



Univerzitet u Nišu
Tehnološki fakultet Leskovac



Svetislav S. Cvetković

**Analiza hemijskih i energetskih
postrojenja u funkciji unapređenja
konceptualne faze projektovanja**

Doktorska disertacija

Leskovac, 2014



University of Niš
Faculty of technology Leskovac



Svetislav S. Cvetković
**Analysis of the chemical and energy
plants in respect of improving the
conceptual process design**

PhD thesis

Leskovac, 2014

Podaci o mentoru i članovima komisije

Mentor:

Prof. dr Predrag Rašković, Tehnološki fakultet Leskovac, Univerzitet u Nišu, Niš, Srbija.

Članovi komisije:

Prof. dr Zvonimir Guzović, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska.

Dr Žarko Stevanović, naučni savetnik, Institut za nuklearne nauke Vinča, Vinča, Srbija.

Dr Stanko Žerajić, docent, Tehnološki fakultet Leskovac, Univerzitet u Nišu, Niš, Srbija.

Dr Sreten Stojanović, vanred. prof., Tehnološki fakultet Leskovac, Univerzitet u Nišu, Niš, Srbija.

Datum odbrane : _____

Podaci o doktorskoj disertaciji

Naziv disertacije:

Analiza hemijskih i energetskih postrojenja u funkciji unapređenja konceptualne faze projektovanja

Rezime:

Tematika ove teze je postupak analize složenih hemijskih i energetskih postrojenja kao obaveznog dela u fazi konceptualnog projektovanja istih. Zadatak analize u fazi konceptualnog projektovanja objašnjen je pregledom osnovnih postulata inženjerskog projektovanja i razradom elemenata bazičnog projektnog ciklusa. Posebna pažnja je posvećena postupku modelovanja i simulacije otvorenih stacionarnih sistema, kao i kompjuterski podržanom postupku projektovanja takvih sistema putem generisanja *flowsheeting* softvera. Kao osnovni alat za evaluaciju projektnih rešenja, sa ciljem povećanja nivoa njihove energetske efikasnosti, koristila se metoda eksergetske analize.

U praktičnom delu rada teorijska razmatranja su ilustrovana putem analize tri složena postrojenja od kojih su dva trenutno operativna, dok je analiza geotermalnog postrojenja iskorišćena u funkciji preliminarnih proračuna za izgradnju budućeg postrojenja. Rezultati dobijeni u tezi ukazuju na značajne mogućnosti poboljšanja energetske efikasnosti u sva tri postrojenja.

Ključne reči : Konceptualno projektovanje, Hemijska i energetska postrojenja, Analiza procesa, Eksergijska analiza, Postrojenje za proizvodnju tripolifosfata, Binarna geotermalna postrojenja, Postrojenje za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije.

Naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast : Hemijsko inženjerstvo

UDK:66.011:

Informations about PhD thesis

Title of PhD thesis

Analysis of the chemical and energy plants in respect of improving the conceptual process design

Abstract:

This thesis deals with analysis method of chemical and energy plants as an integral part of the conceptual plant design. The purpose of the analysis phase in the conceptual process design is explained by summarizing the fundamental postulates of engineering design and by considering the elements of basic design cycle. Particular attention is devoted to the steady-state, open thermodynamic systems, modelling and simulation, as well to the computer-aided process design and flowsheeting software. The method of exergy analysis was used as the basic tool which evaluates the design solutions with respect to the energy efficiency improvement.

In the practical part of the thesis, theoretical framework is illustrated by analysis of three complex plants, two of which are currently operating, while the geothermal plant analysis is used with the aim of performing preliminary accounting for the plant construction in future. Research results obtained in the thesis indicate significant possibilities of energy efficiency improvements in all three plants.

Key words: Conceptual process design, Chemical and energy plants, Process analysis, Exergy analysis, Tripolyphosphate plant, Binary geothermal plant, CHP plant.

Scientific field: Engineering technology

Field of Academic Expertise: Chemical engineering

UDC: 66.011:

Sadržaj

Spisak oznaka.....	I
Spisak grafičkih ilustracija.....	V
Spisak tabela	VIII
1. Uvod.....	1
1.1. Značaj istraživanja prezentovanih u doktorskoj disertaciji.....	1
1.2. Predmet, metodologija i ciljevi rada	4
1.3. Struktura doktorske teze.....	5
2. Projektovanje procesa u složenim hemijskim i energetskim postrojenjima	8
2.1. Procesni sistemski inženjering, osnovni pojmovi i pregled istorijskog razvoja	9
2.2. Faza konceptualnog projektovanja u okviru životnog veka procesa proizvodnje u SHE postrojenjima.....	13
2.3. Projektovanje procesa kao disciplina inženjerskog projektovanja	17
2.4. Bazični projektni ciklus u konceptualnoj fazi.....	20
2.5. Zaključna razmatranja poglavlja 2.....	25
Literatura poglavlja 2	26
3. Analiza procesa u konceptualnoj fazi projektovanja	30
3.1. Modelovanje procesa	31
3.1.1. Klasifikacija modela.....	33
3.1.2. Jednačine matematičkog modela.....	37
3.1.3. Metodologije modelovanja.....	39
3.2. Simulacija procesa	42
3.2.1. Strategije rešavanja simulacionog problema	43
3.2.2. Pregled softverskih paketa korišćenih u procesu flowsheetinga	45
3.3. Proračun analize stepena slobode numeričkih modela u fazi konceptualnog projektovanja postrojenja	46
3.3.1. Stepene slobode materijalnog toka.....	47
3.3.2. Analiza stepena slobode karakterističnih procesnih jedinica	48
3.3.3. Određivanje stepena slobode karakterističnih elemenata u HTE sistemima.....	52
3.3.4. Stepene slobode sistema.....	65
3.4. Zaključna razmatranja poglavlja 3	67
Literatura poglavlja 3	67
4. Energetska evaluacija konceptualnih projektnih rešenja korišćenjem eksergetske analize	69
4.1. Pojam eksergije i anergije	70
4.2. Definicija eksergije	71
4.3. Fundamentalna funkcija eksergije	75
4.4. Teorema o destrukciji eksergije	79
4.5. Osnovni oblici eksergije.....	82

4.5.1. Potencijalna eksergija	84
4.5.2. Kinetička eksergija	84
4.5.3. Fizička eksergija	84
4.5.4. Hemijska eksergija	86
4.5.4.1. Standardna hemijska eksergija supstanci	87
4.5.4.2. Hemijska eksergija gasova	88
4.3.4.3. Hemijska eksergija smeša	89
4.5.4.4. Hemijska eksergija goriva	90
4.6. Eksergijska analiza sistema	93
4.6.1. Indikatori eksergijske analize	94
4.7. Grafički prikazi eksergije	99
4.7.1. Dijagram bilansa eksergije	99
4.7.2. Vektorski dijagram eksergije	99
4.7.3. Dijagram eksergija-sastav	104
4.7.4. Dijagram entalpija-entropija	104
4.7.5. Dijagram Karnoov faktor-entalpija	105
4.8. Zaključna razmatranja poglavlja 4	105
Literatura poglavlja 4	106
5. Energetska i eksergetska analiza sustava za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate u okviru postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata u IHP Prahovo	109
5.1. Karakteristike i opis procesa proizvodnje natrijum tripolifosfata u IHP Prahovo	110
5.2. Fizički model sustava za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate	114
5.3. Matematički model sustava za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate	115
5.4. DOF analiza sustava za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate	122
5.5. Eksergijska analiza sustava za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate	125
5.6. Određivanje specifične toplote kalcinacije	128
5.7. Rezultati energetske analize sustava za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate	130
5.9. Zaključna razmatranja poglavlja 5	140
Literatura poglavlja 5	141
6. Analiza binarnih postrojenja u svrhu korišćenja geotermalne energije na polju Velika Ciglana	142
6.1. Karakteristike i tehnologija korišćenja geotermalne energije	143
6.2. Upotreba koncepta eksergije u analizi geotermalnih postrojenja	147
6.3. Analiza geotermalnog postrojenja na lokaciji Velika Ciglana	150
6.3.1. Fizički modeli binarnih postrojenja u geotermalnom polju Velika Ciglana	150
6.3.2. Matematički modeli binarnih postrojenja u geotermalnom polju Velika Ciglana	152
6.4. DOF analiza binarnih postrojenja u geotermalnom polju Velika Ciglana	157
6.5. Simulacioni softver	160

6.5.1. Energetska i eksergetska analiza binarnih postrojenja	164
6.5.2. Ekonomska analiza	165
6.5.3. Verifikacija and validacija softvera	166
6.5.4. Projektni i parametarski mod simulacije	167
6.6. Projektovanje i analiza bazičnog slučaja postrojenja.....	172
6.6.1. Analiza performanse bazičnog slučaja ORC postrojenja koje operiše sa različitim radnim fluidima.....	178
6.6.2. Parametarska analiza ORC i KLN postrojenja	179
6.7. Zaključna razmatranja poglavlja 6	187
Literatura poglavlja 6	188
7. Analiza energetskog sistema za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije.....	191
7.1. Postrojenja za kombinovanu proizvodnju korisne snage i toplote.....	192
7.2. Opis tehnološkog procesa u energetskom sistemu TE-TO Zrenjanin.....	193
7.2. Fizički i matematički model kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin.....	198
7.4. Simulacioni softver za analizu kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin.....	202
7.5. DOF analiza kotlovskeg seta - sistema za produkciju tehnološke pare	202
7.6. Eksergijska analiza kotlovskeg seta - sistema za proizvodnju tehnološke pare	206
7.6.1. Eksergijske analize kotlovskeg seta i postrojenja	208
7.7. Zaključna razmatranja poglavlja 7	214
Literatura poglavlja 7	214
8. Zaključak.....	215
Prilozi.....	216
Prilog P1. Stehiometrijske jednačine sagorevanja tečnog i gasovitog goriva.....	217
Prilog P2. Rezultati simulacije sistema za konverziju ortofosfata u cilju određivanja specifične toplote kalcinacije.....	221
Prilog P3. Pregled matematičkih modela komponenti i indikatora eksergetske analize u ispitivanim postrojenjima.....	222
Prilog P4. Rezultati simulacija operativnih režima u TE-TO Zrenjanin.....	230
Biografija autora	266
Izjave autora.....	267

Spisak oznaka

a	aktivitet, -	s	specifična entropija, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
A	površina, m^2	S	protočna entropija, W
C	cena, \$	$SExI$	indeks specifične eksergije, -
c_p	specifični toplotni kapacitet, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	SDF	faktor rasipanja Sunčeve svetlosti, -
d	poremećaj, -	t	vreme, s
e	specifična eksergija, $J \cdot kg^{-1}$	T	temperatura, K
E	protočna eksergija, W	$TEDR$	koeficijent ukupne destrukcije, -
ef	eksergetski faktor, -	TPD	ukupna procentna razlika, %
f	fugacitet, -	u	input, (-); unutrašnja energija, $J \cdot kg^{-1}$
g	specifična Gibsova energija, $J \cdot kg^{-1}$	U	protočna unutrašnja energija, W
g_a	ubrzanje Zemljine teže, $m \cdot s^{-2}$	v	brzina, $m \cdot s^{-1}$
G	maseni protok, $kg \cdot s^{-1}$	V	zapremina, m^3
h	specifična entalpija, $J \cdot kg^{-1}$	vl	vrednost promenljive, -
H	protočna entalpija, W	W	rad u jedinici vremena, W
H_D	donja toplotna moć, $J \cdot kg^{-1}$	x	maseni udeo, -
k	koeficijent prenosa toplote, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	X	stepen hemijske konverzije, -
K	koeficijent isparavanja, -	x_{st}	promenljiva stanja, -
l	sadržaj obnovljive energije u ukupnoj energiji komponente, %	y	output, -
m	masa, kg	y_D	koeficijent destrukcije eksergije, -
n	količina materije, mol	y_L	koeficijent gubitaka eksergije, -
N	broj, -	z	visina težišta sistema, m
p	pritisak, Pa	Grčki simboli	
P	snaga, W	α	eksergetski koef. obnovljivosti, -
p_v	parametarska promenljiva, -	β	koeficijent eksergije, -
p_s	parametar sistema, -	γ	koeficijent aktiviteta, -
Q	toplotni fluks, W	δ	koeficijent potrošnje goriva, -
r	sadržaj obnovljive energije rezidentno-komercijalnog sektora, %	Δ	promena, -
R	specifična konstanta gasa, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	ε	eksergetska efikasnost, -
R_{kin}	brzina hemijske reakcije, $kg \cdot s^{-1}$	ζ	kompatibilnost s okolinom, -
		η	energetska efikasnost, -
		θ	Karnoov faktor, -

λ	raspoloživost energije; koeficijent viška vazduha, -	exrc	eksergetska rezidentno-komercijalna stvaranje jedinjenja
μ	hemijski potencijal, $J \cdot mol^{-1}$	f	gorivo
ν	stehiometrijski koeficijent, -	FG	dimni gasovi
ξ	koeficijent manjka produktivnosti; parametar inverzne krive, -	FL	protočna ventilator
χ	relativna ireverzibilnost, -	FN	napojna pumpa
Φ	koeficijent fugaciteta, -	FP	generisana gasna faza
Indeksi		gen	vodonik
0	stanje okoline	gp	razmenjivač toplote
00	stanje atmosfere	H	visokopritisna pumpa
abat	smanjenje emisija	HE	interkonektivni tok
AC	vazdušni kondenzator	HPP	ulaz
air	vazduh	ICS	idealni gas
ar	dodatna relacija	in	nečistoća
base	osnovna	IG	početna
brine	geotermalni fluid	imp	izentropska
c	ciklus	init	KC
C	hemijska komponenta, ugljenik	is	kalcinator
CA	atom ugljenika	is	kinetička
calc	kalcinacija	KC	gubici
CH	hemijska	KN	tečna faza
cn	kondenzacija	L	tečnost
comb	sagorevanje	lp	molarna
cons	proreagovala	LQ	maksimalna
CONST	konstanta	m	minimalna
cool	hlađenje	max	mešač
d	stepen slobode	min	azot
D	destrukcija eksergije	MX	neto
dry	suva materija	N	nereakciona
e	električna energija	net	kiseonik
eq	oprema	nr	ukupna rezidentna
ev	isparavanje	O	operaciona jedinica
		or	
		OU	

out	izlaz	TB	turbina
p	procenat	th	toplotna
P	produkt	tot	ukupno
par	parazitni	v	promenljiva
PH	fizička	vp	parna faza
PHS	faza	w	vlaga
pipe	cevovod	W	rad
plant	postrojenje	wf	radni fluid
prod	proizvod reakcije	wh	zagrevanje vode
PT	potencijalna	wp	vlaga u proizvodu
PU	procesna jedinica	u	ukupan rad
pv	parametarska promenljiva	use	korisna eksergija
Q	toplota		Skraćenice
qt	citirano iz literature	AC	vazdušni kondenzator
r	nezavisna relacija, hemijska reakcija	AE	algebarska jednačina
rc	rezidentno-komercijalni sektor	AH	predgrejač vazduha
rea	reaktant	BFD	blok dijagram toka
ref	referentno stanje	BH	razmenjivački deo kotla
reinj	ponovno ubrizgavanje	BU	kotlovska jedinica
ren	obnovljivi izvor energije	CC	komora za sagorevanje
rev	reverzibilna	CFD	kompjuterska dinamika fluida
RG	realan gas	CHP	kombinovana proizv. toplote i snage
ro	rezidentna ukupna	CN	kondenzator
rr	suvišna relacija	CT	rashladnji toranj
rtw	povratna termalna voda	DOF	stepen slobode
RU	preostale jedinice	DRS	separator minerala i kond. kotao
rv	suvišna promenljiva	DSR	izvor suve pare
s	specifična, izentropska promena stanja	EEC	ekserg./energetska efikasnost i cena
S	materijalni tok, sumpor	EGEC	Evropska Agencija za Geot.E.
sh	grejanje prostora	EGS	poboljšani geotermalni sistem
sp	specifikacija	EO	pristup generalisanih jednačina
STPP	natrijum tripolifosfat	EP	tehnološko oduzimanje pare
sys	sistem	EV	isparivač

EX	ekspander	PFD	dijagram toka procesa
FN	ventilator	PH	predgrejač
FP	napojna pumpa	Pm	pumpa
GN	generator	PSE	procesni sistemski inženjering
HPH	grejač visokog pritiska	PU	procesna jedinica
HPP	visokopritisna pumpa	PW	proizvodna bušotina
hps	para visokog pritiska	R&D	istraživanje i razvoj
HT	zagrejač toplifikacionog sistema	RU	preostale jedinice
HTE	hemijska, termoprocena i energetska	SCL	hladnjak pare sa lab. zaptivača
HTR	visokotemperaturni rekuperator	SCS	hladnjak pare sa zaptivača
IGA	Međunarodna Geotermalna Asocijacija	SHE	složena hemijska i energetska
IHP	industrija hemijskih proizvoda	SP	separator
IW	utisna bušotina	STPP	natrijum tripolifosfat
LPG	tečni naftni gas	SR	reducirna stanica
LPH	grejač niskog pritiska	TB	turbina
LTR	niskotemperaturni rekuperator	TE	termoelektrana
KC	kalcinator	TO	toplana
KLN	Kalina ciklus	TR	prigušni ventil
LKC	ložište kalcinatora	VT	visokotemperaturni
LMTD	srednja log. temperaturna razlika	WSR	izvor vlažne pare
lps	para niskog pritiska		
LR	letnji režim		
M	mešač		
MILP	celobrojno linearno programiranje		
MINLP	celobrojno nelinearno programiranje		
MX	mešačka jedinica		
NLP	nelinearno programiranje		
NT	niskotemperaturni		
NTU	broj prenosnih jedinica		
ODE	obična diferencijalna jednačina		
ORC	organski Rankinov ciklus		
ORPH	ortofosfatni prah		
PDE	parcijalna diferencijalna jednačina		

Spisak grafičkih ilustracija

Slika 2.1. Analiza faza u životni vek proizvodnog ciklusa u hemijskoj industriji	16
Slika 2.2. Ekonomske karakteristike pojedinih faza u procesu izgradnje postrojenja	17
Slika 2.3. Osnovni ciklus projektovanja	21
Slika 3.1. Sistemski okvir procesa modelovanja	31
Slika 3.2. Procesna jedinica sa svojim ulaznim i izlaznim tokovima	49
Slika 3.3. Procesna jedinica za separaciju materijalnih tokova - a) Razdelnik, b) Separator	52
Slika 3.4. Razdelnik sa dva jednokomponentna toka.....	54
Slika 3.5. Adijabatski separator sa dva jednokomponentna toka.....	54
Slika 3.6. Procesna jedinica za mešanje materijalnih tokova – Mešač	55
Slika 3.7. Mešač sa dva ulazna toka s istom komponentom	55
Slika 3.8. Mešač sa dva ulazna toka s različitim komponentom.....	56
Slika 3.9. Mešač sa dva ulazna dvokomponentna toka različitog sastava	56
Slika 3.10. Procesna jedinica za razmenu energije materijalnih tokova – Razmenjivač	57
Slika 3.11. Adijabatski razmenjivač	57
Slika 3.12. Evaporator	59
Slika 3.13. Procesna jedinica za hlađenje/zagrevanje materijalnih tokova – hladnjak/grejač	59
Slika 3.14. Procesna jedinica u vezi sa vršenjem rada – pumpa	60
Slika 3.15. Procesna jedinica u vezi sa vršenjem rada – turbina sa R izlaza.....	60
Slika 3.16. Procesna jedinica u vezi sa vršenjem rada – turbina sa jednim izlazom.....	60
Slika 3.17. Procesna jedinica u kojoj se odvija hemijska reakcija.....	62
Slika 3.18. Procesna jedinica u kojoj se odvija hemijska reakcija sagorevanja.....	63
Slika 3.19. Procesna jedinica – kalcinator	64
Slika 4.1. Otvoreni termodinamički sistem.....	75
Slika 4.2. Klasifikacija eksergije za p-V-T sisteme [23]	85
Slika 4.3. Dekompozicija termomehaničke eksergije [23]	86
Slika 4.4. Tok entalpije i eksergije kroz otvoreni sistem kod koga se dva procesa (1 i 2) odvijaju na konstantnoj temperaturi: H – protok entalpije, E – protok eksergije [40]	100
Slika 4.5. Režimi egzotermnog, endotermnog, prinudnog i spontanog procesa kod dijagrama eksergija-entalpija [40]	100
Slika 4.6. Različiti režimi procesa kod dijagrama eksergije-entalpije: λ - raspoloživost energije; linija ΔS odgovara slučaju $\Delta H = \Delta E$ [40].....	101
Slika 4.7. Vektorski dijagram eksergije za prenos eksergije u toku procesa apsorbovanja eksergije i oslobađanja eksergije: (a) kombinovani proces nije izvodljiv; (b) kombinovani proces je izvodljiv [40]	103
Slika 4.8. Određivanje fizičke eksergije u Molijerovom dijagramu [42].....	105
Slika 5.1. Tehnološka šema proizvodnje natrijum tripolifosfata u IHP Prahovo.....	111
Slika 5.2. Fizički model subsystema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate	115
Slika 5.3. Blok dijagram toka subsystema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate.....	117
Slika 5.4. Vektorski dijagram eksergije za reakciju stvaranja tripolifosfata pri standardnim uslovima	127

Slika 5.5. Vrednosti specifične toplote kalcinacije dobijene simulacionim softverom.....	129
Slika 5.6. Određivanje specifične toplote kaclinacije i eksergetske efikasnosti pri različitim temperaturnim režimima	130
Slika 5.7. Raspodela destrukcija unutar komponenti sustistema za transformaciju u tripolifosfate	130
Slika 5.8. Eksergetska efikasnost komponenti sustistema za transformaciju u tripolifosfate	131
Slika 5.9. Uticaj promene kapaciteta na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost sustistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo lož ulje).....	132
Slika 5.10. Uticaj temperature okoline na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost sustistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo lož ulje).....	133
Slika 5.11. Uticaj promene temperature dimnih gasova na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost sustistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo lož ulje)	134
Slika 5.12. Uticaj promene kapaciteta na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost sustistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo LPG).....	135
Slika 5.13. Uticaj promene temperature okoline na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost sustistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo LPG).....	136
Slika 5.14. Uticaj promene temperature dimnih gasova na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost sustistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo LPG)	137
Slika 6.1. Geotermalna elektrana sa suvom parom.....	144
Slika 6.2. Geotermalna elektrana sa dvostrukim isparavanjem	145
Slika 6.3. Geotermalna elektrana sa binarnim ciklusom.....	145
Slika 6.4. Zone eksergije u Molijerovom h-s dijagramu [4].....	148
Slika 6.5. a)Fizički model binarne geotermalne elektrane Velika Ciglena u ORC ciklusu b) T-s dijagram ORC ciklusa.....	153
Slika 6.6. a) Fizički model binarne geotermalne elektrane Velika Ciglena u Kalina ciklusu b) T-s dijagram Kalina ciklusa.	154
Slika 6.7. Blok dijagrami toka ORC i KLN postrojenja	155
Slika 6.8. Softverski dijagram toka a) struktura simulatora b) algoritam programa za verifikaciju i validaciju	160
Slika 6.9. Bazični slučaj postrojenja koje operiše u ORC ciklusu, termodinamičke osobine i deklarisanje promenljivih.....	162
Slika 6.10. Bazični slučaj postrojenja koje operiše u KLN ciklusu, termodinamičke osobine i deklarisanje promenljivih.....	163
Slika 6.12. Šeme tokova softvera a) algoritam projektnog moda b) algoritam parametarskog moda.....	168
Slika 6.13. Grafički prikazi obrade podataka u parametarskoj analizi postrojenja	171
Slika 6.14. Dijagram toka eksergije ORC postrojenja	173
Slika 6.15. Dijagram toka eksergije KLN postrojenja	174
Slika 6.16. Eksergetska efikasnost bazičnog slučaja ORC postrojenja.....	176
Slika 6.17. Eksergetska efikasnost bazičnog slučaja KLN postrojenja.....	176
Slika 6.18. Raspodela destrukcije eksergije kod bazičnog slučaja ORC postrojenja.....	177
Slika 6.19. Raspodela destrukcije eksergije kod bazičnog slučaja KLN postrojenja.....	177
Slika 6.20. Analiza performanse ORC postrojenja koje operiše sa različitim radnim fluidima	179

Slika 6.21. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: sastav polazne smeše.....	180
Slika 6.22. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: temperatura okoline.....	181
Slika 6.23. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: temperatura okoline.....	181
Slika 6.24. TEDR dijagram ORC postrojenja; parametarska promenljiva: okolna temperatura	182
Slika 6.25. TEDR dijagram KLN postrojenja; parametarska promenljiva: okolna temperatura	182
Slika 6.26. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: min.temp.razlika AC	183
Slika 6.27. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: min.temp.razlika AC	183
Slika 6.28. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja	184
Slika 6.29. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja	184
Slika 6.30. TEDR dijagram ORC postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja	185
Slika 6.31. TEDR dijagram KLN postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja	185
Slika 6.32. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: min.temp.razlika u EV	186
Slika 6.33. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: temperatura pregrevanja.....	186
Slika 7.1. Tehnološka šema postrojenja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije.....	195
Slika 7.2. Fizički model kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin.....	196
Slika 7.3. Funkcionalna šema kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin sa podelom na sastavne podsisteme	199
Slika P4.1. Šema strujnih tokova - Zimski režim 1	230
Slika P4.2. Zimski režim 2	236
Slika P4.3. Zimski režim 3	242
Slika P4.4. Zimski režim 4	248
Slika P4.5. Letnji režim 1	254
Slika P4.6. Letnji režim 2	260

Spisak tabela

Tabela 3.1. Analiza stepena slobode višefaznog toka.....	48
Tabela 3.2. Analiza stepena slobode razdelnika sa R izlaznih tokova	53
Tabela 3.3. Stepeni slobode kod separatora sa R razdelnih tokova	54
Tabela 3.4. Analiza stepena slobode razdelnika sa 2 izlazna jednokomponentna toka	54
Tabela 3.5. Stepeni slobode kod adijabatskog separatora dvokomponentne smeše sa 2 izlazna toka	55
Tabela 3.6. Stepeni slobode kod mešača za R ulaznih tokova	56
Tabela 3.7. Stepeni slobode kod mešača sa 2 ulazna toka sa istom komponentom	56
Tabela 3.8. Stepeni slobode kod mešača sa 2 ulazna toka sa različitim komponentom.....	56
Tabela 3.9. Stepeni slobode kod mešača sa 2 ulazna toka sa dve iste komponente.....	57
Tabela 3.10. Stepeni slobode kod neadijabatskog razmenjivača toplote	58
Tabela 3.11. Stepeni slobode kod adijabatskog razmenjivača toplote.....	58
Tabela 3.12. Stepeni slobode kod evaporatora	59
Tabela 3.13. Stepeni slobode kod hladnjaka/grejača	59
Tabela 3.14. Stepeni slobode kod pumpe	61
Tabela 3.15. Stepeni slobode kod turbine sa R izlaza.....	61
Tabela 3.16. Stepeni slobode kod turbine sa jednim izlazom.....	61
Tabela 3.17. Stepeni slobode kod procesne jedinice u kojoj se odvija hemijska reakcija	63
Tabela 3.18. Stepeni slobode kod komore za sagorevanje	64
Tabela 3.19. Stepeni slobode kalcinatora	65
Tabela 4.1. Pregled dodatnih eksergetskih parametara [36], [37], [38], [39].	97
Tabela 5.1. Kvalitet industrijskog natrijum tripolifosfata.....	110
Tabela 5.2. Uticaj temperature na stabilnost faza natrijum tripolifosfata	112
Tabela 5.3. Doprinosi hemijskih elemenata u izrazu za specifičnu molSKU toplotu fosfatnih jedinjenja.....	121
Tabela 5.4. DOF analiza sistema za produkciju dimnih gasova (LKC _S).....	123
Tabela 5.5. DOF analiza sistema za hlađenje dimnih gasova (LKC _M).....	123
Tabela 5.6. DOF analiza sistema za kalcinaciju - kalcinator (KC)	123
Tabela 5.8. Inputi u simulacioni softver u cilju određivanja specifične toplote kalcinacije	129
Tabela 5.9. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo lož ulje	132
Tabela 5.10. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo lož ulje	132
Tabela 5.11. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo lož ulje	133
Tabela 5.12. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo lož ulje	133
Tabela 5.13. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo lož ulje	134
Tabela 5.14. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo lož ulje	134
Tabela 5.15. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo LPG.....	135
Tabela 5.16. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo LPG.....	135
Tabela 5.17. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo LPG.....	136
Tabela 5.18. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo LPG.....	136
Tabela 5.19. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo LPG.....	137

Tabela 5.20. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo LPG.....	137
Tabela 5.21. Eksergije ulaznih i izlaznih tokova subsystema za hemijsku konverziju ortofosfata u tripolifosfate za prosečne vrednosti kapaciteta postrojenja i temperatura tokova (gorivo LOŽ ULJE %-nog sastava: C=86,H=13,N=0.5,O=0.3,S=0.2; koeficijent viška vazduha 1.32).....	138
Tabela 5.22. Kriterijumi eksergijske analize subsystema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate (gorivo LOŽ ULJE %-nog sastava: C=86,H=13,N=0.5,O=0.3,S=0.2; koeficijent viška vazduha 1.32)	139
Tabela 5.23. Eksergijski bilans subsystema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate (gorivo LPG %-nog sastava: C=82.75,H=17.25; koeficijent viška vazduha 1.184)	139
Tabela 5.24 Kriterijumi eksergijske analize subsystema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate (gorivo LPG %-nog sastava: C=82.75, H=17.25; koeficijent viška vazduha 1.184).....	140
Tabela 6.1. DOF analiza energetskih sistema u ORC i KLN ciklusu	159
Tabela 6.2. Parametri bazičnog slučaja postrojenja korišćeni za energetsku i ekonomsku analizu.....	175
Tabela 6.3. Osobine proučavanih radnih fluida u ORC postrojenju.	178
Tabela 7.1. Pregled strujnih tokova u tehnološkoj šemi postrojenja.....	197
Tabela 7.2. Elementi sistema i podsistema u modelu TE-TO Zrenjanin	200
Tabela 7.3. DOF analiza predgrejača vazduha (AH).....	204
Tabela 7.4. DOF analiza ložišta (CC).....	204
Tabela 7.5. DOF analiza razmenjivačkog dela kotla (BH).....	204
Tabela 7.6. DOF analiza kotlovsog seta	205
Tabela 7.7. Indikatori eksergijske analize kotlovsog seta TE-TO Zrenjanin zimski režim	209
Tabela 7.8. Pregled veličina destrukcije eksergije komponenti, subsystema i sistema postrojenja (gorivo prirodni gas)	210
Tabela 7.9. Pregled koeficijenta ukupne destrukcije komponenti u odnosu na pripadajući set (gorivo prirodni gas)	211
Tabela 7.10. Pregled eksergetske efikasnosti komponenti (gorivo prirodni gas)	212
Tabela 7.11. Prosta eksergetska efikasnost subsystema i sistema	213
Tabela 7.12. Pregled koeficijenta ukupne destrukcije subsystema (gorivo prirodni gas).....	213
Tabela P1.1. Stehiometrijske jednačine sagorevanja tečnog goriva	217
Tabela P2.2. Stehiometrijske jednačine sagorevanja gasovitog goriva	219
Tabela P2.1. Parametri vazduha i vlažnih produkata sagorevanja.....	221
Tabela P2.2. Parametri tripolifosfata i ortofosfata.....	221
Tabela P2.3. Parametri toplote kalcinacije	221
Tabela P3.1. Pregled masenih, energetskih i eksergijskih bilansa komponenti	222
Tabela P3.2. Pregled eksergetskih efikasnosti komponenti po pristupu gorivo-produkt	226
Tabela P4.1. Opis strujnih tokova- Zimski režim 1	231
Tabela P4.2. Pregled parametara strujnih tokova –Zimski režim 1 (gorivo: prirodni gas).....	232
Tabela P4.3. Pregled parametara strujnih tokova –Zimski režim 1 (gorivo: mazut)	234
Tabela P4.4. Opis strujnih tokova postrojenja - zimski režim 2	237
Tabela P4.5. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 2 (gorivo: prirodni gas).....	238
Tabela P4.6. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 2 (gorivo:mazut)	240

Tabela P4.7. Opis strujnih tokova postrojenja - zimski režim 3	243
Tabela P4.8. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 3 (gorivo:prirodni gas).....	244
Tabela P4.9. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 3 (gorivo:mazut)	246
Tabela P4.10. Opis strujnih tokova postrojenja - zimski režim 4	249
Tabela P4.11. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 4 (gorivo:prirodni gas).....	250
Tabela P4.12. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 4 (gorivo:mazut)	252
Tabela P4.13. Opis strujnih tokova postrojenja - letnji režim 1.....	255
Tabela P4.14. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 1 (gorivo:prirodni gas)	256
Tabela P4.15. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 1 (gorivo:mazut)	258
Tabela P4.16. Opis strujnih tokova postrojenja - letnji režim 2.....	261
Tabela P4.17. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 2 (gorivo:prirodni gas)	262
Tabela P4.18. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 2 (gorivo:mazut)	264

1. Uvod

1.1. Značaj istraživanja prezentovanih u doktorskoj disertaciji

Strateško opredeljenje Republike Srbije u pravcu racionalnog korišćenja energije i povećane upotrebe energije iz obnovljivih izvora, čini važan deo paketa mera koje su neophodne za smanjenje emisija gasa sa efektom staklene bašte i za poštovanje Kjoto protokola Okvirne konvencije Ujedinjenih Nacija o promeni klime. U skladu sa ovim opredeljenjem u strateškim dokumentima Republike Srbije definisani su i dodatni ciljevi u vidu kontinuiranog promovisanja sigurnosti snabdevanja energijom, ekstenzivnog tehnološkog razvoja i inovacija, te proširenja mogućnosti za zaposlenje i regionalni razvoj, naročito u ruralnim i izolovanim područjima.

Proizvodnja energije iz obnovljivih i neobnovljivih izvora energije, kao i njena upotreba u industrijskim postrojenjima usko je povezana sa razvojem postrojenja povećane energetske efikasnosti. Energetska efikasnost je jedan od najefikasnijih i najisplativijih načina za postizanje održivog razvoja i dostizanje standarda iz oblasti energetske efikasnosti je takođe u direktnoj vezi sa procesom približavanja Republike Srbije Evropskoj uniji. Na globalnom nivou povećanje energetske efikasnosti ostaje i dalje najveći resurs održivog razvoja, obzirom da je ona uzrok 40 %-tnog smanjenja potrošnje primarne energije u periodu od 1980. do 2006.

Sve države Zapadnog Balkana, a među njima i Srbija, danas su suočene sa ozbiljnim problemom relativno niske stope energetske efikasnosti, kombinovane sa visokom intenzivnošću emitovanja štetnih gasova u okolinu. Na osnovu poređenja istih parametara u razvijenim zemljama i Republici Srbiji, može se zaključiti da naša zemlja prilično zaostaje u pogledu energetske efikasnosti za razvijenim svetom. U poslednjem periodu (2010. do 2012.) nije došlo do značajnijih promena stepena energetske efikasnosti, pa je ona i dalje među najnižim u Evropi. Ovakva niska energetska efikasnost u svim sektorima potrošnje energije uzrokovana različitim faktorima nepovoljno utiče na konkurentnost izvoza i porast uvoza i narušava spoljnotrgovinsku ravnotežu Republike Srbije.

Saglasno Strategiji održivog razvoja i Zakonu o energetici Republike Srbije, jedan od osnovnih prioriteta razvoja jeste racionalna upotreba kvalitetnih energenata i povećanje energetske efikasnosti u proizvodnji, distribuciji i korišćenju energije kod krajnjih korisnika energetske usluga. Ovaj prioritet je značajan pre svega zbog usklađivanja proizvodnje energije sa realnim potrebama sektora potrošnje energije, ali i sa aspekta smanjenja uticaja sektora energetike na životnu sredinu, povoljnog uticaja na efikasnost privrede, standard građana i smanjenje uvozne zavisnosti.

Danas je efikasna upotreba ograničenih izvora energije pomoću tehnologija kojima se obezbeđuje realizacija principa održivog razvoja moguća jedino uvođenjem inovacija u istraživanju, razvoju i projektovanju novih i unapređenjem postojećih postrojenja. Verovatno najznačajniji pomak u tom pravcu moguće je realizovati putem uvođenja savremenih metoda projektovanja složenih hemijskih i energetskih postrojenja (u daljem tekstu SHE postrojenja), baziranih na principima sistemskog inženjeringa uz poštovanje tehničkih, ekonomskih, ekoloških i društvenih standarda. Pri tome sistemsko inženjerstvo predstavlja okvir u kome se SHE postrojenja posmatraju kao celina koja se definiše, specificira i analizira putem interdisciplinarnog pristupa.

U globalnoj mapi naučnih oblasti problem projektovanja SHE postrojenja svrstava se u naučnu oblast Procesnog sistemskog inženjeringa (*Process system engineering*) ili još bliže oblasti Kompjuterski podržanog projektovanja procesnih postrojenja (*Computer aided process plant design*), obzirom da se mnoge faze projektovanja realizuju uz pomoć kompleksnih kompjuterskih alata.

U sledu projektnih koraka postupaka u SHE postrojenjima, faza konceptualnog projektovanja označava onaj deo projektnog zadatka kojim se definiše struktura, sastav i ponašanje procesa, pa samim tim i okvirni proračun investicionih troškova izgradnje novog, odnosno unapređenja postojećeg postrojenja. Rešenja dobijena u ovoj fazi omogućavaju značajne investicione i operativne uštede na nivou postrojenja uz nisku cenu izrade ove faze u odnosu na ukupne troškove projektovanja.

U PSE inženjerstvu zadatak konceptualnog projektovanja SHE postrojenja, koji po pravilu uključuje i kompjuterski podržan inženjering, javlja se u vidu tipa problema analize ili problema sinteze. Kod problema analize projektni zadatak uključuje poznavanje topologije ispitivanog sistema, njegovih sastavnih komponenti (procesnih jedinica), kao i najznačajnijih operativnih parametara. Ako je sistem opisan samo putem performansi (tačno definisani

ulazno-izlazni tokovi) projektni zadatak poprima oblik složenijeg tipa problema, odnosno problema sinteze. U tom slučaju određivanje strukture i parametara komponenti sistema realizuje se putem sukcesivnih postupaka analize alternativnih projektnih modela ili postavljenjem složenog numeričkog algoritma za pretragu i optimizaciju alternativnih modela. U oba slučaja postupak projektovanja je praćen evaluacijom predloženih rešenja kojima se definiše mera uspešnosti u postizanju projektnih ciljeva (ekonomski, energetski i ekološki indikatori).

Problem analize predstavlja daleko najzastupljeniji zadatak u praktičnim problemima konceptualnog projekta SHE postrojenja. Generalno, dok zadatak sinteze predstavlja kombinovanje sastavnih elemenata sistema u jednu koherentnu celinu, dotle analiza predstavlja dekompoziciju takvog sistema u cilju ispitivanja njegovih performansi. Postupkom analize, kroz izučavanje prethodno predloženog preliminarnog sastava i topologije sistema, definišu se detaljni termodinamički, ekonomski i ekološki parametri kako komponenti sistema, tako i njihovih međusobnih veza koje omogućuju funkcionisanje sistema kao celine. Drugim rečima, u ovoj fazi projektovanja za poznate parametre inputa analizom se određuju parametri outputa. Tehnike analize uključuju kreiranje matematičkih modela sastavnih delova sistema i interkonekcija, njihovo prevođenje u oblik pogodan za realizaciju simulacione procedure i korišćenje simulacionog softvera kojim se ispituju performanse sistema i evaluacija dobijenih rešenja kojom se može utvrditi pravac unapređenja postojećeg sistema.

U okviru disertacije osnovni indikatori analize energetskih karakteristika sistema dobijeni su konceptom eksergije, tj. putem eksergetske analize procesa. Ovaj termodinamički koncept zasnovan na Drugom principu termodinamike, predstavlja jedan od najkorišćenijih alata za analizu u fazi konceptualnog projektovanja, kako u oblasti hemijskog inženjerstva, tako i u oblasti energetike. Korišćenjem eksergetske analize proces projektovanja je moguće približiti konceptu održivog razvoja, tj. uspostaviti vezu između ekonomskih, termodinamičkih i ekoloških ciljeva projekta.

Na taj način prikazani su osnovni motivi i smernice za definisanje teme doktorske disertacije. Povećanje energetske efikasnosti SHE postrojenja predstavlja savremen i univerzalan problem, kako u svetu tako i kod nas, te izaziva permanentan interes privrednih subjekata za istraživanja u ovoj oblasti.

1.2. Predmet, metodologija i ciljevi rada

Analiza projekta SHE postrojenja predstavlja obavezan deo konceptualnog projekta. U okviru analize posebna pažnja je posvećena otvorenim stacionarnim termodinamičkim sistemima, obzirom da je ovaj vid problema najčešći u praktičnom režimu rada ispitivanih referentnih postrojenja. Teorijski deo rada posvećen je osnovnim tehnikama za postupak analize SHE postrojenja i to: modelovanju komponenti sistema i interkonektivnih veza među njima, analizi stepena slobode matematičkih modela, simulacionoj proceduri i upotrebi savremenih računarskih alata u okviru nje, kao i evaluativnim metodama za unapređenje konceptualne faze projektovanja (eksergetska i ekonomska analiza).

U praktičnom delu rada teorijska razmatranja poslužiće za praktičnu realizaciju analize tri SHE postrojenja:

- Subistema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate u okviru postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata u IHP Prahovo,
- Binarnog geotermalnog postrojenja na bazi ORC i Kalina ciklusa, definisanih za parametre geotermalne vode na lokaciji Velika Ciglena u Republici Hrvatskoj.
- Postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije TE-TO Zrenjanin u Zrenjaninu.

U sva tri slučaja matematički model referentnog postrojenja formiran je putem materijalnog, energetskog i eksergetskog bilansa sistema, subistema i komponenti, uz poštovanje konstitutivnih relacija.

Postupkom analize stepena slobode matematički modeli se korišćenjem sekvencijalno-modularne i simultane strategije prevode u simulacione softvere u cilju ispitivanja uticaja parametara sistema i specifikacije opreme za termodinamičke i ekonomske karakteristike ispitivanih postrojenja.

- Polazna osnova za realizaciju analize u sva tri referentna objekta predstavljala je dostupna tehnička dokumentacija u postojećim postrojenjima, kao i već realizovana primarna analiza za postrojenja u izgradnji. Programske platforme na kojima se vršila aplikacija simulacionih softvera su Microsoft Excel-ov spreadsheet sa eksternom bazom termodinamičkih osobina radnih fluida (Refprop 8.0) i programski solver EES (Engineering Equation Solver) sa ugrađenim termodinamičkim funkcijama hemijskih komponenti i smeši. Validacija simulacionih modela je u slučaju prva dva referentna objekta vršena u odnosu na podatke dostupne iz baze operativnih parametara rada realnih postrojenja, dok se u slučaju geoter-

malnog postrojenja Velika Ciglena, ona bazira na prethodno izvršenim analizama. U slučaju postrojenja TE-TO Zrenjanin strategija rešavanja zasnovana je na sekvencijalno-modularnoj strategiji (softver preuzet i redefinisan uz dozvolu autora referenca poglavlje 7 [9]), dok će se kod dva preostala postrojenja koristiti strategija simultanog rešavanja, odnosno pristup generalisanih jednačina. Subsystem kotlovskeg dela u postrojenju TE-TO Zrenjanin takođe je simuliran korišćenjem u objektu strategija simultanog rešavanja.

Činjenice da su istraživanja u oblasti projektovanja hemijskih, termoprocenih i energetskih postrojenja (u daljem tekstu: HTE postrojenja) savremena i u domaćoj literaturi nedovoljno obrađena, stvorila je potrebu da se u uvodnom delu rada prikaže presek dosadašnjih teorijskih i praktičnih dostignuća pre svega u svetskim razmerama. Cilj rada je pri tome bio da se identifikuju i objasne postupci kompjuterski podržanog konceptualnog projektovanja sa generalizacijom modela i procedura koje bi mogle biti primenjene u procesu projektovanja šireg dijapazona industrijskih i energetskih postrojenja.

Na bazi tih istraživanja formirani su simulacioni softveri sa elementima materijalnog i energetskog bilansiranja za analizu tri referentna HTE objekta. Rezultati eksergetske i ekonomske analize u sva tri slučaja poslužiće za unapređenje energetskih, ekonomskih i ekoloških parametara ispitivanih postrojenja.

1.3. Struktura doktorske teze

Doktorska teza je sastavljena iz 8 (osam poglavlja), od kojih prvo poglavlje predstavlja uvod u tezu, dok se u poslednjem poglavlju daju zaključni komentari o izvedenim istraživanjima. Pre uvodnog dela u tezi su definisani simboli i skraćenice korišćeni u pisanom materijalu, te spisak svih postojećih grafičkih i tabelarnih ilustracija. Svako od poglavlja (osim uvoda i zaključka) započinje kratkim apstraktom poglavlja i završava se zaključnim razmatranjima materijala prezentovanog u poglavlju, te spiskom literarnih citata u njemu.

Poglavljia 2, 3 i 4 su poglavljia posvećena teorijskim razmatranjima od bitnog značaja za izradu teze.

U poglavlju 2 (dva) definisan je zadatak projektovanja procesa (process design) u složenim hemijskim i energetskim postrojenjima kao kreativna aktivnost koja pripada naučnoj oblasti Procesnog sistemskog inženjeringa (Process System Engineering) – PSE. Dat je istorijski pregled razvoja naučne oblasti PSE-a, te pregled najvažnijih zadataka i naučnih izazova koji egzistiraju u ovoj oblasti. Poglavlje razmatra položaj i značaj faze konceptualnog pro-

jektovanja u okviru životnog ciklusa procesa proizvodnje u hemijskoj industriji. Definisani su zadaci sinteze, analize, evaluacije i optimizacije kao osnovne faze konceptualnog projektovanja.

U poglavlju 3 (tri) osnovna pažnja je posvećena analizi procesa, u svrhu određivanja konzistentnosti materijalnih i energetske bilansa, preliminarnih proračuna dimenzija i cene procesnih jedinica, proračuna indikatora proizvodnje i predikcije ponašanja sistema u slučaju promene parametara u definisanoj tehnološkoj šemi. Analiza procesa definisana je kroz dva hijerarhijska koraka: modelovanja i simulacije sistema uz upotrebu simulacionih softverskih paketa. U finalnom delu ovog poglavlja detaljno je objašnjen postupak analize stepena slobode kao značajne faze u analizi procesa, obzirom da je ova tematika po mišljenju autora manje zastupljena u domaćoj literaturi.

Poglavlje 4 (četiri) razmatra osnovne postavke eksergetske analize, oblik termodinamičke analize neophodne za energetske evaluacije rešenja dobijenih simulacijom rada postrojenja. Objasnjene su osnovne pojmove, definisana funkcija eksergije i objašnjenja osnovna teorema o destrukciji eksergije. Posebna pažnja usmerena je na aplikativnu primenu eksergijske analize u stacionarnim energetskim sistemima koji se često javljaju u postupku projektovanja složenih hemijskih i energetskih postrojenja.

U poglavlju 5 (pet) izvršena je analiza dela postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata u okviru kompleksa IHP Prahovo, označenog kao subsistem odgovoran za hemijsku transformaciju ortofosfata u tripolifosfate. U okviru poglavlja vršeno je ispitivanje energetskih karakteristika u odnosu na upotrebu dve vrste goriva i u tu svrhu obavljena energetska i eksergetska analiza pomenutog dela postrojenja. Pregled referentnog matematičkog modela pruža uvid u pretpostavke modela, način dekompozicije posmatranog sistema u cilju efikasnije analize i na kraju, osnovne bilansne i konstitutivne jednačine modela. Kao uslov za simulaciju putem strategije generalisanih jednačina izvršena je DOF analiza relevantnog sistema koja istovremeno uključuje simulacione specifikacije u vidu jednačina ograničenja. Simulacija je izvršena u EES softveru sa ugrađenim termodinamičkim bazama koje su iskorišćene za proračun termodinamičkih parametara gasova i tečnosti, dok su se za čvrste organske supstance koristile opštepoznate konstitutivne relacije. Eksergijska analiza je primenjena u istraživanju praćenjem promene eksergetskih kriterijuma za identične promene energetskih parametara u simulacionom zadatku. Na osnovu prikazanih tabelarnih i grafičkih rezultata izvedena su odgovarajuća zaključna zapažanja.

U poglavlju 6 (šest) metodologija konceptualnog projektovanja korišćena je za energijsku, eksergetsku i ekonomsku analizu performanse binarnih postrojenja, od kojih jedno radi u Organskom Rankinovom Ciklusu (ORC), a drugo u Kalina (KLN) ciklusu, u geotermalnom polju Velika Ciglena. Prikazani su referentni fizički i matematički modeli binarnih postrojenja, te izvršena DOF analiza u cilju formiranja numeričkog modela za simulaciju zasnovanu na strategiji simulacionog rešavanja jednačina modela. Verifikacija i validacija modela izvršena je na osnovu rezultata iz prethodno urađene studije od strane Guzovića i dr. Korišćenjem simulacionog paketa te izračunavanjem energetske i ekonomske indikatore zaključeno je da binarno postrojenje bazirano na ORC tehnologiji predstavlja bolju projektnu alternativu obzirom na karakteristike ispitivanog geotermalnog polja u Velikoj Cigleni.

Poglavlje 7 (sedam) posvećeno je analizi rada šest različitih režima rada referentnog kogenerativnog postrojenja (TE-TO Zrenjanin u Zrenjaninu, Srbija). Za analizu je korišćen simulacioni softver sekvencijalnog tipa urađen na programskim platformama EES-a i Microsoft Excel-a. U cilju evaluacije različitih operativnih režima korišćeni su različiti indikatori eksergetske analize. Indikatori su ukazali na osnovne generatore destrukcije eksergije u sistemu (kotlovski set) i na režim sa maksimalnom eksergetskom efikasnošću (Zimski režim 3).

2. Projektovanje procesa u složenim hemijskim i energetskim postrojenjima

Projektovanje procesa (*process design*) u složenim hemijskim i energetskim postrojenjima je kreativna aktivnost koja pripada naučnoj oblasti Procesnog sistemskog inženjeringa (*Process System Engineering*) – PSE. U ovom poglavlju dat je istorijski pregled razvoja naučne oblasti PSE-a, te pregled najvažnijih zadataka i naučnih izazova koji egzistiraju u ovoj oblasti. Predstavljeni su elementi životnog ciklusa procesa proizvodnje i definisana konceptualna faza projektovanja, kao ključna faza efikasnog i održivog postupka izgradnje i funkcionisanja postrojenja u hemijskoj industriji. Metodologija konceptualnog projektovanja objašnjena je putem pregleda postulata inženjerskog projektovanja, te korišćenjem bazičnog ciklusa projektovanja koji uključuje zadatke sinteze, analize, evaluacije i optimizacije procesa. Posebna pažnja posvećena je fazi analize procesa, kao ciljnoj oblasti istraživanja u okviru ove teze.

2.1. Procesni sistemski inženjering, osnovni pojmovi i pregled istorijskog razvoja

Termin PSE [1] je relativno novijeg datuma¹, ali inženjering procesnih i energetske sistema predstavlja oblast istraživanja koja se poklapa sa početkom razvoja hemijske industrije. Osnovni istraživački alati u PSE-u bazirani su na postulatima sistemskog inženjeringa² obzirom da se ispitivani sistemi³ posmatraju kao celina i da je jedan od osnovnih zadataka PSE-a utvrđivanje načina na koji komponente sistema (procesne jedinice ili delovi sistema) putem međusobnih interakcija utiču na njegovo funkcionisanje. U spoju sa paralelnim razvojem kompjuterske i informacione tehnologije, numeričkih i optimizacionih matematičkih metoda, dinamičkih sistema i teorije upravljanja ove aktivnosti predstavljaju okvir savremene PSE metodologije. Zbog toga i istorijski razvoj PSE-a treba posmatrati kao proces vođen razvojem potreba u procesnoj i energetske industriji, dostignućima u hemijskom inženjerstvu i razvojem različitih akademskih disciplina kao što su primenjena matematika, operaciona istraživanja, teorija upravljanja, analize rizika i menadžmenta. Metode projektovanja procesa se u PSE-u primenjuju generalno i u procesnoj industriji i u energetici, sa naznakom da su opšti koncepti i istraživačke metode uglavnom razvijeni u okviru petrohemijske i hemijske industrije.

Prva istraživanja povezana sa ovom naučnom oblašću vezuju se za period između 1860-ih i 1920-ih godina. Ernest Solvej ([Ernest Solvay](#)) se može smatrati verovatno prvim procesno-sistemskim inženjerom, obzirom da je njegov kontinuirani proces proizvodnje sode prvi moderan proces u kome se sa sistemskog stanovišta razmatraju aspekti proizvodnje, ekonomija i uticaj procesa na životnu sredinu. U periodu od prvih šezdeset godina oblast PSE-a se poisto-

¹ Termin PSE se prvi put javlja u specijalnom izdanju AIChE simpozijuma 1961. godine, mada on postaje široko prihvaćen tek na međunarodnom simpozijumu u Kjotu, Japan 1982. godine.

² Po definiciji iz [McGraw-Hill Dictionary of Engineering](#), 1997, sistem inženjering predstavlja "projektovanje kompleksnih međupovezanih sistema u cilju maksimizacije unapred definisane mere performanse sistema, uzimajući u obzir sve elemente koji su na bilo koji način povezani sa sistemom" (slobodan prevod). Postulati sistemskog inženjeringa u naučnim i inženjerskim aktivnostima vezanim za hemijski orijentisane procese se označavaju kao Procesni sistemski inženjering.

³ Osnovna metodologija PSE-a razvijena je u oblasti hemijske industrije gde se pod sistemima podrazumevaju hemijska postrojenja sastavljena od procesnih jedinica. Tako razvijena metodologija je zatim iskorišćena i u izučavanju industrijskih postrojenja koncentrisanih u petrohemijskim, polimernim, farmaceutskim, prehrambenim, biohemijskim, pa i energetske kompleksima.

većuje sa pojmom industrijska hemija, dok se fokus istraživanja⁴ usmerava na opis i specifikaciju mehaničkih karakteristika opreme za dobijanje određenih hemijskih proizvoda.

Kasnih 1920-ih, izučavanje tehnoloških procesa u hemijskim postrojenjima uveliko dobija karakter sistemskog inženjeringa sa naglaskom na proučavanje tehnoloških operacija⁵ (*Unit Operations*) [2] u individualnim procesnim jedinicama. Iako je koncept tehnoloških operacija u polje hemijskog inženjerstva prvi uveo Džordž Dejvis (*George Davis*) 1888. godine, on je definitivno usvojen na predlog Artura D. Litla (*Arthur D. Little*) 1915. godine. Naredni četrdesetogodišnji vremenski period, označava se kao *period pauze* u razvoju PSE-a, obzirom na manjak novih ideja u odnosu na trend istraživanja baziran na konceptu tehnoloških operacija. Sa druge strane, paralelno i izvan domena discipline hemijskog inženjerstva, dolazi do snažnog razvoja računarskih mašina i metoda matematičkog programiranja koje će u vreme prelomnog perioda imati veliki uticaj na definitivno ustanovljene oblasti PSE-a kao zasebne naučne celine u okviru hemijskog inženjerstva.

Prelomni period u razvoju PSE-a, sredinom 1960-ih, praćen je i naglim razvojem hemijske industrije na svetskom nivou, velikim skokom cena energetske i petrohemijske sirovine i intenzivnim razvojem kompjuterskih i informacionih tehnologija. Uvođenjem sistemski orijentisanih tehnologija fokus istraživanja počinje da se lagano pomera sa nivoa individualnih procesnih jedinica na nivo sistema. Sistemska metodologija uslovljava promenu filozofije projektovanja i analize kompleksnih postrojenja koja bi se u najkraćem mogla opisati putem krilatice: "Prvo pogledaj celu sliku, a zatim kreni na detalje⁶." Razvoj nove naučne oblasti počinje pojavom knjige "Strategija Procesnog Inženjeringa" (*Strategy of Process Engineering*) autora Ruda i Votsona (*Rudd and Watson*), 1968. godine [3], koja predstavlja prvu značajniju

⁴ Najpoznatiji istraživači iz tog perioda su: Rudolf Knic (*Rudolf Knietz*), Herbert Dav (*Herbert Dow*), Čarls Hol (*Charles Hall*), Karl Boš (*Carl Bosch*), Vilijam Barton (*William Burton*) i Si Pi Dabs (*C.P. Dubbs*).

⁵ Tehnološke operacije u predstavljaju pojedine radne faze tehnološkog postupka koje po svojoj prirodi ili u smislu organizacije proizvodnje predstavljaju relativno nezavisne, zaokružene celine. Tehnološke operacije su osnovne gradivne jedinice čijim se različitim kombinovanjem mogu ostvariti različiti tehnološki postupci. Stoga se one u procesnom inženjerstvu proučavaju nezavisno od materijala koji se u njima obrađuje. Njihova fundamentalna osobina – elementarnost, sadržana je u engleskom izrazu: *unit operations* (pojedinačne operacije), pa se pojedinačna oprema (aparati i mašine) koje obavljaju osnovne tehnološke operacije (mehaničke, hidromehaničke, toplotne, difuzione, hemijske, biohemijske, pomoćne) često nazivaju procesne jedinice. Suština ovog koncepta leži u činjenici da se svaki složeni sistem može predstaviti serijom tehnoloških operacija.

⁶ See "the big picture first, and the details later."

publikaciju PSE-a. Taj trend se nastavlja objavljivanjem časopisa "[Computers and Chemical Engineering](#)" 1977. godine i održavanjem FOCAPD ([The Foundations of Computer-Aided Process Design](#)⁷) konferencije, 1980. godine u Henniker-u (USA), događaja čija je tematika u potpunosti bila posvećena tematskom području PSE-a. Konferenciju je organizovala CACHE ([Computer Aids for Chemical Engineering](#)⁸) korporacija, formirana od strane akademskih institucija 1970-te godine, pod motivom uvođenja simulacionih alata u nastavnom planu hemijskog inženjerstva. Od 1992. Evropa je domaćin godišnjeg sastanka ESCAPE ([European Symposium of Computer Aided Process Engineering](#)⁹) koja se trenutno smatra najznačajnijom specijalizovanom konferencijom u oblasti procesnog sistemskog inženjerstva.

Od 1980-ih godina PSE se u inženjerskim krugovima tradicionalno povezuje sa razumevanjem i razvojem sistemskih procedura za: projektovanje (*design*), upravljanje (*control*), pravilno funkcionisanje (*operation*) i optimizaciju (*optimization*) širokog spektra procesnih (hemijskih, biohemijskih, farmaceutskih, ekoloških) i energetskih (proizvodnih, distributivnih i potrošačkih) postrojenja. Ciljeve PSE-a [4] prvi definiše Takamacu (*Takamatsu*) [5] u sledećem obliku (slobodan prevod):

"PSE je akademsko i tehnološko polje istraživanja posvećeno metodama za proces odlučivanja u hemijskom inženjerstvu. Metodama PSE-a vrši se planiranje i projektovanje procesa i proizvoda, te upravljanje i funkcionalna kontrola nad tehnološkim operacijama, postrojenjima i kompanijama u hemijskoj industriji."

Prethodnu definiciju Takamacu je koristeći skale fundamentalnih fenomena, industrijske upotrebe i prostorne komponente, iskoristio proširivši oblast istraživanja PSE-a i na područja koja su tradicionalno svrstavana u druge naučne grane. Ovu tendenciju, početkom 21. veka, Grosman i Vesterberg (*Grossmann and Westerberg*) [6] ilustruju konceptom lanca produkcije hemijskih proizvoda (*chemical supply chain*), tj. setom metoda i alata kojim je podržan proces otkrivanja, projektovanja, proizvodnje i distribucije hemijskih proizvoda. Lanac produkcije autori definišu kao životni vek procesa proizvodnje u hemijskoj industriji i sve faktore koju utiču na nastanak proizvoda u njoj. Lanac započinje sintetizovanjem hemijskih komponenti na molekularnom nivou koji se u sledećem koraku sjedinjavaju u klastere, čestice i filmove kao jednofazne i višefazne sisteme koji formiraju makrosopske miksture. Pomeranjem

⁷ Dostignuća kompjuterski podržanog projektovanja procesa

⁸ Kompjuterska podrška za hemijsko inženjerstvo

⁹ Evropski simpozijum o kompjuterski podržanom procesnom inženjeringu

iz polja hemije u polje inženjerstva lanac se nastavlja projektovanjem i analizom procesnih jedinica koje u sledećem koraku formiraju postrojenje za realizaciju više tehnoloških procesa. Lanac se završava na nivou kompanije uz razmatranje logističkih, distributivnih i marketinških parametara celokupnog procesa proizvodnje.

Kreiranjem lanca produkcije Grosman, Vesterberg i Takamacu proširuju ranije definisanu užu oblast PSE-a (prikazana poljima srednjeg nivoa i povezanih sa projektovanjem procesnih jedinice i postrojenja) u dva pravca [7]. U jednom pravcu oblast istraživanja se kreće ka molekularnom nivou u cilju otkrivanja i dizajniranja novih molekularnih struktura, odnosno u polje projektovanja proizvoda (*product design*) [8], [9]. U drugom pravcu PSE se kreće ka nivou kompanije u cilju koordinacije i planiranja procesa proizvodnje u celokupnom proizvodnom lancu putem optimizacije lanca snabedevanja (*supply chain optimization*) [10], [11]. Po ovim autorima ciljevi PSE-a sada pokrivaju sve vremenske i dužinske skale celokupnog životnog veka procesa proizvodnje od nivoa istraživanja i razvoja, manufakture u procesnim postrojenjima do nivoa logistike i distribucije u kompaniji.

Trend globalizacije, kao i strožiji ekološki uslovi proizvodnje, doneli su niz promena u metodama i alatima PSE-a [12]. Iako je kapitalno intenzivni karakter postrojenja jedan od osnovnih brana promenama u procesnoj industriji, u dugom vremenskom periodu te promene su neizbežne. Po Keleru i Brajanu (*Keller and Bryan*) [13] glavni pravci razvoja PSE-a mogu se klasifikovati kroz set zadataka:

1. **Redukcija troškova na sirovinskoj strani.** Visoka cena sirovina je faktor koji ima veliki uticaj na cenu i efikasnost procesa proizvodnje u hemijskoj industriji (u ovom slučaju hemija ima ključnu ulogu). Izborom atraktivnijih i efikasnijih hemijskih agenasa, te unapređenjem i selekcijom samo nužnih reakcija moguće je eliminisati potrebu za recikliranjem materijala i energije i tako značajno doprineti smanjenju troškova koje stvaraju postupci recirkulacije proizvoda.
2. **Redukcija investicionih ulaganja putem intenzifikacije procesa.** Intenzifikacija procesa (*Process Intensification*) odnosi se na razvoj tehnike i nove opreme koja može dovesti do značajnog povećanja produktivnosti, energetske efikasnosti i ekološke podobnosti procesa proizvodnje. Pojam intenzifikacija [14] procesa podrazumeva:
 - Razvoj opreme u kojima se intenziviraju pojedini tehnološki procesi, kao što su unapređeni reaktori, intenzivni mikseri, te uređaji za efikasan prenos mase i toplote.

- Razvoj metoda za intenzifikaciju procesa i to putem integracije procesa reakcije i separacije u multifunkcionalnim reaktorima (reaktivna destilacija, membranski reaktori, gorivne ćelije), putem hibridne separacije (membranska destilacija), izborom alternativnih izvora energije i novih operacionih modula (periodične operacije).

Intenzifikacija procesa omogućava značajno smanjenje veličine i cene procesne opreme, te smanjene ekološkog rizika usled manjeg inventara u procesu proizvodnje. Ipak, treba naglasiti da će neke od klasičnih tehnoloških operacija kao što su destilacija, apsorpcija ili ekstrakcija još dugo vremena opstati u procesu proizvodnje, pa se sa te tačke gledišta redukcija procesnih jedinica putem efikasnijeg projektovanja može posmatrati kao efikasnija metoda za smanjenje investicionih troškova.

- **Redukcija potrošnje energije.** Implementacija termodinamičkih metoda integracije procesa: pinch metode [15], [16], [17] i eksergijske analize integracije kompleksa individualnih procesa i postrojenja predstavlja najperspektivnije postupke kojima je moguće značajno smanjiti potrošnju energije u okviru proizvodnje procesnih postrojenja.
- **Povećanje fleksibilnosti procesa i redukcija dodatne opreme.** Razvoj kompjuterski integrisanih proizvodnih sistema (*Computer Integrated Manufacturing systems*) omogućiće integraciju proizvodnih i biznis aktivnosti u procesnim postrojenjima. Povećanje fleksibilnosti procesa treba sagledati ne samo kroz mogućnost promene kapaciteta proizvodnje, već i kroz mogućnost korišćenja sirovina različitog sastava kvaliteta. Redukcija dodatne opreme odnosi se pre svega na eliminaciju skupih skladišnih uređaja neophodnih za međukorake u procesu proizvodnje (fleksibilnost je u velikoj meri povezana sa intenzifikacijom procesa objašnjenom u tački 2).
- **Povećanje bezbednosti procesa.** Potpuna bezbednost procesa može se poboljšati uključivanjem nelinearne analize u postupke upravljanja procesima.
- **Povećanje kvaliteta proizvoda.** Redukcija nečistoća i nus-proizvoda, kao i implementacija naprednih sistema upravljanja mogu obezbediti konstantan kvalitet proizvoda.
- **Bolja zaštita životne sredine.** Moderno projektovanje procesa treba da bude usmereno ka eliminaciji otpadnih tokova iz postrojenja putem minimizacije emisije štetnih gasova, otpadnih voda i čvrstog procesnog otpada.

2.2. Faza konceptualnog projektovanja u okviru životnog veka procesa proizvodnje u SHE postrojenjima

Istraživanja prezentovana u ovoj doktorskoj disertaciji limitirana su na razvoj metodologije projektovanja procesa u složenim hemijskim i energetskih postrojenjima sa posebnim naglaskom na analizu, simulaciju i evaluaciju procesa u konceptualnoj fazi projektovanja. U praksi hemijskog inženjerstva, projektovanje procesa se definiše kao postupak "izbora i konekcije procesnih jedinica (reaktori, pumpe, skladišni sudovi, kolone i razmenjivači toplote, itd.), te podešavanje parametara tehnoloških operacija u njima u cilju zadovoljavanja unapred određenih kriterijuma proizvodnje u postrojenju¹⁰" [18]. Ovi kriterijumi obuhvataju, kapacitet i kvalitet proizvoda, ekonomsku opravdanost, fleksibilnost i bezbednost procesa proizvodnje, kao i njen uticaj na životnu sredinu. Obzirom na obim i vrstu zadatka, projektovanje procesa pripada fazi Konceptualnog projektovanja u okviru životnog veka procesa proizvodnje u hemijskim postrojenjima¹¹. Iz tog razloga, u okviru ove teze termin projektovanje procesa predstavlja sinonim za termin konceptualno projektovanje.

¹⁰ U tezi je napravljena jasna distinkcija između pojmova: "*proces* (tehnološka operacija)" i "*postrojenje* (ili procesna jedinica kao deo postrojenja)" koji se u literaturi često koriste kao sinonimi kada ispred njih stoji prefiks projektovanje. U okviru teze *termin proces* opisuje ono što se događa u sistemu, dok *termin postrojenje* (ili procesna jedinica kao deo postrojenja) predstavlja tehnički sistem u kome (kojima) se taj proces odvija. Drugim rečima, proces se može slikovito opisati kao glagol, tj. radnja koja se vrši, dok se postrojenje (i njegovi sastavni delovi), mogu opisati kao imenice, odnosno kao objekti koji vrše tu radnju.

Pored ove primedbe u tezi je razvijena i nešto *šira definicija procesa*. Naime, u okviru hemijskog inženjerstva proces se tradicionalno definiše kao "konverzija sirovina u proizvode putem fizičkih, hemijskih, elektrohemijskih ili biohemijskih promena." Ova definicija zanemaruje druge aktivnosti koje se odvijaju u procesu proizvodnje, kao što je konverzija sirovina u neželjene ili željene poluproizvode, te konverziju energenata (npr. konverzija pare visokog pritiska u paru niskog pritiska, ili proizvodnju tople vode kao nus-produkta rashladnih procesa u postrojenju) [18]. Konačno, mnogi procesi u postrojenju koriste agense koji postepeno umanjuju svoje aktivite ili bivaju uklonjeni iz postrojenja putem izlaznih tokova gotovih proizvoda. Zbog svega toga, u ovoj tezi termin proces pored konvencionalnog značenja podrazumeva i prethodno pomenute aktivnosti što je doprinelo da su u delu praktične realizacije teorijskih razmatranja prikazani i slučajevi energetskih sistema.

Sa druge strane, termin postrojenje (u hemijskoj industriji) označava skup međusobno povezanih procesnih jedinica neophodnih za realizaciju procesa. Postrojenja pored ostalog poseduju i opremu za monitoring i upravljanje procesima, energetsku infrastrukturu i informatičku opremu (informacioni procesi, po definiciji, ne predstavljaju deo procesa u postrojenju, iako se, kao paradoks, odgovarajuća informatička oprema smatra delom postrojenja). Postrojenjem upravljaju operatori koji po definiciji predstavljaju sastavni deo postrojenja u obliku ljudskog faktora.

¹¹ Životni vek procesa proizvodnje u hemijskim postrojenjima apstrahuje koncept "od kreveta pa do groba" (*Cradle-to-the-grave*) koji obuhvata sve elemente vezane za izgradnju, funkcionisanje i zatvaranje postrojenja u hemijskoj industriji.

U literaturi se kao osnovni standardi koji razmatraju životni vek proizvodnog ciklusa u skladu sa postulatima sistemskog inženjerstva [19] označavaju *ISO15288* (ISO, 2008) i *ISO14001* (ISO, 2004) [20]. Ovi standardi definišu nekoliko značajnih faza životnog veka kao što su koncept, razvoj, produkcija, korišćenje, podrška i zatvaranje. U slučaju hemijskih postrojenja ovi standardi su predstavljeni sa različitim stepenom detalja, ali sa gotovo identičnim sastavom i rasporedom faza koje formiraju životni vek proizvodnog ciklusa ovih postrojenja [21]:

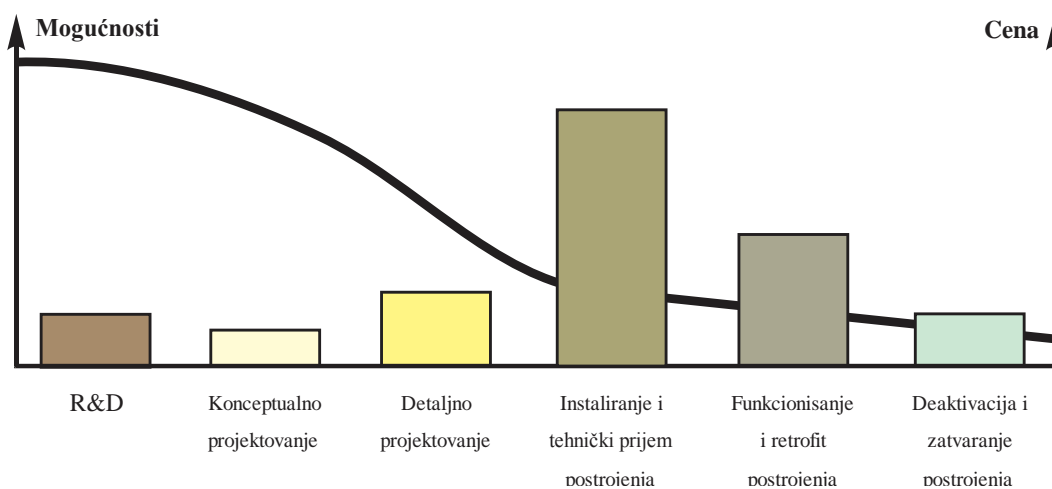
- **Strateško planiranje ili faza ideje:** faza u kojoj se kreira inicijalna ideja za korišćenje resursa i kreiranje proizvoda uz razmatranje ekonomskih efekata novog procesa proizvodnje.
- **Istraživanje i razvoj (R&D):** inicijalna ideja se testira u laboratoriji uz marketinško istraživanje moguće produkcije produkta. Iz perspektive proizvodnog procesa istraživanja se usmeravaju na kvalitet proizvoda, kinetiku reakcije, količinu produkcije proizvoda, kao i na fizičko-hemijske pretpostavke modela.
- **Konceptualno projektovanje:** u ovoj fazi razvija se pojednostavljena početna tehnološka šema procesa proizvodnje za dobijanje proizvoda čije su karakteristike definisane u fazi R&D. Mogućnost realizacije proizvodnog procesa analizira se putem masenih, energetskih i eksergetskih bilansa i uz razmatranje alternativnih reakcionih i proizvodnih ruta. U okviru konceptualnog projektovanja vrši se preliminarno dimenzionisanje i dispozicija postrojenja, ekonomska analiza, sigurnosni i ekološki aspekti proizvodnog procesa. U ovoj fazi moguće je realizovati integraciju procesa¹² i intenzifikaciju procesa, uz napomenu da se svi proizvodni procesi uglavnom razmatraju kao stacionarni.
- **Detaljan projekat:** u finalnu tehnološku šemu se uvode elementi za kontrolu procesa, detaljna dispozicija opreme i elemenata za transport fluida (cevovodi), te ostala neophodna instrumentacija. U razmatranje se uvode elementi dinamičkog ponašanja pri puštanju i

¹² Integracija procesa je termin koji se pojavio 80-ih godina prošlog veka u oblasti PSE-a sa ciljem unapređenja sistemskih metodologija za projektovanje procesa kojom bi se omogućila efikasnija upotreba energije u procesnim sistemima. Treba naglasiti da su integracija procesa i sinteza procesa komplementarne aktivnosti koje su se do 90-ih godina tretirale kao separatne aktivnosti u projektovanju procesa, ali od tada razlika među njima nestaje. Dimijan (*Dimian*) [12] u ljuskastom dijagramu [17] sintezu procesa povezuje sa etapom projektovanja reaktorskog i separacionog sistema, dok integraciju procesa vezuje za nivoje projektovanja mreže razmenjivača toplote, energetskog sistema i ukupnog industrijskog procesa. Novostvorenu vezu između sinteze procesa i integracije procesa imenuje terminom *Integrirano projektovanje procesa* (*Integrated Process Design*).

prekidu rada postrojenja, razmatraju se elementi regulacije i odgovor u slučaju neočekivanih događaja u procesu proizvodnje

- **Instaliranje i tehnički prijem postrojenja.**
- **Funkcionisanje postrojenja:** ova faza podrazumeva dnevno praćenje procesa proizvodnje, održavanje opreme, rešavanje problema vezanih za otklanjanje uskih grla u proizvodnji i retrofit postrojenja.
- **Deaktivacija i zatvaranje postrojenja** uz prpratne aktivnosti za saniranje ili rehabilitaciju okoline u kojima je postrojenje bilo aktivno.

U literaturi je moguće pronaći više autora koji su razmatrali uticaj pojedinih faza životnog ciklusa postrojenja na ekonomske i ekološke karakteristike proizvodnje. Tako Jang i Ši (*Yang and Shi*) [22], razmatrajući dijagram sa dve ordinate na [slici 2.1](#), konstatuju da faza konceptualnog projektovanja i pored relativno niskog učešća u ukupnim troškovima procesa proizvodnje, pruža najviši stepen slobode u donošenju odluka koje će uticati na ekonomsku i ekološku efikasnost postrojenja. Prelaskom na sledeće faze životnog ciklusa evidentan je pad stepeni slobode u izboru projektnih rešenja, ali i rast cene eventualnog retrofita po puštanju postrojenja u pogon.



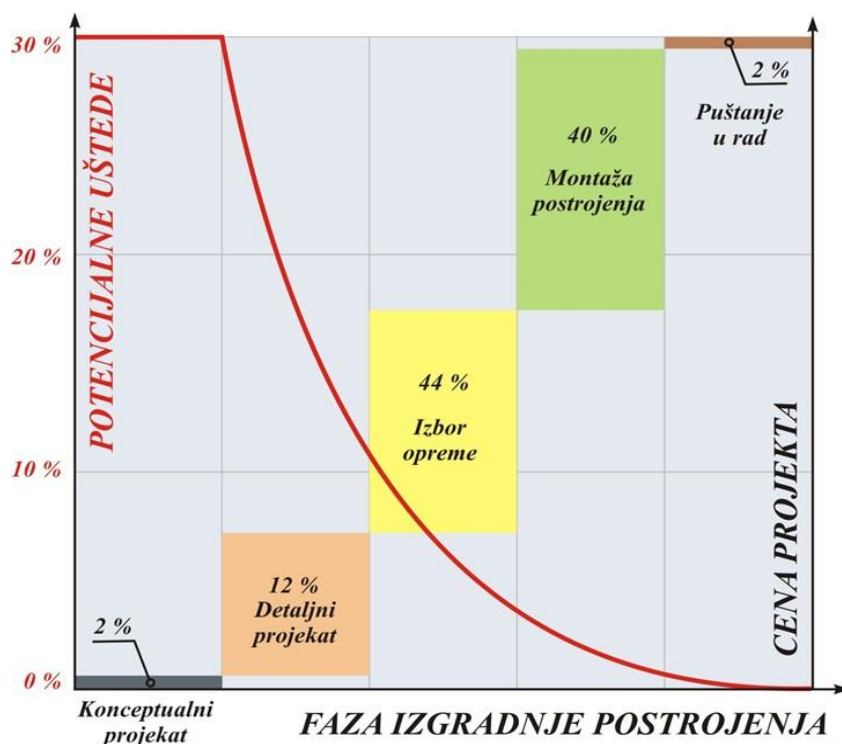
Slika 2.1. Analiza faza u životnom veku proizvodnog ciklusa u hemijskoj industriji

Korevar (*Korevaar*) [23] analizira rast troškova, procenu investicija i stepene slobode u odlučivanju tokom svake faze u izgradnji postrojenja i zaključuje da se cena investicija u najvećoj meri definiše u fazi konceptualnog dizajna.

Dimijan [12], na osnovu rada Pingena (*Pingen*) [24], ilustruje detaljniju ekonomsku analizu pojedinih faza životnog ciklusa u funkciji smanjenja ukupne cene izgradnje postrojenja, [slika 2.2](#). Očigledno je da projektna rešenja u fazi konceptualnog dizajna, uprkos niskoj ceni koš-

tanja (oko 2% ukupnih troškova), omogućuju uštede od gotovo 30% na nivou ukupne cene izgradnje postrojenja.

Iz prethodnog dela očigledno je da faza konceptualnog projektovanja zauzima možda i najznačajnije mesto u životnom veku jednoga postrojenja obzirom da je odnos cena faze/cena ukupnih troškova u njoj najniži. Do sličnog zaključka dolaze i autori u [25] konstatujući da se u razvojnoj fazi projekta (R&D i faza konceptualnog projektovanja) determiniše 70% ukupnih troškova i pored činjenice da je ukupna cena koštanja te faze samo 5%, dok autori u [26] ukazuju da se u ovoj fazi određuje 80% svih investicija do puštanja postrojenja u rad.



Slika 2.2. Ekonomске karakteristike pojedinih faza u procesu izgradnje postrojenja

U nastavku ovog poglavlja biće predstavljeni osnovni gradivni elementi konceptualne faze projektovanja koji su proistekli iz opšte metode inženjerskog projektovanja.

2.3. Projektovanje procesa kao disciplina inženjerskog projektovanja

Da bi se nešto bliže objasnila metodologija projektovanja procesa, potrebno je prvo razmotriti set osnovnih postulata proisteklih iz opšte metode inženjerskog projektovanja [27]. Metodologija inženjerskog projektovanja predstavlja jedan od najintenzivnije razmatranih problema u oblasti inženjerstva tokom poslednjih decenija [28], a pri tome se karakteriše velikim bro-

jem različitih pristupa, modela¹³, strategija¹⁴ i metoda, te velikim brojem definicija [29], [30], [31], [32], [33]. U svim definicijama se generalno može uočiti zajednički set ključnih reči i fraza koje uključuje sledeće pojmove: potrebe, zahteve, rešenja, specifikacije, kreativnost, ograničenja, naučne principe, tehničke podatke, funkcije, mapiranje, transformaciju, proizvodnju i ekonomiju. Reč korisnik, iako odsutna u prethodno pomenutom setu, implicitno se predstavlja rečima potreba, zahtev ili tržište. Uzimajući u obzir ove ključne reči, zadatak inženjerskog projektovanja se može opisati kao:

"Proces utvrđivanja zahteva zasnovanih na ljudskim potrebama transformisanih u skup performansi i funkcija, koje se zatim mapiraju i konvertuju (u zavisnosti od ograničenja) u projektna rešenja (upotrebom kreativnosti, naučnih principa i tehničkog znanja) koja se mogu proizvoditi na ekonomski opravdan način."

Obzirom na sadržaj i ciljeve u ovoj tezi definicija inženjerskog projektovanja napribližnija je onoj predstavljenoj od strane *The Accreditation Board for Engineering and Technology* (<http://www.ab-et.org>):

"Inženjerski projekat je procedura kreiranja sistema, komponenti ili procesa kojim se zadovoljavaju željene potrebe. To je procedura donošenja odluka (uglavnom iterativnog karaktera), u kojoj se upotrebom bazične nauke, matematike i inženjerstva te potrebe ispunjavaju uz optimalnu konverziju resursa. Fundamentalni elementi procesa projektovanja su: postavljanje ciljeva i kriterijuma, sinteza, analiza, konstrukcija, testiranje i evaluacija."

Projektovanje je aktivnost koja se realizuje u brojnim inženjerskim zadacima i često je multidisciplinarna aktivnost. Najpoznatiji modeli inženjerskog projektovanja su preskriptivni modeli [34] bazirani na proceduralnom principu. Autori najznačajnijih preskriptivnih modela su: Džej Si Džons (*J.C. Jones*) [35], Vots (*Watts*) [36], Marpls (*Marples*) [37], Asimov (*Asimow*) [38], Krik (*Krick*) [39], a treba istaknuti i model sastavljen od strane nemačkih profesionalnih inženjera Model VDI 2221.

¹³ Projektni modeli su opisi filozofija ili strategija za realizaciju procesa projektovanja. Često se prikazuju u vidu dijagrama toka pokazujući iterativnu prirodu procesa projektovanja pomoću povratne veze.

¹⁴ Proces inženjerskog projektovanja putem bilo kog projektnog modela uobičajeno se realizuje putem dve osnovne strategije: *Top-down* strategija (u slobodnom prevodu: "od vrha ka dnu") ili strategija deduktivnog projektovanja kojom se vrši defragmentisanje sistema u cilju proučavanja njegovih sastavnih subsystema, pa se zato često koristi kao sinonim za analizu ili dekompoziciju; *Bottom-up* strategija (u slobodnom prevodu: "od dna ka vrhu") ili strategija induktivnog projektovanja predstavlja pristup baziran na detaljnom proučavanju manjih (originalnih) sistema i njihovom spajanju u veće sisteme (što originalne sisteme čini subsystemima novonastalog sistema), pa predstavlja sinonim za sintezu.

Karakteristika preskriptivnih modela [40] je da se projektovanje predstavlja kao niz eksplicitnih odluka u procesu "zaključivanja od funkcije do forme" (*reasoning from function to form*)¹⁵. Model zaključivanja od funkcije do forme često se imenuje kao bazični ciklus projektovanja (*basis cycle of design*) [23] obzirom da se on primenjuje u industrijskom inženjersvu, u projektovanju procesa u hemijskim postrojenjima [41], kao i pri projektovanju mašinskih elemenata [42].

Bazični ciklus projektovanja polazi od formulacije problema gde se definiše: baza projekta koja uključuje uticaj spoljnih faktora na projektno rešenje, selekcija projektog prostora i gradivnih elemenata putem kojih će se projekat realizovati, te identifikacija raspoloživog i potrebnog nivoa znanja u cilju uspešnog realizacije projekta. U sledećoj fazi, fazi sinteze, generišu se alternative projektog rešenja. Opis ponašanja alternativa definiše se u fazi analize, dok se u fazi evaluacije performanse alternativa kompariraju po kriterijumima definisanim u fazi formulacije problema. U slučaju da performanse alternativa nisu zadovoljavajuće, problem se preformuliše ili se vrši povratak u fazu sinteze gde se generišu nove alternative. Kada su performanse zadovoljavajuće, prelazi se na sledeći nivo projektog zadatka. Dva tipična preskriptivna modela industrijskog inženjeringa, vrlo bliska problemima projektovanja u oblasti PSE-a su projektni model Frenča (*French*) [43] i model Pala i Bajca (*Pahl and Beitz*) [44].

Po Frenču proces projektovanja je podeljen na četiri etape. Projektovanje započinje fazom analize problema u kojoj se na osnovu marketinškog istraživanja tržišta definiše lista zahteva koju bi krajnji proizvod trebao da ispunjava. U ovoj fazi se analiziraju i postojeći podaci o proizvodu i načini njegove proizvodnje. Rezultati ove faze su definisanje projektog problema u obliku koji sadrži cilj i projektna ograničenja (npr. način proizvodnje, zahtevi kupaca, životni vek proizvoda, formiranje baze podataka i kriterijum evaluacije za proizvod).

U sledećoj, konceptualnoj fazi (konceptualno projektovanje) projektant formira set inicijalnih konceptualnih rešenja pri čemu se svako od rešenja sastoji od seta principa za rešavanje projektog zadatka. Konceptualna rešenja se transformišu u apstraktna rešenja koja omogućavaju njihovu procenu i komparaciju u odnosu na zahteve definisane u fazi analize projekta. Is-

¹⁵ Projekat počinje određivanjem specifične funkcije koju proizvod koji treba da ispuni. Uloga projektanta je da definiše onaj proizvod koji tu funkciju ostvariti na optimalan način. Forma proizvoda se sastoji u opisu geometrijskih i fizičko-hemijskih karakteristika. U slučaju projektovanja procesa funkcija se opisuje kao konvertovanje sirovine u proizvod sa specifičnim karakteristikama.

ishodište ove faze je apstraktno projektno rešenje koje u najvećoj meri zadovoljava cilj projekta u okviru definisanih projektnih ograničenja.

Apstraktni karakter svakog projektnog rešenja proisteklog iz faze konceptualnog projektovanja se transformiše u detaljniji projekat u fazi konkretnih rešenja. Potom se vrši nova procena i komparacija tako kreiranog rešenja i kao ishodište se javlja konkretno projektno rešenje (za razliku od apstraktnog rešenja u prethodnoj fazi) projektnog zadatka. Na kraju, takvom projektnom rešenju se u fazi detaljnog projektovanja dodaju neophodne informacije i detalji neophodni za punu realizaciju proizvodnje analiziranog proizvoda.

Pored modela Frenča, drugi značajan preskriptivni etapni model inženjerskog projektovanja kreiran je od strane Pala i Bajca za potrebe mašinskih projekata. Model je baziran na postojanju četiri faze (planiranje i razjašnjavanje zadatka, konceptualni projekat, konkretizovani projekat, detaljni projekat) u okviru kojih je predstavljena lista radnih koraka koji po autorima predstavljaju najkorisniju strategiju za uspešnu realizaciju projektnog zadatka.

Sam proces inženjerskog projektovanja ima evolucionu karakter koji se ogleda u činjenici da se pri projektovanju konstantno definišu promene (unapređenja ili poboljšanja) trenutnog projekta kako bi se došlo do naprednijeg projektnog rešenja. Na taj način inženjersko projektovanje predstavlja iterativni, pa i interaktivni proces obzirom na veliku ulogu kreativnih i iskustvenih sposobnosti projektanta u realizaciji projekta¹⁶. Inženjersko projektovanje se karakteriše se i intenzivnom upotrebom matematičkih i kompjuterskih alata za analizu i optimizaciju projektnih rešenja.

2.4. Bazični projektni ciklus u konceptualnoj fazi

Konceptualno projektovanje označava onaj deo projektnog zadatka u kome se razmatraju osnovni elementi koji definišu proces: tehnološke šeme, materijalni i energetski bilansi procesnih jedinica, sistema i sistema, specifikacije opreme, korisne potrošnje, stepen bezbednosti i zaštite okoline i konačno, ekonomska profitabilnost. U konceptualnom projektovanju akcenat je više stavljen na ponašanje procesa kao sistema, nego na dimenzionisanje opreme.

¹⁶ Interaktivnost je neophodna u situaciji kada je projektni problem loše definisan; u slučaju nedostataka osnovnih podataka za realizaciju projekta, kao i u slučaju nepostojanja prethodnog iskustva u vezi sa projektnim problemom.

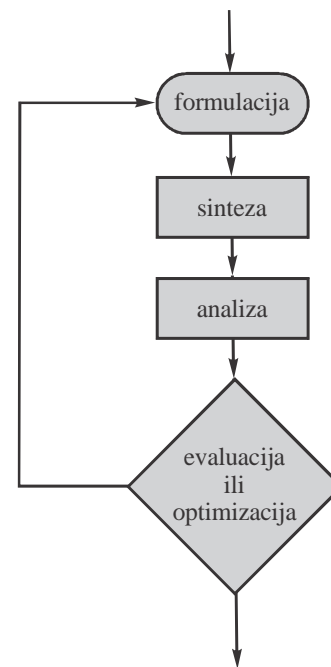
Niz projektnih aktivnosti u okviru konceptualne faze projekta baziran je na već predstavljenom bazičnom ciklusu projektovanja i u literaturi [45] se on najčešće predstavlja putem šematskog toka prikazanog na slici 2.3.

Prva faza konceptualnog projekta predstavlja fazu formulacije projektnog zadatka. U ovoj fazi se definišu: potrebne performanse (kapacitet proizvodnje, preliminarne energetske, ekonomske i ekološke karakteristike proizvodnje), relevantni spoljni faktori (vrsta i količina sirovina, energenta, itd.), projektni prostor koji uključuje gradivne elemente projektovanja (procesne jedinice, pomoćna oprema) i identifikacija potrebnog znanja za uspešnu realizaciju projekta (uglavnom znanje o tehnološkim operacijama).

Po formulisanju osnovnih projektnih parametara i definisanju svih potrebnih podataka u procesu projektovanja se prelazi na tri međusobno zavisna projektna koraka: sintezu, analizu i evaluaciju/optimizaciju, prikazana na slici 2.3.

Pre detaljnijeg razmatranja svakog od projektnih koraka treba razmotriti dva osnovna problema u oblasti projektovanja procesa, direktni problem ili problem analize procesa i njegov inverzni problem, odnosno problem sinteze procesa. Oba problema (razmatranje je ograničeno samo na projektovanje procesa, mada analogija važi i u slučaju projektovanja proizvoda) podrazumevaju postojanje odgovarajućeg opšteg modela sastavljenog od tri ključna elementa: sistema (sastav i struktura ispitivanog procesa), inputa u sistem (sirovine, energetske tokovi, itd.) i outputa iz sistema (proizvod, otpadni tokovi, itd.)¹⁷.

Pretpostavka modela je da poznavanje dva elementa generiše podatke o trećem elementu.



Slika 2.3. Osnovni ciklus projektovanja

¹⁷ Modeli koji se koriste u svrhu objašnjenja direktnog i inverznog problema u projektovanju procesa su značajno pojednostavljeni, a nešto detaljniji prikaz modela i postupka modeliranja je ilustrovan u poglavlju 3.

U slučaju direktnog problema, analize procesa, dva poznata elementa su input u sistem i sam sistem¹⁸. Pri tome, analiza podrazumeva dekompoziciju sistema na njegove sastavne delove (subsisteme i komponente) u cilju izračunavanja individualnih performansi tih delova (tu se misli na parametre materijalnih i energetskih tokova u strukturi sistema, kao i na preliminarne dimenzije komponenti, tj. procesnih jedinica, koje formiraju taj sistem) i parametara outputa sistema. Model se zatim sprovođenjem postupka simulacije može koristiti u svrhu predviđanja outputa i performansi sistema kada se vrše promene inputa u sistem i promene karakteristika komponenti sistema.

Kod inverznog problema, odnosno sinteze procesa, poznati elementi su inputi u sistem i outputi iz sistema, dok se putem sinteze vrši određivanje sastava i strukture sistema neophodnog za transformaciju tokova inputa u tokove outputa definisane performanse koju taj sistem treba da ispuni. Output zadatka sinteze je tehnološka šema i karakteristike opreme potrebne da bi sistem ispunio tražene performanse [46].

Obzirom da je u konceptualnoj fazi projektovanja dominantna *top-down* strategija projektovanja, konceptualni projekat započinje sintezom procesa¹⁹ u cilju kreiranja tehnološke šeme ispitivanog procesa, tj. u cilju objedinjavanja svih procesnih jedinica i njihovih međusobnih relacija u jedinstven procesni sistem. Vesterberg [47] definiše sintezu procesa kao "*diskretan proces donošenja odluka koja od raspoloživih komponenti (procesnih jedinica) može biti upotrebljena i na koji način će ona biti optimalno smeštena u strukturu procesa obzirom na unapred određeni projektni zadatak.*"

U praksi, sinteza procesa se sastoji iz dva individualna koraka:

- Izbor individualnih transformacija neophodnih za proces proizvodnje (drugim rečima, izbor procesnih jedinica koje će realizovati te transformacije),
- Izbor načina na koji će procesne jedinice biti povezane u cilju potpune realizacije procesa proizvodnje.

¹⁸ Objašnjenje analize procesa ovde je ograničeno na postupak u kome se koristi simulacija u modu analize i koji je objašnjen u nastavku ovog poglavlja.

¹⁹ U literaturi faza sinteze u okviru konceptualnog projektovanja se često definiše kao konceptualna sinteza procesa (*conceptual process synthesis*) ili samo kao Sinteza procesa (*process synthesis*).

Kao produkt ove etape konceptualnog projektovanja kreira se tehnološka šema sa jasno definisanom topologijom procesnih jedinica i njihovih interkonekcija. Zadatak sinteze procesa može se razmatrati kroz dve vrste problema:

- kreiranje tehnološke šeme potpuno novog postrojenja (*grassroot design*),
- redefinisane tehnološke šeme postojećeg postrojenja (*retrofit design*)

U prvom slučaju projektantu se daje sloboda izbora sastava i strukture tehnološke šeme, kao i dimenzija procesnih jedinica. U slučaju retrofita projektant vrši redefinisane tehnološke šeme uzimajući u obzir već postojeće stanje u postrojenju. Ovde treba primetiti da je razlika između retrofit zadatka sinteze i analize procesa u činjenici da pri analizi tehnološka šema ostaje nepromenjena, tj. da se samo menjaju parametri komponenti.

Metode sinteze procesa [48] se dele na tri velike grupacije:

- dekompozicione hijerarhijski orijenisane metode,
- heurističke metode,
- optimizacione metode i evolucionarni sistemi.

Kasnije su u ovoj podeli dodate i termodinamičke metode [49], [50].

Obzirom da sinteza procesa ne predstavlja osnovnu temu disertacije, u objašnjenju ove faze konceptualnog dizajna ograničenje se svodi na podatak da su termin sinteza procesa u okviru projektovanja procesa uveli Maso (*Masso*) i Rud 1969. godine [51] i da je prvi revijalni rad iz ove oblasti objavljen 1973. godine [52]. Nakon toga objavljeno je još nekoliko radova koji su imali revijalni karakter o sintezi procesa [53], [54], [55], [56], [57], [58].

Cilj sledećih etapa, analize i optimizacije je određivanje one tehnološke šeme koja predstavlja optimalno rešenje po unapred definisanim kriterijumima. Etapa analize procesa u sebi uključuje:

- Postupak modelovanja (sistema i njegovih komponenti), tj. formulisanje modela, konceptualizacija modela, kreiranje baze podataka modela, projektovanje modela, rešavanje modela, verifikacija modela, validacija modela.
- Simulaciju sistema, prvenstveno putem simulacionog softvera baziranog na stacionarnim operativnim uslovima u postrojenju – u daljem tekstu postupak *flowsheeting*-a. Simulacijom se vrši analiza delovanja parametara inputa i parametara komponenti u definisanoj tehnološkoj šemi na parametre outputa i na energetske, ekonomske i ekološke indikatore ispitivanog procesa (određivanje energetske i eksergetske efikasnosti procesa, preliminar-

no dimenzionisanje procesnih jedinica, određivanje ukupnih investicionih i operativnih troškova rada postrojenja, određivanje uticaja projektovanog procesa na životnu okolinu).

Simulacija se uglavnom realizuje u dva moda [59]: projektom modu (*design mode*) ili modu analize (*analysis mode*). U projektom modu, pored ranije specificirane tehnološke šeme, vrši se specifikacija outputa iz sistema (izlazni materijalno/energetski tokovi iz sistema), pa se procesom simulacije određuju parametri inputa u sistem (ulazni materijalno/energetski tokovi u sistem). U modu analize specificiraju se inputi u sistem, dok se kao produkt simulacije dobijaju parametri outputa. U idealnom slučaju simulacija putem projektog moda bi se mogla okarakterisati kao korisnija, ali istraživanja pokazuju da je ona često nestabilna sa numeričke tačke gledišta. Sa druge strane, simulacija u modu analize obezbeđuje identičan smer informacija vezanih za input u svaku od procesnih jedinica i materijalno/energetskih tokova u postrojenju. Na taj način postiže se veći stepen numeričke stabilnosti dobijenih rešenja i ovakav vid simulacije je naročito pogodan u slučaju iterativne analize uticaja pojedinih parametara inputa na performanse postrojenja. Zbog toga su i istraživanja u ovoj disertaciji bazirana na simulacijama u modu analize koja ujedno može poslužiti i za parametarsku analizu²⁰ ispitivanog postrojenja. Obzirom da je glavni cilj ove teze vezan za ovu etapu procesa, o njoj će nešto više biti rečeno u narednim poglavljima.

Kada je utvrđena bazična alternativa tehnološke šeme putem analize procesa, prelazi se u etapu optimizacije procesa [12], [60]. Cilj optimizacije sa inženjerskog stanovišta predstavlja određivanje parametara tehnološke šeme koji omogućavaju najbolje performanse postrojenja po unapred određenim kriterijumima. Obzirom da se sličan cilj delimično može ostvariti i putem parametarske analize simulacionih rešenja, može se reći da je optimizacija napredna metoda u oblasti *flowsheeting-a*.

Osnovna razlika između simulacionog i optimizacionog zadatka može se utvrditi analizom stepena slobode (DOF analiza, *Degrees of Freedom Analysis*)²¹ seta matematičkih jednačina proisteklih iz faze modelovanja ispitivanog sistema. U slučaju optimizacionog zadatka $DOF > 0$, pa se u cilju njegovog rešavanja pored postojećih ograničenja u vidu jednačina u set uvode i ograničenja u vidu nejednačina i ciljna funkcija, tehničke ili ekonomske prirode. U oba slučaja ciljna funkcija i set jednačina/ograničenja imaju oblik linearnih, odnosno neline-

²⁰ Pod pojmom parametarska analiza podrazumeva se promena parametara procesnih jedinica i ekonomskih, energetskih i ekoloških indikatora postrojenja u funkciji promene nekih od parametara inputa.

²¹ Poglavlje 3.3. u tezi.

arnih (u većini slučajeva) algebarskih jednačina (AE). Optimizacioni zadatak se uobičajeno javlja u dva oblika:

- Strukturna optimizacija, u kojoj se kao promenljive u matematičkoj formulaciji zadatka javljaju broj procesnih jedinica i njihove interkonekcije. Rešavanje strukturne optimizacije u matematičkom smislu predstavlja problem mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP) ili problem mešovitog celobrojnog nelinearnog programiranja (MINLP).
- Parametarska optimizacija, u kojoj broj procesnih jedinica i struktura tehnološke šeme ostaje nepromenljiva, ali se zato kao promenljive javljaju parametri materijalno/energetskih tokova (pritisak, temperatura, sastav). U ovom slučaju zadatak optimizacije se svodi na problem nelinearnog programiranja (NLP).

2.5. Zaključna razmatranja poglavlja 2

- Projektovanje procesa složenih hemijskih i energetskih postrojenja pripada oblasti Procesnog sistemskog inženjerstva. Procesno sistemsko inženjerstvo izučava mehanizme donošenja odluka u procesu kreiranja i funkcionisanja celokupnog lanca produkcije hemijskih proizvoda, tj. otkrivanja, projektovanja, proizvodnje i distribucije hemijskih proizvoda.
- Osnovni istraživački alati u PSE-u bazirani su na postulatima sistemskog inženjeringa obzirom da se objekti ispitivanja posmatraju kao celina, a da je cilj ispitivanja izbor komponenti sistema i definisanje njihove uzajamne zavisnosti na način koji će obezbediti optimalno funkcionisanje tog objekta. Metodologija PSE-a, prvobitno je razvijena u oblasti hemijske industrije gde se pod objektima istraživanja podrazumevaju hemijska postrojenja sastavljena od procesnih jedinica, a potom iskorišćena i u izučavanju industrijskih postrojenja koncentrisanih u petrohemijskim, polimernim, farmaceutskim, prehrambenim, biohemijskim, pa i energetskim industrijskim kompleksima.
- Projektovanje procesa predstavlja značajan alat u fazi konceptualnog projektovanja u životnom ciklusu procesa proizvodnje u hemijskim postrojenjima. Konceptualno projektovanje označava onaj deo projekta izgradnje postrojenja u kome se razmatraju osnovni elementi koji definišu proizvodni proces: tehnološke šeme, materijalni i energetski bilansi procesnih jedinica, subsystema i sistema, specifikacije opreme, korisne potrošnje, stepen bezbednosti i zaštite okoline i konačno, ekonomska profitabilnost. Dakle, u konceptualnom projektovanju akcenat je više stavljen na ponašanje procesa kao sistema, nego na dimenzionisanje opreme. U ovoj fazi razvija se pojednostavljena početna tehnološka šema

procesa proizvodnje za dobijanje proizvoda čije su karakteristike definisane u fazi R&D. Projektovanje procesa se razlikuje od projektovanja opreme koje je u suštini bliže projektovanju pojedinačnih operacija. Procesi se, pak često sastoje od više pojedinačnih operacija.

- Strategija u projektovanju procesa sledi bazični ciklus inženjerskog projektovanja i on se sastoji od faze sinteze procesa, analize procesa i evaluacije, odnosno optimizacije procesa.

Literatura poglavlja 2

- [1] Stephanopoulos G, Reklaitis GV. Process systems engineering: from Solvay to modern bio- and nanotechnology. A history of development, successes and prospects for the future. Chem Eng Sci 2011;66(4):272–4,306. [\[cit u tekstu\]](#)
- [2] Rašković P. Energetika u procesnoj industriji [udžbenik]. Leskovac, Srbija: Tehnološki Fakultet u Leskovcu; 2013 [u štampi]. [\[cit u tekstu\]](#)
- [3] Rudd DF, Watson, CC. Strategy of process engineering. New York: John Wiley & Sons; 1968. [\[cit u tekstu\]](#)
- [4] Klatt K, Marquardt W. Perspectives for process systems engineering – personal views from academia and industry. Comput Chem Eng 2009;536–50. [\[cit u tekstu\]](#)
- [5] Takamatsu T. The nature and role of process systems engineering. Comput Chem Eng 1983;7: 203–18. [\[cit u tekstu\]](#)
- [6] Grossmann IE, Westerberg AW. Research challenges in process systems engineering, AIChE J 2000;46:1700–3. [\[cit u tekstu\]](#)
- [7] Conte E. Innovation in Integrated Chemical Product-process Design, Development through a Model-based System Approach [PhD thesis]. Lingby, Denmark: Technical University of Denmark; Department of Chemical and Biochemical Engineering; 2010. [\[cit u tekstu\]](#)
- [8] Moggridge GD, Cussler EL. An introduction to chemical product design. Trans IChemE-Part A 2000;78:5–11. [\[cit u tekstu\]](#)
- [9] Ng KM, Gani R, Dam-Johansen K. Chemical product design. Toward a perspective through case studies. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2007. [\[cit u tekstu\]](#)
- [10] Grossmann IE. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. Comput Chem Eng 2004;29:29–39. [\[cit u tekstu\]](#)
- [11] Grossmann IE. Enterprise-wide optimization: a new frontier in process systems engineering. AIChE Journal 2005;51:1846–57. [\[cit u tekstu\]](#)
- [12] Dimian AC. Integrated design and simulation of chemical processes. New York: Elsevier; 2003. [\[cit u tekstu\]](#)
- [13] Keller GE, Bryan PF. Process engineering: moving in new direction. Chem Eng Prog 2000;41–9. [\[cit u tekstu\]](#)
- [14] Stankiewicz AJ, Moulijn A. Process intensification: transforming chemical engineering. Chem Eng Prog 2000;22–40. [\[cit u tekstu\]](#)

- [15] Linnhoff BD, Townsend W, Boland D, Hewitt GF, Thomas B, Guy AR, Marsland RH. User guide on process integration for the efficient use of energy. The Institution of Chemical Engineers; 1994. [\[cit u tekstu\]](#)
- [16] Raskovic P, Stoiljkovic S. Pinch design method in the case of a limited number of process streams. *Energy* 2009;34(5):593–612. [\[cit u tekstu\]](#)
- [17] Rašković P. Optimizacija industrijskih energetska sistema putem integracije mreže razmenjivača toplote [doktorska disertacija]. Niš, Srbija: Mašinski fakultet u Nišu; 2002. [\[cit u tekstu\]](#)
- [18] Herder PM. Process Design in a Changing Environment. Identification of Quality Demands Governing the Design Process [PhD thesis]. Delft, The Netherlands: Delft University Press; 1999. [\[cit u tekstu\]](#)
- [19] Bojarski AD. Life Cycle Thinking and General Modelling Contribution to Chemical Process Sustainable Design and Operation [PhD thesis]. Barcelona, Spain: Universitat Politècnica de Catalunya; 2010. [\[cit u tekstu\]](#)
- [20] Cameron I, Raman R. Process systems risk management. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier; 2005. [\[cit u tekstu\]](#)
- [21] Cameron IT, Newell RB. Modeling in the process life cycle. In: Puigjaner L, Heyen G, editors. Computer aided process and product engineering. New York: John Wiley & Sons; 2006; Section 4.2, Chapter 2, 667–93. [\[cit u tekstu\]](#)
- [22] Yang Y, Shi, L. Integrating environmental impact minimization into conceptual chemical process design – a process systems engineering review. *Comput Chem Eng* 2000;24(2–7):1409–19. [\[cit u tekstu\]](#)
- [23] Korevaar, G. Sustainable Chemical Processes and Products: New Design Methodology and Design Tools [PhD thesis]. Delft, The Netherlands: Eburon; 2004. [\[cit u tekstu\]](#) [\[cit u tekstu\]](#)
- [24] Pingen J. A vision of future needs and capabilities in process modelling, simulation and control. ESCAPE-11 Proceedings; Amsterdam, The Netherlands; Elsevier; 2001. [\[cit u tekstu\]](#)
- [25] Heinzle E, Weirich D, Brogli F, Hoffmann V, Koller G, Verduyn M, Hungerbühler K. Ecological and economic objective functions for screening in integrated development of fine chemical processes: 1. Flexible and expandable framework using indices. *Ind Eng Chem Res* 1998;37:3395–407. [\[cit u tekstu\]](#)
- [26] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization. New York: John Wiley & Sons; 1996. [\[cit u tekstu\]](#)
- [27] Wynn DC, Clarkson PJ. Design process improvement: A Review of Current Practice. In: Clarkson J, Eckert C, editors. Models of designing. London (UK): Springer; 2005. [\[cit u tekstu\]](#)
- [28] Rittel H, Webber MM. Planning problems are wicked problems. In: Developments in design methodology. Chichester (UK): John Wiley; 1984. [\[cit u tekstu\]](#)
- [29] Feilden GBR. Engineering design. The Feilden's Report. Her Majesty's Stationery Office, London; 1963. [\[cit u tekstu\]](#)
- [30] Finkelstein L, Finkelstein ACW. Review of design methodology. *IEE Proceedings* 1983, 130 (Part A, No. 4). [\[cit u tekstu\]](#)
- [31] Luckman J. An approach to the management of design. In: N. Cross, editor. Developments in design methodology. London (UK): John Wiley; 1984: 83–97. [\[cit u tekstu\]](#)

- [32] Archer LB. Systematic method for designers. In: N. Cross, editor. Developments in design methodology. London (UK): John Wiley; 1984: 57–82. [\[citat u tekstu\]](#)
- [33] Caldecote V. The design team in relation to the individual designer. The practice of and education for engineering design. Proc Inst Mech Eng 1963–4;178(3B):16–9. [\[citat u tekstu\]](#)
- [34] Evbuomwan NF, Sivaloganathan S, Jebb A. A survey of design philosophies, models, methods and systems. J Eng Manuf 1996;210:301–20. [\[citat u tekstu\]](#)
- [35] Jones JC, Thornley DG. Conference on design methods. London (UK): Pergamon Press; 1962. [\[citat u tekstu\]](#)
- [36] Watts RD. The elements of design. In: Gregory SA, editor. The design method. London (UK): Butterworth; 1966: 85–95. [\[citat u tekstu\]](#)
- [37] Marples DL. The decisions of engineering design. London (UK): The Institution of Engineering Designers; 1960: 1–16. [\[citat u tekstu\]](#)
- [38] Asimow M. Introduction to design. Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall; 1962. [\[citat u tekstu\]](#)
- [39] Krick EV. Engineering and engineering design. 2nd ed. New York: John Wiley; 1969. [\[citat u tekstu\]](#)
- [40] Roozenburg NFM, Eekels J. Product design – fundamentals and methods. Chichester (UK): Wiley; 1995. [\[citat u tekstu\]](#)
- [41] Siirola JJ. Strategic process synthesis: advances in the hierarchical approach. Comput Chem Eng 1996;20:1637–43. [\[citat u tekstu\]](#)
- [42] Cross N. Engineering design methods. London (UK): John Wiley; 1991. [\[citat u tekstu\]](#)
- [43] French MJ. Conceptual design for engineers. 1st ed. London (UK): The Design Council; 1971. [\[citat u tekstu\]](#)
- [44] Pahl G, Beitz W. Engineering design. Original German Edition, 1st ed. 1971. English Edition (Wallace K, editor.) 1984 (The Design Council. London). [\[citat u tekstu\]](#)
- [45] Patel B. Fundamental Targets for the Synthesis and Evaluation of Chemical Processes [PhD thesis]. Johannesburg, South Africa: University of the Witwatersrand; 2007. [\[citat u tekstu\]](#)
- [46] Klatt KU, Marquardt W. Perspectives for process systems engineering – personal views from academia and industry. Comput Chem Eng 2009;33(3):536–50. [\[citat u tekstu\]](#)
- [47] Westerberg AW. Process synthesis: a morphology review. In: Liu YA, McGee HA, Epperly WR, editors. Recent developments in chemical process and plant design. New York: John Wiley and Sons; 1987. [\[citat u tekstu\]](#)
- [48] Henry JE, Rudd DF, Seader JD. Synthesis in the design of chemical processes. AIChE J 1973;19(1):1–15. [\[citat u tekstu\]](#)
- [49] Herder K. Chemical and Process Integration for Environmental Assessment. Development and Evaluation of a Chemical Recycling Concept for Plastic Waste [PhD thesis]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology; 2007. [\[citat u tekstu\]](#)
- [50] Anantharaman R. Energy Efficiency in Process Plants with emphasis on Heat Exchanger Networks; Optimization, Thermodynamics and Insight [PhD thesis]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology; 2011. [\[citat u tekstu\]](#)
- [51] Masso AH, Rudd DF. The synthesis of systems design: heuristic structuring. AIChE Journal 1969;15(10). [\[citat u tekstu\]](#)

- [52] Hlavacek V. Synthesis in the design of chemical processes. *Comput Chem Eng* 1978;2(1):67–75. [\[citat u tekstu\]](#)
- [53] Nishida N, Stephanopoulos G, Westerberg AW. A review of process synthesis. *AIChE J* 1981;27(3):321–51. [\[citat u tekstu\]](#)
- [54] Umeda T. Computer aided process synthesis. *Comput Chem Eng* 1983; 7(4):279–309. [\[citat u tekstu\]](#)
- [55] Westerberg AW. Review of process synthesis. In: Squires R, Reklaitis G, editors. *Computer applications to chemical engineering*. ACS Symposium Series; 1980: 53–87. [\[citat u tekstu\]](#)
- [56] Li X, Kraslawski A. Conceptual process synthesis: past and current trends. *Chem Eng Process* 2004;43(5):589–600. [\[citat u tekstu\]](#)
- [57] Westerberg AW. A retrospective on design and process synthesis. *Comput Chem Eng* 2004;28:447–58. [\[citat u tekstu\]](#)
- [58] Barnicki SD, Siirola JJ. Process synthesis prospective. *Comput Chem Eng* 2004;28:441–6. [\[citat u tekstu\]](#)
- [59] Babu BV. *Process Plant Simulation*. New Delhi, India: Oxford University Press; 2004. [\[citat u tekstu\]](#)
- [60] Smith R. *Chemical Process Design*. New York: McGraw-Hill; 1995.

3. Analiza procesa u konceptualnoj fazi projektovanja

Po završetku procesa sinteze u konceptualnoj fazi projekta definiše se osnovna tehnološka šema ispitivanog procesa. U sledećoj fazi konceptualnog dizajna vrši se analiza (eventualno optimizacija tehnološke šeme) u svrhu određivanja konzistentnosti materijalnih i energetskih bilansa, preliminarnih proračuna dimenzija i cene procesnih jedinica, proračuna indikatora proizvodnje i predikcije ponašanja sistema u slučaju promene parametara u definisanoj tehnološkoj šemi. Iako je analiza procesa integralna aktivnost, u njoj se ipak mogu definisati dva hijerarhijska koraka: postupak modelovanja i postupak simulacije sistema na bazi definisanih modela i uz upotrebu softverskog paketa za simulaciju modela. Obe ove aktivnosti biće predstavljene u okviru ovog poglavlja u obimu koji odgovara potrebama analize postrojenja predstavljenih u praktičnom delu ove teze. U poslednjem delu poglavlja detaljno je objašnjen postupak analize stepena slobode kao značajne faze u analizi procesa obzirom da je ova tematika po mišljenju autora manje zastupljena u domaćoj literaturi.

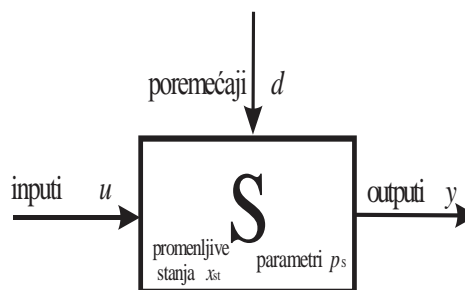
3.1. Modelovanje procesa

Modelovanje, u terminološkom smislu, predstavlja prikaz realne ili virtuelne fizičko-hemijske, ekonomske, društvene ili ljudske pojave u alternativnom matematičkom ili fizičkom obliku, a sve u svrhu njenog daljeg izučavanja. Džordž Boks (*George Box*), slavni britanski statističar i tvorac modela vremenskih tokova, tvrdio je *da su svi modeli pogrešni, ali da su neki korisni*, što je velika istina koja se mora imati na umu kada se prave efikasni i delotvorni modela [1]. Suština procesa modelovanja podrazumeva identifikaciju sistema (S) koga treba modelovati, svrhu modela i način reprezentacije modela (M). Pri tome modelovanje predstavlja pokušaj verodostojne zamene sistema (S) odgovarajućim modelom (M) koji će pomoći u odgovorima na pitanja u vezi ponašanja realnog sistema [2], [3], [4], [5]. Procesom modelovanja zanemaruju se sporedne i manje važne odlike originalnog sistema, a naglašavaju se njegova bitna svojstva u svrhu efikasnije analize njegovog ponašanja. Preterano usložnjavanje modela predstavlja potencijalnu opasnost u procesu kreiranja.

Svrha kreiranja modela, kao preduslov za realizaciju postupka simulacije i analize, jeste detaljno proučavanje originala i poboljšanje njegove strukture i ponašanja, nezavisno da li original trenutno egzistira ili će biti realizovan u budućnosti. Procesom modelovanja korisnik unapređuje stepen razumevanja problema i stiče dodatni alat za manipulisanje događajima ili pojavama kojom bi se analizirao uticaj širokog spektra pretpostavki i inputa na ponašanja originala. Obzirom da se model kreira u svrhu simulacije procesa, to su pretpostavke pod kojima se vrši kreacija u funkciji ciljeva analize.

Koncept modela u okviru oblasti procesnog sistemskog inženjeringa sadrži niz elemenata ilustrovanih na slici 3.1.

Sistem (S) predstavljaju osnovne komponente unutar granica²² modela i njihove međusobne veze, uključujući primarne funkcionalne mehanizme u sistemu. U praksi modelovanja složenih hemijskih i energetskih postrojenja, sistem se



Slika 3.1. Sistemski okvir procesa modelovanja

²² Granice definišu nivo detalja koje se koriste pri razmatranju modela (model koji razmatra ponašanje individualne procesne jedinice sigurno ima drugačije granice od modela celog postrojenja). Granice sistema imaju hijerarhijski karakter obzirom na cilj modelovanja: granice sa manjim stepenom detalja mogu se aglomerisati na

često predstavlja kao skup podsistema (subsistema) [6]. Pri tome subsistemi predstavljaju sastavne delove sistema koje je u procesu modelovanja moguće tretirati kao zasebne celine, ali se u krajnjem modelu vrši njihovo ujedinjavanje u celovit sistem. U praksi subsistemi mogu biti delovi postrojenja u kojima se realizuje karakterističan deo procesa²³, deo postrojenja koji izvršava određeni zadatak (subsistemi za transport fluida), pa i same procesne jedinice, ako je cilj modela analiza njihovog rada. Komponente sistema predstavljaju osnovne gradivne jedinice sistema (ili subsistema) u kojima se ne javljaju interakcije između njihovih delova ili se te interakcije zanemaruju obzirom na cilj modelovanja.

Promenljive stanja sistema (x_{st}) označavaju stanje sistema u vremenu i prostoru. Ove promenljive se često povezuju sa količinom mase, energije i entropije u sistemu.

Inputi (u) predstavljaju promenljive povezane sa osobinama sistema i njihov izbor značajno utiče na ponašanje sistema. Inputi sistema predstavljaju promenljive sa unapred definisanim vrednostima (protoci, temperature, cena, vreme).

Outputi (y) su promenljive koje odražavaju unutrašnje osobine sistema, obično su povezane sa stanjima sistema i mogu biti: količina proizvoda, indikatori kvaliteta, željene temperature, efikasnosti ili druge značajne performanse.

Poremećaji (d) predstavljaju promenljive koje odražavaju one uticaje na sistem koje je obično nemoguće kontrolisati. Promenljive poremećaja su naprimer parametri okoline, promene u kvalitetu sirovina ili performanse procesa van ljudskog uticaja.

Parametri sistema (ps) se odnose se na promenljive koje su povezane sa konstantama, dimenzijama, fizičkim ili hemijskim osobinama komponenti unutar sistema i samo u nekim slučajevima mogu biti funkcije stanja sistema.

Na osnovu prethodne ilustracije moguće je definisati generičke modele svojstvene različitim problemima analize i optimizacije u okviru konceptualnog projektovanja složenih hemijskih i procesnih postrojenja²⁴. Model problema analize može se izraziti u formi: za poznate pro-

veći nivo detalja, a istovremeno putem dekompozicije granica većeg nivoa detalja mogu se spustiti na finije detalje.

²³ Naprimer, u proizvodnji natrijum tripolifostafa moguće je izvršiti generalnu podelu sistema na subsisteme za vlažni i suvi deo procesa proizvodnje. Takođe, u slučaju kogenerativnog postrojenja subsistemi su definisani obzirom na rutu u procesu proizvodnje: subsistem za proizvodnju električne energije, subsistem za toplifikaciju, subsistem za predgrevanje kondenzata, subsistem za pripremu napojne vode i proizvodnju tehnološke pare.

²⁴ Sistemi se smatraju stacionarnim, dok se vremenski promenljivo ili dinamičko ponašanje sistema ne razmatra.

menljive inputa (u), poremećaje (d) i promenljive parametre sistema (ps), uz konstantne vrednosti promenljivih x_{st} , potrebno je definisati promenljive outputa (y).

3.1.1. Klasifikacija modela

Prva klasifikacija modela se može izvršiti na osnovu stepena obuhvaćenosti osobina originala u modelu. Model koji u sebi sadrži sve karakteristike i osobenosti originala predstavlja *izomorfni model* originala koga reprezentuje. Obzirom na veliku složenost elemenata, u procesnim sistemima sačinjavanje izomornog modela nije, niti moguć, niti svrsishodan postupak. Zato se, u PSE-u, u cilju efikasnije realizacije, proces modelovanja realizuje putem *neizomornih (homomornih)* modela koji prikazuju samo najvažnije karakteristike objekta i procesa u sistemu. Kreiranje homomornih modela se bazira na pretpostavkama koje su rezultat iskustva, teorijskog znanja i inženjerskog iskustva putem kojih se model uprošćava uz očuvanje neophodnog stepena realističnosti [7].

Druga klasifikacija bazirana je na vrsti opisa putem kojih se original prevodi u model, pa je tako na jednoj strani grupa modela koja se bavi opisom isključivo preko matematičkog opisa putem simbola, numeričkih veza i izraza, matematički modeli, a na drugoj su modeli koji koriste sve druge načine opisa ili kvalitativni (generalisani) modeli. U slučaju kvalitativnih modela, model opisuje opšte kvalitativne karakteristike ispitivanog objekta i to putem tekstualnih opisa – verbalni ili deskriptivni modeli ili putem grafičkih prezentacija ili šema – grafičko-kvalitativni ili fizički modeli [8], [9].

Ipak, najprihvaćenija je opšta klasifikacija svih modela na četiri glavne kategorije:

- Fizički modeli,
- Šematski modeli,
- Verbalni modeli i
- Matematički modeli.

Fizički modeli su modeli koji liče na objekat ili gotov proizvod koji predstavljaju. Slikoviti fizički modeli su egzaktne ili jako slične replike modelovanog objekta, pa je prednost mnogih fizičkih modela u njihovom odnosu sa realnom pojavom.

Pored toga što liče na objekat koji predstavljaju, neki fizički modeli se ponašaju onako kako bi to činila njihova kopija. To dopušta da se izvrše eksperimenti na modelu da se utvrdi kako bi se on ponašao pod stvarnim radnim uslovima. Probni modeli koji se ponašaju na način koji je sličan realnim objektima koje predstavljaju, često se označavaju kao prototipovi modela i daleko su jeftiniji za stvaranje i testiranje od svoje stvarne kopije što se obilato koristi u

tehnologiji modelovanja. Fizički modeli ne moraju uvek izgledati identično kao objekat koji predstavljaju, ali su dovoljno njemu bliski da pruže neku informaciju.

U PSE-u fizički modeli predstavljaju neizostavan element pri analizi procesa i sistema. Grafički prikaz fizičkog modela realizuje se putem šema različitog oblika složenosti na osnovu kojih se može suditi o vrstama i načinu spajanja elemenata, kao i o redosledu pojedinih procesa. Najkompleksniji i najpotpuniji način prikazivanja fizičkog modela vrši se putem Tehnoloških šema (*Process Flow diagram – PFD*) gde je svaki element procesa prikazan u vidu uslovno opšteprihvaćenog standardnog oblika, dok su tehnološke veze prikazane linijama sa orijentisanim strelicama uz dodatne informacije. U slučaju Funkcionalnih (principijelnih) i Strukturnih šema, informacije o posebnim tipovima elemenata ne postoje, ali zato tehnološke veze u njima pokazuju pravac kretanja materijalnih i energetske tokova u sistemu. Funkcionalne šeme prikaz elemenata u sistemu baziraju na postojanju čvorova sa jasno ucrtanim tehnološkim vezama između njih putem kojih se omogućava prepoznavanje tipova i redosleda operacija u procesu proizvodnje. Kod Strukturnih šema prikaz svih elemenata se vrši u vidu blokova sa elementima njihovih tehnoloških veza. Za razliku od prethodne dve šeme, Operatorske šeme prezentuju fizičko-hemijsku suštinu tehnoloških procesa u sistemu gde se svaki element sistema prikazuje kao određeni tip tehnološkog operatora koji kvalitativno ili kvantitativno transformiše parametre fizičkih, materijalnih i energetske tokova.

Šematski modeli su apstraktniji od fizičkih modela. Iako imaju neku vizuelnu korespondenciju sa realnošću, oni jako malo liče na fizičku realnost koju predstavljaju. Grafici i dijagrami su šematski modeli koji pružaju slikovito predstavljanje matematičkih veza. Crtanje prave linije na grafiku ukazuje na matematičku linearnu vezu između dve promenljive, a kada se dve takve linije sretnu u jednoj tački na grafiku mogu da označe tačku preloma. Kružni dijagrami, box dijagrami i histogrami mogu modelovati neke realne situacije, ali realno ne sadrže fizičku sličnost sa bilo čim.

Nacrti, crteži ili skice su takođe oblici šematskih modela. To su slikoviti prikazi konceptualnih veza što znači da model oslikava koncept kakva je hronologija ili redosled u sistemu. Primeri za to su dijagram toka koji opisuje kompjuterski program ili dijagrami prvenstva u projektnom menadžmentu koji pokazuju redosled aktivnosti koji se moraju izvršiti da bi se postigao željeni rezultat.

Verbalni ili deskriptivni modeli koriste tehniku tekstualnih opisa originala ili njegovog apstraktnog oblika. Ovi modeli često pružaju scenario neophodan za definisanje problema,

obezbeđuju sve relevantne i neophodne informacije za rešavanje istog, putem preporuka ili izvodljivih alternativa. Informacije predstavljene u verbalnom modelu predstavljaju bazu za kreiranje matematičkih modela originala.

Matematički model realnog procesa je matematički opis koji kombinuje eksperimentalne podatke i utvrđuje odnose između procesnih promenljivih. Matematičko modelovanje je aktivnost u kojoj se kvalitativni i kvantitativni prikazi ili apstrakcije realnog procesa izvode pomoću matematičkih simbola. Za sistem jednačina se kaže da čini matematički model sistema ukoliko su jednačine formulisane tako da izražavaju zakone sistema i ako njihova rešenja reprezentuju neke aspekte ponašanja sistema. Tako su matematički modeli podskupovi modela gde je predstavljanje pojave "realnog sveta" u vidu matematičkih simbola ili logičkih relacija što kvantitativno opisuje procese. Mnogobrojni matematički modeli mogu se klasifikovati na nekoliko načina:

- **Linearni i nelinearni modeli.** Matematički modeli su obično sastavljeni od promenljivih koji su apstrakcije relevantnih količina u opisanim sistemima i operatora koje deluju na ove promenljive i koje mogu biti algebarski ili diferencijalni operatori, funkcije itd. Ako svi operatori u matematičkom modelu pokazuju linearnost, to dovodi da se matematički model definiše kao linearan. U suprotnom slučaju, model se smatra nelinearnim. Pitanje linearnosti i nelinearnosti je zavisno od konteksta, jer linearni modeli mogu imati nelinearne izraze u sebi. Naprimer, u statističkom linearnom modelu, pretpostavlja se da je veza između parametara linearna, ali može biti nelinearna u prediktorskim promenljivama. Slično, za diferencijalnu jednačinu se kaže da je linearna ako se može napisati sa linearnim diferencijalnim operatorima, ali može i dalje imati nelinearne izraze u sebi. U modelu matematičkog programiranja, kada su ciljne funkcije i ograničenja predstavljene potpuno linearnim jednačinama, model se posmatra kao linearan. Ako je jedna ili više ciljnih funkcija ili ograničenja predstavljen nelinearnom jednačinom, onda je model nelinearan. Nelinearnost, čak i u potpuno prostim sistemima se često povezuje sa pojavama kao što su neuređenost i ireverzibilnost. Iako postoje izuzeci, nelinearni sistemi i modeli izgledaju teži za izučavanje od linearnih. Opšti pristup nelinearnim problemima je linearizacija, ali to može biti problematično ako se uzimaju u obzir aspekti kao što je ireverzibilnost koji su jako vezani uz nelinearnost.
- **Mehanistički i empirijski modeli.** Mehanistički modeli su oni modeli koji su zasnovani na izučavanju mehanizmima i pojavama, dok empirijski modeli nastaju iz merenja

ulazno-izlaznih podataka za modelovani sistem putem eksperimenata, testiranja ili probnog rada sistema.

- **Deterministički i stohastički modeli.** Deterministički model je onaj u kome je svaki skup promenljivih stanja jednoznačno određen parametrima u modelu i skupom prethodnih stanja ovih promenljivih. Tako, deterministički modeli vrše isti rad za dati skup početnih uslova. Nasuprot tome, u stohastičkom ili slučajnom modelu, prisutna je slučajnost, a promenljive stanja nisu opisane jedinstvenim vrednostima, već uglavnom funkcijama verovatnoće.
- **Stacionarni i nestacionarni modeli.** Stacionarni modeli koriste se za opis sistema stacionarnog stanja gde su vrednosti ulaznih i izlaznih promenljivih konstantne, ali ne nužno i jednake jedne drugima. Budući da su promenljive konstantne, njihov izvod po vremenu je jednak nuli, drugim rečima one ne zavise o vremenu, pa stacionarni modeli ne uzimaju u obzir element vremena. Nestacionarni ili dinamički modeli, za razliku od stacionarnih, zavise o vremenu, pa su promene promenljivih u ovim modelima obično prikazane kao izvodi po vremenu, odnosno kao diferencijalne jednačine.
- **Kontinualni, diskretni i hibridni modeli.** Kontinualni modeli su oni u kojima su zavisne promenljive predstavljene kao funkcija vremena i prostora, a promene se ogledaju kroz kontinualne vremenske intervale. Diskretni (diskontinualni ili diskretizacioni) modeli ne uzimaju uvek u obzir funkciju vremena i prostora zavisnih promenljivih, već samo za neke određene diskretne vrednosti, pa tako obično koriste napredne metode vremena. Hibridni modeli su u suštini kontinualni modeli koji poseduju ponašanje diskretnih veličina.
- **Modeli sa raspodeljenim i neraspodeljenim parametrima.** Ako se pri opisivanju sistema mogu zanemariti prostorne varijacije promenljivih, tj. njihove vrednosti smatrati uniformnim po celoj zapremini sistema, rezultat je model sa neraspodeljenim ili uniformnim parametrima. Modeli sistema kod kojih su prisutne promene pojedinih promenljivih duž jedne ili više prostornih koordinata nazivaju se modeli sa raspodeljenim parametrima.
- **Deduktivni, induktivni i slobodni modeli.** Deduktivni model je logička struktura bazirana na teoriji. Induktivni modeli nastaju iz empirijskih saznanja i njihovih generalizacija. Slobodni ili plivajući modeli se ne baziraju niti na teoriji, niti na posmatranju, već samo na prizivanju očekivane strukture. Primena matematike u društvenim naukama van polja ekonomije je tako kritikovana za nedefinisane modele, dok je primena teorije katastrofe u nauci okarakterizovana kao slobodni model.

- **Modeli crne, bele i sive kutije.** U slučaju da je model sistema izveden samo putem deduktivnog pristupa, uz korišćenje fizičkih zakona i procenjenih vrednosti parametara, a na bazi fizičkih gabarita razmatranog procesa, matematički model se definiše kao beli model ili model bele kutije (*white-box* model). U slučaju da ne postoji adekvatno apriorno znanje o realnom procesu, model sistema se kreira na osnovu raspoložive merne informacije o ulazu i izlazu sistema, često bez adekvatnih informacija o internoj strukturi i internim relacijama u sistemu. Tako izveden model naziva se crni model ili model crne kutije (*black-box* model). Između ova dva granična slučaja nalazi se model u formi sive kutije (*gray-box* model) koji u sebe uključuje sve moguće raspoložive apriorne informacije o realnom procesu. To je rezultovalo u primeni odgovarajućih zakona u kojima će se pojaviti određeni broj nepoznatih parametara. Pri tome, ovakva informacija zavisi uglavnom od polja primene modela. Generalno, što je više veza među promenljivim modela poznato, to će model biti tačniji. Stoga je nekada korisno u model ugraditi selektivne informacije na temelju intuicije, iskustva, stručnog mišljenja ili uverljivosti matematičkog izraza. Praktično su svi modeli sistema negde između modela crne i bele kutije tako da je ovaj koncept koristan samo kao intuitivni vodič za odluku koji pristup uzeti. Problemi matematičkog modelovanja su često klasifikovani u modele crne ili bele kutije, prema tome koliko je neophodnih informacija dostupno u sistemu. Obično je poželjno koristiti što je moguće više neophodnih informacija da bi se sastavio što precizniji model. Tako se modeli bele kutije obično smatraju lakšim, jer kada se informacije koriste ispravno, tada se i model ispravno ponaša.

3.1.2. Jednačine matematičkog modela

U procesu modelovanja složenih hemijskih i energetskih postrojenja, kao i u procesu formiranja matematičkog modela koriste se tri vrste jednačina [8], [9], [10]:

- Bilansne jednačine;
- Konstitutivne jednačine i
- Jednačine ograničenja.

Bilansne jednačine izražavaju ukupnu ekstenzivnu strukturu modela procesa i mogu se hijerarhijski rastaviti na: akumulacijske, transportne (konvektivni i molekularni transport) i generičke jednačine. Bilansne jednačine u procesnom modelu su zasnovane na zakonima održanja mase i energije u ispitivanom sistemu i u slučaju stacionarnih sistema predstavljaju se skupom algebarskih jednačina.

Konstitutivne jednačine povezuju ekstenzivne veličine koje se sreću u bilansnim jednačinama sa intenzivnim karakteristikama veličina (npr. koncentracija, temperatura, pritisak). Konstitutivne jednačine se mogu klasifikovati na sledeće tri kategorije:

- Jednačine kretanja koje obično opisuju funkciju kretanja i sile i mogu biti jednačine koje opisuju molekularni transport i jednačine koje opisuju kretanje;
- Termodinamičke jednačine stanja koje predstavljaju veze između intenzivnih karakterističnih veličina (sastav, temperatura i pritisak) i izvedenih termodinamičkih veličina (npr. entalpija, gustina, viskozitet);
- Bilansne korelacije koje povezuju bilansne jednačine sa nekim korelacijama koje su opet u funkciji drugih promenljivih (npr. korelacija za rast pritiska ili korelacija za temperaturne profile).

Konstitutivne jednačine su obično algebarske, ali takođe mogu biti obične ili parcijalne diferencijalne (tipa ODE ili PDE).

Jednačine ograničenja mogu biti podeljene na:

- Jednačine sumirajućih ograničenja. To su jednačine kod kojih je vrednost jedne promenljive zavisna od vrednosti drugih promenljivih. Ove jednačine su geometrijske veze zasnovane na sumiranju vrednosti komponenti. Primer zatvorene jednačine je suma masenih ili molskih udela svih hemijskih komponenti koje čine dati sistem.
- Ravnotežne jednačine. Ravnoteža je definisana kao ograničeno stanje u kome je neto razmena materije i energije između sistema i njegove okoline u odnosu na sve nezavisne koordinate u sistemu jednaka nuli. Dobro je poznato da je ovaj uslov ispunjen kada je Gibsova energija u globalnom minimumu.
- Jednačine graničnih ograničenja. Ove jednačine se dele na: jednačine heterogenih graničnih ograničenja i jednačine homogenih graničnih ograničenja. Dok heterogena granična ograničenja opisuju transfer materije između granica, homogena opisuju limitirajuće uslove unutar granica. Heterogena granična ograničenja aproksimiraju bilansne jednačine oko međufaznih granica. Homogena granična ograničenja se javljaju kao posledica simetrije ili konačnosti. Da bi se usaglasio broj promenljivih sa brojem relacija, homogena ograničenja se uvek zamenjuju heterogenim graničnim ograničenjima.
- Jednačine matematičkih ograničenja. Koriste se u oblasti upravljanja i optimizacije. Upravljačke jednačine su jednačine fizičkih ograničenja kada su fizičke vrednosti specifi-

rane referentnim veličinama. Optimizacijom se određuje minimum ili maksimum date ciljne funkcije u odnosu na ograničenja u određenim veličinama procesa.

Granične jednačine su obično algebarske.

3.1.3. Metodologije modelovanja

Praksa modelovanja uključuje širok spektar zadataka, znanja i veština potrebnih za stvaranje adekvatnog modela sistema koji se ispituje. Mnogi zadaci se često i obično ponavljaju usled raznovrsnih aktivnosti testiranja ili verifikacije modela koji se odigravaju kroz ciklus razvoja modela [5].

Postupak modelovanja započinje formulacijom problema i definisanjem ciljeva modelovanja [5] pri čemu posebnu pažnju treba obratiti na:

- upotrebnu vrednost modela u odnosu na ciljeve definisane u postupku analize procesa,
- polje primene modela,
- predviđenu netačnost modela koja se može tolerisati u procesu primene modela ili u okviru procesa donošenja odluka,
- vlasnička prava nad modelom i odgovornost za njegovo održavanje,
- vremenski okvir za razvoj modela,
- prihvatljive granice u kojima se kreće cena izgradnje modela,
- okolnosti koje dovode do prekida razvoja modela.

U ovoj fazi modelovanja posmatraju se opšti aspekti koji determinišu aktivnost modelovanja i utvrđuju značajnije karakteristike potrebnog modela.

Konceptualizacija modela podrazumeva razmatranje realne pojave koja se modeluje i donošenje odluke koji aspekti te realnosti se mogu povezati sa budućim modelom. Aktivnost konceptualizacije modela uključuje:

- definisanje granica izučavanog sistema,
- jasno identifikovanje subsystema, njihovih granica i interakcija sa drugim subsystemima,
- definisanje vremena, količine i nivoa detalja koji se na početku modelovanja uzimaju u obzir,
- određivanje uticaja prostornih promena stanja,
- definisanje ograničenja u sistemu.

Rezultati konceptualizacije modela uključuju:

- skice komponenti modela i njihovih međusobnih veza,
- jasno definisane inpute i outpute čitavog sistema i identifikaciju ključnih poremećaja koji se moraju uzeti u obzir u narednim fazama modelovanja,
- identifikaciju dominantnih mehanizama (prenos toplote, mase i momenta, ponašanje faza i njihova primena na određene sisteme ili subsisteme) u modelu,
- jasno definisane procedure razvoja modela kroz postupke masenog energetskog i eksergetskog bilansiranja,
- jasno definisan skup organizovanih i dokumentovanih pretpostavki koje opisuju postupak konceptualizacije modela, što je ključno u reviziji koncepata modela tokom aktivnosti validacije.

Kreiranje neophodne baze podataka o sistemu predstavlja neophodan uslov za uspešnu realizaciju kako kreiranja, tako i validacije modela. U slučaju modelovanja procesnih i energetskih sistema baze podataka treba da sadrže:

- termofizičke osobine svih materijalnih tokova u sistemu, uključujući konstante i funkcije stanja za koje se vrši ispitivanje njihove zavisnosti od temperature, pritiska i sastava;
- prediktivne funkcije tih osobina, bilo da su oni direktno dostupni ili se dobijaju na bazi istraživanja u laboratoriji i postrojenju;
- podatke o faznim ravnotežama, kinetičke konstante, koeficijente prenosa mase i toplote;
- specifikaciju opreme u smislu njene veličine i detalja vezanih za funkcionisanje opreme;
- upravljačke karakteristike opreme.

Konstrukcija modela²⁵ vrši se prevođenjem konceptualnog modela u odgovarajuću analitičku ili numeričku formu zavisno od metode koja se koristi za dobijanje rešenja. U slučaju projektovanja SHE postrojenja model se uglavnom transformiše u matematičku formu pogodnu za upotrebu u spreadsheet (tabelarnim) aplikacijama, u komercijalnih simulacionim paketima, u alatima kompjuterske dinamike fluida (CFD) ili za direktno prevođenje u neki od programskih jezika.

Rešavanje modela (predstavljenog u matematičkoj formi) uglavnom se vrši putem primene neke od numeričkih metoda. Izbor numeričke metode je u funkciji seta matematičkih jednačina proisteklih iz faze konstrukcije modela i u slučaju simulacije stacionarnih procesa taj set

²⁵ Konstrukcija modela može se definisati i kao numerička integracija modela ili kreiranje numeričkog modela.

predstavlja sistem algebarskih jednačina (AE) koje mogu biti linearne i (u većini slučajeva) nelinearne po prirodi. Procesu rešavanja modela prethodi analiza skupa modelskih jednačina u cilju generisanja uspešne strategije rešavanja. Postoji nekoliko faktora koji se moraju obezbediti u cilju generisanja rešenja, a najznačajniji su analiza stepena slobode²⁶, konzistentnost inicijalnih promenljivih i pravilno definisanje opsega promenljivih. Faza rešavanja modela u predloženoj metodologiji modelovanja prethodi postupku simulacije.

Korak verifikacije modela [11] predstavlja proveru implementacije prethodno definisanih jednačina modela u programski kod simulatora i ova faza je pre svega usmerena na otklanjanje grešaka, kako u postavci jednačina, tako u kompjuterskom kodu modela.

Validacija modela je posebna aktivnost u odnosu na verifikaciju, ali jako povezana sa njom. Model koji ne prođe test verifikacije može imati ozbiljne probleme u validaciji. Validacija se odnosi na pitanje da li je model verodostojan prikaz aktuelnog sistema, a u pružanju odgovora na ovo pitanje uzimaju se brojni faktori uticaja:

- tačnost usvojenih pretpostavki u procesu konceptualizacije modela, kao i njihova usklađenost sa ciljevima modelovanja;
- očekivani opsezi vrednosti inputa modela i poremećaja pri kojima model deluje adekvatno u odnosu na stvarni sistem;
- outputi modela i njihova veza sa stvarnim sistemom;
- vrednosti internih parametara modela, njihova preciznost, prihvatljive ili najbolje procenjene vrednosti i osetljivost outputa u odnosu na njihove promene;
- definisanje pojma "verodostojan prikaz" za prolaz testa validacije i tolerancije greške između outputa modela i sistema

Pre validacije modela, često se vrši set parametarskih analiza modela kojima se istražuje:

- osetljivost outputa modela na promene inputa,
- osetljivost outputa modela na poremećaje i
- osetljivost outputa modela na promenu parametara modela.

Ovakvi testovi osetljivosti daju ključne informacije o uticaju promena na predviđanja modela iz različitih izvora. Ova aktivnost pomaže u otkrivanju najosetljivijih parametara sistema u

²⁶ videti poglavlje 3.3

pogledu promena outputa. Ove informacije mogu se preneti na procenu parametara koja se koristi kao pomoć pri validaciji modela.

Ukoliko je validacija loša, izvodi se procena osnovnih parametara u postojećem modelu i vrši se podešavanje modela, ponovnim razmatranjem detalja u vezi sa konceptom i strukturom modela, te pažljivom proverom skupa uzetih pretpostavki u konceptualizaciji modela.

Dalji razvoj i održavanje modela je u funkciji korišćenja uspešno kreiranog modela za potrebe narednih istraživanja. U industrijskoj praksi u gotovo 75 % slučajeva postoji značajan gubitak informacija i ekspertize kada ljudi napuste organizaciju usled neadekvatnog arhiviranja modela, njegovih podataka, pretpostavki i informacija o verifikaciji i validaciji. Opasnost od ponavljanja prethodnog posla je jako velika (u 60 % slučajeva). Sve to vodi ka potrebi za organizovanjem, dokumentovanjem i efikasnim komentarisanjem u vezi razvoja i upotrebe modela. Mnogi pod pritiskom vremena i novca skreću s ovog pravca, a često alati modelovanja teško omogućavaju pribavljanje ključnih informacija i znanja koje se može posebno koristiti od strane onih koji rade na razvoju i operativaca.

3.2. Simulacija procesa

Postupak simulacije hemijskih i energetskih postrojenja mogao bi se okarakterisati kao proces rešavanja matematičkog modela sistema definisane topologije u cilju kvantitativnog sprejanja izlazno/ulaznih veličina sa parametrima i karakteristikama posebnih elemenata²⁷. Simulacijom takvih sistema proverava se konzistentnost materijalnog i energetskog bilansa procesnih jedinica, sistema i celog sistema definisanih u fazi sinteze procesa, a takođe i proračun dimenzija i cene opreme u postrojenju. U isto vreme promenom parametara tehnoloških veza između elemenata i podsistema (variranjem vrednosti tehnoloških i konstruktivnih parametara), može se vršiti evaluacija energetskih, ekonomskih, pa i ekoloških indikatora i dobija se prava predstava o funkcionisanju sistema. Koristi od upotrebe simulatora u fazi projektovanja su:

- ušteda novca kroz unapređeno projektovanje,
- ušteda ljudske snage putem unapređene efikasnosti i produktivnosti,

²⁷ Postupak simulacije nije ograničen samo na polje analize u fazi konceptualnog projektovanja, već se može koristiti i u drugim fazama projektovanja i funkcionisanja sistema, tj. u detaljnom inženjeringu kada se zahteva detaljna tehnološka šema procesa i specifikacija procesnih jedinica, u toku proizvodnog procesa u cilju evaluacije performanse postrojenja, poređenja sa projektnim specifikacijama i unapređenja efikasnosti procesa, u analizi promene operativnih uslova i identifikaciji zastoja u radu.

- značajna redukcija vremena koje se troši na inženjerske proračune,
- konzistentnost podataka i korišćenih tehnika pri projektovanju i
- poboljšana i brža komunikacija između procesnih inženjera u svim delovima postrojenja.

3.2.1. Strategije rešavanja simulacionog problema

Postupak simulacije procesa počinje opisom simulacionog modela u vidu šeme koja uključuje identifikaciju sastavnih komponenti sistema i jedinične operacije koje te komponente izvršavaju, odnosno veze koje međusobno ostvaruju. Obzirom na složeni karakter takvih šema, uobičajena praksa u postupku simulacije je dekompozicija šeme na manje delove putem kojih je moguće odrediti sled proračuna pojedinačnih modula procesnih jedinica i definisanje recirkulacionih (povratnih) tokova. Dekompozicija je obavezna u slučaju sekvencijalno-modularne strategije simuliranja. Dekompozicijom se mogu definisati i manji blokovi koji sadrže dva ili više modula i čije rešavanje može biti nezavisno od uticaja promenljivih u preostalim modulima.

Nakon dekompozicije, pristupa se analizi problema konvergencije u numeričkoj proceduri obzirom da su numerički modeli *flowsheeting*-a [12] u većini slučajeva definisani setom nelinearnih algebarskih jednačina. Pri tome posebnu pažnju treba obratiti na pravilno određivanje inicijalnih vrednosti nepoznatih promenljivih.

U slučaju kada za određeni problem simulacije procesa u jednačinama ne postoje sve neophodne informacije, uvodi se koncept integrisanog sistema simulacije, putem koga se uz pomoć dodatnih računskih alata pronalaze te informacije.

U sledećoj fazi vrši se odabir strategije rešavanja problema i to izborom između:

- **Sekvencijalno-Modularne strategije**, gde se funkcionalne jednačine predstavljaju skupom modula definisanih topologijom procesa [13]. Drugim rečima, izlazne veličine jednog modula predstavljaju ulazne veličine drugog i tako redom do krajnjeg rešenja. Osnovni gradivni element simulacionog softvera baziranog na modularnoj strategiji je model procesne jedinice, dobijen korišćenjem bilansnih, konstitutivnih i graničnih jednačina. Iterativne procedure u okviru ove strategije javljaju se na tri nivoa: u slučaju proračuna termodinamičkih jednačina stanja, pri proračunu parametara procesnih jedinica i pri konvergenciji povratnih tokova u sistemu. Sekvencijalno-modularna strategija je vrlo efikasan pristup u slučaju da su u okviru simulacionog zadatka poznati svi inputi u procesne jedinice, kao i parametri tih jedinica, kakav je slučaj u postrojenju TE-TO Zrenjanin.

- **Simultane strategije** – Pristupa generalisanih jednačina (*equation-oriented* – EO), u kome se nepoznate veličine dobijaju iz sistema jednačina celokupnog ispitivanog sistema. Rešavanje ovih jednačina vrši se simultano.

Oblast primene postupka simulacije u okviru konceptualne faze može se sagledati kroz formulaciju nekoliko karakteristična zadataka. Prvi zadatak bi se mogao definisati kao *Simulacija parametara sistema*. Naime, na osnovu prethodno izvedene šeme toka i uz pomoć svih neophodnih ulaznih parametara (vezanih za sirovinску bazu proizvoda i potrebne energetske tokove) analizira se da li se postojećim proizvodnim procesom može dobiti proizvod odgovarajućeg kvaliteta i kvantiteta. U slučaju neispunjenja traženih zahteva vrši se promena ulaznih parametara (pri tome komponente šeme toka zadržavaju svoje osobine). Ukoliko se simulacijom procesa utvrde zadovoljavajuće karakteristike dobijenog proizvoda, formira se novo alternativno rešenje na kome se prethodni proces simulacije ponavlja. U slučaju da se pored promene ulaznih tokova vrši i rekonpozicija šeme toka, simulacijom se realizuje zadatak projektovanja šeme toka.

Drugi zadatak bi se mogao definisati kao *Simulacija komponenti sistema*. U ovom slučaju na postojećoj šemi toka ispituje se mogućnost promene karakteristika pojedinih komponenti (npr. povećanje ili smanjenje površine jednog od razmenjivača toplote) koje, pak, uzrokuju promenu parametara ulaznih tokova u sistem. Kao logična posledica zadatka nameće se rešenje ili u obliku eksperimentalne provere, ili u obliku simulacije novostvorenog procesa proizvodnje. Klasifikacija ovog tipa simulacije se može svrstati u oblast Specifikacije opreme. Matematički model ovog tipa zadatka definisan je sistemom nelinearnih jednačina.

Treći zadatak bi se mogao predstaviti kao sinteza prethodna dva zadatka, drugim rečima on bi u sebi sadržao problem izvodljivosti procesa u slučaju promene kvantitativnih i kvalitativnih parametara komponenti šeme toka. U tom slučaju obično se prvo pristupa rešavanju kvalitativnih karakteristika šeme toka, a zatim se vrši razmatranje različitih scenarija kvantitativnih karakteristika komponenti dobijenog rešenja.

3.2.2. Pregled softverskih paketa korišćenih u procesu flowsheetinga

U okviru ove teze za proces simulacije korišćena su dva softverska paketa [EES](#) i [Microsoft Excel](#).

EES je akronim za *Engineering Equation Solver* što u slobodnom prevodu znači "paket za rešavanje inženjerskih jednačina." Osnovna funkcija koju vrši EES je numeričko rešavanje skupa algebarskih jednačina, mada se u praksi može koristiti i za: rešavanje diferencijalnih i integralnih jednačina, postupak optimizacije, vršenje analize neodređenosti i linearne i nelinearne regresije i crtanje grafika kvalitetnog izgleda. EES verzije su razvijene za sve Meko-tošove kompjutere (uključujući PowerMac) i za personalne računare kompatibilne sa svim Windows-ovim operativnim sistemima.

Postoje dve bitne razlike EES-a i drugih programa za rešavanje jednačina. Najpre, EES dopušta da se jednačine unose po bilo kom redosledu sa lociranjem nepoznatih promenljivih bilo gde u jednačinama i automatski preuređuje jednačine radi efikasnog rešavanja. Drugo, EES obezbeđuje mnoge ugrađene matematičke i termofizičke funkcije veličina korisne za inženjerske proračune. Iako je datoteka funkcija matematičkih i termofizičkih osobina u EES-u ekstenzivna, EES dopušta unošenje sopstvenih funkcionalnih veza ili kreiranjem numeričkog koda u sopstvenom editoru (na sličan način kao u Pascalu ili Fortranu) ili dinamičkim povezivanjem sa funkcijama kreiranim u složenijim programskim jezicima na način kako se Pascal, C ili FORTRAN mogu dinamički povezati sa EES-om. EES poseduje grafički interfejs koji omogućava 2D vizuelizaciju proračuna i kreiranje garfičkih dijagrama.

U okviru ove teze EES solver je korišćen za simulaciju postrojenja u Prahovu i za simulaciju podsistema u okviru postrojenja u Zrenjaninu. U oba slučaja korišćena je simultana simulaciona strategija rešavanja.

Za slučaj simulacije rada binarnih geotermalnih postrojenja korišćen je spreadsheet softverski paket MS Excel uz korišćenje add-ins komponenti Solver (za numeričko rešavanje nelinearnih algebarskih jednačina) i RefProp baze podataka za termodinamičke parametre radnih fluida i okoline. U ovom slučaju korišćena je takođe simultana simulaciona strategija rešavanja.

U slučaju postrojenja TE-TO Zrenjanin u radu je preuređen postojeći spreadsheet program koji je koristio dodatak PWS za proračun stanja vode i pare. Postojeći softver je realizovan putem sekvencijalno-modularne simulacione strategije i u softver je integrisan podprogram za analizu rada kotlovsog postrojenja.

3.3. Proračun analize stepena slobode numeričkih modela u fazi konceptualnog projektovanja postrojenja

Analiza stepena slobode (DOF analiza, *Degrees of Freedom Analysis*) predstavlja nezaobilazan zadatak u postupku kreiranja numeričkom modela stacionarnih energetskih sistema. Ovim postupkom utvrđuje se postojanost dovoljnog broja informacija za rešavanje skupa jednačina definisanih matematičkim modelom.

Postupak DOF-a, najobimnije predstavljen u [14], [15], [16], [17] se bazira na definisanju broja promenljivih od kojih se sastoje materijalni tokovi u energetskom sistemu i broja nezavisnih relacija među njima. Ovako široki spektar promenljivih često je uzrokovao dvostruko računanje ili izostavljanje pojedinih jednačina matematičkog modela, naročito u slučaju komplikovanih procesa [18].

Postupak DOF-a energetskog sistema može se podeliti u nekoliko faza [19]:

- Identifikacija promenljivih kojim se matematički opisuju ulazno/izlazni materijalni tokovi u procesnim jedinicama, tj. promenljivih kojim se matematički opisuju transformacije materijalnih tokova gde procesne jedinice predstavljaju sastavne elemente sistema.
- Identifikacija svih ograničenja u vidu jednačina, odnosno nejednačina koje egzistiraju u matematičkom modelu procesnih jedinica i koje predstavljaju funkcije prethodno definisanih promenljivih.
- Određivanje tačnog broja nezavisnih ograničenja za svaku procesnu jedinicu.
- Izračunavanje broja stepena slobode za svaku procesnu jedinicu.
- Izračunavanje broja stepeni slobode sistema uz uključivanje tehnoloških veza (pomoćni i povratni tokovi) između procesnih jedinica.

Broj stepeni slobode procesne jedinice (ili sistema), N_d , predstavlja razliku između broja promenljivih, N_v , (3.1), čije vrednosti moraju biti poznate u definisanom matematičkom modelu (u daljem tekstu projektne promenljive) i broja nezavisnih jednačina kojom je procesna jedinica matematički opisana, N_r .

$$N_d = N_v - N_r \quad (3.1)$$

Pri tome, jednačine su nezavisne ukoliko se bilo koja od njih ne može dobiti sabiranjem i oduzimanjem kombinacija drugih.

Sa matematičke tačke gledišta, pri analizi stepena slobode mogući su sledeći slučajevi:

- $N_d = 0$: broj nezavisnih jednačina, N_r , jednak je broju potrebnih promenljivih N_v . U ovom slučaju matematički model predstavlja rešiv sistem jednačina; postoji jedinstveno rešenje problema i radi se o simulacionom problemu, odnosno optimizacija ispitivanog sistema nije moguća.
- $N_d < 0$: broj nezavisnih jednačina, N_r , je veći od broja potrebnih promenljivih N_v . Element nije dovoljno definisan, pa rešavanje matematičkog modela nije moguće (sistem jednačina nema rešenje ili ima trivijalno rešenje). U tom slučaju otvara se mogućnost za optimizaciju ispitivanog sistema.
- $N_d > 0$: broj nezavisnih jednačina, N_r , je manji od broja od broja potrebnih promenljivih N_v . Rešavanjem jednačina matematičkog modela dobija se beskonačno mnogo rešenja. Da bi se našlo jedinstveno rešenje "višku" potrebnih promenljivih N_v , pripisuju se proizvoljne broječne vrednosti (takve promenljive postaju konstante u matematičkom modelu), pa zadatak dobija formu $N_d = 0$.

3.3.1. Stepni slobode materijalnog toka

Stepni slobode materijalnog toka mogu biti definisani putem niza intenzivnih i ekstenzivnih veličina stanja kao što su: temperatura, pritisak, ukupni protok, molski i fazni udeli, ukupna entalpija, fazna entalpija i tako dalje. Shodno Gibsovom pravilu faza, uračunavajući samo intenzivne veličine stanja, broj stepeni slobode se može izraziti u obliku, [\(3.2\)](#):

$$N_d = N_C - N_{PHS} + 2 \quad (3.2)$$

gde je:

N_C - broj hemijskih komponenata u materijalnom toku

N_{PHS} - broj faza u materijalnom toku

Obzirom da se matematički modeli sistema baziraju na ekstenzivnim veličinama stanja, za potpunu definiciju stepena slobode materijalnog tok dodaje se i promenljiva protoka (mase-nog ili molskog), pa se jednačina [\(3.2\)](#) se reformuliše u [\(3.3\)](#) oblika:

$$N_d = N_C - N_{PHS} + 3 \quad (3.3)$$

U slučaju jednofaznog materijalnog toka jednačina [\(3.2\)](#) dobija oblik, [\(3.4\)](#):

$$N_d = N_C - 1 + 3 = N_C + 2 \quad (3.4)$$

Broj projektnih promenljivih kojim se materijalni tok definiše čine:

- pritisak,
- temperatura,

- protok,
- maseni udeo komponenti u toku (broj ovih promenljivih je $N_C - 1$).

Analiza višefaznog procesnog toka i sa N_C komponenti podeljenim na N_{PHS} faza od kojih je svaka faza k sastava $x_{k,i}$ u posmatranom toku i , odnosno $x_{k,j}$ u svakoj hemijskoj komponenti j , dovodi do identičnog rezultata u odnosu na analizu monofaznog toka datim jednačinom (3.4), kako je prikazano u tabeli 3.1. Objašnjenje je da je sastav svake faze u ravnoteži posredno određen vrednostima ravnotežnih konstanti koje su funkcije sastava, pritiska i temperature. Sastavi faza u komponentama su fiksni zbog toga što su hemijske ravnotežne konstante poznate, a dostupne su preko hemijskog potencijala, temperaturnih i pritisnih funkcija, dok su temperature i pritisci svih faza u komponenti takođe jednaki. Broj stepeni slobode višefaznog toka se može generalizovati na tokove kod kojih se odigravaju ravnotežne reakcije.

Tabela 3.1. Analiza stepena slobode višefaznog toka

	Jednačine	N_v	N_r
Bilans faza i hemijskih komponenti u materijalnom toku i	$G_i = \sum_{k=1}^{N_{PHS}} G_k ; G_i = \sum_{j=1}^{N_C} G_j$	N_{PHS}	2
Bilans faza i masenih udela u hemijskoj komponenti j	$G_j = \sum_{k=1}^{N_{PHS}} x_{k,j} G_k ; \sum_{k=1}^{N_{PHS}} x_{k,j} = 1$	$N_{PHS} \cdot N_C$	$N_C - 1, N_{PHS} - 1$
Konstantna temperatura faza	$T_1 = T_2 = \dots = T_{N_{PHS}}$	N_{PHS}	$N_{PHS} - 1$
Konstantni pritisak faza	$p_1 = p_2 = \dots = p_{N_{PHS}}$	N_{PHS}	$N_{PHS} - 1$
Fazna ravnoteža	$\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{N_{PHS}}$	N_C	$(N_{PHS} - 1) \cdot N_C$
	$N_d = N_v - N_r = N_C + 2$	$N_{PHS} \cdot N_C + 3 \cdot N_{PHS} + N_C$	$N_{PHS} \cdot N_C + 3 \cdot N_{PHS} - 2$

3.3.2. Analiza stepena slobode karakterističnih procesnih jedinica

U slučaju procesne jedinice date na slici 3.2 ukupan broj promenljivih za sve tokove, (3.5), koje ulaze ili napuštaju granice procesne jedinice je:

$$N_v = N_s \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_W + N_{CONST} \quad (3.5)$$

gde je:

N_s ukupan broj tokova,

N_Q broj promenljivih u vezi sa prenosom toplote između procesne jedinice i okoline,

N_w broj promenljivih u vezi sa vršenjem rada između procesne jedinice i okoline,

N_{CONST} broj promenljivih povezanih sa transformacijom materijalnih tokova u procesnoj jedinici: kinetičke konstante, konstante ravnoteže, recirkulacioni odnosi, parametri opreme.

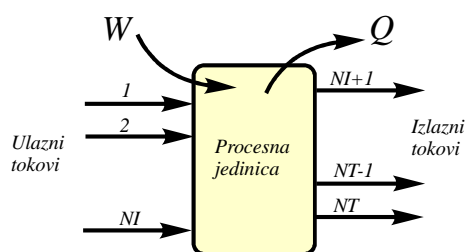
Ovaj izraz važi za procesnu jedinicu u kojoj svi tokovi sadrže isti broj hemijskih komponenti. U slučaju da ulazni/izlazni tokovi procesne jedinice sadrže različit broj hemijskih komponenti prethodni izraz (3.5) dobija modifikovani oblik, (3.6):

$$N_v = \sum_{N_C=1}^{N_{C,max}} N_{S,N_C} \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_w + N_{CONST} \quad (3.6)$$

gde je:

N_{S,N_C} broj materijalnih tokova procesne jedinice sa brojem hemijskih komponenti N_C ,

$N_{C,max}$ maksimalan broj hemijskih komponenti u materijalnom toku procesne jedinice koji nije nužno jednak ukupnom broju hemijskih komponenti u procesnoj jedinici.



Slika 3.2 Procesna jedinica sa svojim ulaznim i izlaznim tokovima

Jednačine kojim se definiše broj ograničenja procesne jedinice uključuju:

1. Materijalne bilanse u procesnoj jedinici

Maseni bilans jednokomponentnih materijalnih tokova u procesnoj jedinici, (3.7), u kojoj ne dolazi do hemijske reakcije glasi:

$$\sum_{i=1}^{NI} G_i = \sum_{i=NI+1}^{NT} G_i \quad (3.7)$$

Maseni bilans jednokomponentnih materijalnih tokova u procesnoj jedinici, (3.8), u kojoj se odvija hemijska reakcija piše se kao:

$$\sum_{i=1}^{NI} G_i + \sum_{i=1}^{NI} R_{kin,i} \left[\sum_{j=1}^{NC} \nu_{j,i} \right] = \sum_{i=NI+1}^{NT} G_i \quad (3.8)$$

Maseni bilans višekomponentnih materijalnih tokova u procesnoj jedinici, (3.9), u kojoj komponente međusobno ne reaguju je:

$$\sum_{i=1}^{NI} G_i x_{j,i} = \sum_{i=NI+1}^{NT} G_i x_{j,i} \quad (j=1,2,\dots,NC) \quad (3.9)$$

Maseni bilans višekomponentnih materijalnih tokova u procesnoj jedinici, (3.10), u kojoj komponente međusobno reaguju dat je izrazom:

$$\sum_{i=1}^{NI} G_i x_{j,i} + \sum_{l=1}^{NR} v_{j,l} R_{kin,l} = \sum_{i=NI+1}^{NT} G_i x_{j,i} \quad (j=1,2,\dots,NC) \quad (3.10)$$

gde je:

NC ukupan broj hemijskih komponenti,

NI broj ulaznih materijalnih tokova,

NR broj hemijskih reakcija,

NT ukupan broj materijalnih tokova.

Za slučaj procesa bez hemijske reakcije moguće je napisati najviše NC nezavisnih materijalnih bilansa, pri čemu je NC broj komponenti koje su uključene u proces.

2. Energetske bilanse u procesnoj jedinici

Energetski bilans sistema, (3.11), glasi:

$$\sum_{i=1}^{NI} G_i h_i + Q_n - W_n = \sum_{i=NI+1}^{NT} G_i h_i \quad (3.11)$$

Ovim bilansom definišu se projektne promenljive koje su funkcije pritiska i temperature.

3. Ograničenja bazirana na ravnotežnim relacijama i funkcijama stanja

Ravnotežna raspodela gas-tečnost, (3.12):

$$x_{j,gp} = K_j x_{j,lp} \quad (j=1,2,\dots,NC) \quad (3.12)$$

Ravnotežni koeficijent isparavanja, (3.13):

$$K_j = K(T_i, p_i, x_{j,i}) \quad (i=1,2,\dots,NT; j=1,2,\dots,NC) \quad (3.13)$$

Funkcije fizičkih osobina, (3.14):

$$h_i = h(T_i, p_i, x_{j,i}); s_i = s(T_i, p_i, x_{j,i}) \quad (i=1,2,\dots,NT; j=1,2,\dots,NC) \quad (3.14)$$

gde je:

NC broj hemijskih komponenti u materijalnom toku,

U grupu ovih ograničenja mogu se svrstati i ona koja nisu uslovljena karakterom samog procesa, a koja omogućuju da je vrednost jedne projektne promenljive direktno zavisna od vred-

nosti drugih promenljivih. Naprimera, ako su maseni udeli tri komponente toka označeni sa x_A , x_B , i x_C , onda je odnos između ovih promenljivih, (3.15):

$$x_A + x_B + x_C = 1, \quad (3.15)$$

pa je dovoljno poznavati masene udele dve komponente, jer će maseni udeo treće komponente u toku direktno zavisiti od ova dva data masena udela. Opšti oblik ovog ograničenja, (3.16), je:

$$\sum_{i=1}^{N_I} x_{j,i} = 1.0 \quad (j = 1, 2, \dots, N_C) \quad (3.16)$$

4. Specifična ograničenja procesa.

Poseban vid ograničenja koji je uslovljen karakterom procesa i kojim se formuliše zavisnost između dve ili više projektnih promenljivih. Naprimera, ako u kondenzator ulazi strujni tok masenog protoka G_1 , a iz kondenzatora izlazi strujni tok masenog protoka G_2 , koji u sebi treba da sadrži 40% ulaznog strujnog toka, onda je jednačina specifičnog ograničenja:

$$G_2 = 0.4 \cdot G_1.$$

Opšta oblika jednačina specifičnih ograničenja, (3.17), može se predstaviti u obliku:

$$\Omega_q = \Omega(\Omega_r) \quad (3.17)$$

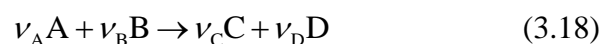
gde je:

Ω_q q -ta promenljiva sistema

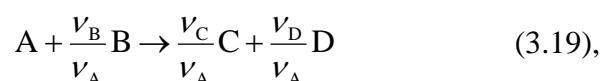
Ω_r r -ta promenljiva sistema.

5. Stehiometrijske odnose.

Ukoliko dođe do hemijskih reakcija u sistemu, stehiometrijske jednačine reakcija obezbeđuju veze između količina utrošenih reaktanata i generisanih proizvoda, (3.18). U slučaju hemijske reakcije opšteg oblika:



koja se može zapisati po broju molova reaktanta A, (3.19), tako da važi:



trenutne količine ostalih učesnika reakcije u reakcionom sistemu mogu se izraziti preko limitirajućeg reaktanta A, (3.20), (3.21), (3.22), (3.23), putem sledećih relacija:

$$n_A = n_{A,init}(1 - X_A) \quad (3.20)$$

$$n_B = n_{B,init} - \frac{V_B}{V_A} n_{A,init} X_A \quad (3.21)$$

$$n_C = n_{C,init} + \frac{V_C}{V_A} n_{A,init} X_A \quad (3.22)$$

$$n_D = n_{D,init} + \frac{V_D}{V_A} n_{A,init} X_A \quad (3.23)$$

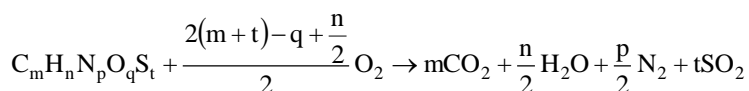
gde je:

n_p trenutna količina učesnika reakcije p u reakcionom sistemu ($p = A, B, C, D$),

$n_{p,init}$ početna količina učesnika reakcije p u reakcionom sistemu ($p = A, B, C, D$),

X_A stepen konverzije limitirajućeg reaktanta A u datom trenutku reakcije (domašaj, do-met ili stepen napredovanja reakcije).

U slučaju reakcije sagorevanja opšteg oblika:



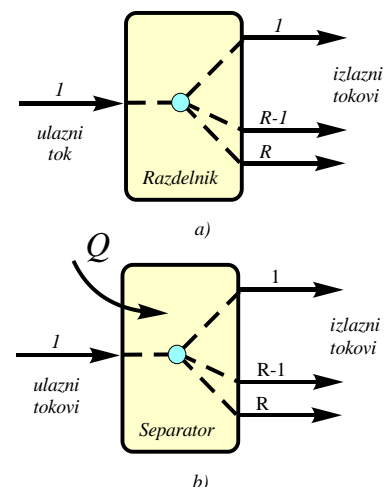
gde su koeficijenti izraženi preko masenog udela elementa u gorivu: $m=x_C/12$, $n=x_H/1$, $q=x_O/16$, $p=x_N/14$, $t=x_S/32$, količine produkata potpunog sagorevanja goriva i stehiometrijskog kiseonika se mogu izraziti u funkciji sastava goriva. U slučaju da je kiseonik prisutan u višku u odnosu na gorivo, njegova količina je određena i koeficijentom viška vazduha u ložištu.

3.3.3. Određivanje stepena slobode karakterističnih elemenata u HTE sistemima

Stepeni slobode procesnih jedinica za separaciju.

U okviru procesa separacije mogu se definisati dva slučaja, [slika 3.3](#):

1. Slučaj kada bez razmene toplote i rada sa okolinom procesna jedinica vrši separiranje ulaznog toka na više izlaznih tokova – procesna jedinica Razdelnik;
2. Slučaj kada usled razmene toplote i/ili rada sa okolinom procesna jedinica vrši separiranje ulaznog toka na više izlaznih tokova – procesna jedinica Separator.



Slika 3.3. Procesna jedinica za separaciju materijalnih tokova - a) Razdelnik, b) Separator

U slučaju jedinica za separaciju materijalnih tokova promenljive ulaznih i izlaznih materijalnih tokova karakterišu se sledećim specifikacijama:

- Ukupan broj tokova je $N_s=NT+1$ gde postoji jedan ulazni i R izlaznih tokova ($R=NT-1$);
- Pritisak u ulaznom toku jednak je pritisku u izlaznim materijalnim tokovima;
- Temperatura u ulaznom toku jednaka je temperaturama u izlaznim materijalnim tokovima u slučaju razdelnika, ali ne i u slučaju separatora što uslovljava uključivanje energetskog bilansa u analizu;
- Maseni protok ulaznog toka jednak je zbiru masenih protoka izlaznih tokova;
- Sastav svih tokova je identičan u slučaju razdelnika, ali ne i u slučaju separatora. Broj komponenti u svakom od tokova N_c jednak je ukupnom broju komponenti u procesnoj jedinici NC ($N_c=NC$);
- U procesnoj jedinici za separaciju nema dodatnih ograničenja kojim bi se definisao broj konstanti N_{CONST} .

Obzirom da procesna jedinica razdelnik ne vrši razmenu energije (toplote i rada) sa okolinom za materijalni tok važi $N_v=N_s \cdot (N_c+2)$, pa je u slučaju razdelnika sa R izlaznih toka ukupan broj promenljivih, (3.24):

$$N_v = (R + 1) \cdot (N_c + 2) = R \cdot N_c + N_c + 2 \cdot R + 1 \quad (3.24)$$

Procesna jedinica separator vrši razmenu energije sa okolinom (pri čemu je ovom u primeru istraživanje ograničeno na razmenu toplote, dok se razmena rada sa okolinom zanemaruje) tako da je broj promenljivih koji definiše jedinicu uvećan za jedan usled uzimanja u obzir razmenjenog toplotnog fluksa s okolinom, (3.25):

$$N_v = N_s \cdot (N_c + 2) + N_Q \quad (3.25)$$

Tabela 3.2. Analiza stepena slobode razdelnika sa R izlaznih tokova

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v=N_s \cdot (N_c+2)$	$(N_s=R+1)$	$(R+1) \cdot (N_c+2)$
Ukupno		$N_v=R \cdot N_c+2R+N_c+2$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans	N_c	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$R \cdot (N_c-1)$	
Jednakost temperature ($T_{in} = T_{out,i}; i = 1, 2, \dots, R$)	R	
Jednakost pritisaka ($p_{in} = p_{out,i}; i = 1, 2, \dots, R$)	R	
Ukupno	$R \cdot N_c + N_c + R$	$N_r = R \cdot N_c + N_c + R$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$R + 2$

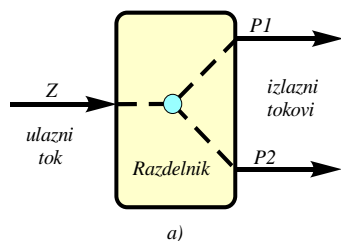
Tako je u slučaju separatora sa R izlaznih toka ukupan broj promenljivih, (3.26):

$$N_v = (R+1) \cdot (N_C + 2) + 1 = R \cdot N_C + N_C + 2R + 3 \quad (3.26)$$

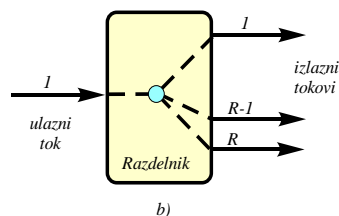
Imajući u vidu navedene specifikacije može se izvršiti analiza obe jedinice za separaciju toka na način koji je prikazan u tabeli 3.2 i tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Stepeni slobode kod separatora sa R razdelnih tokova

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q$	$(N_S = R + 1)$	$(R + 1) \cdot (N_C + 2) + 1$
Ukupno		$N_v = R \cdot N_C + 2R + N_C + 3$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans	N_C	
Energetski bilans	1	
Jednakost pritisaka ($p_{in} = p_{out,i}; i = 1, 2, \dots, R$)	R	
Ukupno	$N_C + R + 1$	$N_r = N_C + R + 1$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$R \cdot N_C + R + 2$



Slika 3.4. Razdelnik sa dva jednokomponentna toka



Slika 3.5. Adijabatski separator sa dva jednokomponentna toka

Analiza stepena slobode razdelnika sa 2 izlazna jednokomponentna toka, slika 3.4, prikazana je u tabeli 3.4, dok je analiza stepena slobode adijabatskog separatora dvokomponentne smeše, slika 3.5 prikazana u tabeli 3.5.

Tabela 3.4. Analiza stepena slobode razdelnika sa 2 izlazna jednokomponentna toka

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2)$	$(N_C = 1; N_S = R + 1 = 3)$	$(2 + 1)(1 + 2)$
Ukupno		$N_v = 9$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans $G_Z = G_{P1} + G_{P2}$	1	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	0	
Jednakost temperature ($T_Z = T_{P1}; T_Z = T_{P2}$)	2	
Jednakost pritisaka ($p_Z = p_{P1}; p_Z = p_{P2}$)	2	
Ukupno	5	$N_r = 5$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		4

Tabela 3.5. Stepeni slobode kod adijabatskog separatora dvokomponentne smeše sa 2 izlazna toka

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q$	$(N_C = 2; N_S = R + 1; N_Q = 0)$	$(2 + 1)(2 + 2) + 0$
Ukupno		$N_v = 12$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans	2	
$G_Z = G_{P1} + G_{P2}, G_{ZxZ} = G_{P1xP1} + G_{P2xP2}$		
Energetski bilans	1	
$G_Z h_Z = G_{P1} h_{P1} + G_{P2} h_{P2}$		
Jednakost pritisaka ($p_Z = p_{P1}; p_Z = p_{P2}$)	2	
Ukupno	5	$N_r = 5$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		7

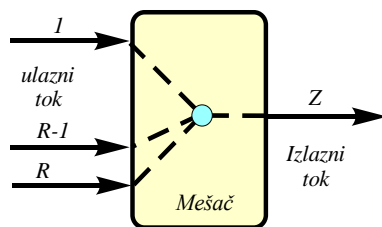
Stepeni slobode procesnih jedinica za mešanje materijalnih tokova.

Mešanje materijalnih strujnih tokova ([slika 3.6](#)) vrši se u procesnoj jedinici u kojoj nema razmene toplote i rada sa okolinom tako da se za broj promenljivih primenjuje jednačina ([3.24](#)) koja važi za razdelnik.

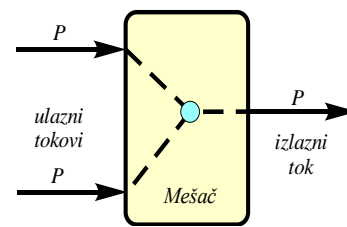
Projektne promenljive ulaznih i izlaznih materijalnih tokova imaju sledeće karakteristike:

- Ukupan broj tokova je $N_S = N_T = R + 1$ gde postoji R ulaznih i jedan izlazni tok;
- Pritisak u ulaznom toku nije nužno jednak pritiscima u izlaznim materijalnim tokovima;
- Temperatura u ulaznom toku nije jednaka temperaturama u izlaznim materijalnim tokovima što dovodi do uzimanja u obzir energetskog bilansa;
- Maseni protok izlaznog toka jednak je zbiru masenih protoka ulaznih tokova;
- Broj komponenti u svakom od tokova N_C je isti i jednak je ukupnom broju komponenti u procesnoj jedinici N_C , ali sastav tokova nije identičan.

Ovaj opšti slučaj mešača sa R ulaznih tokova razmatran je u [tabeli 3.6](#).



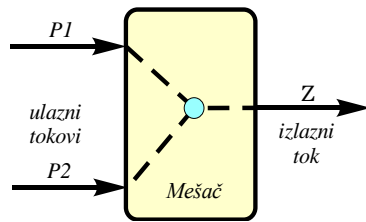
Slika 3.6. Procesna jedinica za mešanje materijalnih tokova – Mešač



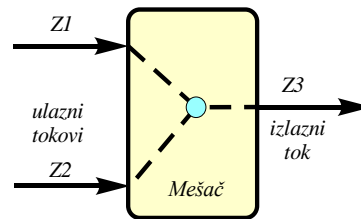
Slika 3.7. Mešač sa dva ulazna toka s istom komponentom

U [tabeli 3.7](#) data je analiza stepena slobode kod mešača za 2 ulazna toka sa istom komponentom, [slika 3.7](#), dok je mešač sa dva jednokomponentna toka na ulazu i jednim jednokomponentnim tokom ([slika 3.8](#)) na izlazu dat u [tabeli 3.8](#). Analiza mešača sa dva dvokomponentna

toka na ulazu i jednim dvokomponentnim tokom na izlazu - izlaz sadrži komponente jednog i drugog ulaznog toka ($N_C=2, R=2$), [slika 3.9](#), prikazan je u [tabeli 3.9](#).



Slika 3.8. Mešač sa dva ulazna toka s različitim komponentom



Slika 3.9. Mešač sa dva ulazna dvokomponentna toka različitog sastava

Tabela 3.6. Stepni slobode kod mešača za R ulaznih tokova

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v=N_S \cdot (N_C+2)$	$(N_S=R+1)$	$R \cdot N_C+2R+N_C+2$
Ukupno		$N_v= R \cdot N_C+2R+N_C+2$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans	N_C	
Energetski bilans	1	
Ukupno	N_C+1	$N_r=N_C+1$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$R \cdot N_C+2R+1$

Tabela 3.7. Stepni slobode kod mešača sa 2 ulazna toka sa istom komponentom

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v=N_S \cdot (N_C+2)$	$(N_C=1; N_S=R+1=3)$	$(2+1)(1+2)$
Ukupno		$N_v= 9$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans		
$G_{P,in(1)}+G_{P,in(2)}=G_{P,out}$	1	
Energetski bilans		
$G_{P,in(1)}h_{P,in(1)}+G_{P,in(2)}h_{P,in(2)}=G_{P,out}h_{P,out}$	1	
Ukupno	2	$N_r=2$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		7

Tabela 3.8. Stepni slobode kod mešača sa 2 ulazna toka sa različitim komponentom

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v=R \cdot (N_{C,P}+2)+1 \cdot (N_{C,Z}+2)$	$(N_{C,P}=1; N_{C,Z}=2; N_S=R+1=3)$	$2(1+2)+1(2+2)$
Ukupno		$N_v=10$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans		
$G_{P1}+G_{P2}=G_Z, G_{P1}=G_Zx_Z$	2	
Energetski bilans		
$G_{P1}h_{P1}+G_{P2}h_{P2}=G_Zh_Z$	1	
Ukupno	3	$N_r=3$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		7

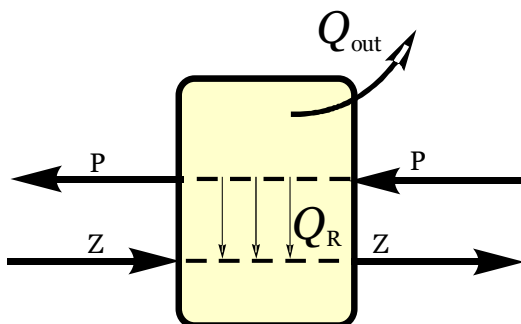
Tabela 3.9. Stepeni slobode kod mešača sa 2 ulazna toka sa dve iste komponente

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2)$	$(N_C = 2; N_S = R + 1 = 3)$	$(2 + 1)(2 + 2)$
Ukupno		$N_v = 12$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans $G_{Z1} + G_{Z2} = G_{Z3}, G_{Z1}x_{Z1} + G_{Z2}x_{Z2} = G_{Z3}x_{Z3}$	2	
Energetski bilans $G_{Z1}h_{Z1} + G_{Z2}h_{Z2} = G_{Z3}h_{Z3}$	1	
Ukupno	3	$N_r = 3$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		9

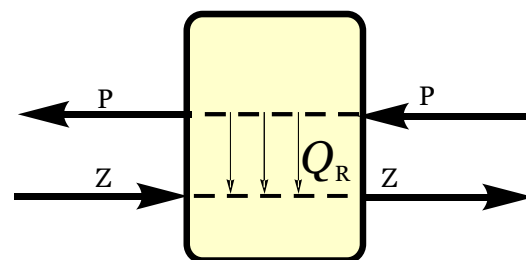
Stepeni slobode procesnih jedinica u vezi sa razmenom toplote.

U pitanju je procesna jedinica u kojoj postoji razmena toplote (slika 3.10), ali ne i rada sa okolinom tako da se za broj promenljivih primenjuje jednačina (3.24) koja važi za separator. Projektne promenljive ulaznih i izlaznih materijalnih tokova imaju sledeće karakteristike:

- Ukupan broj tokova je $N_S = 4$ gde postoje dva ulazna i dva izlazna toka;
- Pritisak u ulaznom toku jednak je pritisku u izlaznom materijalnom toku;
- Temperatura u ulaznom toku nije jednaka temperaturi u izlaznom materijalnom toku;
- Razmena toplote je takva da ova procesna jedinica odaje toplotu u okolinu, pa pored razmenjene toplote u razmenjivaču u promenljive u vezi sa razmenom toplote treba uračunati količinu toplote koja se odaje okolini;
- Maseni protok izlaznog toka jednak je masenom protoku ulaznog toka;
- Broj komponenti u svakom od tokova N_C je isti i jednak je ukupnom broju komponenti u procesnoj jedinici N_C , sastav tokova je identičan.



Slika 3.10. Procesna jedinica za razmenu energije materijalnih tokova – Razmenjivač



Slika 3.11. Adijabatski razmenjivač

Analiza stepena slobode kod procesne jedinice u kojoj postoji razmena toplote svodi se na analizu neadijabatskog razmenjivača toplote predstavljenu u [tabeli 3.10](#), kao i adijabatskog razmenjivača toplote, [slika 3.11](#), datoj u [tabeli 3.11](#).

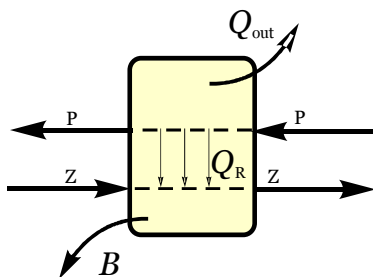
Tabela 3.10. Stepeni slobode kod neadijabatskog razmenjivača toplote

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q$	$(N_S = 4; N_Q = 2)$	$4(N_C + 2) + 2$
Ukupno		$N_v = 4N_C + 10$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans $G_{P,in} = G_{P,out}, G_{Z,in} = G_{Z,out}$	2	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$N_C - 1$	
Energetski bilans $G_{P,in}h_{P,in} + G_{Z,in}h_{Z,in} = G_{P,out}h_{P,out} + G_{Z,out}h_{Z,out} + Q_R$	1	
Dodatna relacija $Q_R = G_Z(h_{Z,in} - h_{Z,out})$	1	
Jednakost pritisaka ($p_{Z,in} = p_{Z,out}; p_{P,in} = p_{P,out}$)	2	
Ukupno	$N_C + 5$	$N_r = N_C + 5$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$3N_C + 5$

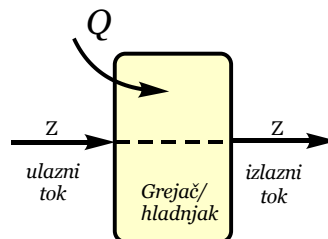
Tabela 3.11. Stepeni slobode kod adijabatskog razmenjivača toplote

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q$	$(N_S = 4; N_Q = 1)$	$4(N_C + 2) + 1$
Ukupno		$N_v = 4N_C + 9$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans $G_{P,in} = G_{P,out}, G_{Z,in} = G_{Z,out}$	2	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$N_C - 1$	
Energetski bilans $G_{P,in}h_{P,in} + G_{Z,in}h_{Z,in} = G_{P,out}h_{P,out} + G_{Z,out}h_{Z,out}$	1	
Dodatna relacija $Q_R = G_Z(h_{Z,in} - h_{Z,out})$	1	
Jednakost pritisaka ($p_{Z,in} = p_{Z,out}$)	1	
Ukupno	$N_C + 4$	
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$3N_C + 5$

Analiza stepena slobode evaporatora ($N_Q = 3, N_S = 5$), [slika 3.12](#), prikazana je u [tabeli 3.12](#), a analiza stepena slobode grejača/hladnjaka, [slika 3.13](#), data je u [tabeli 3.13](#).



Slika 3.12. Evaporator



Slika 3.13. Procesna jedinica za hlađenje/zagrevanje materijalnih tokova – hladnjak/grejač

Tabela 3.12. Stepeni slobode kod evaporatora

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q$	$(N_S = 5; N_Q = 3)$	$5(N_C + 2) + 3$
Ukupno		$N_v = 5N_C + 13$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans		
$G_{Z,in} = G_{Z,out}, G_{P,in} = G_{P,out} + G_B$	2	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$N_C - 1$	
Energetski bilans		
$G_{P,in}h_{P,in} + G_{Z,in}h_{Z,in} = G_{P,out}h_{P,out} + G_{Z,out}h_{Z,out} + G_Bh_B + Q_{out}$	1	
Dodatna relacija		
$Q_R = G_{Z,in}(h_{Z,in} - h_{Z,out})$	1	
Jednakost pritisaka ($p_{Z,in} = p_{Z,out}$)	1	
Ukupno	$N_C + 4$	
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$4N_C + 9$

Tabela 3.13. Stepeni slobode kod hladnjaka/grejača

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q$	$(N_S = 2; N_Q = 1)$	$2(N_C + 2) + 1$
Ukupno		$N_v = 2N_C + 5$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans		
$G_{Z,in} = G_{Z,out}$	1	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$N_C - 1$	
Energetski bilans		
$G_{Z,in}h_{Z,in} + Q = G_{Z,out}h_{Z,out}$	1	
Jednakost pritisaka ($p_{Z,in} = p_{Z,out}$)	1	
Ukupno	$N_C + 2$	$N_r = N_C + 2$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$N_C + 3$

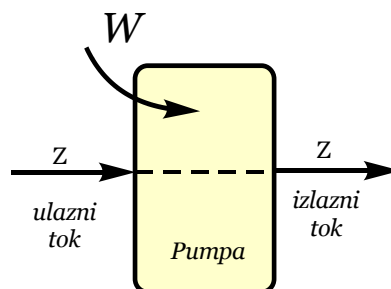
Stepeni slobode procesnih jedinica u vezi sa vršenjem rada.

Ovo je procesna jedinica u kojoj ne postoji razmena toplote sa okolinom, ali postoji razmena rada tako da se za broj promenljivih primenjuje novi skraćeni oblik izraza (3.5), tj. (3.27):

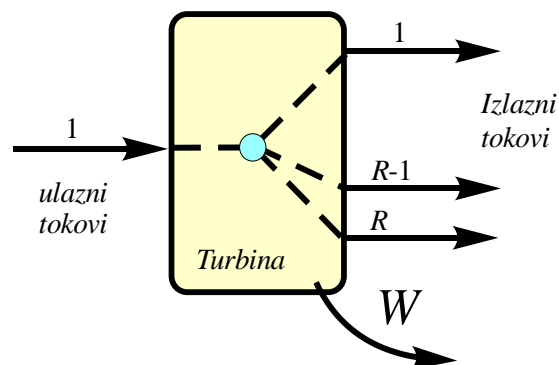
$$N_v = N_s \cdot (N_c + 2) + N_w + N_{\text{CONST}} \quad (3.27)$$

Projektne promenljive ulaznih i izlaznih materijalnih tokova imaju sledeće karakteristike:

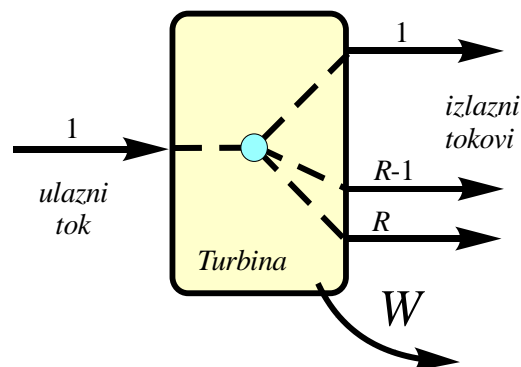
- Ukupan broj tokova je $N_s=2$. Postoji jedan ulazni i jedan izlazni tok;
- Pritisak u ulaznom toku nije jednak pritisku u izlaznom materijalnom toku;
- Temperatura u ulaznom toku nije nužno jednaka temperaturi u izlaznom materijalnom toku;
- Maseni protok izlaznog toka jednak je masenom protoku ulaznog toka;
- Broj komponenti u svakom od tokova N_c je isti i jednak je ukupnom broju komponenti u procesnoj jedinici N_C , sastav tokova je identičan.
- Kao dodatna promenljiva u vezi sa transformacijom materijalnih tokova se koristi izentropska efikasnost η_{is} procesne jedinice u vezi sa vršenjem rada, a kao dodatna relacija korišćena ili proizvedena snaga jedinice izražena preko ovog parametra.



Slika 3.14. Procesna jedinica u vezi sa vršenjem rada – pumpa



Slika 3.15. Procesna jedinica u vezi sa vršenjem rada – turbina sa R izlaza



Slika 3.16. Procesna jedinica u vezi sa vršenjem rada – turbina sa jednim izlazom

U okviru analize stepena slobode procesnih jedinica koje su u vezi sa vršenjem rada analizirane su pumpa, [slika 3.14](#), [tabela 3.14](#), turbina sa R izlaznih tokova, [slika 3.15](#), [tabela 3.15](#), i i turbina sa jednim izlaznim tokom, [slika 3.16](#), [tabela 3.16](#).

Tabela 3.14. Stepeni slobode kod pumpe

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_W + N_{CONST}$		$2(N_C + 2) + 2$
Ukupno		$N_v = 2N_C + 6$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans		
$G_{Z,in} = G_{Z,out}$	1	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$N_C - 1$	
Energetski bilans		
$G_{Z,in} h_{Z,in} + W = G_{Z,out} h_{Z,out}$	1	
Dodatna relacija		
$W = G_{Z,in} \cdot (h_{Z,out(s)} - h_{Z,in}) / \eta_{is}$	1	
Ukupno	$N_C + 2$	$N_r = N_C + 2$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$N_C + 4$

Tabela 3.15. Stepeni slobode kod turbine sa R izlaza

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_W + N_{CONST}$	$(N_S = R + 1)$	$(R + 1)(N_C + 2) + 2$
Ukupno		$N_v = R \cdot N_C + 2R + N_C + 4$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans	N_C	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$R \cdot (N_C - 1)$	
Energetski bilans		
$G_{1,in} h_{1,in} = G_{1,out} h_{1,out} + \dots + G_{R,out} h_{R,out} + W$	1	
Dodatna relacija		
$W = G_{1,in} \cdot (h_{1,in} - h_{out(s)}) \cdot \eta_{is}$	1	
Ukupno	$R \cdot N_C - R + N_C + 2$	$N_r = R \cdot N_C - R + N_C + 2$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$3R + 2$

Tabela 3.16. Stepeni slobode kod turbine sa jednim izlazom

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_W + N_{CONST}$		$2(N_C + 2) + 2$
Ukupno		$N_v = 2N_C + 6$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans		
$G_{Z,in} = G_{Z,out}$	1	
Ograničenja nastala kao posledica identičnog sastava materijalnih tokova	$N_C - 1$	
Energetski bilans		
$G_{Z,in} h_{Z,in} = G_{Z,out} h_{Z,out} + W$	1	
Dodatna relacija		
$W = G_{Z,in} \cdot (h_{Z,in} - h_{Z,out(s)}) \cdot \eta$	1	
Ukupno	$N_C + 2$	$N_r = N_C + 2$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$N_C + 4$

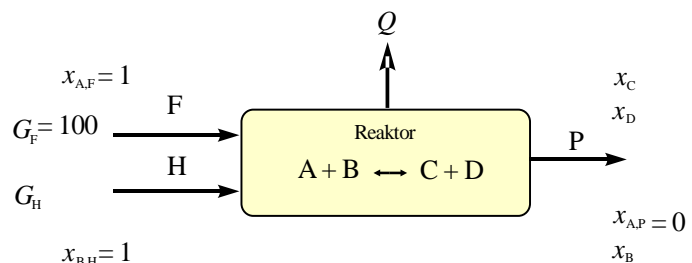
Stepeni slobode procesnih jedinica u kojima se odigrava hemijska reakcija.

U slučaju jedinice u kojoj se odigravaju hemijske reakcije način izračunavanja ukupnog broja nezavisnih promenljivih N_v se u većini slučajeva ne menja u odnosu na dosad prikazane jedinice. Broj materijalnih bilansa nije obavezno jednak broju komponenti (voda, kiseonik, ugljendioksid itd.), već je umesto toga u većini slučajeva jednak broju elementarnih bilansa (H,O,C, itd.), dok energetski bilans kao dodatnu promenljivu sadrži količinu toplote koja se troši ili stvara putem hemijske reakcije. Ograničenjima se smatraju: određeni odnosi materija (npr. odnos kiseonik/azot u vazduhu), odnos komponenti u proizvodnom toku, stepen konverzije koji definiše sastav bar jednog reaktanta na izlazu ili poznati molarni protok materijalnog toka. U slučaju reakcije sagorevanja, količine azota i kiseonika u dimnim gasovima ne zavise samo od njihovih udela u gorivu, već i od dodatne promenljive koeficijenta viška vazduha λ koji treba uzeti u obzir kao konstantu u vezi sa transformacijom tokova u jedinici, (3.28):

$$N_v = N_s \cdot (N_c + 2) + N_Q + N_{\text{CONST}} \quad (3.28)$$

Ova jednačina se može primeniti takođe na slučaj kada se za dati reakcioni sistem uzima u obzir količina gubitaka toplote koja između ostalog može da zavisi od materijala i veličine procesne jedinice. To dovodi do povećanja broja promenljivih u vezi sa razmenom toplote za jedan, ali i broja parametara opreme za dva.

U sledećem primeru prikazan je slučaj procesne jedinice u kojoj se odvija hemijska reakcija (slika 3.17, tabela 3.17)



Slika 3.17. Procesna jedinica u kojoj se odvija hemijska reakcija

Radi jednostavnosti pretpostavlja se sledeće:

- Temperature i pritisci svih ulaznih i izlaznih tokova su isti i ovi tokovi su u gasovitom stanju;
- U pitanju je egzotermna reakcija (reakcioni sistem odaje količinu toplote Q u okolinu) što čini jednačinu (3.28) važećom za broj promenljivih;
- Toplotni gubici su zanemarljivi, stepen konverzije limitirajućeg reaktanta A iznosi 1;
- Ulazni tokovi sadrže samo čiste reaktante A (poznat) i B;

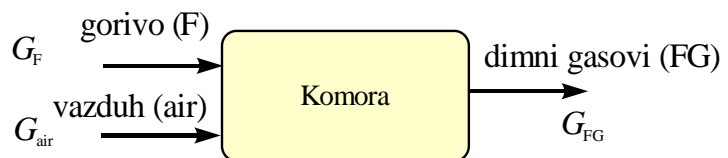
Tabela 3.17. Stepeni slobode kod procesne jedinice u kojoj se odvija hemijska reakcija

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q$	$(N_S = 3; N_C = 4)$	$3(N_C + 2) + 1$
Ukupno		$N_v = 3(N_C + 2) + 1 = 3N_C + 7 = 19$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans (A,B,C,D)		
$G_F x_{A,F} + G_H x_{A,H} = G_{A,cons} + G_P x_{A,P}$		
$G_F x_{B,F} + G_H x_{B,H} = G_{B,cons} + G_P x_{B,P}$	4	
$G_F x_{C,F} + G_H x_{C,H} + G_{C,gen} = G_P x_{C,P}$		
$G_F x_{D,F} + G_H x_{D,H} + G_{D,gen} = G_P x_{D,P}$		
Energetski bilans		
$G_F h_F + G_H h_H = G_P h_P + Q$	1	
Jednakost temperatura		
$T_P = T_F; T_P = T_H$	2	
Jednakost pritisaka		
$p_P = p_F; p_P = p_H$	2	
Specifikacije sastava u tokovima		
$x_{B,F} = 0; x_{C,F} = 0; x_{D,F} = 0$ (tok F)	3	
$x_{A,H} = 0; x_{C,H} = 0; x_{D,H} = 0$ (tok H)		7
$x_{A,P} = 0$ (tok P)	1	
Ukupno		$N_r = 16$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		$3N_C - 9 = 3$

U skladu sa ograničenjima da se ulazni tokovi sastoje samo od čistih reaktanata, u tokovima F i H nije nužno jedan od sastava unapred definisati, dok je u toku P sastav komponente A direktno određen zadatim uslovom da se ona potpuno troši u reakciji. Temperatura i pritisak moraju biti određeni za ulogu stepena slobode tako da preostali stepen slobode može biti maseni protok u toku H (G_H) obzirom da je ukupni protok u toku F (G_F) poznat i istovremeno određen iz bilansa komponenti tokova definisanog sastava.

U slučaju da je procesna jedinica u kojoj se odvija hemijska reakcija komora za sagorevanje (slika 3.18), analiza stepena slobode, tabela 3.18, izvedena je uz sledeće pretpostavke:

- Zastupljeni hemijski elementi u gorivu su ugljenik, vodonik, azot, kiseonik i sumpor, dok se udeli nesagorivih komponenti u gorivu (vlage i pepela) zanemaruju;
- Pritisci goriva, vazduha za sagorevanje i dimnih gasova na izlazu su međusobno jednaki;
- Temperature goriva i vazduha za sagorevanje su međusobno jednake;

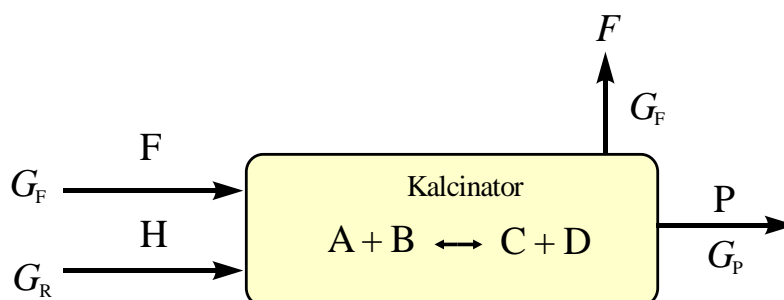


Slika 3.18. Procesna jedinica u kojoj se odvija hemijska reakcija sagorevanja

Tabela 3.18. Stepeni slobode kod komore za sagorevanje

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v = N_S \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_{CONST}$	$(N_S = 3; N_C = 5)$	$3(N_C + 2) + 1 + 1$
Ukupno		$N_v = 3(5 + 2) + 1 + 1 = 23$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans (C,H,O,N,S)		
$G_{CO_2} = G(x_C)$		
$G_{O_2} = G(x_C, x_H, x_S, x_O, \lambda)$	5	
$G_{H_2O} = G(x_H)$		
$G_{SO_2} = G(x_S)$		
$G_{N_2} = G(G_{air}, x_N, \lambda)$		
Energetski bilans		
$H_{D,F} + G_F h_F + G_{air} h_{air} = G_{FG} h_{FG}$	1	
Jednakost temperatura		
$T_{air} = T_F$	1	
Jednakost pritiska		
$p_{air} = p_F; p_{FG} = p_F$	2	
Specifikacije sastava u toku vazduha		
$x_{C,air} = 0$		
$x_{H,air} = 0$	4	
$x_{S,air} = 0$		
$x_{N_2,air} = 0.79$		
Ukupno	13	$N_r = 13$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		10

Analiza stepena slobode kalcinatora koji se javlja u zadatku analize podsistema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate, [slika 3.19](#), predstavljena je u [tabeli 3.19](#) i realizovana uz sledeće pretpostavke:



Slika 3.19. Procesna jedinica – kalcinator

- Posmatra se hemijska reakcija opšteg oblika $A + B \rightarrow C + D$;
- Napojni tok sirovina R sadrži isključivo reaktante A i B, dok izlazni tok proizvoda P sadrži isključivo proizvode reakcija C i D (udeo nečistoća ili sporednih proizvoda u napojnom i proizvodnom toku je zanemarljiv, dok stepen konverzije oba reaktanta iznosi 1);

Tabela 3.19. Stepeni slobode kalcinatora

Ukupan broj promenljivih, N_v		
$N_v=(N_{C,R}+2)+(N_{C,P}+2)+2(N_{C,F}+2)+N_Q$ ($N_{C,R}=N_{C,P}=4$; $N_{C,F}=5$)		$(N_{C,R}+2)+(N_{C,P}+2)+2(N_{C,F}+2)+1$
Ukupno		$N_v=(4+2)+(4+2)+2(5+2)+1=27$
Nezavisne relacije, N_r		
Materijalni bilans (A,B,C,D+bilans dimnih gasova)		
$G_R x_{A,R} = G_{A,cons} + G_P x_{A,P}$		
$G_R x_{B,R} = G_{B,cons} + G_P x_{B,P}$	5	
$G_R x_{C,R} + G_{C,gen} = G_P x_{C,P}$		
$G_R x_{D,R} + G_{D,gen} = G_P x_{D,P}$		
$G_{F,in} = G_{F,out}$		
Energetski bilans	1	
$G_R h_R + G_{F,in} h_{F,in} = G_P h_P + G_{F,out} h_{F,out} + Q_{reac}$		
Jednakost pritisaka	2	
$p_R = p_P$; $p_{F,in} = p_{F,out}$		
Specifikacije sastava u tokovima		
$x_{A,P} = 0$		
$x_{B,P} = 0$		
$x_{C,R} = 0$		
$x_{D,R} = 0$	8	
$x_{CO_2,F(in)} = x_{CO_2,F(out)}$		
$x_{O_2,F(in)} = x_{O_2,F(out)}$		
$x_{H_2O,F(in)} = x_{H_2O,F(out)}$		
$x_{SO_2,F(in)} = x_{SO_2,F(out)}$		
Ukupno	16	$N_r=16$
Ukupan broj stepeni slobode, $N_d = N_v - N_r$		11

- Dimni gasovi (tok F) se smatraju petokomponentnom smešom ugljendioksida, sumpordioksida, azota, kiseonika i vode;
- Gubici toplote su zanemarljivi u peći;
- Pritisak dimnih gasova na ulazu i izlazu iz jedinice je isti;
- Pritisak napojne sirovine je identičan pritisku izlaznog proizvoda.

3.3.4. Stepeni slobode sistema

U slučaju da je element ispitivanja složeni sistem, sastavljen od više procesnih jedinica, broj stepeni slobode takvog sistema zavisi od broja stepeni slobode svake procesne jedinice i od strukture tehnoloških veza između njih. Kako je ukupan broj promenljivih (3.29) i nezavisnih relacija sistema (3.30) jednak sumi ovih veličina u njegovim procesnim jedinicama:

$$N_v = \sum_{i=1}^n N_{v,i} \quad (3.29),$$

$$N_r = \sum_{i=1}^n N_{r,i} \quad (3.30),$$

preliminarnan ukupan broj stepeni slobode [\(3.31\)](#) sistema izračunava se kao:

$$N_d = \sum_{i=1}^n N_{v,i} - \sum_{i=1}^n N_{r,i} = \sum_{i=1}^n N_{d,i} \quad (3.31)$$

gde je:

$N_{v,i}$ -broj projektnih promenljivih svake i -te jedinice.

$N_{r,i}$ -broj nezavisnih relacija svake i -te jedinice.

$N_{d,i}$ -broj stepeni slobode svake i -te jedinice.

Preliminarni broj stepeni slobode sistema, izračunat kao zbir stepeni slobode njegovih procesnih jedinica, potrebno je korigovati za onaj broj promenljivih ili relacija koji su višestruko uračunate kod analize pojedinačnih subsistema, odnosno relacija koje nedostaju. Ova zavisnost [\(3.32\)](#) definisana je sledećom relacijom:

$$N_d = \sum_{i=1}^n N_{d,i} - \sum_{j=1}^k N_{v,j} + N_{rr} - N_{ar} \quad (3.32)$$

gde je:

$N_{v,j}$ -broj projektnih promenljivih u j -toj tehnološkoj vezi (j -tom fizičkom toku) između procesnih jedinica (ili j -toj tački sprezanja elemenata),

N_{rr} -ukupan broj suvišnih relacija u sistemu,

N_{ar} -ukupan broj dodatnih relacija u sistemu koje povezuju promenljive različitih tokova različitih procesnih jedinica.

Broj projektnih promenljivih u j -toj tehnološkoj vezi između procesnih jedinica sistema može se označiti kao ukupan broj suvišnih projektnih promenljivih sistema N_{rv} (u odnosu na analizu pojedinačnih komponenti) i odrediti iz izraza [\(3.33\)](#):

$$N_{rv} = \sum_{j=1}^k N_{v,j} = \sum_{N_c=1}^{N_{c,max}} N_{ICS,N_c} \cdot (N_c + 2) \quad (3.33)$$

gde je: N_{ICS,N_c} -broj interkonektivnih tokova (tokova koji povezuju bilo koje dve procesne jedinice u sistemu) sa brojem hemijskih komponenti N_c .

3.4. Zaključna razmatranja poglavlja 3

- Analizom procesa kao delom konceptualnog projektovanja vrši se provera konzistentnosti materijalnih i energetskih bilansa, preliminarni proračun dimenzija i cene procesnih jedinica, proračun indikatora proizvodnje i predikcije ponašanja sistema u slučaju promene parametara u definisanoj tehnološkoj šemi.
- Analiza procesa u oblasti PSE-a se realizuje putem modelovanja i simulacije. U slučaju modela stacionarnih stanja simulacija sistema se uobičajeno imenuje kao *flowsheeting*.
- Cilj modelovanja u *flowsheeting*-u je kreiranje seta matematičkih (uglavnom nelinearnih algebarskih) jednačina kojim su opisana ponašanja procesnih jedinica i struktura tehnološke šeme. Valjanost modela testira se postupcima verifikacije i validacije.
- *Flowsheeting*-om se vrši egzekucija numeričke forme modela korišćenjem simulacionog softverskog paketa. Postupak modelovanja uglavnom omogućava opis strukture i ponašanja ispitivanog objekta (procesna jedinica) i kreiranje matematičkog modela korišćenjem bilansnih, konstitutivnih i graničnih jednačina kao baze za simulaciju.
- Analiza stepena slobode predstavlja nezaobilazan zadatak u postupku kreiranja numeričkog modela stacionarnih energetskih sistema. Ovim postupkom utvrđuje se postojanost dovoljnog broja informacija za rešavanje skupa jednačina definisanih matematičkim modelom.

Literatura poglavlja 3

- [1] Cameron IT, Gani R. Product and process modelling: a case study approach. Oxford (UK): 1st ed. Elsevier; 2011. [\[cit u tekstu\]](#)
- [2] Aris R. Mathematical modelling: a chemical engineer's perspective. London (UK): Academic Press; 1999. [\[cit u tekstu\]](#)
- [3] Hangos KM, Cameron IT. Process modelling and model analysis. London (UK): Academic Press; 2001. [\[cit u tekstu\]](#)
- [4] Cameron IT, Ghani R. Product and process modelling: a case study approach. Oxford (UK): 1st ed. Elsevier; 2011. [\[cit u tekstu\]](#)
- [5] Cameron IT, Ingram GD. A survey of industrial process modelling across the product and process lifecycle. Comput Chem Eng 2008;32(3):420–38. Oxford (UK): Elsevier; 2008. [\[cit u tekstu\]](#)
- [6] Jaluria Y. Design and optimization of thermal systems. New York: 2nd edition, Mc Graw-Hill; 1998. [\[cit u tekstu\]](#)
- [7] Rašković P. Optimizacija industrijskih energetskih sistema putem integracije mreže razmenjivača toplote [doktorska disertacija]. Niš, Srbija: Mašinski fakultet u Nišu; 2002. [\[cit u tekstu\]](#)
- [8] Babu BV. Process plant simulation. New Delhi, India: Oxford University Press; 2004. [\[cit u tekstu\]](#)

- [9] Edgar TF, Himmelblau DM, Lasdon LS. Optimization of chemical processes. New York: 2nd edition, McGraw-Hill, 2001. [\[citat u tekstu\]](#)
- [10] Gani R, Hostrup M. Course 36445 – Computer Aided Process Design, CAPEC. Lyngby, Denmark: Institut for Kemiteknik Danmarks Tekniske Universitet 2800; <http://www.capec.kt.dtu.dk/main/36445/course36445.html>. [\[citat u tekstu\]](#)
- [11] Thacker BH, Doebbling SW, Hemez FM, Anderson MC, Pepin JE, Rodriguez EA. Concepts of model verification and validation. Los Alamos (NM): Los Alamos National Laboratory; 2004. Report LA-14167-MS. [\[citat u tekstu\]](#)
- [12] Westerberg AW, Hutchinson HP, Motard RL, Winter P. Process flowsheeting. Cambridge (UK): Cambridge Universities Press; 1979. [\[citat u tekstu\]](#)
- [13] Saitović A. Metodologija sekvencijalne simulacije stacionarne šeme toka hemijskih i energetskih postrojenja [diplomski rad]. Leskovac, Srbija: Tehnološki fakultet u Leskovcu, Univerzitet u Nišu; 2012. [\[citat u tekstu\]](#)
- [14] Smith BD, Design of equilibrium stage processes. New York: McGraw-Hill; 1963. [\[citat u tekstu\]](#)
- [15] Westerberg AW, Hutchison HP, Motard RL, Winter P. Process flowsheeting. Cambridge (UK): Cambridge University Press; 1979. [\[citat u tekstu\]](#)
- [16] Coulson JM, Richardson JF, Sinnott RK. Chem Eng 1983;6(Design):14–7. Oxford (UK): Pergamon Press; 1983. [\[citat u tekstu\]](#)
- [17] Stephanopoulos G. Chemical process control. Englewood Cliffs (NJ): Prentice Hall; 1984. [\[citat u tekstu\]](#)
- [18] Kwauk M. A system for counting variables in separation processes. AIChE J 1956;2:240. [\[citat u tekstu\]](#)
- [19] Stevanović M. Primena DOF analize u cilju modelovanja i simulacije komponenti i sistema u hemijskih i energetskim postrojenjima [diplomski rad]. Leskovac, Srbija: Tehnološki fakultet u Leskovcu, Univerzitet u Nišu; 2012. [\[citat u tekstu\]](#)

4. Energetska evaluacija konceptualnih projektnih rešenja korišćenjem eksergetske analize

Evaluacija projektnih rešenja dobijenih u konceptualnoj fazi projektovanja dugo vremena zasnivala se na Energetskoj analizi – analizi baziranoj prvom principu termodinamike, tj. na zakonu o održanju energije. Prvi princip termodinamike koji su utemeljili su Van Majer ([Van Mayer](#)) i Karno ([Carnot](#)) u prvoj polovini 19-og veka, kao poseban slučaj tog zakona, govori o mogućnosti pretvaranja jednog oblika energije u drugi, ali ne daje odgovor na pitanje kada je takva transformacija moguća. Rešenje ovog pitanja vezano je za Drugi princip termodinamike koji govori o uslovima pod kojima je moguće pretvaranje jednog oblika energije u drugi. Drugi zakon termodinamike, koji je i eksperimentalno potvrđen, utvrđuje razliku između kvaliteta različitih oblika energije i objašnjava zašto se neki procesi mogu spontano odigravati, a drugi ne mogu. Drugi zakon termodinamike definiše fundamentalnu veličinu entropije kao uobičajeno stanje energije koja je nedostupna za direktno pretvaranje u rad, pri čemu se svi spontani fizički i hemijski procesi odigravaju u cilju maksimizacije entropije. Takođe, po Drugom principu termodinamike postoji i deo energije koja se potpuno pretvara u svaki drugi oblik energije – eksergija.

U ovom poglavlju obrađene su osnovne postavke eksergetske analize. Eksergetska analiza predstavlja oblik termodinamičke analize, neophodne za energetske evaluacije rešenja dobijenih simulacijom rada postrojenja. Objašnjeni su osnovni pojmovi, definisana funkcija eksergije i objašnjenja osnovna teorema o destrukciji eksergije. Posebna pažnja usmerena je na aplikativnu primenu eksergijske analize u stacionarnim energetskim sistemima koji se često javljaju u postupku projektovanja složenih hemijskih i energetskih postrojenja.

4.1. Pojam eksergije i anergije

Prema Drugom principu termodinamike kriterijum za podelu energije je stepen transformacije jednog oblika energije u drugi i pri tome se definišu tri grupe:

- Energija koja se potpuno pretvara u svaki drugi oblik energije – ovaj vid energije predstavlja *eksergiju*, a njeni glavni predstavnici su *mehanička* i *električna energija*,
- Energija koja se ograničeno pretvara u neki drugi oblik energije pri čemu takve transformacije zavise od stanja toplotnog izvora i stanja okoline – *toplotna* i *unutrašnja energija*.
- Energija koja se ne može prevesti u neki drugi oblik energije (važi za sisteme koji su u termodinamičkoj ravnoteži sa okolinom) – *energija okoline*.

Iz navedenih postavki mogu se uočiti dva osnovna oblika energije:

- Energija koja se može transformisati bez ograničenja – *eksergija*.
- Energija koja se uopšte ne može transformisati u druge oblike – *anergija*.

Eksergija i anergija su uzajamno dopunjavajući pojmovi: deo energije koji se ne javlja kao eksergija je anergija. Svi vidovi energije koji se neograničeno pretvaraju sastoje se iz čiste eksergije, ograničeno pretvarajući oblici sadrže i eksergiju i anergiju, dok se energija okoline sastoji samo iz anergije.

Prve korake u definisanju koncepta podele energije na eksergiju i anergiju izveo je Karno 1824. godine uočivši proporcionalnost rada toplotne mašine i temperaturne razlike, te na taj način formirajući osnovne pretpostavke za definisanje Drugog zakona termodinamike. Ipak, istorijski gledano ključni događaj za razvoj eksergije predstavlja rad Gibbsa ([Gibbs](#)) [1] iz 1873. godine u kome definiše eksergiju kao poseban slučaj Gibsove raspoložive energije (radne sposobnosti ili radnog potencijala). Po njegovom tumačenju eksergija predstavlja najopštiji pojam rada (erg) i mogućnosti ili sposobnosti da se rad dobije ili izvede iz sistema (ex).

Prva publikacije Guia i Stodole ([Gouy](#) and [Stodola](#)) [2] vezane za upotrebu koncepta eksergije i analizu energetske sistema putem tog koncepta – *eksergijsku analizu* donela su malo interesovanja. U istorijskom smislu razvoj modernog koncepta eksergije započet je radom [Bošnjakovića](#) [3] 1938. godine, nastavljen s Kinanom ([Keenan](#)) koji je uveo termin "raspoloživa energija" 1948. godine, a završen radom [Ranta](#) [4] koji je upotrebio termin eksergija za označavanje "tehničkog radnog kapaciteta" 1956. godine. Tribus je 1961. god. spojio klasičnu termodinamiku sa teorijom informacije posredstvom koncepta entropije, dok je od ranih 70-ih

godina prošlog veka interesovanje za eksergetsku analizu ravnomerno raslo i analiza industrijskih sistema postaje verovatno najčešća primena ove metode [5]. Tokom poslednjih 50 godina, korisnost koncepta eksergije je otišla daleko iznad termodinamičke analize industrijskih i energetske postrojenja, pa je eksergija postala koristan koncept u inženjerstvu i zaštiti životne okoline (usled njene primene u prirodnim procesima) za specifičnu analizu nacionalnih ekonomija i za izučavanje uticaja okoline na proizvodna postrojenja [6]. Pored toga, postoje mnoge metode koje kombinuju eksergetsku analizu s ekonomijom u literaturi poznate pod različitim imenima: termoeconomija, eksergoeconomija, proračun cene po Drugom zakonu, eksergetski ekonomski proračun i eksergetska ekonomska optimizacija [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Osnovna ideja ovih metoda je primena uobičajenih postupaka inženjerskog proračuna povezivanjem cene komponenti sa njihovim operativnim parametrima i njihovom efikasnošću.

4.2. Definicija eksergije

Danas postoji nekoliko definicija eksergije u dostupnoj literaturi. Sve one sadrže istu osnovnu ideju, ali se razlikuju prema načinu izvođenja [13], pa tako neki autori definišu eksergiju preko rada [14], [15], [16], [17], drugi preko reverzibilnog procesa [18], a neki uzimaju u obzir koristan rad [16]. Definiciju Cacaronisa (*Tsatsaronis*) [17] po mišljenju mnogih autora treba izdvojiti kao najpogodniju za inženjersku primenu.

"Eksergija termodinamičkog sistema je maksimalni teorijski rad (mehanički ili električni rad) koju je moguće dobiti dok se sistem dovodi u potpunu termodinamičku ravnotežu s termodinamičkom okolinom pritom ostvarujući interakcije isključivo sa tom okolinom."

Šargut (*Szargut*) [16], [18] je eksergiju definisao na sličan način kao "maksimalnu količinu postignutog rada kada je prenosnik energije doveden iz svog prvobitnog stanja u stanje termodinamičke ravnoteže sa okolnim supstancama iz prirodnog okruženja pomoću povratnih procesa, uključujući interakciju samo sa prirodnim supstancama." Drugim rečima, eksergija predstavlja dostupnu energiju koja može da se iskoristi iz fizičkog ili hemijskog procesa u kome radni fluid na reverzibilan način dostiže ravnotežno stanje.

Reč ravnoteža se definiše kao "stanje balansa između suočenih sila ili akcija". Kada je sistem u stanju ravnoteže, svaki njegov deo je u balansu (ravnoteži) sa nekim drugim delom i među njima ne postoji neto transfer materije ili energije. Sa druge strane, balans sistema predstavlja dinamičku kategoriju, pošto molekuli iz jednog dela sistema mogu preći u drugi deo (u slučaju tečnosti ili gasova), ali uslov balansa je da isti broj molekula iz drugog dela sistema mora

preći u prvi deo krećući se u suprotnom pravcu. Opšta karakteristika stanja ravnoteže jeste da se mnogo lakše opisuju nego stanja neravnoteže. Zbog toga se u termodinamičkim proračunima uglavnom koriste nekoliko tipova ravnoteže:

1. Mehanička ravnoteža koja se postiže putem eliminacije razlike u pritiscima između susednih sistema;
2. Termalna ravnoteža koja se postiže putem eliminacije razlike u temperaturama između susednih sistema;
3. Difuziona ravnoteža koja se postiže putem eliminacije razlike u hemijskim potencijalima između komponenti koje se nalaze u susednim sistemima. Hemijski potencijal za pojedinačnu komponentu, zavisi od njene koncentracije (u nekim slučajevima zavisi i od koncentracije drugih komponenti), od temperature i pritiska koji vlada u sistemu. Ukoliko sistem poseduje makroskopsku potencijalnu energiju (npr. usled gravitacije), hemijski potencijal će takođe zavistiti od lokalne vrednosti potencijalne energije;
4. Fazna ravnoteža je slična sa difuzionom ravnotežom, pošto se molekuli kreću između faza, ali u ravnoteži broj molekula koji se kreću između faza je isti u oba pravca. Kao i kod difuzione, fazna ravnoteže se manifestuje kroz razlike hemijskog potencijala dve susedne faze;
5. Hemijska ravnoteža nastaje u slučaju materija koje hemijski reaguju pri čemu će doći do pada njihove koncentracije uz rast koncentracije proizvoda reakcije. Proizvodi reakcije, takođe, mogu međusobno reagovati i u povratnoj reakciji ponovo formirati reaktante. Na kraju, koncentracije svih komponenti će se stabilizovati tako da je direktna reakcija u ravnoteži sa povratnom. Kada se to desi, koncentracije se više neće menjati i sistem je u hemijskoj ravnoteži. Kao i kod difuzione i fazne, hemijska ravnoteža se manifestuje kroz razlike hemijskog potencijala dva susedna sistema;
6. Termodinamička ravnoteža. Kada su svi delovi sistema uravnoteženi na sve načine (mehanički, termički, difuzioni, fazni i hemijski) kaže se da je sistem u termodinamičkoj ravnoteži. Temperatura, pritisak i hemijski potencijal će biti isti u svim delovima sistema u termodinamičkoj ravnoteži, a koncentracija svake hemijske supstance će biti konstantna;
7. Ograničena ravnoteža (ograničeno stanje mirovanja). Kada je sistem uravnotežen na neke načine, ali ne i na druge, kaže se da je u ograničenoj ravnoteži. Naprimer, mešavina metana i vazduha na sobnoj temperaturi nije u hemijskoj ravnoteži, iako može biti u mehaničkoj, termičkoj i difuzionoj ravnoteži;

Sa termodinamičke tačke gledišta eksergija može biti predstavljena kao funkcija stanja sistema koje je definisano ekstenzivnim promenljivim (S, V, n) i gradijenata koji nastaju usled razlika između intenzivnih promenljivih stanja sistema (T, p, μ) i intenzivnih promenljivih stanja okoline (T_0, p_0, μ_0). Pri tome je okolina veliki ravnotežni sistem s nultom eksergijom u kome ekstenzivne promenljive ostaju konstantne tokom interakcija sa nekim termodinamičkim sistemom.

U slučaju zatvorenog (neprotočnog) sistema eksergija sistema se može izraziti pomoću jednačine (4.1):

$$E = \underbrace{S(T - T_0)}_{\text{Gradijent temperature}} - \underbrace{V(p - p_0)}_{\text{Gradijent pritiska}} + \sum_i n_i \underbrace{(\mu_i - \mu_{i,0})}_{\text{Gradijent hemijskog potencijala}} \quad (4.1)$$

Iz jednačine (4.1) može se videti da je eksergija zatvorenog sistema različita od nule ukoliko postoji bilo koji gradijent intenzivnih promenljivih. U inženjerskoj primeni eksergija kao veličina obično obračunava samo gradijente prikazane jednačinom (4.1), pretpostavljajući mali uticaj energije nuklearne, magnetne ili površinske prirode. Zbog toga će komponente eksergije u vezi sa ovim uticajem biti zanemarene u daljem delu.

Koncept eksergije pod pojmom okoline podrazumeva okruženje ili deo okruženja ispitivanog sistema u kome su intezivna svojstva jednolika i ne menjaju se značajno kao rezultat procesa koji se odigravaju u sistemu. Referentna okolina deluje kao neodređeni sistem, čiji su svi delovi u ravnoteži i služe kao izvor toplote i materija. Eksergija referentne okoline jednaka je nultoj vrednosti, dok je eksergija toka ili sistema nulta, onda kada je u ravnoteži sa referentnom okolinom. Prirodna okolina nema teoretske karakteristike referentne okoline. Svi delovi prirodne okoline nisu u ravnoteži, njene intenzivne osobine su sklone promenama u prostoru i vremenu pa kao rezultat, eksergija prirodne okoline nema nultu vrednost. Dakle, modeli za referentnu okolinu [19], [20], se koriste kako bi se postigao kompromis između teoretskih zahteva referentne okoline i stvarnog ponašanja prirodne okoline.

Smatra se da je okolina sastavljena od zbira sličnih hemijskih komponenti koje postoje u zemaljskom okruženju sa koncentracijama koje odražavaju hemijski sastav okoline. Ove komponente su u svom stabilnom obliku u kome se javljaju u prirodi i ne postoji mogućnost generisanja rada fizičkom ili hemijskom interakcijom između delova okoline. Za opštu primenu na hemijske procese i procese koji uključuju hemijsku interakciju s okolinom najuobičajeniji je sistem referentnih supstanci koji potiče od Šarguta [19] i njegovih saradnika u čijem mode-

lu su definisani standardni uslovi okoline. Objašnjenje za uspešnu primenu ovog pristupa je da supstance nađene u okolini imaju malu ekonomsku vrednost.

Eksergija se definiše upravo u odnosu na okolinu koju definišu: temperatura T_0 , pritisak p_0 i određeni hemijski sastav koji se menja u odnosu na položaj na Zemlji. Standardna temperatura T_0 se obično definiše kao $T_{\text{ref}}=T_0=298.15$ K, dok je standardni pritisak $p_{\text{ref}}=p_0=101.325$ kPa. Standardni sastav je tema mnogih diskusija u radovima, a diskusije na ovu temu su se javile, jer okolina obično nije u ravnoteži i postoje lokalne razlike u njenom sastavu.

Sledeći Šargutov pristup u definisanju standardnog sastava i referentnih stanja, definišu se tri smeše okoline od kojih je jedna za vazduh, druga za mora i okeane, a treća za Zemljinu koru [21]. Brojevi referentnih supstanci u ovim smešama su fiksni i iznose 10, 32, and 13, respektivno. Naprimer, izvori nafte nisu deo standardne okoline, iako predstavljaju resurse, jer ne poseduju prosečan sastav, ali je Šargutova standardna okolina sastavljena samo od najstabilnijih ili najbrojnijih raspoloživih vrsta. Referentne supstance izabrane za hemijske elemente koje dolaze iz tri velika različita dela okoline se tako dele u tri velike grupe:

- gasoviti sastojci atmosfere,
- čvrste referentne supstance iz Zemljine kore,
- referentne supstance iz mora u jonskom i molekulskom (nejonizovanom) obliku.

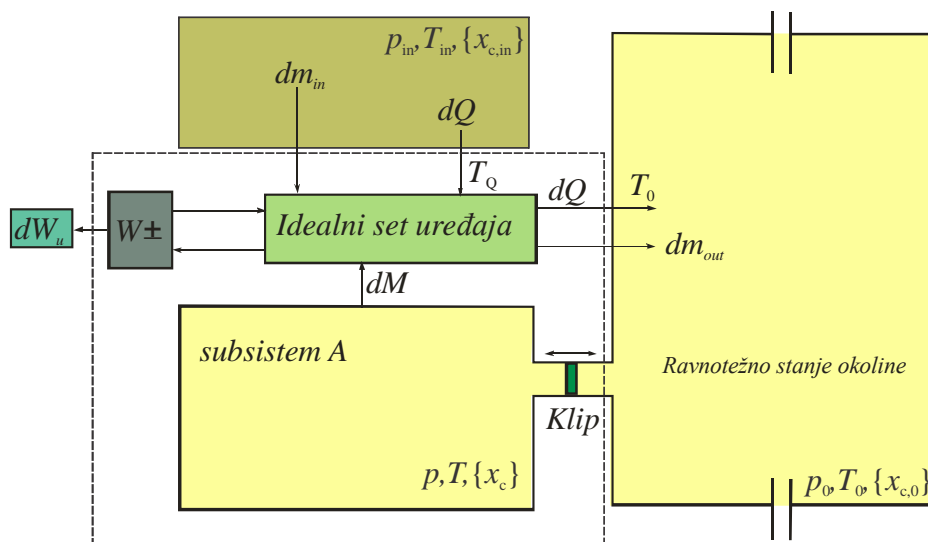
Postoji samo jedna referentna supstanca po svakom hemijskom elementu i to je supstanca koja sadrži taj element, koja je prisutna u pomenutim delovima prirodnog okruženja i čija koncentracija u okolini mora biti poznata uz adekvatnu preciznost. Tipične eksergijske referentne gasovite vrste u atmosferskom vazduhu su: kiseonik, azot, ugljendioksid i vodena para sa svojim pojedinačnim parcijalnim pritiscima na kojima se nalaze u atmosferi, pa tako recimo gasoviti vodonik ima tečnu vodu kao referentnu supstancu. Kada su čvrste supstance u pitanju, referentna vrsta se uglavnom nalazi u najstabilnijim čvrstim jedinjenjima u litosferskim stenama, naprimer oksid gvožđa Fe_2O_3 je referentna supstanca za metalno gvožđe, a ugljendioksid za grafit (ugljenik). Za supstance koje se nalaze u hidrosferi uzimaju se referentne vrste sa nultim nivoom eksergije na najstabilnijem stanju njihovog postojanja u vodi (npr. jon natrijuma za natrijum).

Standardna eksergija je tako eksergija izračunata za standardnu temperaturu, standardan pritisak i standardan sastav koji definiše indeks 0. Skupovi standardnih eksergija referentnih komponenti su smešteni u tabelama i u tom obliku se koriste pri proračunima, dok se sta-

ndardne specifične vrednosti s (entropije), u (unutrašnje energije) i izvedenih veličina h (entalpije) i g (Gibsove energije) takođe obeležavaju indeksom 0.

4.3. Fundamentalna funkcija eksergije

Derivaciju funkcije eksergije moguće je izvesti putem masenog, energetskog i entropijskog bilansiranja energetskog sistema prikazanog na [slici 4.1 \[22\]](#).



Slika 4.1. Otvoreni termodinamički sistem

Energetski sistem se sastoji iz podsistema A, u kome je stacionirana materija mase M koja se nalazi na pritisku p i temperaturi T . Materija mase M je višekomponentna i njen sastav je određen udelima $\{x_c\}$ pri čemu je $c = 1, 2, \dots, C$. Podsistem A je u direktnoj interakciji sa referentnom okolinom putem kanala sa pokretnim klipom (u slučaju promene zapremine materije mase M u podsistemu A vrši se pomeranje klipa i vrši se rad). Referentna okolina je u stanju mirovanja pritiska p_0 , temperature T_0 i sadrži komponente sastava $\{x_{c,0}\}$.

Takođe, sistem razmenjuje materiju i toplotu sa drugim sistemima putem seta idealnih uređaja (koji u apstraktnom smislu, uključuje ekspandere, kompresore, pumpe, hemijske reaktore, razmenjivače toplote, itd.). Drugi sistemi transferišu materiju mase dm_{in} i toplotu dQ u set uređaja, materija mase dm_{in} je na T_{in} , p_{in} i ima sastav $\{x_{c,in}\}$, dok se toplota dQ iz drugih sistema u posmatrani set predaje na temperaturi T_Q . Pri transferu se generiše ili koristi koristan rad $\pm W$ (u slučaju sistema na slici 1 pretpostavka je da se pri transferu materije generiše koristan rad W_u).

Pretpostavlja se da materije mase dm_{in} i dM u vremenskom periodu dt dostižu pritisak, temperaturu i sastav okoline. Pitanje je koliki se koristan rad može dobiti u tom vremenskom periodu.

Odgovor na ovo pitanje može se dobiti putem formiranja masenih i energetskih i entropijskih bilansa u vremenskom periodu dt :

Maseni bilans (4.2) po komponentama i (4.3) ukupnoj masi:

$$dM_c = x_{c,in} \cdot dm_{in} - x_{c,out} \cdot dm_{out} \quad (4.2)$$

$$dM = dm_{in} - dm_{out} \quad (4.3)$$

Energetski bilans (4.4): Akumulacija = Ulaz – Izlaz

$$dU = dQ - dQ_0 - dW_u - p_0 \cdot dV + h_{in} \cdot dm_{in} - \sum_{c=1}^C h_{c,out} \cdot x_{c,out} \cdot dm_{out} \quad (4.4)$$

gde dV predstavlja zapreminsku razliku mase dM na T, p i x_c i iste mase na T_0, p_0 i $x_{c,0}$.

Bilans entropije (4.5): Akumulacija = Ulaz – Izlaz + generisana entropija

$$dS = \frac{dQ}{T_Q} - \frac{dQ_0}{T_0} + \delta S_{gen} + s_{in} dm_{in} - \sum_{c=1}^C s_{c,out} \cdot x_{c,out} \cdot dm_{out} \quad (4.5)$$

Množenje jednačine (4.5) sa T_0 daje sledeći izraz (4.5a):

$$T_0 \cdot dS = T_0 \cdot \frac{dQ}{T_Q} - dQ_0 + T_0 \cdot \delta S_{gen} + T_0 \cdot s_{in} dm_{in} - \sum_{i=1}^C T_0 \cdot s_{i,out} \cdot x_{i,out} \cdot dm_{out} \quad (4.5a)$$

Oduzimanje jednačine (4.5a) od (4.4) daje sledeći izraz (4.6):

$$\begin{aligned} dU - T_0 \cdot dS &= dQ - dQ_0 - dW_u - p_0 \cdot dV + h_{in} \cdot dm_{in} - \sum_{c=1}^C h_{c,out} \cdot x_{c,out} \cdot dm_{out} - T_0 \cdot \frac{dQ}{T_Q} + dQ_0 \\ &\quad - T_0 \cdot \delta S_{gen} - T_0 \cdot s_{in} \cdot dm_{in} + \sum_{c=1}^C T_0 \cdot s_{c,out} \cdot x_{c,out} \cdot dm_{out} \\ dQ \left(1 - \frac{T_0}{T_Q} \right) - dW_u - T_0 \cdot \delta S_{gen} + (h_{in} - T_0 \cdot s_{in}) dm_{in} - \underbrace{\sum_{c=1}^C (h_{c,out} - T_0 \cdot s_{c,out}) x_{c,out} \cdot dm_{out}}_A & \quad (4.6) \end{aligned}$$

$$= dU + p_0 \cdot dV - T_0 \cdot dS$$

Deo izraza (4.6) označen kao A, korišćenjem izraza za maseni bilans komponenti

$$x_{c,out} \cdot dm_{out} = x_{c,in} \cdot dm_{in} - dM_c$$

i definisanjem hemijskog potencijala jedinične mase u ravnoteži sa okolinom:

$$h_{c,out} - T_0 \cdot s_{c,out} = \mu_{c,0}^M$$

može se predstaviti u obliku (4.7):

$$\sum_{c=1}^C (h_{c,\text{out}} - T_0 \cdot s_{c,\text{out}}) \cdot x_{c,\text{out}} \cdot dm_{\text{out}} = \sum_{c=1}^C (h_{c,\text{in}} - T_0 \cdot s_{c,\text{in}}) \cdot x_{c,\text{in}} \cdot dm_{\text{in}} - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot dM_c \quad (4.7)$$

Zamenom (4.7) u jednačinu (4.6) i njenim preuređivanjem sledi (4.8):

$$\underbrace{dQ \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right)}_{dE_Q} + \underbrace{\left(h_{\text{in}} - T_0 \cdot s_{\text{in}} - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot x_{c,\text{in}}\right)}_{dE_{\text{FL,in}}} \cdot dm_{\text{in}} - \underbrace{dW_u}_{dE_W} - \underbrace{T_0 \cdot \delta S_{\text{gen}}}_{\delta E_D} = \underbrace{dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot dM_c}_{dE_S} \quad (4.8)$$

U slučaju idealnog seta uređaja, generisana entropija je jednaka 0, dok generisani rad dW_u izražen preko ostala tri dela jednačine (4.8) predstavlja eksergiju (4.9):

$$\underbrace{dW_u}_{dE_W} = \underbrace{dQ \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right)}_{dE_Q} + \underbrace{\left(h_{\text{in}} - T_0 \cdot s_{\text{in}} - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot x_{c,\text{in}}\right)}_{dE_{\text{FL,in}}} \cdot dm_{\text{in}} - \underbrace{\left(dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot dM_c\right)}_{dE_S} \quad (4.9)$$

Jednačina (4.8) može da se izrazi putem sastavnih delova, (4.10):

$$dE_Q + dE_{\text{FL,in}} - dE_W = dE_S \quad (4.10)$$

gde je:

dE_Q - maksimalni rad zatvorenog sistema ($dE_{\text{F,in}}=0$, jer je $dm_{\text{in}}=0$) u kome se realizuju stacionarni procesi ($dE_S=0$, jer $dU = dV = dS = dM_c = 0$), (4.11):

$$dE_Q = dQ \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right) \quad (4.11)$$

$dE_{\text{FL,in}}$ - maksimalni rad ukoliko strujni tok iz drugog sistema ne transferiše toplotu i energiju u set idealnih uređaja, već se direktno uvodi u referentno okruženje i dolazi u potpunu ravnotežu sa njim, (4.12):

$$dE_{\text{FL,in}} = \left(h_{\text{in}} - T_0 \cdot s_{\text{in}} - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot x_{c,\text{in}}\right) dm_{\text{in}} \quad (4.12)$$

Ukoliko pri dostizanju ravnoteže nema promene sastava toka tj. $dm_{\text{in}}=dm_{\text{out}}=dM$ promena eksergije toka (4.13) glasi:

$$dE_{\text{FL}} = (dh - T_0 \cdot ds) dM \quad (4.13)$$

dE_S - maksimalni rad koji se može dobiti iz sistema mase M kada akumulisana masa dM dolazi u potpunu ravnotežu sa referentnim okruženjem (4.14):

$$dE_S = dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot dM_c \quad (4.14)$$

Ukoliko se akumulisana masa ne menja pri dostizanju ravnoteže, onda važi izraz (4.14a):

$$dE_S = dU + p_0 dV - T_0 dS \quad (\text{Kinanova raspoloživost}) \quad (4.14a)$$

Ukoliko pri tome zapremina u kojoj je smeštena masa M ostaje konstantna, onda važi (4.14b):

$$dE_S = dU - T_0 dS \quad (\text{Helmholcova slobodna energija}) \quad (4.14b)$$

Ukoliko je i pritisak u subsitemu A jednak pritisku referenog stanja, p_0 , važeći izraz je (4.14c):

$$dE_S = (dH - TdS)_{T_0, p_0} \quad (\text{Gibsova slobodna funkcija}) \quad (4.14c)$$

U prisustvu destrukcije eksnergije, jednačina (4.10) postaje (4.15):

$$dE_Q + dE_{FL, in} - (dE_W + \delta E_D) = dE_S \quad (4.15)$$

Drugim rečima, maksimalni rad je umanjen za destrukciju eksnergije.

Integrisanjem jednačine (4.14) pri konstantnim parametrima okoline, dobija se jednačina (4.16):

$$E_S = \int dE_{S(p_0, T_0, \mu_{c,0})} dt = U + p_0 V - T_0 S - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot M_c \quad (4.16)$$

E_S je maksimalan rad koji može biti dobijen iz materije koja poseduje unutrašnju energiju U , zapremine V , koja je sastavljena od C komponenti pri čemu je broj molova (ili masa) komponente n_c , kada ona dostiže ravnotežu sa okolinom temperature T_0 , pritiska p_0 , u kojoj svaka od komponenti ima hemijski potencijal $\mu_{c,0}$. Isti izraz se može upotrebiti i u slučaju da je za dovođenje materije u ravnotežu sa okolinom potrebno uložiti minimalan rad.

U slučaju da je $M = dm_{in}/dt$ jednačina (4.12) postaje (4.17):

$$dE_{FL, in} = \left(h_{in} - T_0 \cdot s_{in} - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot x_{c, in} \right) \cdot M \cdot dt = H - T_0 \cdot S - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot M_c \quad (4.17)$$

pa se njenim integrisanjem kao u slučaju jednačine (4.16) dobija funkcija protočne eksnergije (4.18):

$$dE_{FL} = H - T_0 \cdot S - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot M_c \quad (4.18)$$

Primenom jednačine (4.18) nalazi se eksergija protočnog sistema u kome svaka hemijska komponenta c mase M_c i sastava x_c poseduje u stanju ravnoteže s okolinom hemijski potencijal $\mu_{c,0}$ dostižući pritom sastav $x_{c,0}$, pri čemu u stanju ravnoteže kada eksergija ima nulti nivo važi izraz (4.19):

$$[H_0 - T_0 S_0]_{T_0, p_0, \{x_c\}} = \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M M_c \quad (4.19)$$

Korišćenjem jednačine (4.19) ukupnu eksergiju sistema moguće je napisati u sledećem obliku (4.20):

$$E_{FL} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) + \sum_{c=1}^C (\mu_c^M - \mu_{c,0}^M) M_c \quad (4.20)$$

pri čemu prva dva člana čine termičko-mehanički deo, (4.21):

$$E_{PH} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (4.21)$$

koji se naziva fizička eksergija, dok je poslednji član hemijski deo, (4.22):

$$E_{CH} = \sum_{c=1}^C (\mu_c^M - \mu_{c,0}^M) M_c \quad (4.22)$$

koji predstavlja hemijsku eksergiju.

Upotreba više od jednog sastava komponente u stanju ravnoteže data je izrazom (4.23):

$$\sum (\mu_c^M - \mu_{c,0}^M) M_c = \sum_{i1} (\mu_{c,i1}^M - \mu_{c,0}^M) M_c + \sum_{i2} (\mu_{c,i2}^M - \mu_{c,0}^M) M_c \quad (4.23)$$

gde se za pojedine vrste c (npr. soli) koje su prisutne u tragovima u ravnotežnom stanju sa uobičajenom pretpostavljenom okolinom 0 (npr. vazduhom), ali su istovremeno prisutne u izobilju u okolini stanja $i2$, pretpostavlja još jedno ravnotežno stanje okoline $i2$ (npr. mora).

4.4. Teorema o destruktiji eksergije

Jedna od najznačajnijih inženjerskih primena zakona termodinamike može se okarakterisati kao veza između ireverzibilnosti (generisanja entropije) i jednosmernog puta koji vodi ka smanjenju eksergije. Mnoga pravila vezana za maksimizaciju energetske efikasnosti različitih procesnih jedinica, postrojenja i samih procesa, nisu ništa drugo do specijalni slučaj principa destruktije eksergije (teoreme Gui-Stodole, teoreme o izgubljenom radu, analize Drugog zakona termodinamike). Posmatrano sa teorijskog nivoa, koncept gubitka eksergije, nastao iz simultanog korišćenja Prvog i Drugog zakona termodinamike, ukazuje na činjenicu da oba principa termodinamike funkcionišu istovremeno, uprkos tradiciji rešavanja problema uz

ignorisanje Drugog zakona termodinamike. Trajna poruka ove teoreme je da u polju energetskog inženjeringa gubici mogu biti mereni u jedinicama generisane entropije.

Izvođenje teoreme počinje preuređivanjem jednačine bilansa eksergije (4.8) koja važi pod uslovom da set uređaja koji razmenjuje rad sa sistemom A ne radi idealno, već generiše izvetsnu količinu entropije tako da se generisani rad u tom slučaju može izraziti preko ostalih članova na sledeći način, (4.24):

$$dW_u = dQ \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right) + \left(h_{in} - T_0 \cdot s_{in} - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot x_{c,in}\right) \cdot dm_{in} - \left(dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot dM_c\right) - T_0 \cdot \delta S_{gen} \quad (4.24)$$

Na taj način, dolazi se do zaključka da maksimalna količina generisanog korisnog rada, W_{rev} , koja odgovara reverzibilnom načinu rada seta uređaja, zavisi eksplicitno od generisane entropije u sistemu S_{gen} .

Obzirom da po Drugom principu termodinamike veličina generisane entropije S_{gen} , ne može biti negativna, to prva tri člana u jednačini (4.24) predstavljaju gornju granicu za generisani rad W_u (4.25):

$$dW_{rev} = dQ \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right) + \left(h_{in} - T_0 \cdot s_{in} - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot x_{c,in}\right) \cdot dm_{in} - \left(dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot dM_c\right) \quad (4.25)$$

Ova granica se doseže kada sistem uređaja radi reverzibilno ($S_{gen}=0$), pa se na ovaj način generisani rad u slučaju reverzibilnog procesa W_{rev} može identifikovati kao suma tri oblika eksergije čiji je fizički smisao objašnjen u prethodnom odeljku. Ovaj zbir se istovremeno može označiti kao ukupna eksergija sistema E_{rev} u kome se odigravaju isključivo reverzibilni procesi putem razmene materije (4.26), toplote i rada sa drugim sistemima.

$$dE_{rev} = dW_{rev} = dE_Q + dE_{FL,in} - dE_S \quad (4.26)$$

Na taj način jednačina (4.24) dobija jednostavniji oblik bilansa (4.27):

$$dW_u = dW_{rev} - T_0 dS_{gen} \quad (4.27)$$

ili, obzirom na Drugi princip termodinamike, oblik nejednačine (4.28):

$$dW_{rev} - dW_u = T_0 dS_{gen} \geq 0 \quad (4.28)$$

Očigledno je da se u slučaju realizacije ireverzibilnog procesa u sistemu, generisani rad smanjuje proporcionalno generisanju entropije sistema. Količina smanjenog rada u takvom procesu, $W_{rev}-W_u$, imenuje se kao izgubljeni rad W_L (radna sposobnost) ili *destrukcija eksergije* E_D . Veza između generisanja entropije i destrukcije eksergije čini osnovu *teoreme o destrukciji eksergije* i izražava se za posmatrani protočni sistem u formi nejednačine (4.29):

$$dW_L = dE_D = T_0 dS_{gen} = T_0 \left(\sum_{out} sdm - \sum_{in} sdm \right) \geq 0 \quad (4.29)$$

Veličinu destrukcije eksergije, prethodno definisane kao razlike između maksimalne vrednosti reverzibilnog rada i stvarne vrednosti rada koji sistem generiše, moguće je definisati i kao razliku između odgovarajućih vrednosti eksergija (4.30):

$$dW_L = dE_D = dE_{rev} - dE_w \quad (4.30)$$

Veličina reverzibilnog rada W_{rev} može biti sa pozitivnim ili negativnim predznakom, zavisno od toga da li sistem koristi ili generiše rad. Iz tog razloga, nejednakost Drugog principa termodinamike $W_{rev}>0$ mora da se napiše sa odgovarajućim predznakom da bi ta nejednakost imala algebarskog smisla. Implikacija ove prezentacije je da vrednost destrukcije eksergije E_D nikad ne može biti negativna. Veličine destrukcije eksergije E_D i veličina transfera rada W_u nisu funkcije stanja sistema, već zavise od istorije procesa koji ih generiše.

U slučaju posmatranog otvorenog termodinamičkog sistema koji realizuje stacionarne procese ($M=dm_{in}/dt$) jednačina eksergije (4.24) dobija oblik (4.31):

$$dW_u = dQ \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_Q} \right) + \left(H - T_0 \cdot S - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot M_c \right) - \left(dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot M_c \right) - T_0 \cdot \delta S_{gen} \quad (4.31)$$

čijim se preuređenjem i kombinovanjem sa izrazom (4.27) dobija izraz (4.32) za maksimalni mogući generisani rad ili radnu sposobnost sistema:

$$\underbrace{E_{rev}}_{\text{Maks. radna sposobnost}} = \underbrace{-\frac{d}{dt}(H + p_0 V - T_0 S)}_{\text{Akumulacija neprotocne eksergije}} + \underbrace{dQ \left(1 - \frac{T_0}{T_Q} \right)}_{\text{Transfer eksergije toplotom}} + \underbrace{\sum_{in} M(h - T_0 s)}_{\text{Transfer eksergije ulaznim tokom}} - \underbrace{\sum_{out} M(h - T_0 s)}_{\text{Transfer eksergije izlaznim tokom}} \quad (4.32)$$

U slučaju da otvoreni sistem vrši zapreminski rad $p_0 dV/dt$ prenoseći ga u okolinu, potrebno je ukupni generisani rad W_u umanjiti za zapreminski rad prema relaciji (4.33):

$$dW_u - p_0 \frac{dV}{dt} = dQ \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right) + \left(H - T_0 \cdot S - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot M_c\right) - \left(dU + p_0 dV - T_0 dS - \sum_{c=1}^C \mu_{c,0}^M \cdot M_c\right) - T_0 \cdot dS_{\text{gen}} \quad (4.33)$$

tako da maksimalnu radnu sposobnost sistema (4.34) čini ukupna eksergija u slučaju reverzibilnog rada seta uređaja umanjena za ovaj zapreminski rad.

$$\underbrace{E_{\text{rev}} - p_0 \frac{dV}{dt}}_{\text{Maks. radna sposobnost}} = \underbrace{-\frac{d}{dt}(H + p_0 V - T_0 S)}_{\text{Akumulacija neprotocne eksergije}} + \underbrace{dQ \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right)}_{\text{Transfer eksergije toplotom}} + \underbrace{\sum_{\text{in}} M(h - T_0 s)}_{\text{Transfer eksergije ulaznim tokom}} - \underbrace{\sum_{\text{out}} M(h - T_0 s)}_{\text{Transfer eksergije izlaznim tokom}} \quad (4.34)$$

Prethodna analiza može se sumirati u dva zaključka:

- da je generisanje entropije mera destrukcije eksergije,
- da je korišćenjem jednačine (4.25) moguće proceniti gornju granicu generisanja rada koju sistem može da ostvari, odnosno odrediti maksimalnu vrednost rada.

Može se reći da su tri najznačajnija izvora generisanja entropije predstavljena:

- prenosom toplote između sistema različitih temperatura,
- efektom trenja nastalim strujanjem fluida kroz različite otvore i cevi i
- procesom mešanja dva ili više strujnih tokova.

U opštem smislu, za slučaj termodinamičkih sistema koji su u termalnom kontaktu sa okolinom (T_0), princip pada eksergije determiniše proporcionalnost izgubljenog rada ukupnoj količini generisane entropije, tokom ispitivanog procesa. Logičan zaključak je da projektovanje postrojenja i komponenti sa minimalnom destrukcijom korisnog rada počinje sa minimizacijom generisanja entropije. Sa druge strane, ova minimizacija pored termodinamičkih zakona uvažava i zakone prenosa toplote (putem temperaturnih razlika) i zakone prenosa mase (putem razlike pritisaka). U krajnjem ishodu, stepen termodinamičke neidealnosti krajnjeg projekta povezan je sa fizičkim karakteristikama sistema i konačnim vremenskim intervalima operacije.

4.5. Osnovni oblici eksergije

Ukupna eksergija materije prema jednačini (4.35) sadrži četiri osnovne komponente: kinetičku (E_{KN}), potencijalnu (E_{PT}), fizičku (E_{PH}) i hemijsku eksergiju (E_{CH}).

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{KN}} + E_{\text{PT}} + E_{\text{PH}} + E_{\text{CH}} = m(e_{\text{KN}} + e_{\text{PT}} + e_{\text{PH}} + e_{\text{CH}}) \quad (4.35)$$

Kinetička i potencijalna eksergija se ocenjuju na osnovu relativnih koordinata u okolini koje predstavljaju referentnu ravan za međusobni odnos među delovima, dok se fizička i hemijska eksergija procenjuju na osnovu parametara i hemijskog sastava okoline. Drugi oblici eksergije kao što su: nuklearna eksergija, eksergija površinskog napona i ostale koje nemaju praktičan značaj u oblasti termotehnike, ne uzimaju se u obzir kod proračuna eksergija tokova i sistema.

Bilans eksergije zatvorenog sistema (4.36) treba takođe da sadrži i sledeće komponente: eksergiju u vezi sa prenosom toplote (E_Q), radom (E_W) kroz granicu sistema i komponentu destrukcije eksergije (E_D).

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{KN}} + E_{\text{PT}} + E_{\text{PH}} + E_{\text{CH}} + E_Q + E_W + E_D = m(e_{\text{KN}} + e_{\text{PT}} + e_{\text{PH}} + e_{\text{CH}} + e_Q + e_W + e_D) \quad (4.36)$$

Eksergija povezana sa prenosom količine toplote Q_i kroz granicu sistema koji nastaje kada se temperatura na granici sistema razlikuje od temperature okoline ($T_i \neq T_0$), data je izrazom (4.37):

$$E_{Q,i} = \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i \quad (4.37)$$

Eksergija povezana sa prenosom rada kroz granice sistema (4.38) odgovara količini rada koji se vrši nad sistemom ili nastaje kao proizvod sistema:

$$E_W = W \quad (4.38)$$

Destrukcija eksergije usled ireverzibilnosti unutar sistema direktno je proporcionalna generisanoj entropiji unutar zatvorenog sistema prema izrazu (4.39):

$$E_D = T_0 S_{\text{gen}} \quad (4.39)$$

Upotreba eksergijske analize u inženjerskim problemima vezana za termoprocesna postrojenja, obično se vezuje za otvorene stacionarne termodinamičke sisteme i kontrolne zapremine (CV). Bilans eksergije ovih sistema može se dati u sledećem obliku (4.40):

$$E_D = \sum_{\text{in}} E_{\text{tot,in}} - \sum_{\text{out}} E_{\text{tot,out}} + \sum_i E_{Q,i} + \sum_j E_{W,j} \quad (4.40)$$

Eksergija povezana sa protokom mase kroz granice kontrolne zapremine (CV) je ukupna pro- točna eksergija ulaznih/izlaznih tokova i prema relaciji (4.41) iznosi:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{KN}} + E_{\text{PT}} + E_{\text{PH}} + E_{\text{CH}} = G(e_{\text{KN}} + e_{\text{PT}} + e_{\text{PH}} + e_{\text{CH}}) \quad (4.41)$$

4.5.1. Potencijalna eksergija

Potencijalna eksergija (E_{PT}) se određuje preko potencijalne energije u odnosu na nulti nivo povezan sa okolinom. Kako potencijalna energija mora uzeti u obzir sve sile koje deluju na razmatranu materiju i okolinu, to znači da pored sile okoline treba voditi računa i o "sili guranja" koja se javlja zbog pritiska komponenata okoline. Pod pretpostavkom da se ubrzanje zemljine teže g_a ne menja sa visinom težišta sistema z u odnosu na nulti nivo okoline, potencijalna eksergija protočnog sistema masenog protoka materije G se može izračunati iz izraza (4.42):

$$E_{PT} = Ge_{PT} = Gg_a z \quad (4.42)$$

4.5.2. Kinetička eksergija

Kinetička eksergija protočnog sistema (E_{KN}) jednaka je njegovoj protočnoj kinetičkoj energiji koja se izračunava pomoću brzine kretanja v u odnosu na referentnu okolinu po jednačini (4.43):

$$E_{KN} = Ge_{KN} = G \frac{v^2}{2} \quad (4.43)$$

4.5.3. Fizička eksergija

Fizička eksergija je deo eksergije koji se može dobiti iz sistema dovodenjem datog stanja u ograničenu ravnotežu ili ograničeno stanje mirovanja pri referentnoj temperaturi i pritisku, tako da sistem dostiže toplotnu i mehaničku ravnotežu, ali ne i hemijsku ravnotežu. Fizička eksergija, drugim rečima, predstavlja deo eksergije sistema u stanju (T, p) koja nastaje usled razlike u temperaturi i pritisku razmatrane materije sa temperaturom i pritiskom okoline (T_0, p_0) .

Fizička eksergija zatvorenog sistema predstavlja prvi član u izrazu za ukupnu eksergiju i sastoji se od:

- *toplotne (termičke) eksergije* E_T (povezane sa temperaturom sistema) i
- *mehaničke eksergije* E_M (povezane sa pritiskom sistema),

kako je naznačeno u izrazu (4.44):

$$E_{PH} = \underbrace{S(T - T_0) - V(p - p_0)}_{\text{Fizickaeksergija, } E_{PH}} = \underbrace{S(T - T_0)}_{\text{Toplotnaeksergija, } E_T} - \underbrace{V(p - p_0)}_{\text{Mehanickeeksergija, } E_M} \quad (4.44)$$

Fizička eksergija se može takođe izraziti preko entalpije H izvođenjem pomoću jednačine za maksimalni reverzibilni tehnički rad (4.25) koji je funkcija početnog i krajnjeg stanja sistema i uslova okoline tako da se dobije relacija (4.45):

$$E_{PH} = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (4.45)$$

U slučaju otvorenih sistema protočna eksergija (4.46) se može zapisati kao:

$$E_{PH} = E_T + E_M = G(e_T + e_M) \quad (4.46)$$

gde je toplotna eksergija (4.47):

$$E_T = Ge_T = G\{h(T, p_0) - h(T_0, p_0) - T_0[s(T, p_0) - s(T_0, p_0)]\} \quad (4.47),$$

dok je mehanička eksergija (4.48):

$$E_M = Ge_M = G\{h(T_0, p) - h(T_0, p_0) - T_0[s(T_0, p) - s(T_0, p_0)]\} \quad (4.48)$$

Protočna fizička eksergija gasova izražava se pomoću specifičnog toplotnog kapaciteta c_p pomoću jednačine (4.49):

$$E_{PH} = G \left\{ c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + RT_0 \ln \frac{p}{p_0} \right\} \quad (4.49)$$

gde je R specifična gasna konstanta za dati gas.

Za protočna fizičku eksergiju čvrstih tela i tečnosti koristi se izraz (4.50):

$$E_{PH} = G \left\{ c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] - V(p - p_0) \right\} \quad (4.50)$$

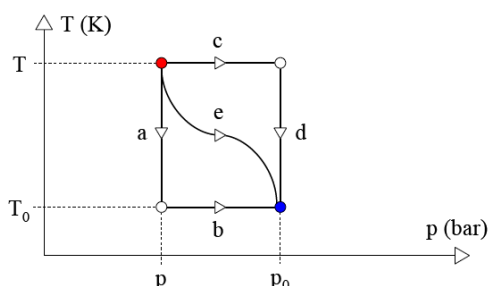
pri čemu se drugi član ove jednačine obično zanemaruje obzirom da se čvrsta tela i tečnosti nalaze na pritisku okoline ($p=p_0$).

Klasifikacija eksergije se, prema nekim autorima [23], može izvršiti na način koji je sličan klasifikaciji energije sa nekim izuzecima (slika 4.2) pri čemu je naglasak u inženjerskoj termodinamici stavljen na termomehaničku eksergiju.

Eksergija					
Fizička				Hemijska	
Mehanička		Termomehanička			
Kinetička	Potencijalna	Bazirana na temperaturi	Bazirana na pritisku	Mešanje i separacija	Hemijske reakcije

Slika 4.2. Klasifikacija eksergije za p-V-T sisteme [23]

Kako se vidi sa slike, fizička eksnergija se deli na termomehantičku i mehaničku eksnergiju. Termomehantička eksnergija se dalje može rastaviti na pritisni i temperaturni deo, dok mehanička eksnergija prema ovom pristupu ne predstavlja pritisni deo termomehantičke eksnergije, već obuhvata kinetičku i potencijalnu eksnergiju sistema. Ovakva dekompozicija nema realan fundamentalan značaj, nije čak ni jedinstvena i samo je izvršena radi uprošćavanja.



Slika 4.3. Dekompozicija termomehantičke eksnergije [23]

Neka se posmatra sistem u termodinamičkom stanju (T, p) koji podležu skupu reverzibilnih procesa koji se završavaju u ograničenoj ravnoteži sa okolinom (T_0, p_0) koja označava jednakost pritisaka i temperatura. Nedostatak jedinstvenosti u podeli termomehantičke eksnergije je prikazan na [slici 4.3](#) gde se mogu pratiti dva logična puta, $(a+b)$ i $(c+d)$, iz realnog stanja do ravnoteže s okolinom. Pored toga, pritisak i temperatura se mogu menjati istovremeno što je označeno putem (e) . U literaturi postoji izvesno opšte slaganje da se deo eksnergije u vezi sa temperaturom odnosi na dovođenje temperature sistema od T do T_0 , dok se pritisak održava konstantnim na p (a) . Deo eksnergije u vezi sa pritiskom se odnosi na promenu pritiska od p do p_0 , dok je temperatura nepromenjena T_0 (b) . Ostale dekompozicije, kao što je put $(c+d)$, dale bi različite rezultate za temperaturne i pritisne komponente eksnergije, ali je ukupna promena termomehantičke eksnergije, naravno, identična i nezavisna od izabranog puta, pošto je eksnergija veličina sistema.

4.5.4. Hemijska eksnergija

Drugi bitan deo eksnergije sistema jeste hemijska eksnergija koja nastaje usled razlike u sastavu između razmatrane materije i njene okoline pri čemu ta razlika u sastavu podrazumeva različite komponente sistema i sredine i različite koncentracije tih komponenti. Hemijska eksnergija predstavlja potencijal dodatne raspoložive energije. Ovaj potencijal se može dobiti iz sistema u graničnom umrtvljenom stanju dovođenjem hemijskih potencijala μ_i komponente $i \in (1, n)$ iz stanja (T_0, p_0) u ravnotežu sa njenom okolinom u krajnjem ili umrtvljenom stanju $(T_0, p_0, \mu_{i,0})$ [17]. Tokom drugog koraka, pored toplotne i mehaničke ravnoteže, sistem dostiže i hemijsku ravnotežu s okolinom putem operacija prenosa mase. Hemijska eksnergija tako predstavlja maksimalnu vrednost korisnog rada za posmatranu materiju koji se dobija dovođenjem materije u stanje okoline koja je definisana parametrima $(T_0, p_0, \mu_{i,0})$ pri čemu se proces prenosa toplote i razmena materija vrši samo sa okolinom.

Koncept reverzibilnosti [18] koji se može primeniti na sve pravce toka i interakcije daje alternativnu definiciju:

"Hemijska eksergija je jednaka minimalnoj količini rada neophodnog da se posmatrana materija stvori iz okolnih materija i dovede u stanje okoline pomoću procesa koji uključuju prenos toplote i razmenu materija isključivo sa okolinom."

Opšti oblik jednačine za hemijsku eksergiju (4.51) dobija se kao poseban slučaj jednačine za eksergiju (4.1) kada posmatrani termodinamički sistem dostigne termičku i mehaničku ravnotežu sa okolinom ($T=T_0, p=p_0$):

$$E_{CH} = \underbrace{\sum_c n_c (\mu_c - \mu_{c,0})}_{\text{Hemijskaeksergija, } E_{CH}} \quad (4.51)$$

Hemijski potencijal komponenti koje nisu u hemijskoj ravnoteži sa okolinom, μ_c , u jednačini (4.51) moguće je izraziti u obliku (4.52):

$$\mu_c = \mu_{c,0} + R_m T_0 \ln a_c \quad (4.52)$$

pri čemu $\mu_{c,0}$ predstavlja hemijski potencijal komponente c u uslovima okoline, a_c aktivitet te komponente, a R_m univerzalnu molarnu gasnu konstantu.

Aktivitet komponente se različito izražava u slučaju gasova, tečnosti ili čvrstih tela (fugacitet, pritisak, koncentracija, maseni ili molski udeo) u zavisnosti od njihovog ponašanja (idealni ili realni sistemi). Jednačina (4.52) tako postaje (4.53):

$$E_{CH} = \sum_c n_c (\mu_c - \mu_{c,0}) + R_m T_0 \sum_c n_c \ln a_c \quad (4.53)$$

Hemijska eksergija sistema može se, u skladu sa izrazom (4.54), generalno podeliti na:

- *reakcionu eksergiju* koja se odnosi se na izračunavanje eksergije u hemijskim reakcijama i
- *nereakcionu eksergiju* koja se odnosi se na izračunavanje eksergije u procesima gde nema hemijske reakcije kao što su: ekspanzija, kompresija, mešanje i separacija.

$$E_{CH,sys} = E_{CHr} + E_{CHnr} \quad (4.54)$$

4.5.4.1. Standardna hemijska eksergija supstanci

Izračunavanje eksergije sistema se može olakšati upotrebom parametara standardne okoline i odgovarajućih tabela standardizovanih hemijskih eksergija. Standardizovane hemijske eksergije su bazirane na standardnim vrednostima temperature (T_0) i pritiska (p_0) okoline, hemijska eksergija nađena na bazi standardizovanih parametara okoline naziva se standardna hemijska eksergija, a njene vrednosti su izračunate i tabelirane za različite hemijske elemente i jedinjenja.

U eksergijskom inženjerstvu standardna molarna hemijska eksergija $e_{\text{CH(m)},i}^0$ jedinjenja i se sastoji iz slobodne molarne Gibsove energije formiranja jedinjenja u standardnom stanju iz njenih sastavnih elemenata $\Delta_f g_{m,i}^0$ i iz stehiometrijske sume vrednosti molarnih hemijskih eksergija sastavnih elemenata j u svom stabilnom stanju na standardnom pritisku p_0 i temperaturi T_0 prema jednačini (4.55):

$$e_{\text{CH(m)},i}^0 = \Delta_f g_{m,i}^0 + \sum_j \nu_j e_{\text{CH(m)},j}^0 \quad (4.55)$$

pri čemu se standardna molarna slobodna Gibsova energija formiranja jedinjenja iz njegovih sastavnih elemenata j u stabilnoj molekulskoj formi, u hemijskoj termodinamici definiše kao standardni hemijski potencijal $\mu_{i,0}$ jedinjenja i čija je vrednost hemijskog potencijala jednaka nuli u standardnom stanju.

Standardna molarna Gibsova energija stvaranja jedinjenja $\Delta_f g_m^0$ se izračunava kao promena ove veličine za reakciju stvaranja tog jedinjenja u skladu sa izrazom (4.56):

$$\Delta_f g_m^0 = \sum \nu_{\text{prod}} \Delta_f g_{m,\text{prod}}^0 - \sum \nu_{\text{rea}} \Delta_f g_{m,\text{rea}}^0 \quad (4.56)$$

gde su sa ν i $\Delta_f g_{m}^0$ označeni stehiometrijski koeficijenti i molarne Gibsove energije proizvoda i reaktanata hemijske reakcije.

Ista veličina, može se napisati i preko standardnih molarnih hemijskih eksergija tako da važi (4.57):

$$\Delta_f g_m^0 = \sum \nu_{\text{prod}} \Delta_f e_{\text{CH,prod}}^0 - \sum \nu_{\text{rea}} \Delta_f e_{\text{CH,rea}}^0 \quad (4.57)$$

Na taj način, merenjem ove veličine za određenu reakciju nalazi se hemijska eksergija jednog od učesnika reakcije preko hemijskih eksergija ostalih učesnika reakcije koje su već poznate i za datu materiju predstavljaju referentne vrste, dok se data reakcija smatra referentnom reakcijom za tu istu materiju.

Molarna eksergija hemijske reakcije (reakciona eksergija) istovremeno, sudeći po narednom izrazu (4.58), predstavlja negativnu promenu standardne molarne Gibsove energije (afinitet) date hemijske reakcije pod uslovom da su standardne molarne hemijske eksergije svih elemenata ili jedinjenja učesnika reakcije već poznate:

$$e_{\text{CHr,m}}^0 = -\Delta_f g_m^0 = \sum \nu_{\text{prod}} \Delta_f e_{\text{CH,rea}}^0 - \sum \nu_{\text{rea}} \Delta_f e_{\text{CH,prod}}^0 \quad (4.58)$$

4.5.4.2. Hemijska eksergija gasova

Definicija hemijske eksergije ukazuje da za dobijanje maksimalne količine rada, korišćeni procesi moraju biti potpuno reverzibilni [18]. Početno stanje u ovom procesu je stanje okoline

definisano sa T_0 i p_0 , a krajnje stanje je ravnotežno stanje definisano sa T_0 i parcijalnim pritiskom gasovite referentne posmatrane supstance p_{00} koja je komponenta atmosfere. Pošto se početno i krajnje stanje karakterišu istom temperaturom T_0 , može se koristiti reverzibilni izotermni proces za redukciju materije od stanja (T_0, p_0) do stanja (T_0, p_{00}) . Takav proces zadovoljava uslov reverzibilnog prenosa toplote samo sa okolinom, kao što je navedeno u definiciji eksergije. Na kraju procesa ekspanzije, kada se pritisak gasa smanjuje do svog parcijalnog pritiska u atmosferskom vazduhu, gas se može osloboditi reverzibilno kroz polupropustljivu membranu u atmosferu, pa ovaj proces, prema definiciji, odgovara razmeni materije isključivo sa okolinom.

Za idealan gas njegova protočna hemijska eksergija i odnos sa posmatranom okolinom se određuje odnosom standardnog pritiska okoline i parcijalnog pritiska odgovarajuće komponente gasa po jednačini (4.59):

$$E_{\text{CH,IG}} = GRT_0 \ln(p_0/p_{00}) \quad (4.59)$$

gde je sa p_{00} označen parcijalni pritisak komponente datog gasa u okolini.

Za realan gas izraz za hemijsku eksergiju (4.60) sadrži umesto pritiska fugacitet gasa f definisan kao proizvod pritiska p i koeficijenta fugaciteta Φ ($f=p \cdot \Phi$) čija vrednost iznosi 1 u slučaju idealnog gasa:

$$E_{\text{CH,RG}} = GRT_0 \ln(f_0/f_{00}) \quad (4.60)$$

4.3.4.3. Hemijska eksergija smeša

Za izvođenje izraza za hemijsku eksergiju smeše posmatra se reverzibilni uređaj u kome se napajanje vrši smešom N komponenti koja je u ravnotežnom stanju definisanom sa T_0 i p_0 . Svaka od N komponenti se odvaja zapravo pomoću polupropustljive membrane, a zatim reverzibilno i izotermno komprimuje od svog parcijalnog pritiska u smeši p_i do p_0 . Ukupni rad kompresije za poznatu masu gasne smeše je dat relacijom (4.61):

$$\sum_{i=1}^N \left[W_{x_i} \right]_{\text{rev}} = mRT_0 \sum_{i=1}^N x_i \ln x_i \quad (4.61)$$

gde je x_i maseni udeo i -te komponente u smeši.

Pošto su svi ovi procesi koji se odigravaju u ovom uređaju reverzibilni, specifična eksergija gasne smeše (4.62) koju čini N idealnih gasova je zbir eksergija njenih komponenti umanjen za rad kompresije:

$$e_{\text{CH,IG}} = \underbrace{\sum_{i=1}^N x_i e_{\text{CH},i}^0}_{\text{hem.eksnergija}} + RT_0 \underbrace{\sum_{i=1}^N x_i \ln x_i}_{\text{eks.mesanja}} \quad (4.62)$$

Rad kompresije, drugi član na desnoj strani jednačine (4.62), može se interpretirati kao minimalan rad neophodan za separaciju komponenti smeše i njihovo dovođenje na pritisak i temperaturu okoline i predstavlja eksnergiju mešanja komponenti. Pošto je drugi član na desnoj strani jednačine (4.62) uvek negativan, hemijska eksnergija smeše je uvek manja od zbira hemijskih eksnergija njenih komponenti na pritisku i temperaturi smeše. Jednačine (4.61) i (4.62) su takođe primenjive na idealne tečne rastvore, tj. rastvore stvorene bez promene zapremine ili entalpije.

Neka se sada razmatra, pri okolnim uslovima, temperaturi T_0 i pritisku p_0 , gasna smeša čije se sastavne vrednosti x_i razlikuju od vrednosti $x_{i,0}$ ravnotežnog atmosferskog vazduha. Za ravnotežni atmosferski vazduh, vrednosti parcijalnih eksnergija pojedinačnih gasova koji ga čine jednake su nuli. Iz jednačine (4.61) dobija se specifična eksnergija gasne smeše koju čini N idealnih gasova u obliku (4.63):

$$e_{\text{CH,IG}} = \sum_{i=1}^N RT_0 x_i \ln \frac{x_i}{x_{i,0}} \quad (4.63)$$

Primenom ove jednačine može se naći standardna hemijska eksnergija gasovitih sastojaka atmosfere kao eksnergija njihovog mešanja u atmosferskom vazduhu, uzimajući da je udeo gasa u smeši $x_i = 1$.

U slučaju neidealnih smeša, kao što su tečni i čvrsti rastvori, umesto masenog udela x_i supstance i u logaritamski član jednačine (4.62) mora se uvrstiti aktivitet a_i , u ovom slučaju definisan kao proizvod ($a_i = \gamma_i \cdot x_i$) masenog udela x_i i koeficijenta aktiviteta γ_i , kako bi se izrazio član za eksnergiju mešanja na referentnoj eksnergijskoj temperaturi T_0 i pritisku p_0 . U slučaju realnih rastvora eksnergija smeše se može dobiti ako su koeficijenti aktivnosti γ_i za komponente poznati. Opštiji oblik jednačine (4.62) se tako svodi na jednačinu (4.64):

$$e_{\text{CH,LQ}} = \sum_{i=1}^N x_i e_{\text{CH},i}^0 + RT_0 \sum_{i=1}^N x_i \ln \gamma_i x_i \quad (4.64)$$

Koeficijenti aktivnosti mogu biti manji ili veći od jedinice, a iznose 1 za idealne rastvore.

4.5.4.4. Hemijska eksnergija goriva

Hemijska eksnergija gasovitih i nekih tečnih goriva [24] može se dobiti korišćenjem tabela sa standardnim hemijskim eksnerzijama datih u literaturi [25] pod uslovom da je poznat hemijski sastav goriva. Mnoga tečna i čvrsta goriva predstavljaju multikomponentne rastvore ili smeše

često nepoznatih supstanci, pa se za određivanje njihove hemijske eksergije može koristiti relacija koja uključuje konstantan odnos hemijske eksergije i toplotne moći goriva. Ipak, izračunavanja za različite organske supstance ukazuju da ovaj odnos ipak zavisi od hemijskog sastava goriva.

Pod uslovom da su neophodni podaci dostupni, specifična standardna hemijska eksergija gorivih supstanci može se dobiti iz sledećeg izraza (4.65):

$$e_{\text{CH,F}}^0 = -\Delta h_0 + T_0 \Delta s_0 + RT_0 \left(x_{\text{O}_2} \ln \frac{P_{00,\text{O}_2}}{P_0} - \sum_{\text{FG}} x_{\text{FG}} \ln \frac{P_{00,\text{FG}}}{P_0} \right) \quad (4.65)$$

gde se supskript FG odnosi na komponente dimnih gasova kao proizvoda sagorevanja.

Ovaj izraz se može primeniti na izračunavanje hemijske eksergije gasovitih goriva za koje se može odrediti hemijski sastav i za koje se mogu dobiti termohemijski podaci. Kod čvrstih i tečnih industrijskih goriva koji su smeše ili rastvori brojnih hemijskih jedinjenja obično nepoznate prirode otežano je određivanje promene entropije reakcije ovih goriva Δs_0 sa prihvatljivim stepenom preciznosti. Uvođenjem pretpostavke [26] da je odnos specifične standardne hemijske eksergije $e_{\text{CH,F}}^0$ i donje toplotne moći $H_{\text{D,F}}$ čvrstih i tečnih industrijskih goriva isti kao kod čistih hemijskih supstanci koje imaju iste odnose hemijskih komponenti dolazi se do izraza (4.66):

$$\beta = \frac{e_{\text{CH,F}}^0}{H_{\text{D,F}}} \quad (4.66)$$

gde je β konstanta proporcionalnosti i naziva se faktor kvaliteta ili koeficijent eksergije.

Podaci o donjoj toplotnoj moći posmatranih vrsta goriva nalaze se iz odgovarajuće termodinamičke literature [27] tako da se za zadati sastav goriva pomoću jednačine (4.66) dolazi do procenjenih vrednosti njihovih hemijskih eksergija. Nakon izračunavanja vrednosti β za brojne čiste organske supstance koje sadrže ugljenik, vodonik, kiseonik, azot i sumpor izvedene su korelacije koje izražavaju zavisnost β od atomskih odnosa vodonik/ugljenik, kiseonik/ugljenik, azot/ugljenik i u nekim slučajevima sumpor/ugljenik.

Pretpostavljeno je da se primenjivost ovih dobijenih izraza može proširiti tako da se obuhvate industrijska fosilna goriva. Za suve organske supstance koje se nalaze u čvrstim fosilnim gorivima sastavljenim od ugljenika, vodonika, kiseonika i azota, sa masenim odnosom kiseonika prema ugljeniku manjim od 0.667 ($x_{\text{O}} < 0.667$), dobijen je sledeći izraz (4.67) u vidu masenih odnosa ugljenika, vodonika, kiseonika i azota:

$$\beta_{\text{dry}} = 1.0437 + 0.1882 \frac{x_{\text{H}}}{x_{\text{C}}} + 0.0610 \frac{x_{\text{O}}}{x_{\text{C}}} + 0.0404 \frac{x_{\text{N}}}{x_{\text{C}}} \quad (4.67)$$

Unutar ograničenja koje se tiče gornje granice odnosa $x_{\text{O}}/x_{\text{C}}$, ova jednačina je primenjiva na širok opseg industrijskih čvrstih goriva, ali ne i na drvo. Preciznost ovog izraza se procenjuje kao veća od $\pm 1\%$.

Za fosilna goriva sa masenim odnosom kiseonika i ugljenika u granicama $0.667 < x_{\text{O}}/x_{\text{C}} < 2.67$, naročito onim koja sadrže drvo, važi izraz (4.68) koji se procenjuje kao precizan unutar granica $\pm 1\%$:

$$\beta_{\text{dry}} = \frac{1.0438 + 0.1882 \frac{x_{\text{H}}}{x_{\text{C}}} + 0.2509 \left(1 + 0.7256 \frac{x_{\text{H}}}{x_{\text{C}}} \right) + 0.0383 \frac{x_{\text{N}}}{x_{\text{C}}}}{1 - 0.3035 \frac{x_{\text{O}}}{x_{\text{C}}}} \quad (4.68)$$

Pošto su poslednje dve jednačine dobijene iz podataka koji se primenjuju na suve supstance, neophodno je kod proračuna za vlažna goriva preko jednačine (4.66) koristiti donju toplotnu moć suvog dela goriva koji odgovara jedinici mase vlažnog goriva. Ova vrednost je data sumom ($H_{\text{D,F}} + x_{\text{w}} h_{0,\text{ev}}$) gde je x_{w} maseni udeo vlage u gorivu, a $h_{0,\text{ev}}$ entalpija isparavanja vode na standardnoj temperaturi T_0 . Usled nedostatka dovoljnog broja podataka, odlučeno je da se zanemari uticaj energije hemijskih veza sumpora u jednačinama (4.67) i (4.68) i da se on tretira kao slobodan element, a takođe su zanemarene eksergije vlage i mineralnih materija (praha) sadržanih u gorivu. Tako je uvedena odgovarajuća korekcija za njihov uticaj na eksergiju goriva što vodi do korigovanog izraza (4.69) za specifičnu standardnu hemijsku eksergiju čvrstih industrijskih fosilnih goriva:

$$e_{\text{CH,F}}^0 = (H_{\text{D,F}} + x_{\text{w}} h_{0,\text{ev}}) \beta_{\text{dry}} + (e_{\text{CH,S}}^0 - H_{\text{D,S}}) x_{\text{S}} \quad (4.69)$$

gde S kao supskript ukazuje na količinu sumpora.

Uzimanjem vrednosti odgovarajućih konstanti jednačina (4.69) može se pogodnije zapisati u obliku (4.70):

$$e_{\text{CH,F}}^0 = (H_{\text{D,F}} + 2442 x_{\text{w}}) \beta_{\text{dry}} + 9417 x_{\text{S}} \quad (4.70)$$

Za tečna goriva uticaj sumpora je uključen u korelaciji koju daje izraz (4.71) s procenjenom preciznošću od $\pm 0.38\%$.

$$\beta = 1.0401 + 0.1728 \frac{x_{\text{H}}}{x_{\text{C}}} + 0.0432 \frac{x_{\text{O}}}{x_{\text{C}}} + 0.2169 \frac{x_{\text{S}}}{x_{\text{C}}} \left(1 - 2.0628 \frac{x_{\text{H}}}{x_{\text{C}}} \right) \quad (4.71)$$

Hemijska eksergija goriva koja se sastoje od smeše poznatih gasovitih komponenti može se naći pomoću jednačine (4.65). Ipak, obzirom da se sastav uobičajenih gasovitih goriva menja unutar relativno uskih granica, kada se izračuna vrednost β za gorivo tipičnog sastava, ona se može koristiti sa prihvatljivom preciznošću samo u nekim slučajevima. Šargut [26] je predložio sledeću relaciju (4.72) (sa srednjom tačnošću od $\pm 0.27\%$) za procenu hemijske eksergije gasovitih ugljovodoničnih goriva:

$$\beta = 1.0334 + 0.0183 \frac{n}{m} + 0.0694 \frac{1}{N_{CA}} \quad (4.72)$$

pri čemu je n/m atomski odnos vodonika i ugljenika u gorivu formule C_mH_n , a N_{CA} srednji broj ugljenikovih atoma u molekulu goriva.

4.6. Eksergijska analiza sistema

Termodinamika prati opis ponašanja, performanse i efikasnosti sistema za konverziju energije iz jednog oblika u drugi. Konvencionalna termodinamička analiza se bazira pre svega na Prvom zakonu termodinamike koji utvrđuje princip održanja energije. Rezultati energetske analize mogu ukazati na glavne neefikasnosti koji su unutar loših delova sistema i stanje tehnološke efikasnosti koja je različita od aktuelne postojeće. Ipak, energetske efikasnosti definisane kao odnosi određenih količina energije koje se koriste za procenu i poređenje različitih sistema, često dovode do pogrešnih zaključaka po tome što ne pružaju uvek meru udaljenosti stvarne performanse sistema u odnosu na idealnu, a takođe se i termodinamički gubici nastali unutar sistema vrlo često neprecizno izračunavaju pomoću energetske analize.

Eksergijska analiza je sistemska metoda zasnovana na konceptu eksergije [28] koja kombinuje upotrebu Prvog i Drugog zakona termodinamike u cilju analize, vrednovanja, razvoja i projektovanja energetskih sistema. Po Valeru (*Valero*) [28] eksergijska analiza se smatra inženjerskim alatom za analizu u sklopu šireg metodološkog okvira za koncept eksergije. Glavna svrha ove analize je detektovanje i kvantitativno izračunavanje uzroka termodinamičke nesavršenosti i obezbeđivanje okvira za projektovanje i unapređenje procesa [18], [28], [29], [30]. Eksergijska analiza daje efikasnosti koji predstavljaju pravu meru za približavanje realnog procesa idealnom i jasnije identifikuje uzroke, lokacija i količina procesnih neefikasnosti od energetske analize. Povećana primena i prepoznavanje korisnosti metoda eksergije u industriji i akademskoj javnosti je evidentna prethodnih godina širom sveta. Mnogi autori su proučavali metodologije eksergetske analize i primenili ih na: industrijske sisteme [31], [32], [33], uštedu toplotne energije [34], zaštitu životne sredine [35] i probleme projektovanja

i analize geotermalnih postrojenja [36], [37], [38]. U mnogim slučajevima, eksergijska analiza se obično povezuje sa primenama u otvorenim stacionarnim sistemima i kontrolnoj zapremini (CV). Ključne promenljive koje se dobijaju iz eksergijske analize kao što su destrukcija eksergije, gubitak eksergije, eksergetska efikasnost, koeficijent destrukcije eksergije i mnoge druge takođe su obimno predstavljene u brojnim radovima i knjigama [12], [18], [30], [31].

4.6.1. Indikatori eksergijske analize

U suštini, eksergijska analiza utvrđuje teoretske ograničenja izložena na sistem, jasno ističući da nema realnog sistema u kome će se energija održati na istom nivou, već se samo deo ulazne eksergije može sačuvati. Takođe, eksergijska analiza kvantitativno specifikuje praktična ograničenja obezbeđivanjem gubitaka u obliku u kojima su oni direktna mera gubitka eksergije. Eksergijska analiza sistema u kome se energija održava je u suštini izračunavanje energija koje ulaze i izlaze iz sistema pri čemu se izlazna energija često može razložiti na: energiju proizvoda i energiju gubitaka i otpadnih materija [33].

Jednostavan postupak za izvođenje kombinovane energetske i eksergetske analize uključuje sledeće korake:

- Podela posmatranog procesa na što je moguće više delova u zavisnosti od količine detalja i razumevanje željenog sadržaja iz analize.
- Izvođenje konvencionalnih bilansa mase i energije za proces i određivanje svih osnovnih veličina i osobina.
- Izbor modela referentne okoline na bazi prirode procesa, prihvatljivog stepena složenosti analize i preciznosti i pitanja na koja se traže odgovori.
- Izračunavanje vrednosti energije i eksergije u odnosu na izabrani model referentne okoline.
- Izrada bilansa eksergija, uključujući određivanje potrošnji eksergije.
- Izbor definicija efikasnosti zavisno od mera željenih kriterijuma i izračunavanje vrednosti za efikasnosti.
- Interpretacija rezultata i izvođenje odgovarajućih zaključaka i preporuka u odnosu na takve teme kao što su: promene u projektovanju, modifikacije retrofita postrojenja itd.

Može se konstatovati da se sve termodinamičke neefikasnosti sistema sastoje od dva različita dela:

- *eksergijske destrukcije* (E_D) koja se odnosi na ireverzibilnosti (generisanje entropije) unutar sistema i

- *gubitaka eksergije* (E_L) povezanim sa prenosom eksergije (kroz materiju i energetske tokove) do okruženja.

Usled prirode eksergije koja je suprotna prirodi entropije po tome što se eksergija može uništiti, ali se ne može stvoriti, promena eksergije sistema tokom procesa manja od prenete eksergije za količinu koja je jednaka uništenoj i izgubljenoj eksergiji tokom procesa unutar ili van granica sistema. Neka materijalni tok ulazi u kontrolisanu zapreminu sa eksergijom koja je indeksirana sa "in", a napušta je eksergijom koja je označena indeksom "out" i koja je manja od one na ulazu usled destrukcije i gubitaka eksergije. Bilans eksergije može biti predstavljen u obliku relacije (4.73) koja predstavlja princip pada eksergije:

$$E_{in} = E_{out} + E_D + E_L \quad (4.73)$$

Ovaj izraz se takođe može zapisati u obliku neto količina, navodi se često kao osnovni bilans eksergije i može se formulisati na način da je promena eksergije sistema tokom procesa jednaka razlici između neto količine eksergije prenete kroz granicu sistema i uništene eksergije unutar granica sistema kao rezultat ireverzibilnosti pod uslovom da nema razmene eksergije s okolinom.

Najvažniji kriterijum u okviru eksergijske analize predstavlja *eksergetska efikasnost*. Najjednostavniji oblik eksergetske efikasnosti je prosta eksergetska efikasnost. Prosta eksergetska efikasnost kod protočnih sistema određuje se kao odnos svih izlaznih i ulaznih eksergija i izračunava po obrascu (4.74):

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\sum_{out} E_{out}}{\sum_{in} E_{in}} \quad (4.74)$$

Ovako definisana eksergetska efikasnost važi za sve razmatrane stacionarne procese. Nažalost, ona daje površan utisak o termodinamičkoj savršenosti sistema u slučaju gde se sve ulazne komponente eksergetskih struja transformišu u druge komponente kao što je slučaj sa energijom. U literaturi stoga postoji još nekoliko predloga za promenljivu ε , ali je u ovom radu ona definisana pomoću pristupa gorivo-produkt koji je prvi uveo Cacaronis [17], a kasnije proučavali detaljnije Cacaronis i Vinhold (*Winhold*) [8], Lazareto (*Lazzaretto*) i Cacaronis [9], Bežan (*Bejan*) i saradnici [29]. Jednačina (4.75) ovog puta definiše ε kao:

$$\varepsilon_{tot} = \frac{E_{P,tot}}{E_{F,tot}} = 1 - \frac{E_{D,tot} + E_{L,tot}}{E_{F,tot}} \quad (4.75)$$

Prema ovom pristupu bilans eksergije na nivou sistema izražava se po relaciji (4.76):

$$E_{F,tot} = E_{P,tot} + E_{L,tot} + E_{D,tot} \quad (4.76)$$

U ovom izrazu eksergija produkta ($E_{P,tot}$), ili korisna eksergija, predstavlja eksergiju željenog outputa pri čemu produkt predstavlja željeni rezultat delovanja sistema, te njegovo određivanje mora biti konzistentno sa svrhom njegovog postojanja i korišćenja. Eksergija goriva ($E_{F,tot}$) ili resursa predstavlja utrošak eksergetskih resursa u cilju generisanja željenog outputa pri čemu resurs predstavlja sve ulazne tokove utrošene za generisanje produkta i ne ograničava se samo na gorivo u užem smislu. Eksergija proizvoda sakuplja korisne eksergije outputa sistema i poraste eksergije u samom procesu, dok se, s druge strane, eksergija goriva sastoji od sume pada eksergije i inputa eksergije u posmatrani sistem. Količina gubitka eksergije ($E_{L,tot}$) predstavlja količinu koja se prenosi toplotom ili masom iz celog sistema u njegova okruženja i ne koristi se više u postojećem ili drugim sistemima. Najzad, destrukcija eksergije ($E_{D,tot}$) se izračunava pomoću bilansa eksergije ili generisane entropije unutar sistema [8], [12].

Na nivou komponenti bilans eksergije se može prikazati sledećim relacijama (4.77), (4.78), (4.79) [31]:

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{D,k} \quad (4.77),$$

$$E_{F,k} = E_{P,k} + E_{D,k} + E_{L,k} \quad (4.78),$$

$$\varepsilon_k = \frac{E_{P,k}}{E_{F,k}} = 1 - \frac{E_{D,k}}{E_{F,k}} \quad (4.79),$$

dok se efikasnost celog sistema preko destrukcije u njegovim komponentama izražava putem (4.80):

$$\varepsilon_{tot} = \frac{E_{P,tot}}{E_{F,tot}} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n E_{D,k} + E_{L,tot}}{E_{F,tot}} \quad (4.80)$$

Tabela 4.1. Pregled dodatnih eksergetskih parametara [36], [37], [38], [39].

Jednačine	Opis
$\xi_k = \frac{E_{D,k}}{E_{use,tot}}$	Koeficijent nedostatka produktivnosti komponente k
$ef_k = \frac{E_{F,k}}{E_{F,tot}}$	Eksergetski faktor komponente k
$\varepsilon = (\eta / \beta) \{ [1 - T_0(T - T_0)] \ln(T / T_0) \}$	Eksergetska efikasnost grejanja prostora
$\varepsilon = \frac{W_{out}}{W_{in}}$	Eksergetska efikasnost obnovljivih energetskih izvora u energetskom sektoru
$\varepsilon = \eta(1 - T_0 / T)$	Eksergetska efikasnost procesa kuvanja
$\varepsilon = \eta(T_0 / T - 1)$	Eksergetska efikasnost procesa hlađenja
$\varepsilon = \sum_k l_k \varepsilon_k / 100$	Ukupna eksergetska efikasnost sektora za upotrebu električne energije
$\varepsilon = (SDF_{sh} \varepsilon_{sh,F} + SDF_{wh} \varepsilon_{wh,F} + SDF_c \varepsilon_{c,F}) / 100$	Ukupna eksergetska efikasnost sektora za upotrebu goriva
$\varepsilon = (r_{sh} \varepsilon_{sh,or} + r_{wh} \varepsilon_{wh,or(F)} + r_c \varepsilon_{c,ro}) / (r_{sh} + r_{wh} + r_c)$	Ukupna eksergetska efikasnost sektora za upotrebu obnovljive energije
$\varepsilon = (\varepsilon_e h_{rc} + \varepsilon_F SDF_{exrc} + \varepsilon_{rtw} h_{exrc}) / (h_{rc} + SDF_{exrc} + h_{exrc})$	Ukupna eksergetska efikasnost sektora za komercijalno-rezidentnu upotrebu
$\alpha_{ren} = \frac{E_{ren,in}}{E_{in}}$	Eksergetska obnovljivost (koeficijent obnovljivosti ulazne eksergije)
$\alpha_{reinj} = \frac{E_L}{E_{gf,in}}$	Eksergetski koeficijent ponovnog ubrizgavanja geotermalnog fluida
$\zeta = \frac{E_{in}}{E_{in} + E_{in,abat}}$	Kompatibilnost s okolinom
<p>Simboli</p> <p>l sadržaj obnovljive energije u ukupnoj energiji svake komponente</p> <p>r sadržaj obnovljive energije koju koristi rezidentno-komercijalni sektor</p> <p>SDF faktor rasipanja Sunčeve svetlosti</p> <p>η energetska efikasnost</p>	<p>Indeksi</p> <p>abat smanjenje emisija</p> <p>c hlađenje</p> <p>e električna energija</p> <p>exrc eksergetska rezidentno-komercijalna</p> <p>F gorivo</p> <p>gf geotermalni fluid</p> <p>or ukupna rezidentna</p> <p>r povratna termalna voda</p> <p>ren obnovljivi izvor energije</p> <p>rc rezidentno-komercijalni sektor</p> <p>ro rezidentna ukupna</p> <p>sh grejanje prostora</p> <p>wh zagrevanje vode</p> <p>use korisna energija</p>

Koeficijent destrukcije eksergije komponente predstavlja odnos destrukcije eksergije u toj komponenti sa eksergijom goriva celoga sistema prema (4.81) i označava se u literaturi još i kao koeficijent potrošnje goriva komponente k (δ_k).

$$y_{D,k} = \frac{E_{D,k}}{E_{F,tot}} \quad (4.81)$$

Koeficijent destrukcije eksergije čitavog sistema izražen relacijom (4.82) daje odnos ukupne destrukcije i eksergije goriva za dati sistem:

$$y_{D,tot} = \frac{E_{D,tot}}{E_{F,tot}} \quad (4.82)$$

Relacija (4.83) koja poredi destrukcije eksergije pojedinih komponenti sa totalnom destrukcijom eksergije u sistemu formira koeficijent ukupne destrukcije eksergije (*Total Exergy Destruction Ratio* – TEDR), poznat u literaturi i kao relativna ireverzibilnost komponente k (χ_k):

$$TEDR_k = \frac{E_{D,k}}{E_{D,tot}} \quad (4.83)$$

Kako je destrukcija eksergije u čitavom sistemu jednaka zbiru destrukcija svih komponenti tog sistema, suma koeficijenata ukupne destrukcije eksergije svih komponenti uvek iznosi 1.

Koeficijent gubitka eksergije sistema je definisan izrazom (4.84) slično koeficijentu destrukcije u jednačini (4.82) poređenjem gubitka eksergije sa eksergijom goriva koje snabdeva celokupan sistem:

$$y_{L,tot} = \frac{E_{L,tot}}{E_{F,tot}} \quad (4.84)$$

Koeficijent ukupnog gubitka eksergije u disipativnoj komponenti sistema definiše u (4.85), slično kao u jednačini (4.82), udeo gubitka te komponente u ukupnim gubicima sistema, a suma ovih koeficijenata za sve jedinice sistema jednaka je takođe 1.

$$y_{L,k} = \frac{E_{L,k}}{E_{F,tot}} \quad (4.85)$$

Koeficijent destrukcije eksergije je mera doprinosa destrukcije eksergije unutar svake komponente smanjenju ukupne eksergetске efikasnosti, pa se može koristiti za poređenje različitih komponenti istog sistema, dok se koeficijenti ukupne destrukcije eksergije i gubitka eksergije mogu koristiti za poređenje različitih termodinamičkih sistema. U tabeli 4.1 dat je pregled dodatnih eksergetskih faktora koji se mogu naći u literaturi.

4.7. Grafički prikazi eksergije

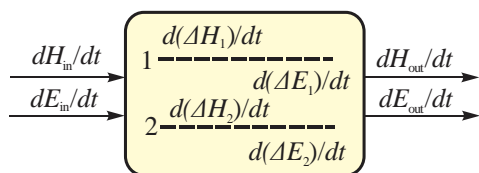
U inženjerskoj termodinamici upotreba termodinamičkih dijagrama u cilju predstavljanja procesa, veličina, kao i količina rada i toplote je uobičajena praksa. U slučaju eksergetske analize procesa u kojima se održava energija, dijagrami kao što su entropija-entalpija i eksergija-entalpija su jako korisni za bolje razumevanje i proračun ovih procesa. Efikasno iskorišćenje energije u hemijskom postrojenju zavisi od primene kombinacije proizvoda koji će koristiti najmanju količinu eksergije prilikom stvaranja proizvoda. Za analizu protoka eksergije i povećanja eksergetske efikasnosti primenjuje se dijagram eksergije koji daje vizuelni prikaz bilansa eksergije u toku proizvodnog procesa [40]. Osim toga, razvijen je i novi koncept vektora eksergije koji je primenjen za izračunavanje efikasnosti eksergije različitih procesa na dijagramu entalpija-eksergija pomoću koga se može aproksimirati minimalna eksergija koja je u termodinamičkom smislu potrebna u procesu proizvodnje

4.7.1. Dijagram bilansa eksergije

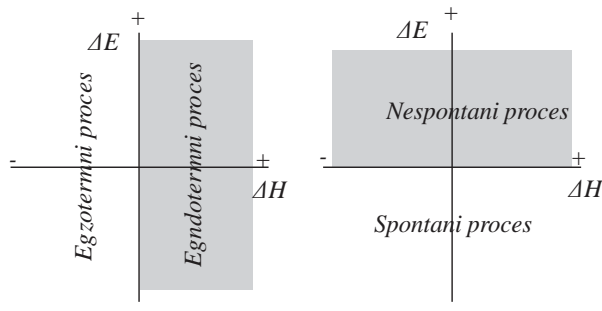
Ovaj dijagram je grafički prikaz sličan dobro poznatom Senkijevom (*Sankey*) dijagramu koji se koristi u energetske analizi procesa gde je širina kriva povezana sa količinom ili protokom eksergije datog energetski održivog procesa. Opisani dijagram opsega eksergije naziva se još i Grasmanov (*Grassmann*) dijagram [41] i koristi se za veliki broj analiza eksergije pri promenljivim termičkim, mehaničkim i fizičko-hemijskim procesima. U ovoj tezi Grasmanov dijagram je korišćen u analizi geotermalnog postrojenja na polju Velika Ciglena.

4.7.2. Vektorski dijagram eksergije

Industrija hemijskih proizvoda proizvodi materijale sa visokim nivoima eksergije od sirovina sa niskim nivoima eksergije preko reakcija apsorbovanja eksergije i pomoću pogodnog procesa doniranja eksergije. Da bi se zadovoljile ovakve potrebe, potrebno je koristiti materijale sa visokom eksergijom u reakcijama i projektovati proces proizvodnje tako da ima veoma malu potrošnju eksergije. Vektorski dijagram eksergije [42] je pogodan za prikaz gubitaka eksergije i zato je bitan prilikom minimiziranja potrošnje eksergije primenom najpogodnijih kombinovanih fizičkih i hemijskih procesa koji troše, u termodinamičkom smislu, najmanju vrednost eksergije. Kako bi se što bolje ilustrovali gubici eksergije u kombinaciji sa ireverzibilnim fizičko-hemijskim procesima kod otvorenih sistema, vrši se primena *vektorskih dijagrama eksergije* za fizičke i hemijske procese u obliku dijagrama entalpija-eksergija. Na ordinati (y -osa) ovog dijagrama se nalazi količina eksergije, dok se na apscisi (x -osa) nalazi entalpija procesa u datom sistemu.



Slika 4.4. Tok entalpije i eksergije kroz otvoreni sistem kod koga se dva procesa (1 i 2) odvijaju na konstantnoj temperaturi: H – protok entalpije, E – protok eksergije [40]



Slika 4.5. Režimi egzoternog, endoternog, prinudnog i spontanog procesa kod dijagrama eksergija-entalpija [40]

Posmatra se jednostavan otvoreni sistem kod koga se dešavaju dva ireverzibilna procesa (proces 1 i 2) u stacionarnom stanju, kao što je prikazano na [slici 4.4](#). Brzina protoka entalpije i eksergije između sistema i okruženja predstavljena je sa dH/dt i dE/dt , dok su brzine promene entalpije i eksergije su predstavljene sa $d(\Delta H)/dt$ i $d(\Delta E)/dt$. Entalpija i eksergija ne podrazumevaju samo entalpije i eksergije supstanci, već i entalpije i eksergije rada W i količine toplote Q . Za prenos entalpije važi [\(4.86\)](#):

$$H_w = W, H_Q = Q \quad (4.86)$$

gde su H_w i H_Q vrednosti entalpije usled izvršenog rada W i količine toplote Q . Prenos eksergije je opisan sledećim jednakostima [\(4.87\)](#):

$$E_w = W, E_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q \quad (4.87)$$

gde su E_w i E_Q vrednosti eksergije usled izvršenog rada W i količine toplote Q .

Prema zakonu održanja energije, jednačina [\(4.88\)](#) važi za protok entalpije i promenu entalpije u stacionarnom stanju:

$$\frac{dH_{in}}{dt} - \frac{dH_{out}}{dt} = 0, \frac{d\Delta H_1}{dt} + \frac{d\Delta H_2}{dt} = 0 \quad (4.88)$$

Na osnovu zakona potrošnje eksergije ili stvaranja entropije za protok i potrošnju eksergije važi izraz [\(4.89\)](#):

$$\frac{dE_{in}}{dt} - \frac{dE_{out}}{dt} \geq 0, \frac{d\Delta E_1}{dt} + \frac{d\Delta E_2}{dt} \leq 0 \quad (4.89)$$

Na [slici 4.5](#) prikazan je izgled dijagrama eksergije-entalpije. Režim vektora koji se nalaze sa leve strane ordinate odgovara *egzotermnom* procesu (praćenim oslobađanjem određene količine toplote iz sistema), kod koga je $\Delta H < 0$, dok režim sa desne strane odgovara *endotermnom*

procesu (praćenim dovođenjem određene količine toplote u sistem), kod koga je $\Delta H > 0$. Režim vektora sa gornje strane apscise odgovara prinudnom procesu, kod koga je $\Delta E > 0$, dok režim sa donje strane apscise odgovara prirodnom (spontanom) procesu, kod koga je $\Delta E < 0$.

Bilo koji proces koji se dešava u otvorenom sistemu može se predstaviti dijagramom eksergija-entalpija tako što se početni vektor postavi u koordinatni početak. Kod prinudnih endotermnih reakcija ($\Delta H > 0$, $\Delta E > 0$), vektor eksergije se nalazi u gornjem desnom delu dijagrama, kao što je prikazano na slici 4.5. Kod ovog režima je entalpija ΔH toplotna energija koja mora biti primljena, a ΔE eksergija koja se mora dovesti u sistem kako bi došlo do reakcije.

Vektor eksergije datog procesa kod dijagrama eksergija-entalpija ima nagib λ koji predstavlja odnos promene eksergije ΔE prema promeni entalpije ΔH u toku procesa dat relacijom (4.90) koji se naziva raspoloživost energije:

$$\lambda = \frac{\Delta E}{\Delta H} = 1 - \frac{T_0 \Delta S}{\Delta H} \quad (4.90)$$

gde je ΔS promena entropije kod procesa:

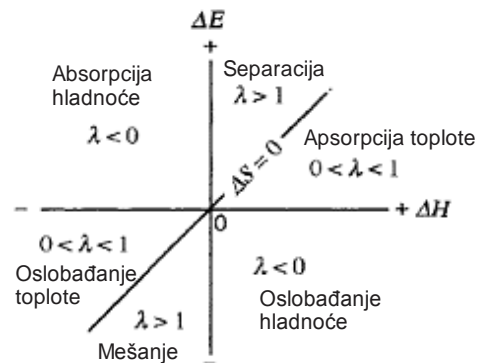
$$\Delta E = \Delta H - T_0 \Delta S$$

Zapravo, veličina λ predstavlja raspoloživost energije u toku procesa. Vektor eksergije za raspoloživost energije $\lambda=1$ predstavlja pravu liniju koja prolazi kroz koordinatni početak pod uglom od 45° . Na ovoj liniji, promena entalpije ΔH je jednaka promeni eksergije ΔE i zbog toga nema promene entropije ($\Delta S=0$) u toku procesa, što još znači da je promena energije u eksergiju izvršena sa 100% efikasnosti.

Reverzibilna razmena rada (mehaničkog, električnog ili drugih oblika rada), kod koje je $\Delta E_w = \Delta H_w$ daje (4.91) raspoloživost energije:

$$\lambda_w = 1 \quad (4.91)$$

koja odgovara pravoj liniji koja prolazi kroz koordinatni početak pod uglom od 45° . Sa druge strane, promena toplotne energije, kod koje $\Delta E_Q \neq \Delta H_Q$, kao i u slučaju reverzibilne razmene toplote, daje raspoloživost energije λ_Q koja je manja od jedinice prema jednačini (4.92):



Slika 4.6. Različiti režimi procesa kod dijagrama eksergije-entalpije: λ - raspoloživost energije; linija $\Delta S=0$ odgovara slučaju $\Delta H=\Delta E$ [40]

$$\lambda_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (4.92)$$

što znači da u ovom slučaju nagib vektora eksnergije termičkog procesa zavisi od temperature T pri kojoj se dešava razmena toplote.

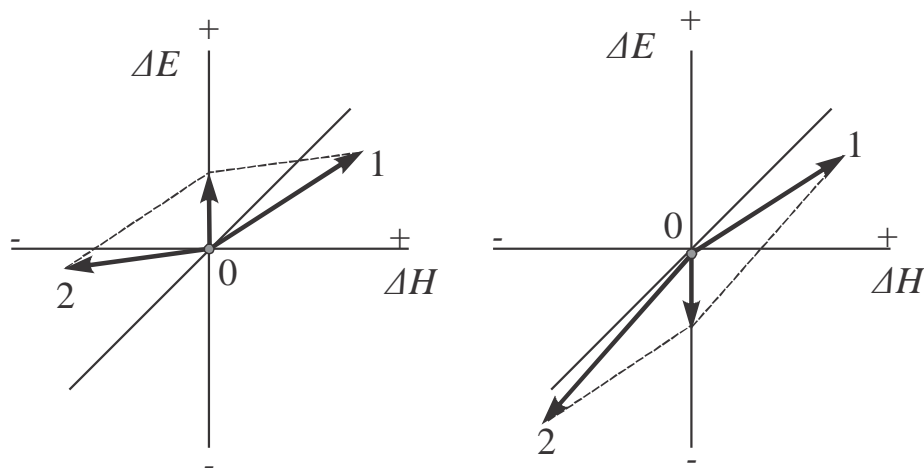
Prema [slici 4.6](#) postoje tri bazična režima vektora kod dijagrama eksnergija-entalpija:

- Režim kod koga se raspoloživost energije kreće u opsegu $0 < \lambda < 1$ i kod koga promene entropije ΔS i entalpije ΔH imaju isti znak (pozitivni ili negativni), $0 < T_0 \Delta S / \Delta H < 1$, jer povećanje ili smanjenje entalpije i entropije zahteva apsorpciju toplote u sistem ili oslobađanje toplote iz sistema, respektivno; prinudni proces ($\Delta E > 0$) sa pozitivnim $T_0 \Delta S$ i ΔH odgovara režimu apsorpcije toplote u toku procesa, dok prirodni proces ($\Delta E < 0$) sa negativnim $T_0 \Delta S$ i ΔH odgovara režimu oslobađanja toplote u toku procesa.
- Režim kod koga je raspoloživost energije veća od jedan, $\lambda > 1$, i kod koga promene entropije ΔS i entalpije ΔH imaju uvek različiti znak, $T \Delta S / \Delta H < 0$. Proces kod koga je promena entalpije pozitivna $\Delta H > 0$ i promena entropije negativna $\Delta S < 0$, jeste proces apsorbovanja toplote, ali se kod ovog procesa entropija ipak smanjuje bez obzira na apsorpciju toplote u sistemu. Uzrok smanjenja entropije ne može biti apsorpcija toplote, već se smanjenje dešava usled razdvojenosti sastavnih supstanci sistema, tj. smanjuje se entropija mešanja. Režim kod koga je $\Delta H > 0$ i $\Delta S < 0$, odgovara procesu separacije kod koga se apsorbuje toplota i smanjuje entropija sistema. Sa druge strane, režim kod koga je $\Delta H < 0$ i $\Delta S > 0$ odgovara procesu mešanja, kod koga se oslobađa toplota i povećava entropija sistema.
- Režim kod koga je raspoloživost energije manja od nule, $\lambda < 0$, i kod koga su promene entropije ΔS i entalpije ΔH uvek istog znaka (pozitivnog ili negativnog znaka) i $T_0 \Delta S$ je veće od ΔH ; $T \Delta S / \Delta H > 1$. Proces kod koga su promene entalpije i entropije pozitivnog znaka ($\Delta S > 0$ i $\Delta H > 0$) i kod koga je promena eksnergije negativna ($\Delta E < 0$), predstavlja prirodni proces oslobađanja negativne toplote, odnosno ovo je proces oslobađanja hladnoće. Sa druge strane, proces kod koga su promene entalpije i entropije negativne ($\Delta S < 0$ i $\Delta H < 0$) i kod koga je promena eksnergije pozitivna ($\Delta E > 0$), predstavlja prinudni proces apsorbovanja negativne toplote, odnosno proces apsorbovanja hladnoće.

Reakcija kod koje promena eksnergije ΔE ima pozitivan znak nije spontana (npr. redukcija oksida gvožđa), ali može da se nastavi njeno odigravanje ukoliko se spoji sa spontanom hemijskom reakcijom kod koje dolazi do oslobađanje eksnergije (npr. oksidacija ugljenika). Ovo se objašnjava prenosom eksnergije od spontane reakcije na prinudnu reakciju gde se određena količina eksnergije oslobađa od strane donora eksnergije i nakon toga se apsorbuje od strane

primaoca eksergije. Ovako preneti energija doprinosi nastavku odvijanja prinudne reakcije. Na [slici 4.7\(a\)](#) prikazan je vektorski dijagram za par reakcija i on se sastoji od: vektora koji opisuje proces oslobađanja eksergije u donjem levom delu grafika i vektora koji opisuje proces apsorbovanja eksergije u gornjem desnom delu grafika. Pored ova dva vektora na [slici 4.7\(b\)](#), na y-osi je dat njihov vektorski zbir ili kombinovani reakcioni vektor koji opisuje kombinovani proces 1 i 2.

Na osnovu zakona o održanju energije, kombinovani reakcioni vektor leži na y-osi kada je $\Delta H=0$. Osim toga, prema teoremi o izgubljenom radu za ireverzibilni proces, kombinovani vektor dve reakcije se nalazi na donjoj strani y-ose gde važi $\Delta E < 0$. Kombinovani vektor tada označava vrednost potrošene eksergije (gubitak eksergije) u toku kombinovanog procesa reakcija. Ukoliko se svi procesi dešavaju reverzibilno, tada ne postoji potrošnja eksergije u sistemu i zato će kombinovani vektor nestati u koordinatnom početku, tj. biće nula. Da bi se smanjila potrošnja eksergije, trebalo bi napraviti reakciju oslobađanja eksergije sa ciljem što većeg smanjenja kombinovanog vektora.



Slika 4.7. Vektorski dijagram eksergije za prenos eksergije u toku procesa apsorbovanja eksergije i oslobađanja eksergije: (a) kombinovani proces nije izvodljiv; (b) kombinovani proces je izvodljiv [40]

Procesi proizvodnje u hemijskoj industriji uključuju razmenu eksergije između različitih fizičkih i hemijskih procesa. Ako se posmatra pojednostavljeni slučaj kod koga je proces apsorbovanja eksergije (proces 1) spojen sa procesom oslobađanja eksergije (proces 2), izvodljivost rezultujućeg procesa zavisi od nagiba λ_1 i λ_2 koji predstavljaju nagibe vektora koji opisuju procese 1 i 2, respektivno. Kada je nagib λ_1 veći od nagiba λ_2 , tada nema prenosa eksergije između dva procesa i zbog toga rezultujući proces nije izvodljiv. U suprotnom slučaju, kada je nagib λ_1 manji od nagiba λ_2 , tada je moguće izvršiti prenos eksergije sa procesa 2 na proces 1 i zbog toga je rezultujući proces izvodljiv. Dakle, da bi došlo do prenosa eksergije,

raspoloživost energije donora λ_{don} (za proces oslobađanja eksergije) mora da bude veća od raspoloživosti energije akceptora λ_{acc} (za proces absorbovanja eksergije):

$$\lambda_{\text{don}} > \lambda_{\text{acc}} \quad (4.93)$$

Prethodna nejednakost (4.93) predstavlja uslov za prenos eksergije između donorskog (proces davanja energije) i akceptorskog (proces primanja energija) procesa.

Klasičan dijagram eksergija-entalpija bez primene vektora često daje sve neophodne podatke za analizu datog procesa održanja energije čiste supstance i za primenu u bilansima energije i eksergije. Na ovom dijagramu izentropske linije su pod uglom od 45° u odnosu na osu entalpije kada su obe promenljive prikazane na istoj osi tako da važi izraz (4.94):

$$(\delta E / \delta h)_s = 1 \quad (4.94)$$

4.7.3. Dijagram eksergija-sastav

Dijagram eksergija-sastav za binarne smeše je analogan dijagramu entalpija-koncentracija, a naročito je koristan pri izučavanju i optimizaciji apsorpcionih rashladnih sistema i sistema toplotnih pumpi sa smešama voda-LiBr i amonijak-voda. Oliveira je predložio jednostavan postupak za izračunavanje eksergije rastvora i kreiranje ovih dijagrama na osnovu definicije ravnotežnih rastvora na referentnoj temperaturi i pritisku (T_0, p_0). Ovaj postupak je adekvatan za sisteme koji operišu u zatvorenom ciklusu kao što su apsorpcione toplotne pumpe i rashladni sistemi, izbegavajući obavezu korišćenja referentnih uslova Šarguta i saradnika.

4.7.4. Dijagram entalpija-entropija

Molijerov (*Mollier*) h - s dijagram se može upotrebiti za izračunavanje fizičke eksergije čiste supstance. Povlačenje linije iz tačke koja definiše uslove okoline (T_0, p_0) pod uglom α u odnosu na x -osu može se matematički definisati izrazom (4.95):

$$(\delta h / \delta s)_{p_0} = T_0 = \text{tg}\alpha \quad (4.95)$$

Ovaj odsečak na dijagramu (slika 4.8) se naziva referentna linija i predstavlja tangentu izobare koja prolazi u p_0 .

Deo izraza za fizičku eksergiju može se tako zapisati u jednom od oblika s obe strane jednačine (4.96):

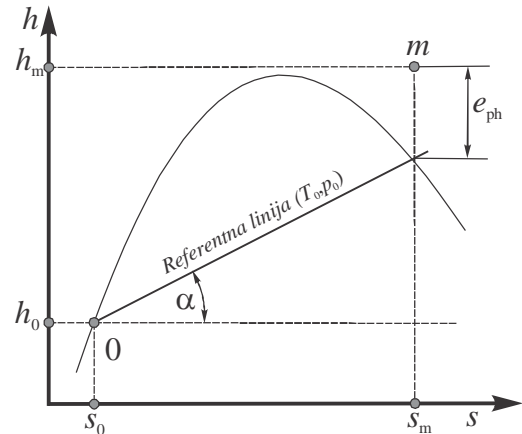
$$(s_m - s_0)\text{tg}\alpha = (s_m - s_0)T_0 \quad (4.96)$$

pri čemu se indeks m odnosi na dato stanje sistema (T, p) .

Zamenom u kompletan izraz (4.97) za specifičnu fizičku eksergiju dobija se:

$$e_{PH} = h_m - h_0 - (s_m - s_0) \operatorname{tg} \alpha \quad (4.97),$$

pa kako se razlika entalpija i entropija sistema u datom stanju i stanju okoline očitava sa dijagrama, to je moguće naći fizičku eksergiju čiste supstance.



Slika 4.8. Određivanje fizičke eksergije u Molijerovom dijagramu [42]

4.7.5. Dijagram Karnoov faktor-entalpija

Ova vrsta dijagrama je prvi put upotrebljena radi izučavanja procesa sagorevanja gde je uveden koncept toplotne moći. Dijagram je naročito koristan za izučavanje procesa prenosa toplote, a takođe je korišćena za izučavanje destilacije binarne smeše. Na apscisnoj osi se prikazuje količina prenete toplote iz jednog toka određena razlikom protočnih entalpija ovog toka, dok se na ordinatnoj osi prikazuje Karnoov faktor ($\theta=1-T_0/T$) kako bi okarakterisao nivo temperature na kom se prenos toplote odigrava. Korišćenjem izraza za fizičku eksergiju i nalaženjem parcijalnog izvoda može se pokazati da Karnoov faktor ukazuje na promenu fizičke eksergije u odnosu na entalpiju u izobarskom procesu. Površine ispod krivih odgovaraju eksergiji koju prenosi grejni agens, odnosno eksergiji koju prima grejano telo, a razlika između ovih vrednosti je količina destrukcije eksergije u ovom procesu prenosa toplote koju je na taj način moguće odrediti grafičkim putem.

4.8. Zaključna razmatranja poglavlja 4

- Eksergijska analiza predstavlja jedan od najčešće korišćenih alata za evaluaciju energetskih karakteristika postrojenja u fazi analize konceptualnog projektovanja.
- Eksergija termodinamičkog sistema je maksimalni teorijski rad (mehanički ili električni rad) koju je moguće dobiti dok se sistem dovodi u potpunu termodinamičku ravnotežu s termodinamičkom okolinom pritom ostvarujući interakcije isključivo sa tom okolinom.
- Derivaciju funkcije eksergije moguće je izvesti putem masenog, energetskog i entropijskog bilansiranja otvorenog termodinamičkog sistema.
- Osnovna svrha eksergijske analize u konceptualnoj fazi projektovanja je detektovanje i kvantitativno izračunavanje uzroka termodinamičke nesavršenosti procesa i obezbeđivanje

okvira za poboljšanje ukupne energetske efikasnosti procesnih jedinica i postrojenja. U tu svrhu koriste se indikatori eksergijske efikasnosti u numeričkoj ili grafičkoj formi.

Literatura poglavlja 4

- [1] Gibbs JW. A method of geometrical representation of thermodynamic properties of substances by means of surface. *Trans Conn Acad* II 1873;382–404. [\[citati u tekstu\]](#)
- [2] Jouget E. The theorem of Mr. Gouy and some of its applications. *Rev Mech* 1907;2:213–38 (in French). [\[citati u tekstu\]](#)
- [3] Bošnjaković F. Fight against irreversibilities. *Arch Wärmewirt* 1938;19(1):1–2 (in German). [\[citati u tekstu\]](#)
- [4] Rant Z. Exergy the new word for technical available work. *Forsch Ingenieurwes* 1956; 22(36). [\[citati u tekstu\]](#)
- [5] Kotas TJ. The exergy method of thermal plant analysis. Malabar (FL): Reprint Edition, Krieger; 1995. [\[citati u tekstu\]](#)
- [6] Dincer I, Rosen MA. Exergy: energy, environment, and sustainable development. Oxford (UK): Elsevier; 2007. [\[citati u tekstu\]](#)
- [7] Tsatsaronis G. Combination of Exergetic and Economic Analysis in Energy-Conversion Processes; Energy Economics and Management in Industry. Proceedings of the European Congress; 1984 Apr 2–5; Algarve, Portugal. Tapir Academic Press 151–7. [\[citati u tekstu\]](#)
- [8] Tsatsaronis G, Winhold M. Exergoeconomic analysis and evaluation of energy conversion plants. Part I-A new general methodology. *Energy Int J* 1985;10:69–80. [\[citati u tekstu\]](#)
- [9] Lazzaretto A, Tsatsaronis G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy Int J* 2006;31:1257–89. [\[citati u tekstu\]](#)
- [10] Jentsch A. A Novel Exergy - Based Concept of Thermodynamic Quality and its Application to Energy System Evaluation and Process Analysis [PhD thesis]. Berlin, Germany: Technische Universität Berlin; 2010. [\[citati u tekstu\]](#)
- [11] Petrakopoulou A. Comparative Evaluation of Power Plants with CO₂ Capture: Thermodynamic, Economic and Environmental Performance [PhD thesis]. Berlin, Germany: Technische Universität Berlin; 2011. [\[citati u tekstu\]](#)
- [12] Tsatsaronis G, Czesla F. Six articles published in topic "Energy". In: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), developed under the Auspices of UNESCO. Oxford (UK): Eolss Publishers; 2004. Available at: <<http://www.eolss.net>> [accessed 27.7.2011]. [\[citati u tekstu\]](#)
- [13] Wall G. Exergy - a useful concept within resource accounting. Goteborg, Sweden: Institute of Theoretical Physics Goteborg; 1977. [\[citati u tekstu\]](#)
- [14] Cornelissen RL. Thermodynamics and sustainable development - the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility. Groningen, The Netherlands: University of Groningen; Mechanical Engineering, Ph.D. Mechanical Engineering; 1997. [\[citati u tekstu\]](#)
- [15] Valero A. Exergy evolution of the mineral capital on Earth. Zaragoza, Spain: Mechanical Engineering, Ph.D. Mechanical Engineering. University of Zaragoza; 2008. [\[citati u tekstu\]](#)
- [16] Szargut J. Exergy method - technical and ecological applications. Southampon, Boston: WIT Press; 2005. [\[citati u tekstu\]](#)

- [17] Tsatsaronis G. Definition and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics, *Energy* 2007;32(4):249–53. [\[citat u tekstu\]](#)
- [18] Szargut J, David RM, Steward FR. Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes. Berlin, Germany: Springer-Verlag; 1988. [\[citat u tekstu\]](#)
- [19] Szargut J. Chemical exergies of the elements. *Appl Energy* 1989;32:269–85. [\[citat u tekstu\]](#)
- [20] Ahrendts J. Reference states. *Energy* 1980;5:666–77. [\[citat u tekstu\]](#)
- [21] Zvolinschi A. On Exergy Analysis and Entropy Production Minimisation in Industrial Ecology [PhD thesis]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology; Faculty of Natural Sciences and Technology, Department of Chemistry; 2006. [\[citat u tekstu\]](#)
- [22] El-Sayed Y. The Thermoeconomics of energy conversions. Oxford (UK): Elsevier Ltd; 2003. [\[citat u tekstu\]](#)
- [23] Gundersen T. An Introduction to the Concept of Exergy and Energy Quality [PhD thesis]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering; 2009. [\[citat u tekstu\]](#)
- [24] Rant Z. Termodinamika. Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani; 1965. [\[citat u tekstu\]](#)
- [25] Shrodt K, Bettermann G, Staffel T, Klein T, Hofmann T. Ullman's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim, Germany: Sixth Completely Revised Edition;26;127, Wiley-Vch, 2003. [\[citat u tekstu\]](#)
- [26] Szargut J, Styrilska T. Approximate evaluation of the exergy of fuels. *Wärme kraft* 1964;16(12):589–96 (in German). [\[citat u tekstu\]](#)
- [27] Winterborne DE. Advanced thermodynamics for engineers. New York: Wiley, 1997. [\[citat u tekstu\]](#)
- [28] Valero A. Exergy accounting: capabilities and drawbacks. *Energy* 2006;31(8):164–80. [\[citat u tekstu\]](#)
- [29] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran M. Thermal design and optimization. New York: Wiley; 1996. [\[citat u tekstu\]](#)
- [30] Gong M. Using Exergy and Optimization Models to Improve Industrial Energy Systems Towards Sustainability [PhD thesis]. Linköping, Sweden: Linköping University; 2004. Dissertation No.: 868; ISBN 91-7373-933-2; ISSN 0345-7524. [\[citat u tekstu\]](#)
- [31] Rosen MA, Dincer I. Exergoeconomic analysis of power plants operating on various fuels. *Appl Therm Eng*;2003a;23;643–58. [\[citat u tekstu\]](#)
- [32] Rosen MA, Dincer I. Thermoeconomic analysis of power plants: an application to a coal-fired electrical generating station. *Energ Convers Manage* 2003b;44;1633–51. [\[citat u tekstu\]](#)
- [33] Koroneos C, Roubas G, Moussiopoulos N. Exergy analysis of cement production. *Int J Exergy* 2005;2(1);55–68. [\[citat u tekstu\]](#)
- [34] Dincer I, Rosen MA. Thermal energy storage systems and applications. London (UK): Wiley; 2002. [\[citat u tekstu\]](#)
- [35] Rosen MA, Dincer I. Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development. *Exergy* 2001;1(1);3–13. [\[citat u tekstu\]](#)
- [36] Utlu Z, Hepbasli A. A review on analyzing and evaluating the energy utilization efficiency of countries. *Renew Sust Energ Rev* 2007;11;1–29. [\[citat u tekstu\]](#)

- [37] Dincer I, Hussain MM, Al-Zaharnah I. Energy and exergy utilization in transportation sector of Saudi Arabia. *Appl Therm Eng* 2004;24:525–38. [\[citat u tekstu\]](#)
- [38] Dincer I, Hussain MM, Al-Zaharnah I. Analysis of sectoral energy and exergy use of Saudi Arabia. *Int J Energy Res* 2004;28:205–43. [\[citat u tekstu\]](#)
- [39] Hepbasli A. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renew Sust Energ Rev* 2008;12(3):593-661. [\[citat u tekstu\]](#)
- [40] Sato N. *Chemical energy and exergy – an introduction to chemical thermodynamics for engineers*. Oxford (UK): Elsevier; 2004. [\[citat u tekstu\]](#)
- [41] Grassmann P. *Chem Ing Tech* 1950;22(4):77–80. [\[citat u tekstu\]](#)
- [42] Ishida M. *Netsurikigaku (Thermodynamics, Principle and Application) in Creative Chemical Engineering Course 7*. Tokyo, Japan: Baifuukan Pub; 1997. [\[citat u tekstu\]](#)

5. Energetska i eksergetska analiza sustava za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate u okviru postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata u IHP Prahovo

Projektovanje energetske i eksergetske analize sustava jedan je od nezaobilaznih ciljeva u svim nacionalnim industrijama. Industrija hemijskih proizvoda Prahovo (IHP Prahovo), poznata po proizvodnji i preradi fosfornih jedinjenja, dugo vremena se smatrala najvećim hemijskim kompleksom na teritoriji bivše SFR Jugoslavije. U ovom delu predstavljena je analiza dela postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata u okviru kompleksa IHP Prahovo, označenog kao sustav odgovoran za hemijsku transformaciju ortofosfata u tripolifosfate. U okviru poglavlja vršeno je ispitivanje energetske i eksergetske karakteristika u odnosu na upotrebu dve vrste goriva i u tu svrhu obavljena energetska i eksergetska analiza pomenutog dela postrojenja. U uvodnom delu pruženo je upoznavanje osnovnih karakteristika natrijum tripolifosfata i konvencionalnih postupaka njegove proizvodnje. Poseban opis dela procesa proizvodnje koji se odvija u ispitivanom delu postrojenja omogućen je prikazom njegovog fizičkog modela. Pregled referentnog matematičkog modela pruža uvid u pretpostavke modela, način dekompozicije posmatranog sistema u cilju efikasnije analize i na kraju, osnovne bilansne i konstitutivne jednačine modela. Kao uslov za simulaciju putem strategije generalisanih jednačina izvršena je DOF analiza relevantnog sistema koja istovremeno uključuje simulacione specifikacije u vidu jednačina ograničenja. Simulacija je izvršena u EES softveru sa ugrađenim termodinamičkim bazama koje su iskorišćene za proračun termodinamičkih parametara gasova i tečnosti, dok se za čvrste organske supstance koriste opštepoznate konstitutivne relacije. Eksergetska analiza je primenjena u istraživanju praćenjem promene eksergetskih kriterijuma za identične promene energetske parametara u simulacionom zadatku. Na osnovu prikazanih tabelarnih i grafičkih rezultata izvedena su odgovarajuća zaključna zapažanja.

5.1. Karakteristike i opis procesa proizvodnje natrijum tripolifosfata u IHP Prahovo

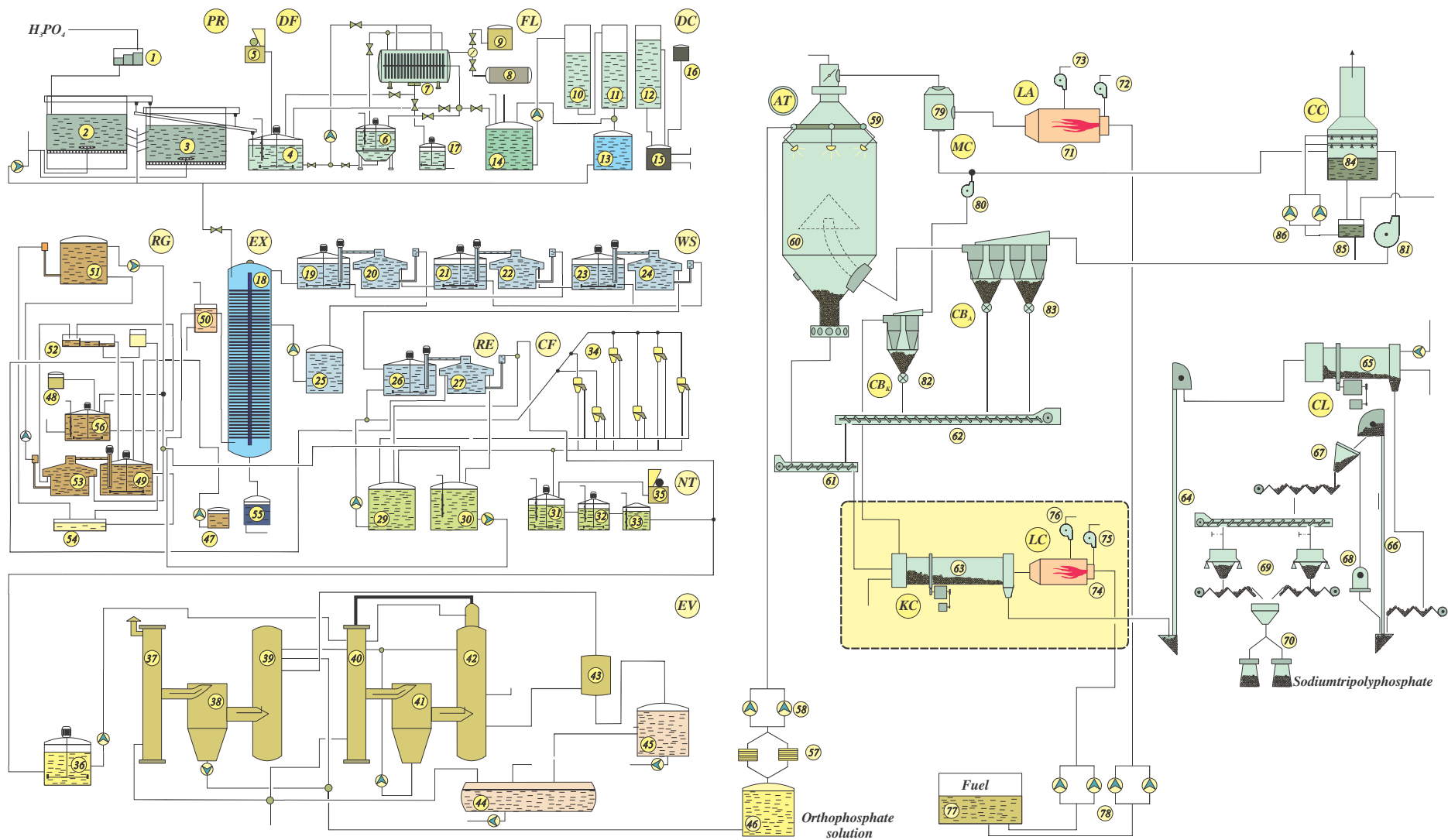
Natrijum tripolifosfat (skraćenica STPP, TPP), hemijske formule $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (molekulska masa 0.368 [$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$]) pripada grupi fosforno-natrijumovih soli, poznatih kao dehidratirani ili kondenzovani fosfati opšte formule $\text{Na}_{n+2}\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$. U pitanju je higroskopna, nezapaljiva supstanca bez ukusa i mirisa koja se nalazi u obliku belog praha ili granula. Nalazi široku primenu u hemijskoj (proizvodnja betona, prečišćavanje voda), rudarskoj (flotacija ruda), papirnoj (priprema papirne pulpe), tekstilnoj (čišćenje tekstila), kožarskoj (štavljenje kože), gumarскоj, naftnoj (bušenje naftnih polja), prehrambenoj industriji (sušenje mesa, konzerviranje mlečnih proizvoda, morskih plodova i voćnih sokova) i industriji boja. Proizvodnja natrijum tripolifosfata počinje da se naglo razvija posle otkrića osobine da omekšava vodu, zahvaljujući sposobnosti stvaranja kompleksa sa magnezijumom, barijumom i drugim rastvornim metalima što ga čini najupotrebljivijim u svojstvu bildera industrijskih deterdženata. Kvalitet industrijskog natrijum tripolifosfata propisan je od 1968. godine i dat je u [tabeli 5.1](#).

Tabela 5.1. Kvalitet industrijskog natrijum tripolifosfata

Sadržaj ukupnih fosfata	56%
Sadržaj gvožđa	0.01%
Sadržaj žarenjem	1%
pH	9.5+0.3
Sadržaj materija nerastvorljivih u vodi	0,1%

U procesu proizvodnje natrijumtripolifosfat se pojavljuje u tri kristalne, dve bezvodne $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ -I (*faza I*) i $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ -II (*faza II*) i jedna u obliku heksahidrata – $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Strukture *faza I* i *II* se primarno razlikuju u koordinaciji katjona. U *fazi II* svi natrijumovi joni su oktaedarski raspoređeni u odnosu na kiseonik, dok su u *fazi I* natrijumovi joni okruženi sa 4 kiseonikova atoma. *Faza II* ima uređenje nalik na kocku i zahvaljujući ovoj osobini ima veći stepen hidratacije. Dva bezvodna oblika natrijum tripolifosfata se, između ostalog razlikuju i prema svom ponašanju pri rastvaranju u vodi. Dok čista *faza II* ima lošu stranu u sporom rastvaranju u vodi, čista *faza I* podleže zgrudvavanju, budući da je njena brzina rastvaranja veća od brzine rastvaranja heksahidrata koji se jako brzo formira iz *faze I*. Iz tog razloga, posebno u industriji deterdženata na značaju dobijaju proizvodi s ograničenim sadržajem *faze I* natrijum tripolifosfata, odnosno dominantnim sadržajem *faze II*.



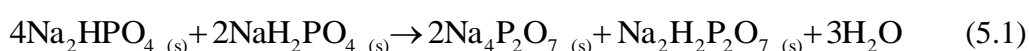
Slika 5.1. Tehnološka šema proizvodnje natrijum tripolifosfata u IHP Prahovo

Na osnovu uticaja temperature na stabilnost njegovih pojedinačnih faza, natrijum tripolifosfat se deli na: visokotemperaturni (dominantna *faza I*) i niskotemperaturni (dominantna *faza II*), odnosno srednjetemperaturni oblik (smeša *faza I* i *faza II*). *Faza I* je stabilna na visokoj temperaturi, dok je *faza II* postojana na niskoj temperaturi i lako prelazi u *fazu I* zagrevanjem iznad temperature prelaza ($417 \pm 8 \text{ }^\circ\text{C}$), ali je povratna reakcija jako spora ispod ove temperature. Oba bezvodna oblika natrijum tripolifosfata dovoljno su stabilna da koegzistiraju na sobnoj temperaturi. U principu u procesu industrijske proizvodnje natrijum tripolifosfata retko se dobija čisti oblik jedne od navedenih faza, a kontrolom temperaturnog profila moguće je ispuniti osnovne zahteve u pogledu kvaliteta proizvoda [1].

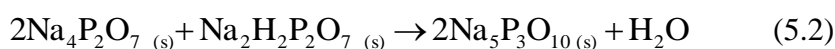
Tabela 5.2. Uticaj temperature na stabilnost faza natrijum tripolifosfata

Temperatura (°C)	Faza I, Na ₅ P ₃ O ₁₀ -I	Faza II, Na ₅ P ₃ O ₁₀ -II
Do 250	Nestabilna	Stabilna
300 – 400	Nestabilna	Stabilna
450 – 625	Stabilna	Nestabilna
preko 625	Nestabilna	Nestabilna

Natrijum tripolifosfat se dobija iz smeše natrijumovih ortofosfata (dinatrijum hidrogen fosfat Na₂HPO₄ i natrijum dihidrogen fosfat NaH₂PO₄) sa molskim odnosom Na₂O prema P₂O₅ od 5:3 u reakciji toplotne dehidracije koja se u suštini odvija u dva stupnja. U prvoj fazi dolazi do stvaranja smeše pirofosfata prema hemijskoj jednačini (5.1):



tako da ove soli u drugom stupnju međusobno reaguju stvarajući Na₅P₃O₁₀ po jednačini (5.2):



Industrijski procesi proizvodnje natrijum tripolifosfata mogu se na osnovu opisanog načina tretmana ortofosfatnog rastvora (likera) klasifikovati u sledeće grupe:

- Dvostepeni proces;
- Hehst-Knapsakov (*Hoechst-Knapsack*) jednostepeni proces;

Dvostepeni proces proizvodnje uključuje dehidraciju ortofosfatnog rastvora (likera) u prvoj fazi do stvaranja bezvodne smeše monofosfata, dok u drugom koraku koji se obavlja dolazi do konverzije u natrijum tripolifosfat. Za dehidraciju monofosfata se obično koriste sprej sušare – atomizeri, mada primenu nalaze i rotacione i dobošaste sušare. Za konverziju u tri-

polifosfat se obično koriste rotacione peći – kalcinatori. Oba uređaja koriste toplotu ulaznih dimnih gasova koji nastaju sagorevanjem gasa ili nafte.

U jednostepenom Hehst-Knapsakovom (*Hoechst-Knapsack*) procesu koristi se samo jedan uređaj koji služi istovremeno i kao kalcinator i kao sušara. Ovaj tip procesa uključuje više mogućnosti. Jedna od njih je naprskavanje likera na sloj vrelog recikliranog kalcinisanog materijala. Obično je ovakav uređaj jasno podeljen na zonu sušenja i zonu kalcinacije, a tokovi gasa i likera mogu biti u istom ili suprotnom smeru. Druga opcija je naprskavanje monofosfatnog rastvora na pritisku 1-2 MPa u koloni za naprskavanje od nerđajućeg čelika. Rastvor se naprskava sa bočnih strana kolone i kreće naniže sa dimnim gasovima koji se uvode na vrhu kolone, brzo se dehidriše i prelazi u tripolifosfat koji se odvodi sa dna kolone. Kod ovakve kolone ne postoji jasna podela na zonu sušenja i zonu kalcinacije.

Najveći deo čestica tripolifosfata se kod obe vrste postupka (jednostepeni ili dvostepeni) sakuplja u konusnom levku gde se fine čestice odvajaju od gasa pomoću ciklonskih baterija. Krajnji produkt je sa sadržajem tripolifosfata obično većim od 94 %. Nakon kalcinacije proizvod se hladi vodom u valjkastim ili cevnim hladnjacima i zatim obrađuje prema specifikacijama veličine praha ili granula putem prosejavanja, vazdušne separacije i tehnika mlevenja.

Natrijum tripolifosfat u obliku granula se prepoznaje kao: laki ($0.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), srednji ($0.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) i teški ($1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) tripolifosfat. Uslovi sušenja u velikoj meri kod ovakvog načina proizvodnje određuju fizičke osobine kalcinisanog proizvoda, pre svega gustinu. U većini procesa, gustina granuliranog proizvoda je konstantna u fazi sušenja fosfata, pa tako sprej sušare proizvode male gustine, dobošaste sušare srednje, a rotacione sušare granule velike gustine. Gustina proizvoda se može kontrolisati u čitavom procesom promenom veličine čestica i sadržaja vlage sirovine u kalcinatoru.

Referentni objekat u ovom radu je postrojenje za proizvodnju natrijum tripolifosfata u "IHP-Prahovo", najvećoj fabrici za proizvodnju hemijskih proizvoda u Srbiji. Proces proizvodnje natrijum tripolifosfata, baziran na putu preko mokre fosforne kiseline sastoji se iz:

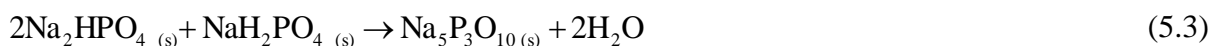
- Mokre faze (neutralizaciona faza) u kojoj se fosforna kiselina neutrališe do stvaranja ortofosfornog rastvora.
- Suve faze procesa (toplotna faza) gde se sušenjem i kalcinacijom dobijeni rastvor ortofosfata konvertuje u natrijum tripolifosfat.

Proces je detaljno je opisan u [2], [3], a u ovoj disertaciji predstavljen je tehnološkom šemom na [slici 5.1](#). U daljem tekstu fokus istraživanja usmeren je na subsistem za transformaciju

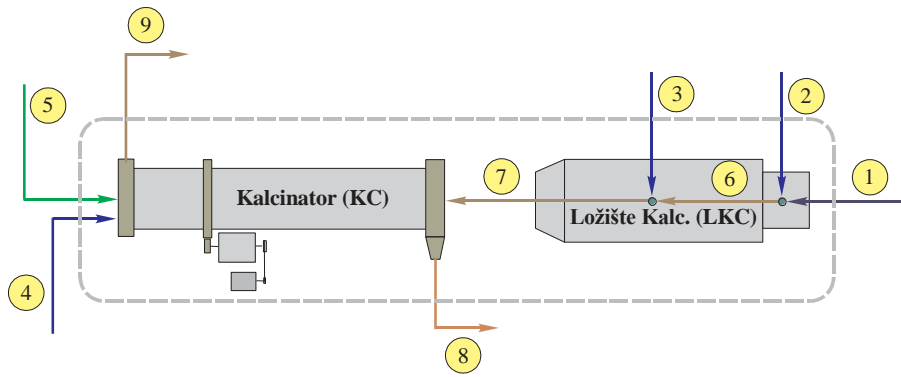
ortofosfata u tripolifosfate čija je pozicija u tehnološkoj šemi ograničena žuto obojenim pravougaonikom.

5.2. Fizički model sistema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate

Subsistem za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate je sastavljen od dve komponente: kalcinatora i ložišta kalcinatora i šematski je predstavljen na slici 5.2. Subsistem za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate referentnog postrojenja u okviru IHP Prahovo koji je prikazan na [slici 5.2](#) radi na sledećem principu. Ortofosfatni prah (tok 5) dobijen sušenjem ortofosfatnog rastvora u atomizeru se putem transportera unosi u dobošastu sušaru – kalcinator (KC). Tretman sirovine u kalcinatoru vrši se zagrevanjem produktima sagorevanja (tok 7) iz ložišta kalcinatora (LKC) koji imaju suprotan smer kretanja u odnosu na nju. Pri procesu dehidratacije koji se odvija u kalcinatoru stvara se iz ortofosfatne smeše (u dva stupnja preko intermedijernih pirofosfata) natrijum tripolifosfat po ukupnoj reakciji [\(5.3\)](#):



Produkti sagorevanja potrebni za tretman ortofosfatnog praha u kalcinatoru dobijaju se u ložištu kalcinatora (tok 6). Ložište se snabdeva gorivom (tok 1) iz zajedničkog rezervoara odakle se transportuje visokopritisnim pumpama. Sagorevanje goriva sprovodi se uz pomoć primarnog vazduha (tok 2), dok se hlađenje dimnih gasova na potrebnu temperaturu (oko 550°C) na izlazu iz ložišta kalcinatora postiže ubacivanjem sekundarnog vazduha (tok 3). Ohlađeni dimni gasovi (tok 7) ulaze u kalcinator radi zagrevanja glavne sirovine do određene temperature na kojoj se odigrava hemijska transformacija i u zavisnosti od nje stvara odgovarajući fazni oblik tripolifosfata. Tokom procesa kalcinacije u kalcinator ulazi izvesna količina spoljašnjeg vazduha koji se označava kao parazitni vazduh (tok 4) i koji napušta posmatrani sistem zajedno sa dimnim gasovima na izlazu iz kalcinatora (tok 9). Dimni gasovi na izlazu iz kalcinatora (tok 9) sa sobom povlače jedan manji deo tripolifosfatnih čestica zbog čega se šalju na suvo otprašivanje u ciklonsku bateriju kalcinatora u cilju vraćanje tih čestica tripolifosfata u kalcinator. Natrijum tripolifosfat (tok 8) kao glavni proizvod sistema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate se iz kalcinatora šalje transporterima u rotacioni dobošasti hladnjak da bi se potom transportovao do tampon bunkera gde se skladišti, a potom i pakuje u vreće.



LEGENDA

- | | | | | | |
|---|-------------------|---|-------------------------|---|--|
| 1 | Gorivo | 4 | Parazitni vazduh | 7 | Mešavina sekundarnog vazduha i produkata sagorevanja |
| 2 | Primarni vazduh | 5 | Ulaz ortofosfata (ORPH) | 8 | Natrijum tripolifosfat (STPP) |
| 3 | Sekundarni vazduh | 6 | Produkti sagorevanja | 9 | Produkti sagorevanja sa česticama STPP-a |

Slika 5.2. Fizički model subsistema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate

5.3. Matematički model subsistema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate

Matematički model podesan za simulaciju rada energetskog razvijen je na osnovu:

- Materijalnog bilansiranja komponenti subsistema, (5.4):

$$\sum_{j \in \text{IN}} G_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}} G_{j,\text{out}} = 0 \quad (5.4)$$

- Energetskog bilansiranja komponenti subsistema, (5.5):

$$\sum_{j \in \text{IN}} G_{j,\text{in}} h_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}} G_{j,\text{out}} h_{j,\text{out}} - W_i - Q_i = 0 \quad (5.5)$$

- Bilansa entropije za komponente subsistema, (5.6):

$$G_{j,\text{in}} s_{j,\text{in}} - G_{j,\text{out}} s_{j,\text{out}} \pm S_{\text{gen}} = 0 \quad (5.6)$$

za $j = \text{KC}, \text{LKC}_s, \text{LKC}_M$;

Formiranje matematičkog modela energetskog sistema za simulaciju strategijom generalisanih jednačina izvršeno je nakon usvajanja nekoliko pretpostavki:

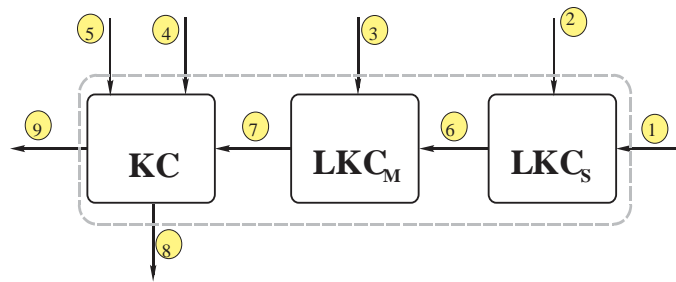
- Procesi u svim jedinicama su stacionarni; Iako je evidentan složen kompleks fizičko-hemijskih parametara koji utiču na proces proizvodnje u cilju izgradnje homomorfno modela može se smatrati da su procesi u referentnom subsistemu stacionarni. Pri tome je stacionarnost termodinamičkih parametara vezana za proizvodnju određenog kapaciteta, od-

ređenog tipa natrijum tripolifosfata u određenom (najčešće 24-časovnom) vremenskom periodu.

- Količina odnetog materijala sa dimnim gasovima je u funkciji kapaciteta postrojenja; Pri formiranju materijalnog bilansa atomizera i kalcinatora maseni protok STPP praha koji odnose dimni gasovi po izlasku iz ovih sušara je u funkciji kapaciteta postrojenja: $G_{STPP,9}=f(G_8)$.
- Apsolutni sadržaj vlage u dimnim gasovima je u funkciji sastava goriva; U predstavljenom matematičkom modelu simulacija se može realizovati sa generisanjem dimnih gasova različitih vrsta goriva: $G_{w,FG}=f(\text{sastav goriva})$.
- Termofizičke karakteristike strujnih tokova računata su kao karakteristike idealne smeše; Strujni tokovi duž instalacije predstavljaju višekomponentne smeše tako da su njihove karakteristike računata kao karakteristike idealne smeše. Pri tome:
- Vazduh neophodan za realizaciju procesa sagorevanja definisan je idealna smeša suvog vazduha i vlage sadržane u njemu. Obzirom na mali udeo vlage, vazduh je tretiran kao suv: $x_{w,air}=0$.
- Produkti sagorevanja (gasoviti) na izlazu iz sistema predstavljaju idealne smeše suvih produkata sagorevanja iz ložišta i vazduha.
- Ortofosfat koji ulazi u sistem predstavlja idealnu smešu suvog praha i vlage u njemu.
- Gubici toplote duž cevovodne instalacije su zanemarljivi; Celokupna instalacija postrojenja je izolovana, pa se gubici toplote duž strujnih tokova mogu zanemariti: $Q_{L,pipe}=0$.
- Promene u kinetičkoj i potencijalnoj energiji tokova su zanemarljive; Projekat postrojenja je takav da svi tokovi ulaze ili izlaze u njega na približno istoj visini u odnosu na referentni nivo i smatra se da protiču jednakim brzinama kroz sistem: $\Delta H_{PT,S}=\Delta H_{KN,S}=0$.
- U ložištu kalcinatora vladaju adijabatski uslovi; Gubici toplote u ložištu su zanemareni, dok se u kalcinatoru računaju kao funkcija srednje temperature dimnih gasova u kalcinatoru, materijala i veličine kalcinatora: $Q_{L,LKC}=0$, $Q_{L,KC}=f(T_7, T_9, \text{materijal}, A_{KC})$.

Na bazi fizičkog modela i usvojenih pretpostavki, matematički modeli posmatranog sistema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate u okviru postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata IHP Prahovo se razvijaju primenama kontrolne zapremine (CV) za otvoreni stacionarni termodinamički sistem i pomoću jednačina masenog i energetskog bilansa. Dijagram toka (PFD) koji predstavlja fizički model sistema za konverziju u tripolifosfate

(slika 5.2) se transformiše u blok dijagram toka (BFD) dat na slici 5.3 koji omogućava lakšu dekompoziciju šeme posmatranog sistema.



Slika 5.3. Blok dijagram toka subsystema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate

Kako se vidi sa slike 5.3 posmatrani subsystem za transformaciju fosfata se može rastaviti na tri nova subsystema:

- subsystem za produkciju dimnih gasova, ložište u užem smislu ili deo ložišta kalcinatora u kome se obavlja isključivo sagorevanje – subsystem LKC_S;
- subsystem za hlađenje dimnih gasova ili deo ložišta kalcinatora u kome se vrši mešanje produkata sagorevanja i rashladnog vazduha – subsystem LKC_M;
- subsystem za hemijsku transformaciju fosfata u užem smislu (kalcinaciju) ili kalcinator - subsystem KC.

Pri formiranju matematičkog modela za simulaciju posmatranog sistema i njegovih podjedinica takođe su usvojene sledeće specifikacije:

- svi tokovi se nalaze na pritisku okoline za koju se pretpostavljaju atmosferski uslovi, (5.7):

$$p_i = 0.1 \text{ MPa} \quad (i = 1..9) \quad (5.7)$$

- gorivo, primarni i sekundarni vazduh ulaze u ložište kalcinatora na temperaturi okoline, (5.8):

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_0 \quad (5.8)$$

- smatra se da je materijal od koga je pretežno izrađen kalcinator čelik što definiše koeficijent prenosa toplote, (5.9):

$$k = 0.345 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (5.9)$$

- površina kalcinatora se usvaja na osnovu uvida u tehničku dokumentaciju i smatra takođe poznatom i konstantnom, (5.10):

$$A = 345 \text{ m}^2 \quad (5.10)$$

- smatra se da su vazdušni tokovi idealne dvokomponentne smeše azota i kiseonika, dok se udeo ostalih komponenti zanemaruje.

- udeo pepela i vlage (koji ne učestvuju u reakciji sagorevanja) u gorivu se zanemaruje; tečni naftni gas sadrži propan i butan, dok je udeo drugih gasova u gorivu zanemarljiv; u sastav lož ulja ulazi pet hemijskih elemenata od značaja za analizu.

Na osnovu stehiometrije procesa kalcinacije, uvida u tehničku dokumentaciju postrojenja i analizu sadržaja sirovina i proizvoda moguće je pretpostaviti konstantan odnos količina formirajući konstitutivne relacije [\(5.11\)](#), [\(5.12\)](#) i [\(5.19\)](#):

- tripolifosfata koji ne ulazi u gotov proizvod i dimnih gasova na izlazu iz kalcinatora:

$$G_{\text{STPP},9} = K_1 G_9 \quad (5.11)$$

gde je $K_1=0.054$, odnos masenih protoka tripolifosfata ka ciklonskoj bateriji kalcinatora i hladnjaku.

- ortopraha kao osnovne sirovine i tripolifosfata kao finalnog proizvoda:

$$G_5 = K_2 G_8 \quad (5.12)$$

gde je $K_2=1.223$, konstanta koja povezuje masene protoke ortopraha i gotovog tripolifosfata.

Maseni bilans ortofosfata shodno hemijskoj jednačini stvaranja tripolifosfata može se izraziti relacijom [\(5.13\)](#):

$$G_5 = G_8 + G_{\text{STPP},9} + G_{\text{wp}} \quad (5.13)$$

gde je G_{wp} , maseni protok vlage koji potiče iz ortofosfatnog praha ili nastaje njegovom hemijskom konverzijom i koja se otklanja procesom sušenja u kalcinatoru.

Ova veličina može se predstaviti kao zbir protoka vlage koja potiče iz polaznog ortopraha (nastale većim delom usled dodatnog naprskavanja osušenog ortopraha na ulazu u kalcinator vodom koja deluje katalitički na stvaranje natrijum tripolifosfata) i vlage koja nastaje hemijskom transformacijom ortofosfata u tripolifosfat prema izrazu [\(5.14\)](#):

$$G_{\text{wp}} = G_{\text{w},5} + G_{\text{w},8} \quad (5.14)$$

Količina vlage koja nastaje transformacijom ortofosfata u tripolifosfat $G_{\text{w},8}$ može se analizirati putem dvostupnih hemijskih reakcija stvaranja tripolifosfata u kojima se kao produkt javlja 4 mola vode. Procesi su pojednostavljeni usvajanjem pretpostavki da je:

- ulazni vazduh u kalcinatoru dovoljno male relativne vlažnosti tako da se količina vlage u njemu može zanemariti u odnosu na količinu vlage koja se otklanja procesom sušenja u kalcinatoru.
- temperaturni profil takav da omogućava lako stvaranje obe faze tripolifosfata.

- isključena mogućnost apsorpcije molekula vode na površini čvrste faze.

Količina vlage koja potiče iz hemijske transformacije ortofosfata ($G_{w,8}$) može se izračunati stehiometrijskim putem, odnosno analizom proreagovale količine ortofosfata ili količine stvorenog tripolifosfata u kalcinatoru. Ako je x_{imp} udeo nečistoća u gotovom tripolifosfatu, M molska masa datog jedinjenja, protok vlage $G_{w,8}$ može se napisati u obliku [\(5.15\)](#):

$$G_{w,8} = \frac{2M_{H_2O}(G_8 + G_{STPP,9})(1 - x_{imp})}{M_{STPP}} \quad (5.15)$$

Ako se veličine na desnoj strani jednačine [\(5.15\)](#) izraze preko ulaznog protoka ortopraha konačna bilansna jednačina protoka vlage iz fosfata u kalcinatoru dobija oblik izraza [\(5.16\)](#):

$$G_{wp} = \frac{2M_{H_2O}G_5(1 - x_{w,5} - x_{dry,5})}{2M_{Na_2HPO_4} + M_{Na_2HPO_4}} + G_5x_{w,5} \quad (5.16)$$

gde je:

$x_{w,5}=0.0556$ maseni udeo vlage u ortoprahu,

$x_{dry,5}=0.0163$ maseni udeo suvih nečistoća u ortoprahu.

Zamenom ovih vrednosti i molskih masa jedinjenja, prethodna jednačina može se napisati u skraćenom obliku [\(5.17\)](#):

$$G_{wp} = K_1 \cdot G_5 \quad (5.17)$$

gde je:

$K_1=0.1385$ odnos masenih protoka vlage koja potiče iz ortopraha ili nastaje hemijskom transformacijom ortofosfata i ortopraha.

Maseni bilans sa ortofosfatne strane je tako dat relacijom [\(5.18\)](#):

$$G_5 = \frac{(1 + K_1)}{(1 - K_1')} G_8 = K_2 G_8 \quad (5.18)$$

čime je pokazano kako je konstanta $K_2=1.223$ povezana sa konstantama K_1 i K_1' .

- parazitnog vazduha i dimnih gasova na izlazu iz kalcinatora:

$$G_4 = K_3 G_9 \quad (5.19)$$

gde je:

$K_4=0.134$ odnos masenih protoka parazitnog vazduha i dimnih gasova na izlazu iz kalcinatora.

Konstanta koja definiše odnos količina dimnih gasova i ulaznog goriva za datu vrstu goriva u jednačini (5.20) se izračunava iz modela.

$$G_6 = K_4 G_1 \quad (5.20)$$

Količina i sastav nastalih dimnih gasova procenjuje se na osnovu opštih jednačina sagorevanja tečnog i gasovitog goriva koje su date u Prilogu P1. Na osnovu konstitutivnih relacija koje definišu količine komponenti dimnih gasova po kilogramu goriva za poznati sastav tečnog naftnog gasa/lož ulja i definisanu vrednost koeficijenta viška vazduha u ložištu vrši se kompletiranje masenog bilansa.

Osnovna jednačina bilansa energije (5.21) za proučavani sistem glasi:

$$H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5 = H_8 + H_9 + H_{STPP,9} + Q_{calc} + Q_{L,KC} \quad (5.21)$$

gde je:

$H_i = G_i \cdot h_i$ entalpija strujnog toka

Q_{calc} fluks toplote kalcinacije, drugim rečima, deo toplote ulaznih dimnih gasova koji se troši na reakciju stvaranja natrijum tripolifosfata.

$Q_{L,KC}$ fluks toplotnih gubitaka u kalcinatoru koji se definiše u funkciji materijala (koeficijent prenosa toplote k) i veličine kalcinatora (površina A), kao i razlike srednje temperature dimnih gasova u kalcinatoru i temperature okoline prema izrazu (5.22):

$$Q_{L,KC} = k \cdot A \cdot \left(\frac{T_9 - T_7}{2} - T_4 \right) \quad (5.22)$$

Nakon rešavanja materijalnog bilansa prelazi se na proračun protočnih energija svih tokova sistema pri čemu se obično smatra da je specifična entalpija svakog toka izražena kao proizvod specifičnog toplotnog kapaciteta i temperature. Vrednosti specifičnih toplotnih kapaciteta za tokove gasovitih smeša u funkciji su temperature i njihovog sastava i nalaze se pomoću termodinamičkih funkcija ugrađenih u softveru. Kada su u pitanju tokovi ortofosfatnog praha i natrijum tripolifosfata, primenjuje se jednačina (5.23) za zavisnost specifične molske toplote ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) čvrstih organskih soli od temperature (izražene u stepenima Kelvina) oblika:

$$c_{p,m} = a + 0.001bT + 10^6 \cdot \frac{c}{T^2} + 10^{-6} \cdot dT^2 \quad (5.23)$$

Koeficijenti a , b , c i d računaju se na osnovu doprinosa specifične toplote svih hemijskih elemenata koji ulaze u sastav jedinjenja. Za jedinjenje hemijske formule $A_x B_y C_z$ jednačina (5.24) se odnosi na bilo koji koeficijent (npr. a) i glasi:

$$a = x\Delta a(A) + y\Delta a(B) + z\Delta a(C) \quad (5.24)$$

gde su $\Delta a(A)$, $\Delta a(B)$, $\Delta a(C)$ doprinosi hemijskih elemenata A, B i C potrebni za izračunavanje koeficijenta a u jednačini za zavisnost specifični molski toplotni kapacitet jedinjenja $A_xB_yC_z$ od temperature, dok su x , y i z su brojevi atoma pomenutih elemenata u molekulu datog jedinjenja.

Tabela 5.3. Doprinosi hemijskih elemenata u izrazu za specifičnu molsku toplotu fosfatnih jedinjenja

Δ	a, J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹	b, J·mol ⁻¹ ·K ⁻²	c, J·mol ⁻¹ ·K ⁻³	d, J·mol ⁻¹ ·K ⁻⁴
Na	14.1860	9.65500	0.52900	4.85100
H	-5.2170	25.7540	0.23200	2.57600
P	-39.486	50.2480	1.68600	2.32500
O	28.1522	12.0434	-0.7472	-4.0225

U [tabeli 5.3](#) dati su doprinosi hemijskih elemenata u relevantnim fosfatnim jedinjenjima za slučaj posmatranog sistema, potrebni za nalaženje odgovarajuće jednačine zavisnosti specifične molske toplote ovih jedinjenja od temperature [\[4\]](#).

Merenje temperatura ulaznih i izlaznih tokova omogućava izračunavanje sadržaja njihove energije i gubitaka toplote u kalcinatoru, pa je tako moguće iz bilansa energije izračunati toplotu kalcinacije. Zanimajući složen mehanizam reakcije stvaranja tripolifosfata, [\[5\]](#), [\[6\]](#), uz nastajanje više sporednih proizvoda ili prisustvo faznih transformacija, ova toplota kalcinacije se može uporediti sa promenom entalpije posmatrane reakcije na temperaturi reakcije ili poslužiti za grubu procenu srednje temperature odigravanja reakcije [\[7\]](#), [\[8\]](#). Istovremeno, temperaturu reakcije moguće je povezati sa dobijenom temperaturnom formom tripolifosfata (*faza I, faza II*). Ipak, u ovom istraživanju njeno određivanje u prvom delu simulacionog zadatka služi kao osnova za definisanje drugog simulacionog zadatka u kome se vrši analiza potrošnje goriva u funkciji drugih energetskih parametara za konstantne vrednosti specifične toplote kalcinacije za dati temperaturni režim proizvodnje. Specifičnom toplotom kalcinacije smatraće se izračunata toplota kalcinacije po kilogramu gotovog proizvoda prema jednačini [\(5.25\)](#):

$$Q_{\text{calc},s} = \frac{Q_{\text{calc}}}{G_8} \quad (5.25)$$

Materijalni i energetski bilansi komponenti prikazani su u Prilogu P3.

5.4. DOF analiza sustistema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate

Prevođenje matematičkog modela u numerički model uz ispitivanje njegove matematičke konzistentnosti je omogućeno analizom stepena slobode (DOF analiza) koja se vrši posebno za svaki od pomenuta tri nova sustistema (podjedinice, komponente).

Osnovne smernice za proračun broja promenljivih i relacija sustistema su sledeće:

- broj materijalnih bilansa odgovara broju hemijskih komponenti u dimnim gasovima u slučaju prva dva sustistema, dok u slučaju kalcintora postoji još jedan dodatni nezavistan bilans fosfata;
- za sva tri sustistema postoji jedan nezavistan energetski bilans;
- dodatne promenljive u energetskom bilansu (promenljive u vezi sa razmenom toplote) su donja toplotna moć goriva kod analize ložišta kalcinatora, a fluks toplote kalcinacije (reakcione toplote) i toplotnih gubitaka kod analize kalcinatora;
- konstante u vezi sa transformacijom materijalnih tokova ili parametri opreme su: koeficijent viška vazduha kod analize ložišta kalcinatora, odnosno koeficijent prenosa toplote materijala kalcinatora, površina kalcinatora, konstante koje definišu sadržaj tripolifosfata i parazitnog vazduha u struji gasova na izlazu kod analize kalcinatora; tokovi tripolifosfata i ortofosfatnog praha mogu se u analizi kalcinatora računati kao jednokomponentni, pošto su udeli obe soli u ortoprahu, vlage i suvih nečistoća u oba toka (definisani stehiometrijom ili poznati iz dokumentacije) sadržani u konstanti koja daje odnos količina sirovine i produkta.
- postoje dva interkonektivna toka (dimni gasovi iz prvog sustistema ka drugom i dimni gasovi iz drugog u treći sustistem) sa jednakim brojem hemijskih komponenti za istu vrstu goriva.
- pomoćne relacije sadrže jednačinu za gubitke toplote i jednačine koje povezuju masene protoke određenih tokova preko pomenutih konstanti.

Specifikacije koje se uzimaju u obzir kod analize stepena slobode odgovaraju pomenutim specifikacijama simulacionog modela (jednakost pritisaka i temperatura, materijal kalcinatora, sastav goriva i vazduha).

Tabela 5.4. DOF analiza subsystema za produkciju dimnih gasova (LKC_S)

Gorivo: Tečni naftni gas	Subsystem LKC _S	Gorivo: Lož ulje	Subsystem LKC _S
$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [2(2+2) + 1(4+2)] + 1 + 0 + 1$	16	$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [1(2+2) + 2(5+2)] + 1 + 0 + 1$	20
Bilans		Bilans	
Nezavisne relacije		Nezavisne relacije	
Materijalni	4	Materijalni	5
Energetski	1	Energetski	1
Pomoćne relacije	0	Pomoćne relacije	0
Broj specifikacija promenljivih		Broj specifikacija promenljivih	
Pritisak	3	Pritisak	3
Temperatura	1	Temperatura	1
Sastav	1	Sastav	1
Konstante	0	Konstante	0
N_r	10	N_r	11
$N_d, N_d = N_v - N_r$	6	$N_d, N_d = N_v - N_r$	9

Tabela 5.5. DOF analiza subsystema za hlađenje dimnih gasova (LKC_M)

Gorivo: Tečni naftni gas	Subsystem LKC _M	Gorivo: Lož ulje	Subsystem LKC _M
$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [1(2+2) + 2(4+2)] + 0 + 0 + 0$	16	$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [1(2+2) + 2(5+2)] + 0 + 0 + 0$	18
Bilans		Bilans	
Nezavisne relacije		Nezavisne relacije	
Materijalni	4	Materijalni	5
Energetski	1	Energetski	1
Pomoćne relacije	0	Pomoćne relacije	0
Broj specifikacija promenljivih		Broj specifikacija promenljivih	
Pritisak	3	Pritisak	3
Temperatura	0	Temperatura	0
Sastav	1	Sastav	1
Konstante	0	Konstante	0
N_r	9	N_r	10
$N_d, N_d = N_v - N_r$	7	$N_d, N_d = N_v - N_r$	8

Tabela 5.6. DOF analiza subsystema za kalcinaciju - kalcinator (KC)

Gorivo: Tečni naftni gas	Subsystem KC	Gorivo: Lož ulje	Subsystem KC
$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [2(1+2) + 1(2+2) + 1(4+2) + 1(5+2)] + 2 + 0 + 5$	30	$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C + 2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [2(1+2) + 1(2+2) + 1(5+2) + 1(6+2)] + 2 + 0 + 5$	32
Bilans		Bilans	
Nezavisne relacije		Nezavisne relacije	
Materijalni	5	Materijalni	6
Energetski	1	Energetski	1
Pomoćne relacije	4	Pomoćne relacije	4
Broj specifikacija promenljivih		Broj specifikacija promenljivih	
Pritisak	5	Pritisak	5
Temperatura	-	Temperatura	-
Sastav	1	Sastav	1
Konstante	5	Konstante	5
N_r	21	N_r	22
$N_d, N_d = N_v - N_r$	9	$N_d, N_d = N_v - N_r$	10

*Legenda : N_v Ukupan broj promenljivih u sistemu, N_r Ukupan broj nezavisnih relacija u sistemu, N_d Ukupan broj stepeni slobode u sistemu

Tabela 5.7. DOF analiza subsystema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate

Sistem KC-LKC		Gorivo: Tečni naftni gas				Gorivo: Lož ulje				
		LKC _S	LKC _M	KC	Sistem	LKC _S	LKC _M	KC	Sistem	
$N_{v,k}$		16	16	30	62	20	18	32	70	
$N_{v,sys,tot}, N_{v,sys,tot} = \sum N_{v,k}$					62					
Nezavisne relacije	Bilans									
	Materijalni	4	4	5	13	5	5	6	16	
	Energetski	1	1	1	3	1	1	1	3	
	Broj specifikacija promenljivih									
	Pritisak	3	3	5	11	3	3	5	11	
	Temperatura	1	-	-	1	1	-	-	1	
	Sastav	1	1	1	3	1	1	1	3	
	Konstante	-	-	5	5	-	-	5	5	
	Pomoćne relacije	-	-	4	4	-	-	4	4	
	$N_{r,k}$		10	9	21	40	11	10	22	43
$N_{r,sys,tot}, N_{r,sys,tot} = \sum N_{r,k}$					40					
$N_{d,sys,tot}, N_{d,sys,tot} = N_{v,sys,tot} - N_{r,sys,tot}$					22					
Suvišna ili dodatna ograničenja										
$N_{rv,sys,tot} = \sum N_{rCS,NC} \cdot (N_C + 2) = 2(4+2)$					12	$=2(5+2)$				
Nezavisne relacije	Bilans									
	Materijalni					-				
	Energetski					-				
	Broj specifikacija promenljivih									
	Pritisak					2				
	Sastav					-				
	Temperatura					-				
Konstante					-					
$N_{rr,sp}$						2				
$N_{rr}, N_{rr} = \sum N_{rr,sp}$					2					
N_{ar}						2				
$N_d, N_d = N_{d,sys,tot} - N_{rv} + N_{rr} - N_{ar}$					10					
*Legenda										
N_{ar}	Broj dodatnih relacija u odnosu na analizu komponenti									
N_d	Konačan ukupan broj stepeni slobode sistema									
$N_{d,k}$	Broj stepeni slobode u komponenti k									
$N_{d,sys,tot}$	Preliminaran broj stepeni slobode u sistemu									
$N_{ICS,NC}$	Broj interkonektivnih tokova sa brojem hemijskih komponenti N_C									
$N_{r,k}$	Broj nezavisnih relacija u komponenti k									
$N_{r,sys,tot}$	Ukupan broj nezavisnih relacija u sistemu dobijen iz analize komponenti									
N_{rr}	Ukupan broj suvišnih relacija u sistemu									
N_{rv}	Ukupan broj suvišnih promenljivih									
$N_{rr,sp}$	Broj suvišnih bilansa ili specifikacija veličina na nivou analize sistema									
$N_{rv,j}$	Broj suvišnih promenljivih u interkonektivnom toku j između dve komponente									
$N_{v,k}$	Broj promenljivih u komponenti k									
$N_{v,sys,tot}$	Ukupan broj promenljivih u sistemu dobijen iz analize komponenti									

Analiza stepena slobode na nivou jedinica subsystema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate prikazana je u tabelama [5.4](#), [5.5](#) i [5.6](#). Povezivanjem dobijenih rezultata analize stepena slobode pojedinačnih komponenti moguće je predstaviti analizu čitavog sistema na način koji je prikazan u [tabeli 5.7](#).

5.5. Eksergijska analiza subsystema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate

U drugom delu analize potrebno je u matematički model uvesti jednačine bilansa eksergije svih ulaznih i izlaznih tokova pomenutog subsystema i na osnovu toga izvršiti procenu osnovnih kriterijuma eksergijske analize. Osnovna bilansna jednačina eksergije za proučavani sistem obeležena sa [\(5.26\)](#) glasi:

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = E_8 + E_9 + E_{STPP,9} + E_{calc} + E_D + E_L \quad (5.26)$$

Eksergijski bilansi komponenti praktično su realizovani u ovoj disertaciji u Prilogu P3.

Podelom posmatranog sistema na tri nova subsystema datom u fizičkom modelu, moguće je izvršiti eksergijsku analizu dobijenih subsystema prema pristupu gorivo-produkt u skladu sa pravilima koje važi za specifične jedinice (Prilog P3). Na osnovu toga, moguće je formirati bilanse eksergije na nivou čitavog subsystema za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate i izračunati osnovne parametre eksergetske analize. Osnovne smernice za izvođenje eksergetske analize posmatranog sistema su sledeće:

- Brzina i visina sistema su zanemarljivi u odnosu na referentnu okolinu i njenu ravan, pa kinetička i potencijalna eksergija svakog toka neće biti uzete u obzir, već samo njegova fizička i hemijska eksergija.
- Tripolifosfat ka hladnjaku se smatra glavnim proizvodom celog sistema, a dimni gasovi sa zahvaćenim česticama tripolifosfata sporednim proizvodom, a ne otpadom, obzirom da se njihov dalji tretman vrši u drugim delovima postrojenja (ciklonska baterija kalcinatora, kolona za pranje dimnih gasova). Isto važi kod analize subsystema kalcinator.
- S aspekta definisanja goriva i produkta pojedinačnih subsystema, prvi subsystem se tretira kao konvencionalna komora za sagorevanje (ložište), drugi kao mešač, treći kao specifična procesna jedinica (reakciona peć) u kojoj se odvija hemijska reakcija pomoću dovedenih toplotnih agenasa (dimni gasovi), slično kao i čitav posmatrani sistem sa funkcijom konverzije ortofosfata u tripofosfate.

- Destrukcija eksergije za pojedinačne sisteme i čitav sistem se izračunava iz njihovih bilansa eksergija pri čemu svakako važi da je zbir destruktija u subistemima jednak ukupnoj destruktiji eksergije u sistemu.
- Kad su u pitanju termodinamički gubici koji ne nastaju usled ireverzibilnosti procesa, oni se javljaju samo u trećem sistemu i odgovaraju gubicima toplote u kalcinatoru datih u energetskom bilansu.

Na osnovu jednačine za protočnu eksergiju preostali vidovi eksergije koji se javljaju u njoj biće posebno analiziran za svaki strujni tok. Kad je fizička eksergija u pitanju, ona je za sve tokove izražena preko specifičnog toplotnog kapaciteta, temperature i pritiska toka (poglavlje 4) i obzirom da važe određene pretpostavke pri simulaciji, zaključuje se sledeće:

- Svi tokovi su na pritisku okoline 0.1MPa;
- Temperature goriva na ulazu u ložište, primarnog, sekundarnog i parazitnog vazduha su među sobom jednake i odgovaraju temperaturi okoline 25°C, pa je fizička eksergija pomenutih tokova jednaka 0.
- Specifični toplotni kapacitet ortopraha i tripolifosfata na zadatim temperaturama računata su na osnovu jednačina zavisnosti koje važe za čvrste neorganske soli, dok se koeficijenti jednačine nalaze na osnovu doprinosa hemijskih elemenata koji čine dato jedinjenje kao što je opisano u matematičkom modelu sistema.
- Vrednosti specifičnih toplotnih kapaciteta tokova dimnih gasova, kako je već pomenuto, nalaze se pomoću termodinamičkih funkcija ugrađenih u softveru.
- Tripolifosfati u dimnim gasovima biće posmatrani kao poseban tok pri analizi obzirom da im se specifični toplotni kapacitet razlikuje od dimnih gasova s kojima izlaze iz sistema, pa poseduju različitu fizičku eksergiju.

Što se tiče hemijske eksergije tokova, preduzeti su sledeći koraci:

- Za izračunavanje specifične hemijske eksergije tripolifosfata i oba ortofosfata korišćena je jednačina za specifičnu hemijsku eksergiju jedinjenja čija primena daje izraze [\(5.27\)](#), [\(5.28\)](#), [\(5.29\)](#):

$$e_{\text{CH}_3\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}} = \Delta_f g_{\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}}^0 + 5e_{\text{CH}_3\text{Na}} + 3e_{\text{CH}_3\text{P}} + 10e_{\text{CH}_3\text{O}} \quad (5.27)$$

$$e_{\text{CH}_3\text{Na}_2\text{HPO}_4} = \Delta_f g_{\text{Na}_2\text{HPO}_4}^0 + 2e_{\text{CH}_3\text{Na}} + e_{\text{CH}_3\text{H}} + e_{\text{CH}_3\text{P}} + 4e_{\text{CH}_3\text{O}} \quad (5.28)$$

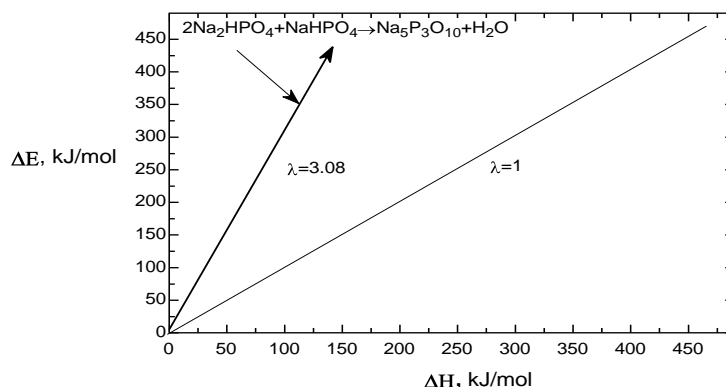
$$e_{\text{CH}_3\text{NaH}_2\text{PO}_4} = \Delta_f g_{\text{NaH}_2\text{PO}_4}^0 + e_{\text{CH}_3\text{Na}} + 2e_{\text{CH}_3\text{H}} + e_{\text{CH}_3\text{P}} + 4e_{\text{CH}_3\text{O}} \quad (5.29)$$

Podaci o molarnim Gibsovim energijama stvaranja ovih jedinjenja su usvojeni iz rada Vagmana (*Wagman*) [9], a molarne hemijske eksergije elemenata se uzimaju po Šargutu [10]. Reakciona eksergija (eksergija kalcinacije) data izrazom (5.30) se za izračunate hemijske eksergije učesnika reakcija predstavlja istovremeno i kao negativna vrednost promene Gibsove energije date reakcije u jednačini (5.31):

$$\Delta g_{\text{calc}}^0 = e_{\text{CH}_3\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}} + 2 \cdot e_{\text{CH}_2\text{H}_2\text{O}} - 2 \cdot e_{\text{CH}_2\text{Na}_2\text{HPO}_4} - e_{\text{CH}_2\text{NaH}_2\text{PO}_4} \quad (5.30)$$

$$e_{\text{calc}} = -\Delta g_{\text{calc}}^0 = 2 \cdot e_{\text{CH}_2\text{Na}_2\text{HPO}_4} + e_{\text{CH}_2\text{NaH}_2\text{PO}_4} - e_{\text{CH}_3\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}} - 2 \cdot e_{\text{CH}_2\text{H}_2\text{O}} \quad (5.31)$$

Primenom jednačine za raspoloživost energije ove reakcije dolazi se do odnosa promena eksergije i entalpije [8] pri standardnim uslovima, izražene po molu natrijum tripolifosfata. Kao što se vidi sa [slike 5.4](#), vrednost raspoloživosti je veća od jedinice tako da ovaj proces pripada režimu separacije (prvi kvadrant) na dijagramu entalpija-eksergija što znači da se u sistemu apsorbuje toplota (endotermna reakcija), ali istovremeno dolazi i do smanjenja entropije mešanja.

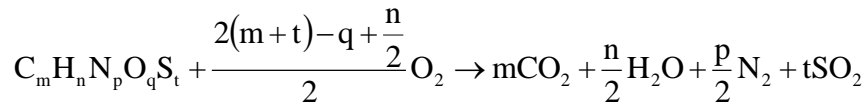


Slika 5.4. Vektorski dijagram eksergije za reakciju stvaranja tripolifosfata pri standardnim uslovima. U slučaju tokova ortopraha i tripolifosfata treba uzeti u obzir sadržaj vlage ili suvih nečistoća pri proračunu njihove protočne hemijske eksergije, jer se hemijska eksergija se uzima u obzir samo za one komponente tokova koje sudeluju u reakcijama sagorevanja i kalcinacije. Hemijska eksergija vlage koja nastaje u reakciji povezuje se sa količinom vlage izračunatom pomoću konstanti iz matematičkog modela. Eksergetska efikasnost reakcije stvaranja natrijum tripolifosfata iz ortofosfatne smeše data je sledećim odnosom u izrazu (5.32):

$$\varepsilon_{\text{calc}} = \frac{E_{\text{CH,calc}}}{E_{\text{in}}} \quad (5.32)$$

i može se računati za jedinicu kalcinator, kao i čitav sistem odgovoran za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate gde je E_{in} ukupna eksergija na ulazu u subsistem/sistem.

- Proračun eksnergije koja se dobija iz procesa sagorevanja i koristi za transformaciju ortofosfata u tripolifosfate na bazi je mase goriva koje učestvuje u reakciji sagorevanja:



gde su koeficijenti izraženi preko masenog udela elementa u gorivu: $m=x_C/12$, $n=x_H/12$, $q=x_O/16$, $p=x_N/14$, $t=x_S/12$.

Promena Gibsove energije reakcije sagorevanja data po kilogramu goriva prema (5.33) iznosi:

$$\Delta g_F^0 = m e_{CH,CO_2} + \frac{n}{2} e_{CH,H_2O} + \frac{p}{2} e_{CH,N_2} + t e_{CH,SO_2} - e_{CH,F} - \frac{2(m+t)-q+\frac{n}{2}}{2} e_{CH,O_2} \quad (5.33)$$

gde zbir prva četiri člana predstavlja ukupnu hemijsku eksnergiju dimnih gasova, naredni član je hemijska eksnergija goriva, a poslednji hemijska eksnergija primarnog vazduha. Svi članovi predstavljaju eksnergiju po kilogramu goriva.

Specifična eksnergija sagorevanja jednaka je negativnoj vrednosti promene Gibsove energije sagorevanja prema izrazu (5.34):

$$e_{comb} = -\Delta g_F^0 = e_{CH,F} + \frac{2(m+t)-q+\frac{n}{2}}{2} e_{CH,O_2} - m e_{CH,CO_2} - \frac{n}{2} e_{CH,H_2O} - \frac{p}{2} e_{CH,N_2} - t e_{CH,SO_2} \quad (5.34)$$

- Za poznati sastav lož ulja ili tečnog naftnog gasa njihova hemijska eksnergija se određuje preko koeficijenta eksnergije goriva i donje toplotne moći.
- Kad je nereakciona eksnergija u pitanju, jedini njen oblik uzet u obzir kod posmatranih tokova je eksnergija mešanja i to kod ortopraha i dimnih gasova na izlazu iz ložišta, ulazu i izlazu iz kalcinatora.

5.6. Određivanje specifične toplote kalcinacije

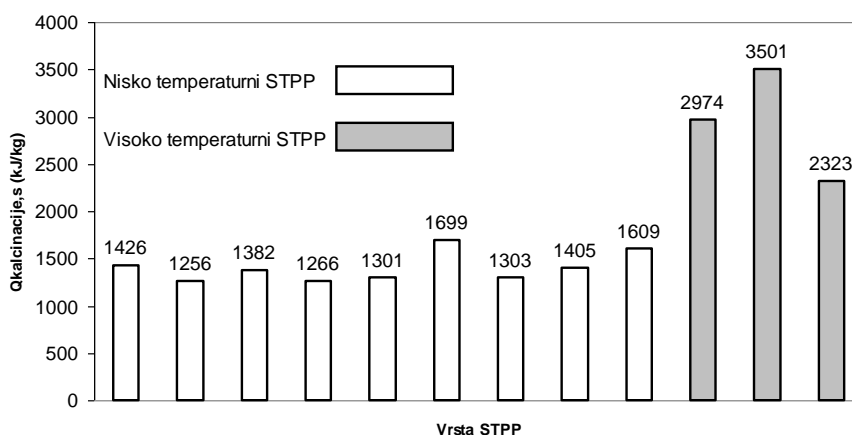
Planom istraživanja prvi zadatak simulacije bio je postupak određivanja specifične toplote kalcinacije. U tom pravcu za inpute softverskog paketa usvojene su vrednosti izmerenih parametara sistema u dužem vremenskom periodu usvojene iz tehničke dokumentacije dostupne u IHP Prahovo. Detaljne baze podataka sa izmerenim veličinama stanja u postrojenju za proizvodnju tripolifosfata u okviru IHP Prahovo za određeni period vremena (1981-2008) su predstavljene u [2]. U ovom delu su u vidu [tabele 5.8](#) prikazani neki karakteristični inputi u softver za slučaj određivanja specifične toplote kalcinacije, dok se procentni sadržaj

elemenata, donja toplotna moć i koeficijent viška vazduha za dato gorivo smatraju podrazumevanim inputima u oba simulaciona zadatka.

Tabela 5.8. Inputi u simulacioni softver u cilju određivanja specifične toplote kalcinacije

Datum merenja	Vrsta tripolifosfata	Inputi u softver						
		Kapacitet	$T_{\text{air,par}}=T_{\text{air,I}}$	T_{ORPH}	$T_{\text{FG,II}}$	$T_{\text{FG,III}}$	T_{STPP}	G_{F}
		G_{STPP} [kg/s]	$T_{\text{air,II}}=T_{\text{F}}$ [°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg/s]
18.01.	niskotemperaturni	1.528	2	78	432.5	237.5	349.9	0.151
29.01.	niskotemperaturni	1.639	1	77	402	233	349.2	0.162
26.07.	niskotemperaturni	1.889	25	82	443.3	240	371.5	0.168
1.08.	niskotemperaturni	1.556	23	81	417.1	240.7	364.6	0.145
2.08.	niskotemperaturni	1.528	23	82	421.7	240	368.5	0.142
19.08.	visokotemperaturni	1.417	21	81	631.9	236.1	445.3	0.171
5.09.	visokotemperaturni	1.722	18	80	591.7	173.3	360.2	0.204
27.07.	visokotemperaturni	1.389	22	82	611.3	260.4	402.3	0.148
30.06.	niskotemperaturni	1.250	19	81	530	244	347.6	0.108
21.07.	niskotemperaturni	1.750	25	81	480	175	346.3	0.096
25.07.	niskotemperaturni	1.406	24	82	519	211	376	0.092
25.08.	niskotemperaturni	1.194	22	80	574.4	233.1	364.5	0.088

Gorivo korišćeno u simulacionom softveru je lož ulje sledećeg procentualnog sastava: C=86%, H=13%, N=0.5%, O=0.3%, S=0.2%. Usvojena vrednost viška vazduha je $\lambda=1.32$, dok je koeficijent iskorišćenja ložišta $\eta=0.95$. Detaljan pregled rezultata određivanja specifične toplote kalcinacije sa parametrima vazduha, dimnih gasova, ortofosfata i tripolifosfata dat je u Prilogu P2, dok se u ovom delu putem [slike 5.5](#) stiže uvid u opseg kretanja približnih vrednosti specifične toplote kalcinacije u oba temperaturna režima.



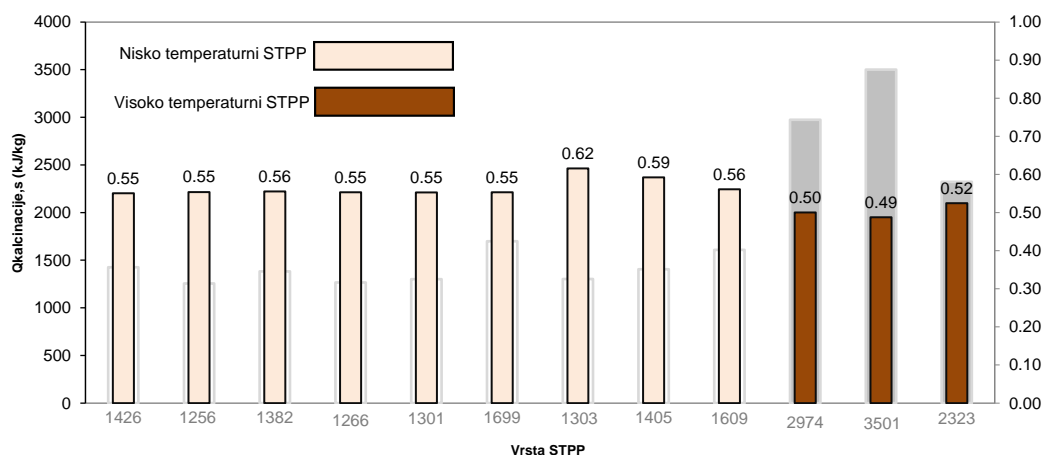
Slika 5.5. Vrednosti specifične toplote kalcinacije dobijene simulacionim softverom

U daljem toku proračuna, pri izvršenju narednog simulacionog zadatka, posebne specifikacije predstavljaju usvojene vrednosti od 1390 kJ/kg za niskotemperaturni i 2900 kJ/kg za visokotemperaturni STPP.

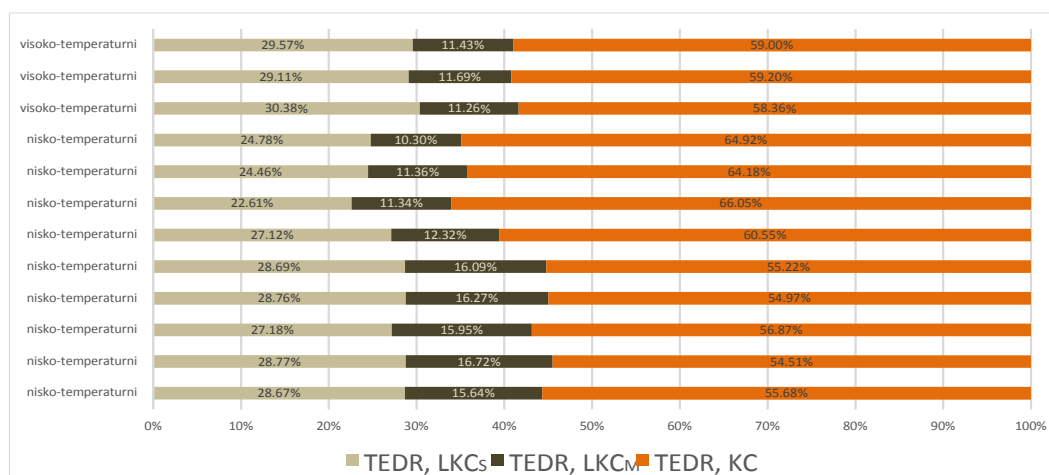
5.7. Rezultati energetske analize subsistema za transformaciji ortofosfata u tripolifosfate

U ovom delu predstavljena je analiza rezultata dobijenih simulacionim softverom.

Na [slici 5.6](#), [slici 5.7](#) i [slici 5.8](#) rezultati korišćeni u funkciji određivanja srednje specifične toplote sastava tripolifosfata redefinisani su u svrhu pregleda eksergetskih indikatora ovoga subsistema.



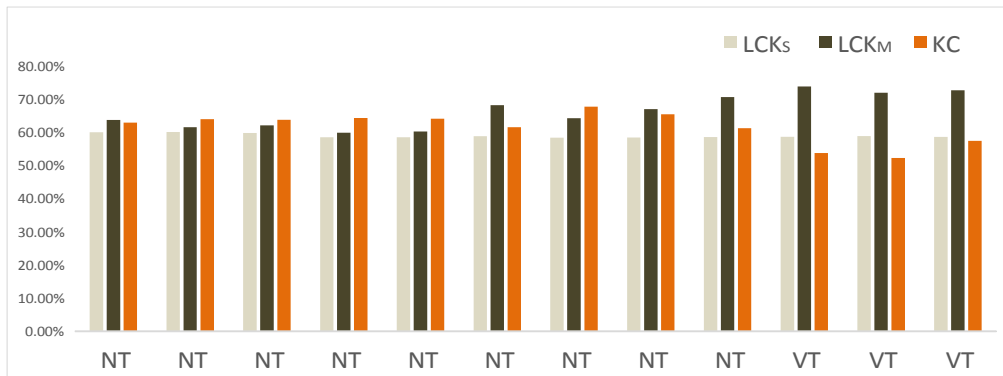
Slika 5.6. Određivanje specifične toplote kaclinacije i eksergetske efikasnosti pri različitim temperaturnim režimima



Slika 5.7. Raspodela destrukcija unutar komponenti subsistema za transformaciju u tripolifosfate

Na [slici 5.6](#) definisane su eksergetske efikasnosti subsistema pri proizvodnji tripolifosfata različitog sastava i uz različitu količinu toplote kalcinacije. Dva osnovna zaključka su da su

procesu proizvodnje niskotemperaturnog tripolifosfata eksergetski efikasniji nego procesi proizvodnje visokotemperaturnog triplifosfata i da najmanju efikasnost pokazuje proces sa maksimalnom toplotom kalcinacije (visokotemperaturni tripolifosfat $Q_{\text{calc}}=3501$ kJ/kg, $\epsilon_{\text{sys}}=0.49$). Na [slici 5.7](#) ilustrovan je koeficijent destrukcije eksergije u subsistemu gde je očigledno da procentualno destrukcija eksergije najveća u kalcinatoru. [Slika 5.8](#) ilustruje individualnu eksergetsku efikasnost svake od procesnih jedinica i u njoj se vidi da je eksergetska efikasnost kalcinatora u proizvodnji visokotemperaturnog tripolifosfata najniža.



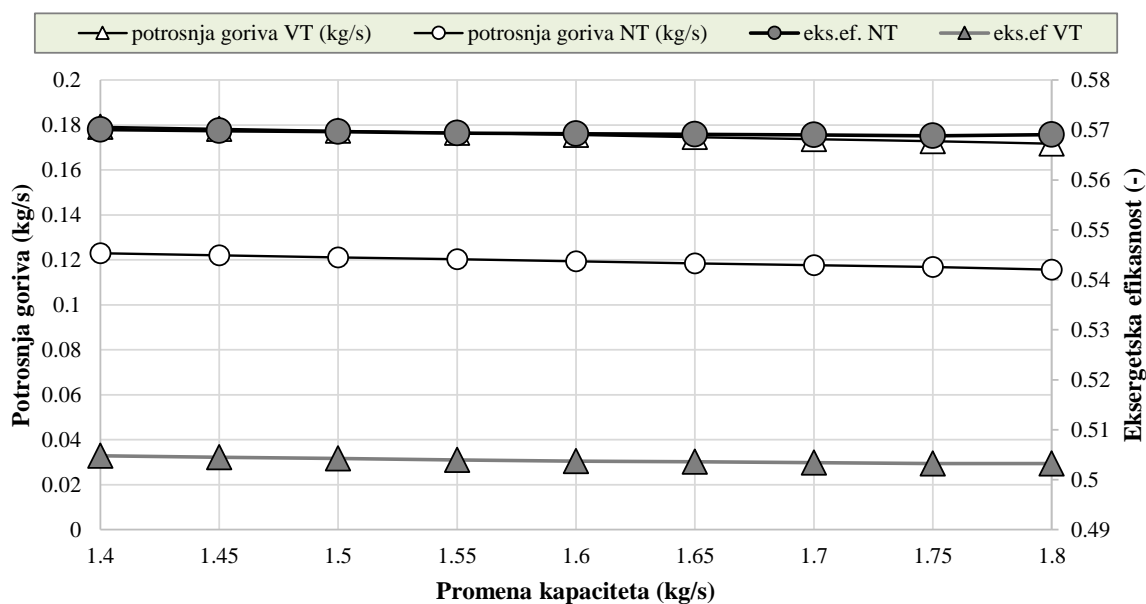
Slika 5.8. Eksergetska efikasnost komponenti subsistema za transformaciju u tripolifosfate

U sledećem koraku ispitivanja dat je pregled energetske i eksergetske karakteristika subsistema u slučaju korišćenja različitih vrsta goriva pri proizvodnji niskotemperaturnog i visokotemperaturnog tripolifosfata. Grafičkim ilustracijama predstavljene su količine potrošenog goriva u procesu proizvodnje, kao i eksergetske efikasnosti subsistema u funkciji tri promenljive:

- Kapaciteta postrojenja (promenljive se kreću u rasponu od 1.4 kg/s do 1.8 kg/s STPP-a), [slika 5.9](#), [slika 5.12](#);
- Temperature okoline (od 2°C do 26°C), [slika 5.10](#), [slika 5.13](#);
- Temperature dimnih gasova na ulazu u kalcinator, [slika 5.11](#), [slika 5.14](#);

Indikatori eksergetske analize (koeficijenti destrukcije eksergije i eksergetska efikasnost komponenti) prikazane su u tabelama koje prate prethodno navedene ilustracije: [tabela 5.9](#), [tabela 5.10](#), [tabela 5.11](#), [tabela 5.12](#), [tabela 5.13](#), [tabela 5.14](#), [tabela 5.15](#), [tabela 5.16](#), [tabela 5.17](#), [tabela 5.18](#), [tabela 5.19](#), [tabela 5.20](#).

U slučaju povećanja kapaciteta proizvodnje povećanje količina potrošenog goriva je izraženija kod korišćenja LPG-a nego kod lož ulja. Takođe, eksergetska efikasnost subsistema koji kao pogonsko gorivo koristi lož ulje je niža nego u slučaju korišćenja LPG-a.



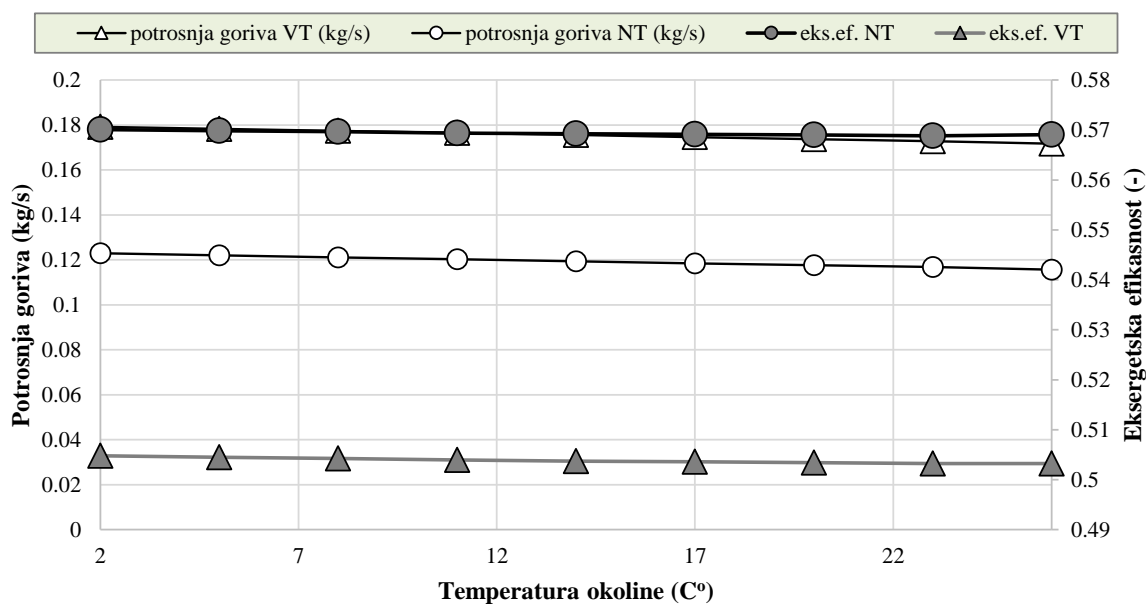
Slika 5.9. Uticaj promene kapaciteta na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost subsistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo lož ulje)

Tabela 5.9. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo lož ulje

kapacitet postrojenja (kg/s)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
1.40	0.4312	0.2460	0.1448	0.6092	0.6140	0.6302	0.6373
1.45	0.4311	0.2461	0.1448	0.6091	0.6138	0.6299	0.6375
1.50	0.4310	0.2457	0.1447	0.6096	0.6142	0.6303	0.6374
1.55	0.4309	0.2458	0.1447	0.6096	0.6141	0.6301	0.6376
1.60	0.4311	0.2456	0.1446	0.6098	0.6139	0.6300	0.6374
1.65	0.4309	0.2453	0.1447	0.6100	0.6143	0.6298	0.6375
1.70	0.4309	0.2455	0.1443	0.6101	0.6139	0.6304	0.6375
1.75	0.4307	0.2455	0.1446	0.6098	0.6142	0.6303	0.6376
1.80	0.4307	0.2455	0.1446	0.6100	0.6141	0.6301	0.6377

Tabela 5.10. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo lož ulje

kapacitet postrojenja (kg/s)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
1.40	0.5307	0.3822	0.1070	0.5108	0.4981	0.7180	0.5446
1.45	0.5306	0.3822	0.1069	0.5109	0.4980	0.7182	0.5447
1.50	0.5306	0.3823	0.1068	0.5110	0.4979	0.7185	0.5448
1.55	0.5304	0.3821	0.1069	0.5110	0.4980	0.7181	0.5450
1.60	0.5305	0.3819	0.1067	0.5113	0.4979	0.7183	0.5448
1.65	0.5304	0.3817	0.1068	0.5115	0.4981	0.7184	0.5448
1.70	0.5304	0.3818	0.1069	0.5114	0.4980	0.7180	0.5450
1.75	0.5303	0.3822	0.1068	0.5110	0.4979	0.7182	0.5451
1.80	0.5302	0.3819	0.1067	0.5113	0.4980	0.7185	0.5451



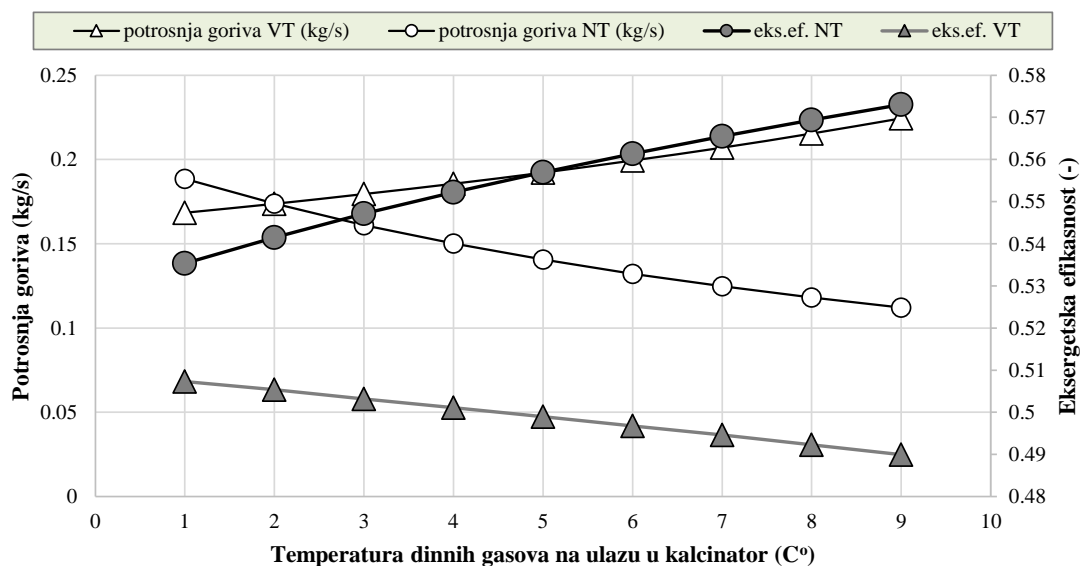
Slika 5.10. Uticaj temperature okoline na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost subsystema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo lož ulje)

Tabela 5.11. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo lož ulje

Temperatura okoline (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKC _S	TEDR, LKC _M	TEDR, KC	ϵ , LKC _S	ϵ , LKC _M	ϵ , KC
2	0.4312	0.2460	0.1448	0.6092	0.6140	0.6302	0.6373
5	0.4311	0.2461	0.1448	0.6091	0.6138	0.6299	0.6375
8	0.4310	0.2457	0.1447	0.6096	0.6142	0.6303	0.6374
11	0.4309	0.2458	0.1447	0.6096	0.6141	0.6301	0.6376
14	0.4311	0.2456	0.1446	0.6098	0.6139	0.6300	0.6374
17	0.4309	0.2453	0.1447	0.6100	0.6143	0.6298	0.6375
20	0.4309	0.2455	0.1443	0.6101	0.6139	0.6304	0.6375
23	0.4307	0.2455	0.1446	0.6098	0.6142	0.6303	0.6376
26	0.4307	0.2455	0.1446	0.6100	0.6141	0.6301	0.6377

Tabela 5.12. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo lož ulje

Temperatura okoline (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKC _S	TEDR, LKC _M	TEDR, KC	ϵ , LKC _S	ϵ , LKC _M	ϵ , KC
2	0.5307	0.3822	0.1070	0.5108	0.4981	0.7180	0.5446
5	0.5306	0.3822	0.1069	0.5109	0.4980	0.7182	0.5447
8	0.5306	0.3823	0.1068	0.5110	0.4979	0.7185	0.5448
11	0.5304	0.3821	0.1069	0.5110	0.4980	0.7181	0.5450
14	0.5305	0.3819	0.1067	0.5113	0.4979	0.7183	0.5448
17	0.5304	0.3817	0.1068	0.5115	0.4981	0.7184	0.5448
20	0.5304	0.3818	0.1069	0.5114	0.4980	0.7180	0.5450
23	0.5303	0.3822	0.1068	0.5110	0.4979	0.7182	0.5451
26	0.5302	0.3819	0.1067	0.5113	0.4980	0.7185	0.5451



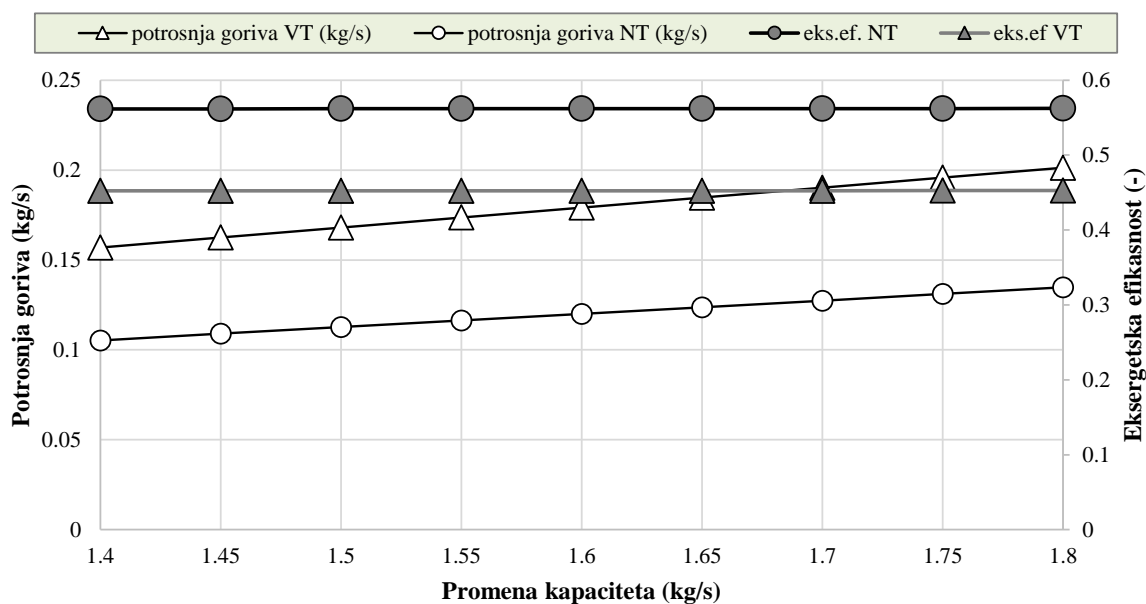
Slika 5.11. Uticaj promene temperature dimnih gasova na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost subsystema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo lož ulje)

Tabela 5.13. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo lož ulje

Temperatura dimnih gasova na izlazu iz KC (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
310	0.4647	0.3909	0.1210	0.4882	0.5190	0.7133	0.6350
300	0.4585	0.3746	0.1175	0.5078	0.5209	0.7116	0.6364
290	0.4528	0.3598	0.1146	0.5256	0.5226	0.7092	0.6381
280	0.4478	0.3463	0.1116	0.5421	0.5239	0.7073	0.6395
270	0.4430	0.3337	0.1088	0.5576	0.5252	0.7055	0.6408
260	0.4386	0.3222	0.1063	0.5715	0.5263	0.7031	0.6422
250	0.4345	0.3117	0.1039	0.5843	0.5271	0.7010	0.6437
240	0.4306	0.3021	0.1017	0.5962	0.5280	0.6994	0.6449
230	0.4270	0.2927	0.0994	0.6079	0.5288	0.6975	0.6462

Tabela 5.14. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo lož ulje

Temperatura dimnih gasova na izlazu iz KC (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
220	0.4927	0.2819	0.1215	0.5966	0.6046	0.7183	0.5466
230	0.4947	0.2865	0.1233	0.5902	0.6045	0.7185	0.5448
240	0.4968	0.2917	0.1253	0.5831	0.6039	0.7185	0.5429
250	0.4989	0.2967	0.1276	0.5757	0.6039	0.7180	0.5412
260	0.5010	0.3022	0.1296	0.5682	0.6035	0.7183	0.5392
270	0.5032	0.3082	0.1317	0.5601	0.6028	0.7186	0.5373
280	0.5054	0.3141	0.1341	0.5518	0.6026	0.7185	0.5354
290	0.5077	0.3209	0.1368	0.5423	0.6021	0.7184	0.5334
300	0.5100	0.3274	0.1394	0.5332	0.6016	0.7182	0.5315



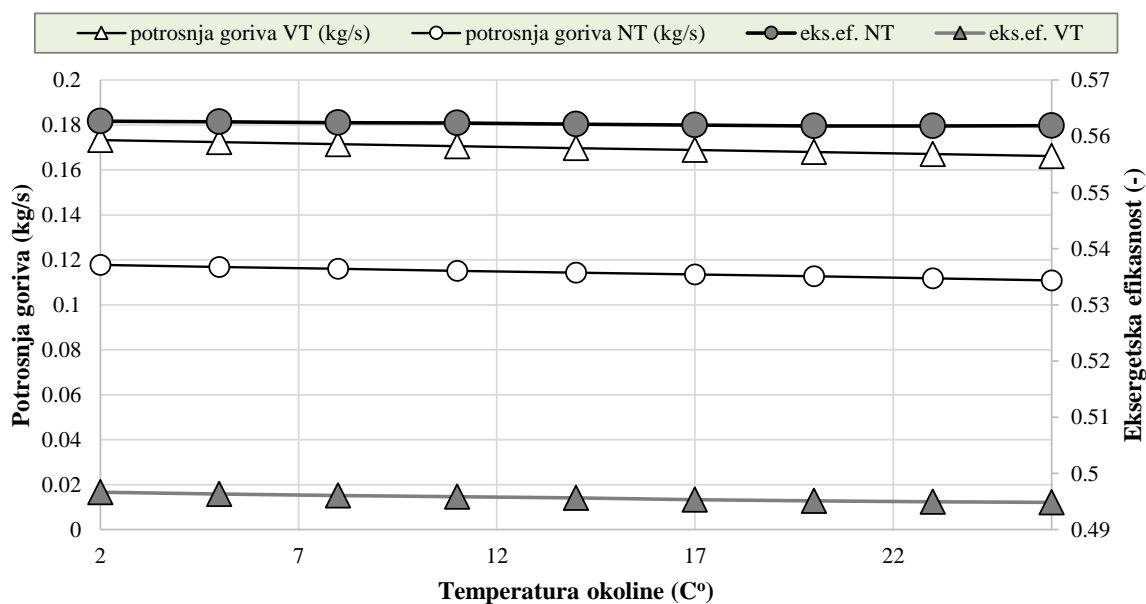
Slika 5.12. Uticaj promene kapaciteta na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost subsystema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo LPG)

Tabela 5.15. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo LPG

kapacitet postrojenja (kg/s)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
1.40	0.4384	0.2676	0.1389	0.5935	0.5880	0.6364	0.6357
1.45	0.4383	0.2674	0.1390	0.5937	0.5882	0.6362	0.6358
1.50	0.4382	0.2674	0.1389	0.5937	0.5880	0.6363	0.6360
1.55	0.4381	0.2672	0.1389	0.5939	0.5882	0.6361	0.6361
1.60	0.4381	0.2666	0.1388	0.5946	0.5886	0.6362	0.6358
1.65	0.4380	0.2665	0.1389	0.5946	0.5887	0.6361	0.6360
1.70	0.4379	0.2665	0.1388	0.5947	0.5886	0.6361	0.6360
1.75	0.4378	0.2667	0.1390	0.5942	0.5887	0.6360	0.6361
1.80	0.4377	0.2666	0.1389	0.5945	0.5886	0.6361	0.6363

Tabela 5.16. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo LPG

kapacitet postrojenja (kg/s)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
1.40	0.5478	0.4227	0.1135	0.4639	0.4570	0.6812	0.5564
1.45	0.5477	0.4227	0.1135	0.4639	0.4569	0.6811	0.5566
1.50	0.5477	0.4227	0.1135	0.4638	0.4569	0.6809	0.5567
1.55	0.5476	0.4225	0.1136	0.4639	0.4570	0.6807	0.5569
1.60	0.5477	0.4223	0.1136	0.4641	0.4570	0.6805	0.5567
1.65	0.5475	0.4222	0.1136	0.4642	0.4570	0.6805	0.5569
1.70	0.5475	0.4222	0.1136	0.4641	0.4569	0.6804	0.5570
1.75	0.5475	0.4226	0.1137	0.4636	0.4569	0.6802	0.5572
1.80	0.5474	0.4223	0.1138	0.4639	0.4570	0.6801	0.5573



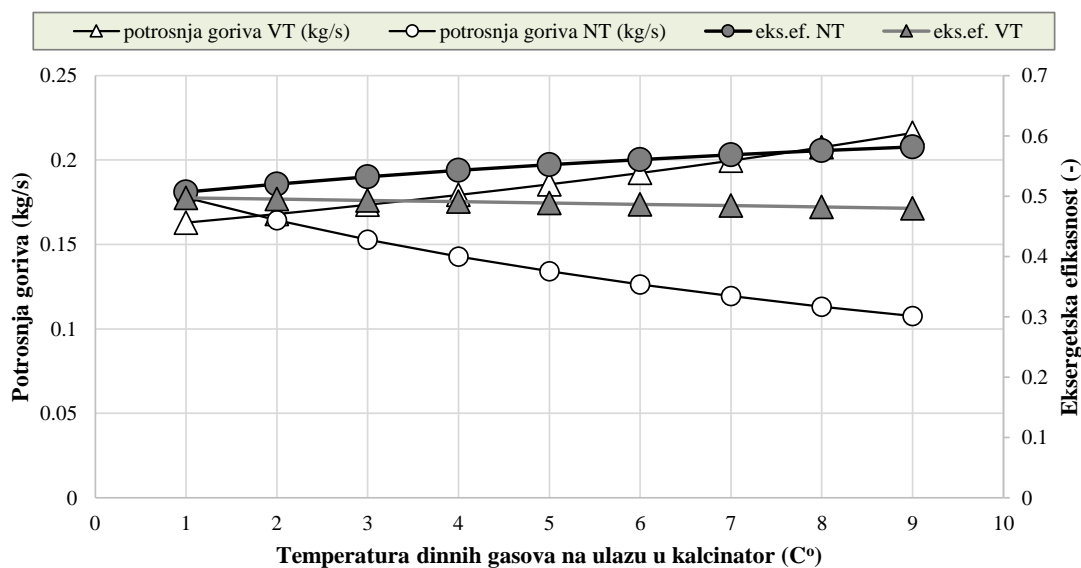
Slika 5.13. Uticaj promene temperature okoline na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost sub-sistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo LPG)

Tabela 5.17. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo LPG

Temperatura okoline (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
2	0.4373	0.2672	0.1375	0.5952	0.6019	0.6598	0.6311
5	0.4374	0.2671	0.1378	0.5951	0.5997	0.6559	0.6319
8	0.4376	0.2668	0.1383	0.5949	0.5979	0.6515	0.6327
11	0.4377	0.2666	0.1383	0.5951	0.5958	0.6482	0.6334
14	0.4379	0.2668	0.1386	0.5946	0.5934	0.6441	0.6343
17	0.4380	0.2671	0.1388	0.5942	0.5907	0.6402	0.6351
20	0.4382	0.2674	0.1389	0.5938	0.5880	0.6363	0.6360
23	0.4382	0.2671	0.1397	0.5932	0.5866	0.6317	0.6368
26	0.4381	0.2668	0.1397	0.5935	0.5845	0.6279	0.6376

Tabela 5.18. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo LPG

Temperatura okoline (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCS	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCS	ϵ , LKCM	ϵ , KC
2	0.5034	0.3114	0.1134	0.5752	0.5866	0.7436	0.5333
5	0.5037	0.3118	0.1138	0.5744	0.5844	0.7406	0.5347
8	0.5039	0.3120	0.1146	0.5734	0.5826	0.7370	0.5362
11	0.5041	0.3124	0.1150	0.5725	0.5804	0.7340	0.5376
14	0.5044	0.3129	0.1155	0.5716	0.5782	0.7309	0.5390
17	0.5047	0.3136	0.1159	0.5705	0.5757	0.7279	0.5404
20	0.5049	0.3141	0.1163	0.5697	0.5735	0.7249	0.5419
23	0.5050	0.3145	0.1171	0.5684	0.5718	0.7213	0.5433
26	0.5052	0.3147	0.1176	0.5677	0.5698	0.7180	0.5447



Slika 5.14. Uticaj promene temperature dimnih gasova na potrošnju goriva i eksergetsku efikasnost subsistema za transformaciju u tripolifosfate (gorivo LPG)

Tabela 5.19. Pregled indikatora eksergetske analize za NT režim i gorivo LPG

Temperatura dimnih gasova na izlazu iz KC (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCs	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCs	ϵ , LKCM	ϵ , KC
310	0.4933	0.3703	0.3421	0.2877	0.5257	0.1670	0.7677
300	0.4798	0.3161	0.3813	0.3027	0.5865	0.1498	0.7693
290	0.4678	0.2611	0.4216	0.3173	0.6511	0.1349	0.7703
280	0.4572	0.2050	0.4632	0.3318	0.7201	0.1220	0.7707
270	0.4478	0.1480	0.5062	0.3459	0.7936	0.1107	0.7707
260	0.4392	0.0890	0.5512	0.3599	0.8732	0.1007	0.7704
250	0.4315	0.0283	0.5981	0.3735	0.9587	0.0917	0.7698
240	0.4246	-0.0343	0.6482	0.3861	1.0510	0.0837	0.7689
230	0.4184	-0.0995	0.6997	0.3997	1.1511	0.0764	0.7679

Tabela 5.20. Pregled indikatora eksergetske analize za VT režim i gorivo LPG

Temperatura dimnih gasova na izlazu iz KC (°C)	$y_{D,sys}$	TEDR, LKCs	TEDR, LKCM	TEDR, KC	ϵ , LKCs	ϵ , LKCM	ϵ , KC
220	0.5028	0.3094	0.1147	0.5760	0.5735	0.7245	0.5438
230	0.5049	0.3141	0.1163	0.5696	0.5735	0.7249	0.5419
240	0.5070	0.3192	0.1181	0.5627	0.5734	0.7250	0.5400
250	0.5091	0.3244	0.1200	0.5556	0.5734	0.7248	0.5382
260	0.5113	0.3299	0.1221	0.5480	0.5733	0.7247	0.5362
270	0.5135	0.3355	0.1240	0.5405	0.5734	0.7252	0.5341
280	0.5157	0.3415	0.1264	0.5321	0.5734	0.7247	0.5323
290	0.5180	0.3482	0.1288	0.5230	0.5733	0.7249	0.5303
300	0.5202	0.3546	0.1311	0.5143	0.5733	0.7249	0.5283

Rezultati simulacije pokazuju mali uticaj temperature okoline na količinu potrošenog goriva, kao i na eksergetsku efikasnost sistema bez obzira na vrstu korišćenog goriva. U slučaju promene temperature dimnih gasova na ulasku u kalcinator tendencije promene potrošnje goriva i eksergetske efikasnosti imaju različit karakter i u slučaju korišćenja lož ulja i u slučaju korišćenja LPG-a.

U [tabeli 5.21](#) i [tabeli 5.23](#) date su eksergije svih tokova relevantnog sistema za prosečne vrednosti izmerenih temperatura tokova i kapaciteta postrojenja za oba režima proizvodnje tripolifosfata (niskotemperaturni i visokotemperaturni oblik) i za obe vrste goriva (lož ulje, propan-butan gas) definisanog sastava. U obzir su uzete prosečne potrošnje u ložištu kalcinatora za oba goriva (0.177 kg/s za lož ulje, odnosno 0.167 kg/s za propan-butan gas) uz identične prosečne temperature i kapacitet postrojenja. Vrednosti eksergije su izražene u kW, kao i po kilogramu glavnog proizvoda.

Tabela 5.21. Eksergije ulaznih i izlaznih tokova sistema za hemijsku konverziju ortofosfata u tripolifosfate za prosečne vrednosti kapaciteta postrojenja i temperatura tokova (gorivo LOŽ ULJE %-nog sastava: C=86,H=13,N=0.5,O=0.3,S=0.2; koeficijent viška vazduha 1.32)

Opis	$G(\text{kg/s})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$e_{\text{PH}}(\text{kJ/kg})$	$e_{\text{CH}}(\text{kJ/kg})$	$e(\text{kJ/kg})$	$\dot{E}_{\text{PH}}(\text{Kw})$	$\dot{E}_{\text{CH}}(\text{kW})$	$E(\text{kW})$	$e(\text{kJ/kgp})$
Ortoprah iz sabirnika	1.84	80.00	5.77	8425.93	8431.70	10.59	15461.59	15472.18	10314.76
Gorivo	0.17	25.00	0.00	47593.00	47593.00	0.00	8190.76	8190.76	5460.50
Primarni vazduh	3.26	25.00	0.00	0.68	12.91	0.00	2.22	2.22	1.48
Sekundarni vazduh	7.46	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Parazitni vazduh	1.72	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Tripolifosfat ka hladnjaku	1.50	360.00	130.40	7173.60	7304.00	195.60	10760.40	10956.00	7304.00
Tripolifosfat ka CBK	0.08	230.00	52.51	7173.60	7226.11	4.25	581.06	585.32	390.21
Dimni gasovi iz kalcinatora	12.81	230.00	53.76	0.00	53.76	688.67	0.00	687.77	458.51
Dimni gasovi iz ložišta	3.38	1611.00	1422.00	1.74	1457.62	4806.36	5.89	4812.25	3208.17
Dimni gasovi u kalcinator	10.84	610.00	316.70	0.00	316.70	3433.03	0.00	3433.03	2288.69

Najzad, u [tabeli 5.22](#) i [tabeli 5.24](#) analiziran je uticaj promene vrste goriva u postrojenju na povećanje termodinamičke efikasnosti sistema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate. Poređenje je vršeno na osnovu podataka iz prethodnih tabela, dakle za isti kapacitet postrojenja i iste temperature tokova uzimajući prosečne potrošnje goriva u ložištu kalcinatora. Iz njih

se vidi da zamena lož ulja propan-butan gasom (LPG) od 2007. godine u IHP Prahovo nije dovela do dramatične promene eksergijskih kriterijuma, odnosno do znatnog pada termodinamičke efikasnosti posmatranog sistema, odnosno procesa.

Kad su u pitanju termodinamički gubici koji ne nastaju usled ireverzibilnosti procesa, iz rezultata se zaključuje da je njihov udeo zanemarljiv u eksergiji koja ulazi ili napušta sistem. Koeficijenti gubitka eksergije u pojedinačnim sistemima mogu se tako smatrati 0, odnosno konstatuje se da neefikasnosti sistema skoro potpuno potiču od ireverzibilnosti.

Tabela 5.22. Kriterijumi eksergijske analize sistema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate (gorivo LOŽ ULJE %-nog sastava: C=86,H=13,N=0.5,O=0.3,S=0.2; koeficijent viška vazduha 1.32)

	LKCS	LKCM	KC	Sistem LKC-KC
EP (kW)	4810.031	3433.028	8205.303	11638.331
EF (kW)	8190.755	4812.252	14872.373	23065.350
ED (kW)	3380.725	1379.224	6667.070	11427.019
EL (kW)	-	-	9.090	9.090
ϵ	0.587	0.713	0.553	0.505
γ_D	0.413	0.287	0.448	0.495
TEDR	0.296	0.121	0.583	1.000
ϵ_{calc}	-	-	0.445	0.530

Tabela 5.23. Eksergijski bilans sistema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate (gorivo LPG %-nog sastava: C=82.75,H=17.25; koeficijent viška vazduha 1.184)

Opis	G(kg/s)	T(°C)	$e_{PH}(kJ/kg)$	$e_{CH}(kJ/kg)$	$e(kJ/kg)$	$E_{PH}(Kw)$	$E_{CH}(kW)$	E(kW)	$e(kJ/kgp)$
Ortoprah iz sabirnika	1.835	80	5.770	8425.934	8431.704	10.588	15461.589	15472.177	10314.785
Gorivo	0.167	25	0.000	52180.000	52180.000	0.000	8687.970	8687.970	5791.980
Primarni vazduh	3.063	25	0.000	0.759	0.000	0.000	2.324	2.324	1.550
Sekundarni vazduh	7.546	25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Parazitni vazduh	1.699	25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Tripolifosfat ka hladnjaku	1.500	360	130.400	7173.600	7304.000	195.600	10760.400	10955.965	7304.000
Tripolifosfat ka CBK	0.081	230	52.510	7173.600	7226.110	4.253	581.062	585.315	390.210
Dimni gasovi iz kalcinatora	12.680	230	54.860	0.000	54.860	695.625	0.000	695.625	463.750
Dimni gasovi iz ložišta	3.178	1655	1516	1.785	1518.743	4817.848	5.674	4823.522	3215.681
Dimni gasovi u kalcinator	10.72	610	323.5	0.000	323.5	3467.92	0.000	3467.92	2311.946

Tabela 5.24 Kriterijumi eksergijske analize sustistema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate (gorivo LPG %-nog sastava: C=82.75, H=17.25; koeficijent viška vazduha 1.184)

	LKC _s	LKC _M	KC	Sistem LKC-KC
E_P (kW)	4821.198	3467.92	8177.370	11645.290
E_F (kW)	8687.970	4823.522	14872.373	23562.667
E_D (kW)	3866.772	1355.602	6695.002	11917.376
E_L (kW)	-	-	8.200	8.200
ε	0.555	0.719	0.550	0.494
γ_D	0.445	0.281	0.450	0.506
TEDR	0.324	0.114	0.562	1
ε_{calc}	-	-	0.445	0.530

5.9. Zaključna razmatranja poglavlja 5

- Energetska i eksergetska analiza dela postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata vršena je putem simulacije koja se odvija u dva pravca.
- U prvom delu simulacionog zadatka na osnovu registrovanih temperatura tokova u postrojenju izvršen je proračun specifične toplote kalcinacije koji je potom iskorišćen za analizu potrošnje goriva u funkciji ostalih relevantnih energetske parametara.
- U oba simulaciona zadatka uporedo je praćena promena eksergetskih efikasnosti za identične zadate energetske parametre.
- Rezultati simulacije (prikazani tabelarno i grafički) su klasifikovani u odnosu na vrstu korišćenog goriva (lož ulje ili propan-butan gas) i odgovarajući temperaturni režim proizvodnje (niskotemperaturni ili visokotemperaturni).
- S povećanjem specifične toplote kalcinacije eksergetska efikasnost posmatranog dela postrojenja opada, pa je tako ona veća kod niskotemperaturnog u odnosu na visokotemperaturni režim proizvodnje i do 12.8 %.
- S povećanjem kapaciteta postrojenja uz potrošnju goriva raste i eksergetska efikasnost sustistema za konverziju ortofosfata u tripolifosfate.
- S povećanjem spoljne temperature potrošnja goriva opada, kao i eksergetska efikasnost posmatranog dela postrojenja.
- Jedan od način smanjenja potrošnje goriva i istovremenog povećanja eksergetske efikasnosti posmatranog sistema jeste smanjenje ulazne temperature dimnih gasova u kalcinatoru (uz konstantan pad temperature dimnih gasova u kalcinatoru), odnosno smanjenje njihove izlazne temperature (uz promenljiv pad temperature dimnih gasova u kalcinatoru).

- Razlika u potrošnji goriva između niskotemperaturnog i visokotemperaturnog režima u korist ovog drugog postaje izraženija s povećanjem kapaciteta postrojenja, sa smanjivanjem spoljne temperature, odnosno ulazne ili izlazne temperature dimnih gasova u kalcinatoru. Isto važi za razliku eksergetskih efikasnosti u korist niskotemperaturnog režima.
- Zamena lož ulja propan-butan gasom nije dovela do dramatičnog pada eksergetskih efikasnosti pri istim uslovima ispitivanja, pa se postignuta ušteda u potrošnji goriva pokazuje opravdana.
- Raspodela destrukcije eksergije posmatranog sistema unutar njegova tri subsistema je takva da najveći deo destrukcije nastaje u kalcinatoru, a znatno manje u komori za sagorevanje i komori za hlađenje dimnih gasova.

Literatura poglavlja 5

- [1] Kijkowska R, Kowalski Z, Pawlowska-Kozinska D, Wzorek Z, Gorazda K. Tripolyphosphate made from wet-process phosphoric acid with use of a rotary kiln. *Ind Eng Chem Res* 2008;47;6821–7. [\[citac u tekstu\]](#)
- [2] Rašković P. Optimizacija industrijskih energetskih sistema putem integracije mreže razmenjivača toplote [doktorska disertacija]. Niš, Srbija: Mašinski fakultet u Nišu; 2002. [\[citac u tekstu\]](#)
- [3] Raskovic P. Step-by-step process integration method for the improvements and optimization of sodium tripolyphosphate process plant. *Energy* 2007;32(6);983–8. [\[citac u tekstu\]](#)
- [4] Head AJ, Lewis GB. Thermodynamic properties of phosphorus compounds. *J Chem Thermodyn* 1970;2(5);701–16. [\[citac u tekstu\]](#)
- [5] Iida T, Takai N, Yamabe T. Studies of sodium tripolyphosphate from orthophosphate by the use of radioisotopes. *Bull Chem Soc Jpn* 1971;44;686–8. [\[citac u tekstu\]](#)
- [6] Edwards JW, Herzog AH. The mechanism of formation of sodium triphosphate from orthophosphate mixtures. *J Am Chem Soc* 1957;79; 3647. [\[citac u tekstu\]](#)
- [7] Shrodtter K, Bettermann G, Staffel T, Klein T, Hofmann T. Ullman's encyclopedia of industrial chemistry. Weinheim, Germany: Sixth Completely Revised Edition;26;127, Wiley-Vch, 2003. [\[citac u tekstu\]](#)
- [8] Winterborne DE. Advanced thermodynamics for engineers. New York: Wiley, 1997. [\[citac u tekstu\]](#)
- [9] Wagman DD, Evans WH, Parker v.B, Schumm RH, Halow I, Bailey SM, Churney ICL, Nuttall RL. The NBS tables of chemical thermodynamic properties: selected values for inorganic and C1 and C2 organic substances in SI units. *J Phys Chem Ref Data* 1982;11;Supplement 2 (La Iglesia, Estimating thermodynamic properties of phosphate minerals);392. [\[citac u tekstu\]](#)
- [10] Szargut J. Chemical exergies of the elements. *Appl Energy* 1989;32:269–85. [\[citac u tekstu\]](#)

6. Analiza binarnih postrojenja u svrhu korišćenja geotermalne energije na polju Velika Ciglena

Tokom poslednje decenije, projektovanje energetske efikasne i jeftine geotermalne postrojenja predstavlja značajan i dugotrajan tehnički izazov u svim zemljama Zapadnog Balkana. U Republici Hrvatskoj, geotermalno polje Velika Ciglena se identifikuje kao jedan od najvrednijih geotermalnih toplotnih izvora i predstavlja lokaciju na kojoj je izgrađeno verovatno prvo geotermalno postrojenje u oblasti Zapadnog Balkana. U ovom poglavlju metodologija konceptualnog projektovanja korišćena je za energetske, eksergetsku i ekonomsku analizu performanse binarnih postrojenja, od kojih jedno radi u Organoskom Rankinovom Ciklusu (ORC), a drugo u Kalina (KLN) ciklusu, u geotermalnom polju Velika Ciglena. U uvodnom delu dat je prikaz postupaka i postrojenja koja se koriste u svrhu iskorišćenja geotermalne energije i predstavljeno korišćenje koncepta eksergije u ovoj oblasti. U nastavku su prikazani referentni fizički i matematički modeli binarnih postrojenja, te izvršena DOF analiza u cilju formiranja numeričkog modela za simulaciju zasnovanu na strategiji simulacionog rešavanja jednačina modela. Verifikacija i validacija modela izvršena je na osnovu rezultata iz prethodno urađene studije od strane Guzovića i dr. Korišćenjem simulacionog paketa, te izračunavanjem energetskih i ekonomskih indikatora, zaključeno je da binarno postrojenje bazirano na ORC tehnologiji predstavlja bolju projektnu alternativu obzirom na karakteristike ispitivanog geotermalnog polja u Velikoj Cigleni.

6.1. Karakteristike i tehnologija korišćenja geotermalne energije

Geotermalna energija je oblik obnovljive energije koji se nalazi u Zemljinoj kori i njenim unutrašnjim fluidima. Definicija koju je usvojila Evropska Agencija za geotermalnu energiju (EGEC) ukazuje na geotermalnu energiju kao "energiju koja se skladišti u vidu toplote ispod površine Zemljine kore" [1]. Geotermalna energija je specifičan oblik energije po tome što predstavlja toplotu sadržanu u Zemljinoj unutrašnjosti, kako u čvrstim stenama, tako i u unutrašnjim fluidima koji popunjavaju šupljine i pukotine unutar stena što je razlikuje od ostalih zemaljskih energetske izvora (fosilna ili fisisjska goriva, biomasa, Sunčeva energija, energija vode i energija vetra). Reč geotermalna dolazi od grčkih reči *geo* (zemlja) i *therme* (toplota). Ova energija je rezidualna toplotna energija u Zemlji nastala tokom geoloških procesa pre 4.5 milijardi godina koja većim delom nastaje laganim raspadom radioaktivnih izotopa koji se nalaze u Zemljinoj unutrašnjosti.

Geotermalna energija se smatra čistim izvorom energije pošto zadovoljava kriterijume dva važna koncepta u eksploataciji energetske izvora – obnovljivost i održivost. U praksi geotermalna energija se može koristiti na dva načina: kao izvor direktnog grejanja ili za proizvodnju električne energije. Način korišćenja primarno zavisi od kvaliteta resursa i specifičnog tehnološkog i ekonomskog kriterijuma. Direktna upotreba koristi resurs efikasnije nego proizvodnja električne energije, pošto ne postoje značajni gubici kao kod pretvaranja toplote u električnu energiju, mada se ni toplota ne može prenositi na udaljenosti većoj od nekoliko kilometara bez značajnijeg smanjenja iskorišćenja zbog neizbežnih toplotnih gubitaka.

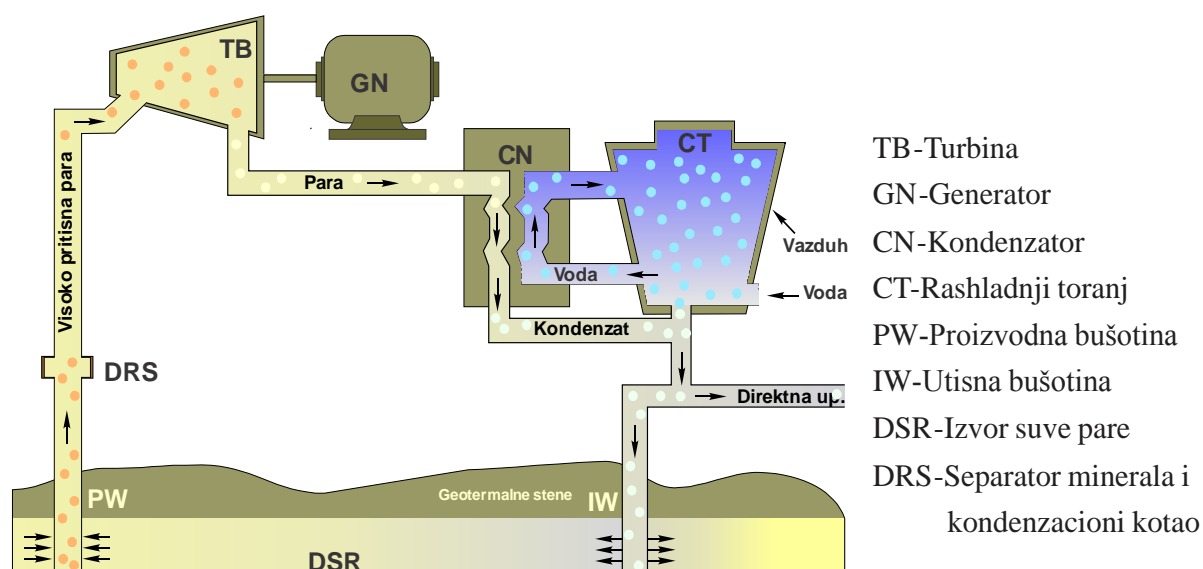
Prema podacima Međunarodne Geotermalne Asocijacije (IGA) u ovom trenutku samo 0.3% proizvedene električne energije u svetu se dobija iz geotermalnih izvora. Ipak, očekuje se da proizvodnja snage iz geotermalnih izvora ravnomerno raste brzinom od 4.3% po godini dostižući udeo od 0.6% globalne proizvodnje električne energije do 2030. godine [2]. Prema nekim prognozama, SAD bi npr. do 2050. godine mogle oko 10% električne energije dobijati iz geotermalnih izvora.

Geotermalne elektrane se, obzirom na stanje geotermalnog fluida koji se dobija na izvoru (pregrejana, suvozasićena ili vlažna para i vrela voda), mogu podeliti na tri osnovna tipa:

- postrojenja sa suvozasićenom parom ([slika 6.1](#)),
- postrojenja s jednostrukim i dvostrukim isparavanjem ([slika 6.2](#)) i

- binarna postrojenja ([slika 6.3](#)).

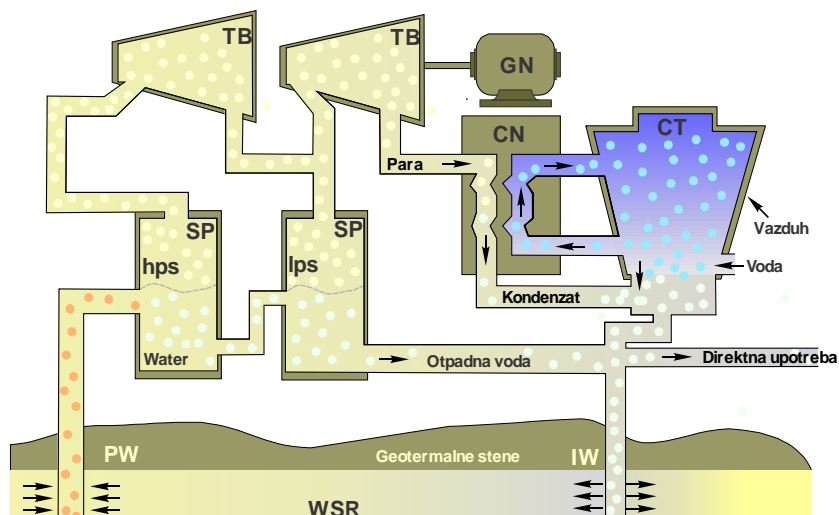
Geotermalne elektrane iz prve dve grupe rade na principu direktnog korišćenja toplote (operišu u direktnim ciklusima), jer para iz geotermalnog izvora direktno ulazi u turbinu, dok geotermalne binarne elektrane indirektno koriste toplote geotermalne vode (indirektni ciklusi), jer se toplota vode iz geotermalnog izvora predaje drugom fluidu čija svojstva omogućavaju isparavanje pri raspoloživim temperaturama geotermalne vode.



Slika 6.1. Geotermalna elektrana sa suvom parom

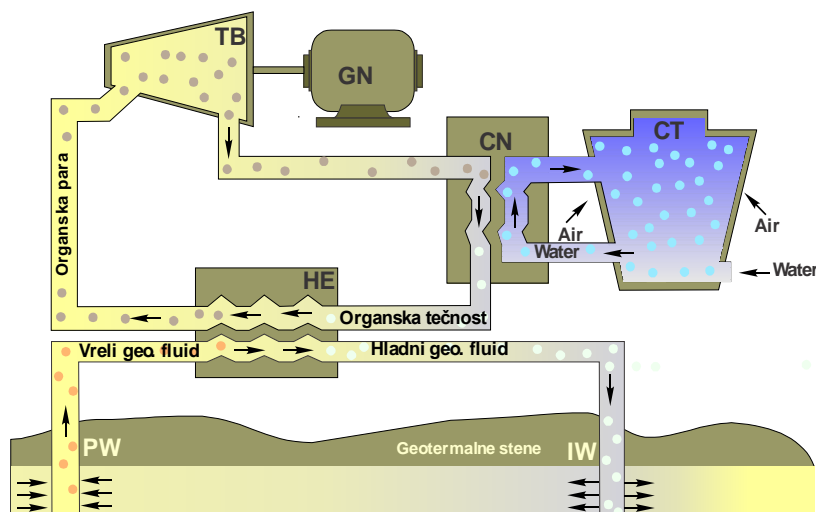
Uz ove osnovne tipove elektrana postoje njihove brojne varijacije i međusobne kombinacije, kako bi se postigla što veća efikasnost i što bolje prilagođavanje konkretnom geotermalnom izvoru i njegovim specifičnostima (npr. kombinacija ciklusa sa isparavanjem i binarnih ciklusa). Geotermalni izvori bogati suvom parom proizvode vrelu paru ($>235^{\circ}\text{C}$) sa minimalnom količinom vode. Ova para se može koristiti direktno u turbini geotermalnog postrojenja gde ekspanduje stvarajući korisnu mehaničku snagu koja pokreće električni generator. Nakon ekspanzije para se kondenzuje u kondenzatoru. Deo kondenzata se može koristiti u rashladnim tornjevima postrojenja, dok se veći deo pumpom vraća u podzemno ležište radi skladištenja i održavanja pritiska u ležištu.

Za proizvodnju električne energije iz geotermalnih izvora bogatih vrelom vodom koriste se postrojenja sa jednostrukim ili dvostrukim isparivanjem koja koriste jako toplu vodu ($>180^{\circ}\text{C}$). Vreli geotermalni fluid isparava u jednom ili dva isparivača (na jednom ili dva nivoa pritiska, respektivno) i stvorena para ekspanduje u jednoj ili dvema turbinama. Nakon ekspanzije para se kondenzuje, a kondenzat se pumpom vraća u ležište.



- TB-Turbina
- GN-Generator
- CT-rashladnji toranj
- SP-separator
- hps-Para visokog pritiska
- lps- Para niskog pritiska
- PW-Proizvodna bušotina
- IW-Utisna bušotina
- WSR-Izvor vlažne pare

Slika 6.2. Geotermalna elektrana sa dvostrukim isparavanjem



- TB-Turbina
- GN-Generator
- CN-Kondenzator
- CT-Rashladnji toranj
- SP-Separator
- hps-Para visokog pritiska
- lps- Para niskog pritiska
- PW-Proizvodna bušotina
- IW-Utisna bušotina
- WSR-Izvor vlažne pare

Slika 6.3. Geotermalna elektrana sa binarnim ciklusom

Za razliku od geotermalnih postrojenja koji koriste suhu paru i isparavanje, kod binarnih postrojenja geotermalni fluid ne dolazi u kontakt sa turbinom ili drugim elementima postrojenja izuzev razmenjivača toplote. Ova relativno nova tehnologija je tako učinila mogućom eksploataciju brojnih geotermalnih izvora sa nižim parametrima fluida i masenim protocima pomoću binarnih sistema manjeg kapaciteta i izborom pogodnog radnog fluida. Binarni sistemi su instalirani u značajnom broju u poslednjih 30 godina, jer binarna postrojenja pretvaraju entalpiju srednje visoke vrednosti geotermalnih izvora efikasnije u električnu energiju od drugih tehnologija što znatno proširuje spektar lokacija pogodnih za proizvodnju geotermalne snage. To dovodi do izvodljive i ekonomski atraktivne decentralizovane geotermalne proizvodnje u mnogim udaljenim i manje razvijenim regionima u svetu gde finansijske inicijative promovišu energetske tehnologije uz malu emisiju ugljendioksida.

Binarna postrojenja pretvaraju izvore srednje i niske temperature u električnu energiju efikasnije od drugih tehnologija zasnivajući svoj princip rada na razmeni energije između dva različita fluida od kojih jedan potiče iz geotermalnog izvora. U najvećem broju binarnih postrojenja toplotni razmenjivač vrši prenos toplote iz proizvodnog toplog geotermalnog (primarnog) fluida u primarnom kolu ka radnom (sekundarnom) fluidu relativno niske tačke ključanja u sekundarnom kolu. Radni fluid isparava i njegova para ekspanduje u turbini stvarajući korisnu mehaničku energiju koja pokreće električni generator. Izlazna para iz turbine se kondenzuje u kondenzatoru sa vodenim hlađenjem ili vazdušnom hladnjaku i pomoću napojne pumpe vraća u isparivač. Ohlađeni geotermalni fluid se može razložiti ili ponovo ubrizgati u ležište bez isparavanja. Unapređenje toplotne efikasnosti pretvaranja energije je moguće kod binarnih postrojenja izborom pogodnog radnog fluida na bazi smanjenja temperaturne razlike između primarnog i sekundarnog fluida.

Geotermalne elektrane koje operišu u binarnim ciklusima su najbliže po termodinamičkom principu termoelektranama na fosilna goriva ili nuklearnim elektranama kod kojih radni fluid izvodi stvarni zatvoreni ciklus. Binarni ciklusi, često opisani kao ciklusi "rashladnih uređaja koji rade povratno", obično se primenjuju za niskotemperaturne i srednjetemperaturne geotermalne fluide (generalno od 70°C do 170°C) koji potiču iz hidrotermalnih izvora i izvora poboljšanih sistema za geotermalnu energiju (*Enhanced Geothermal Systems* – EGS). Druga praktična osobina geotermalnih postrojenja bazirana na ovom ciklusu je da ona omogućavaju korišćenje geotermalnog fluida koji ima visoku koncentraciju rastvorenih hemijskih materija koje mogu da stvore zaprljanje ako se koriste u konvencionalnim postrojenjima sa isparavanjem [3]. Pošto je veliki deo svetskog geotermalnog potencijala u opsegu temperatura između 100°C i 200°C, binarna postrojenja će u budućnosti igrati sve važniju ulogu kod geotermalnih elektrana.

Na osnovu karakteristika radnog fluida, postoje dva tipa binarnih ciklusa koja su dostupna na tržištu: Organski Rankinov (*Rankine*) Ciklus (ORC) i Kalina ciklus (KLN). Prvi prototip ORC ciklusa je bio razvijen 1961. od strane solarnih inženjera Harija Zvi Tabora (*Harry Zvi Tabor*) i Lusijena Bronickog (*Lucien Bronicki*). Organski Rankinov ciklus je zatvoren termodinamički ciklus koji koristi organski jednodokomponentni fluid visoke molekulske mase sa nižom tačkom ključanja od vode (halogene ugljovodonike, toluen, propan, izobutan, pentan, izopentan, amonijak).

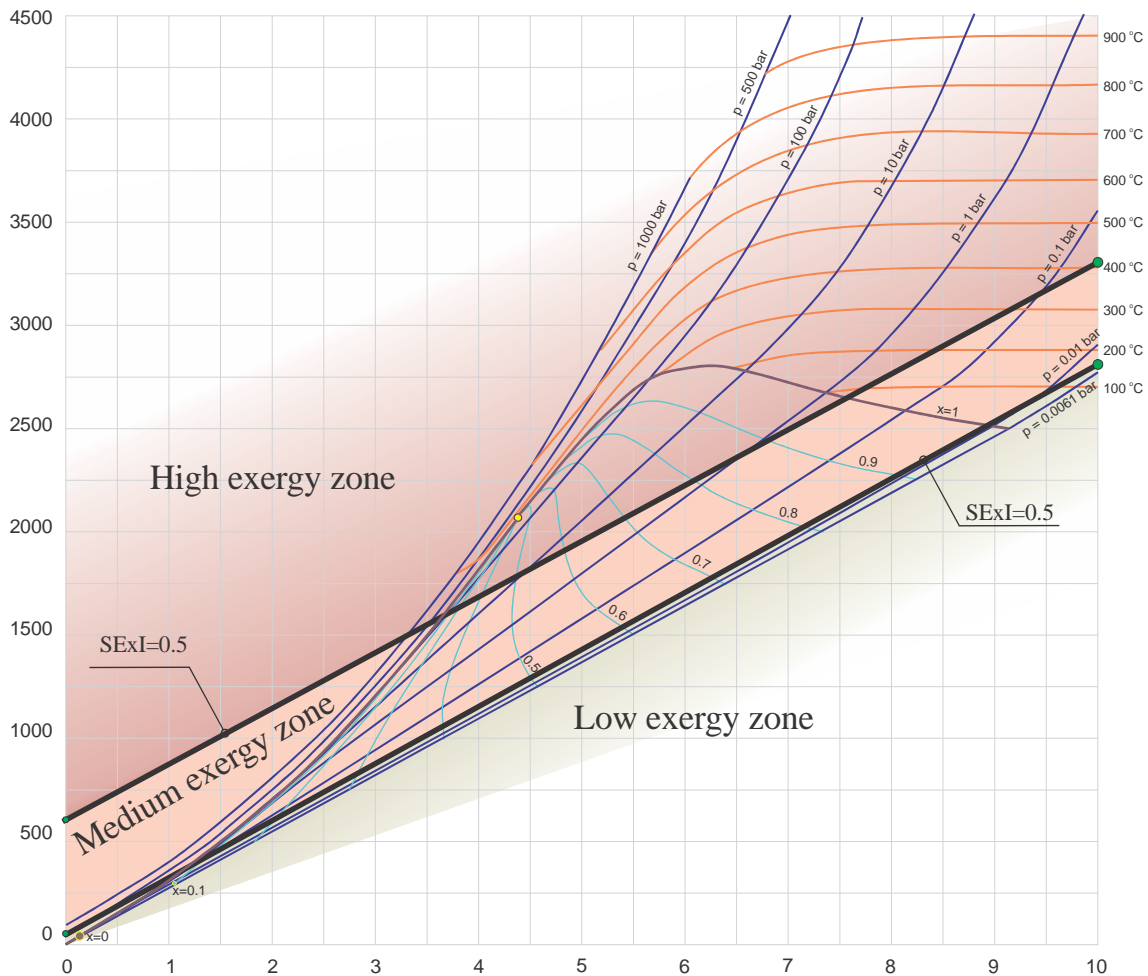
Kalina ciklus je izmislio ruski inženjer Aleksandar Kalina (*Alexander Kalina*) i prvi put ga demonstrirao 1967. u Paratunki, blizu Petropavlovsk na ruskom ostrvu Kamčatka. U pitanju je bila prva binarna geotermalna elektrana koja je sa snagom od 670 kW opsluživala malo selo i nekoliko farmi kako s električnom energijom, tako i toplotom za potrebe staklenika. Radila je uspešno niz godina, dokazujući koncept binarnih postrojenja kakva su danas u upotrebi. Ciklus koristi dvokomponentni radni fluid (u najvećem broju primera smešu amonijak – voda) čiji odnos varira u različitim delovima sistema. Na taj način se menja tačka ključanja (ujedno i temperatura kondenzacije) stvarajući temperaturu promenljivom veličinom, umesto jedne temperature u tački pincha kod ORC ciklusa. Tako Kalina ciklus pruža veće vrednosti za efikasnost unutar određenih opsega temperature i zbog toga može imati prednost u korišćenju na temperaturama ispod 130°C do 140°C. S druge strane, smeša dve supstance sa različitim odnosom mešanja unutar tokova radnog fluida je jedino moguća sa skupljom tehnologijom i to je jedan od razloga zašto je trenutno samo jedan Kalina ciklus u radu u sklopu geotermalnog postrojenja (postrojenje snage 2 MW u Husavíku na Islandu), dok je nekoliko u fazi izgradnje.

6.2. Upotreba koncepta eksergije u analizi geotermalnih postrojenja

Termodinamička analiza i optimizacija geotermalnih sistema, zasnovana na konceptu eksergije, može se podeliti u tri grupe:

- Klasifikacija kvaliteta geotermalnih izvora pomoću eksergije;
- Proračun eksergije geotermalnih polja;
- Osnovna analiza i optimizacija termodinamičkih parametara u geotermalnim postrojenjima.

Klasifikacija kvaliteta geotermalnih izvora postala je važna tema od početka geotermalnih istraživanja 60-ih i 70-ih godina prošlog veka. Neki od tih pristupa određivanju su se zadržali u upotrebi do danas. Najčešća podela je na osnovu temperature, pošto je to parametar koji se lako meri i razume. Geotermalni izvori su podeljeni na tri, ponekad i dve temperaturne grupe ([slika 6.4](#)):



Slika 6.4. Zone eksergije u Molijerovom h-s dijagramu [4]

Metodu klasifikacije geotermalnih izvora na bazi koncepta eksergije predložio je Li (Lee) [5], [6] 1996. i 2001. godine. Ovaj autor je uočio nekonsistentnost i zabunu u pristupima preko temperature/entalpije i predložio novi sistem klasifikacije u vidu indeksa specifične eksergije ($SExI$). Indeks specifične eksergije predstavlja odnos specifičnih eksergija datog geotermalnog sistema u zasićenoj pari na pritisku 9 MPa po formuli (6.1):

$$SExI = \frac{h_{\text{brine}} - 27316s_{\text{brine}}}{1192} \quad (6.1)$$

Crtanjem pravih linija za $SExI=0.5$ i $SExI=00.5$ u Molijerovom $h-s$ dijagramu, Li je definisao način po kome se vrši podela geotermalnih izvora u tri zone (slika 6.4):

- Zona niske eksergije ili niskog kvaliteta, $SExI < 00.5$;
- Zona srednje eksergije ili srednjeg kvaliteta, $00.5 < SExI < 0.5$;
- Zona visoke eksergije ili visokog kvaliteta, $SExI > 0.5$.

Kasnije su različiti autori koristili $SExI$ indeks za potrebe podele drugih geotermalnih polja. Kihano (*Quijano*) [7] je 2000. godine izračunao vrednosti $SExI$ indeksa u uslovima bušotine, koristeći prosečne vrednosti entalpije i entropije u geotermalnom polju. Ovi proračuni su korišćeni za identifikaciju geotermalnih polja Auaćapan (*Ahuachapán, El Salvador*) i Berlin. Pored vrednosti $SExI$ indeksa od 0.5 i 0.005, Kihano je uveo vrednost $SExI$ od 0.02 i podelio srednju eksergijsku zonu na dva dela: srednju visoku zonu eksergije iznad vrednosti $SExI=0.2$ i srednju nisku zonu eksergije ispod vrednosti $SExI=0.2$. Baba i saradnici [8] su primenili ovaj indeks na geotermalno polje Balčova (*Balçova*), tako da se, prema izračunatoj vrednosti $SExI=0.07$, Balčova polje smatra geotermalnim izvorom srednjeg kvaliteta. Na osnovu termodinamičkih parametara polja Balčova, Hepbašli (*Hepbaşli*) [9] je zaključio da je "klasifikacija prema $SExI$ indeksu puno značajnija, pošto ne postoji opšte slaganje oko merodavnih opsega temperature za klasifikaciju geotermalnih izvora prema temperaturi" [10], [11], [12], [13].

Upotreba koncepta eksergije u termodinamičkoj analizi geotermalnih postrojenja počela je 70-ih godina prošlog veka i otada postala proverena i dokazana metodologija za optimizaciju radnih uslova i neefikasnih komponenti u sistemu. Bodvarson i Egers (*Bodvarsson and Eggers*) [14] su 1972. godine prvi uveli eksergetsku efikasnost geotermalnog postrojenja upoređivanjem performansi ciklusa sa jednostrukim i dvostrukim isparavanjem sa temperaturom vode iz rezervoara od 250°C i temperaturom hladnjaka 40°C. Kasnije je u radu Bruk (*Brook*) i saradnika [15] takođe primenjen koncept eksergije na geotermalne sisteme u kojima je temperatura viša od 150°C. Teoretsko razmatranje raspoloživog rada i njegova upotreba u geotermalnom postrojenju je prikazana u radu Kestina (*Kestin*) [16] iz 1978. godine.

Di Pipo i Marsil (*DiPippo and Marcille*) [17] su 1984. pokazali prednost proračuna efikasnosti na bazi Drugog zakona termodinamike i koncepta eksergije. Di Pipo je koristio ovu tehniku da bi odgovorio na članke koji proklamuju dramatičnu prednost u efikasnosti Kalina ciklusa nad ORC ciklusom [18]. Analiza je demonstrirala da nije postignuta razlika od 15 % – 50 % više snage na izlazu za isti iznos ulazne toplote u korist Kalina ciklusa. Pri simulaciji sa istim uslovima okoline i rashladnih sistema, izračunata razlika u performansi je oko 3 % u korist Kalina ciklusa. U radu Di Pipoa [18] je takođe zaključeno da je ORC tehnologija više upotrebljavana, pošto je postrojenje Husavik (*Húsavík*) jedino do danas komercijalno postrojenje koje radi u Kalina ciklusu. U istom radu izračunata je ukupna efikasnost postrojenja (Prvi zakon toplotne efikasnosti i Drugi zakon efikasnosti) za nekoliko geotermalnih binarnih

postrojenja na različitim lokacijama i sa različitom proizvodnjom ciklusa [\[19\]](#), [\[20\]](#), [\[21\]](#), [\[22\]](#), [\[23\]](#), [\[24\]](#), [\[25\]](#), [\[26\]](#), [\[27\]](#).

6.3. Analiza geotermalnog postrojenja na lokaciji Velika Ciglena

Geotermalno binarno postrojenje Velika Ciglena (175°C) spada u red srednjetemperaturnih geotermalnih izvora u Republici Hrvatskoj pomoću kojih je moguće proizvesti električnu energiju, zajedno uz Lunjkovec (125°C), Fernandinovac (125°C), Babinu Gredu (125°C) i Rečicu (120°C). Nalazi se u hrvatskom delu Panonskog basena, tačnije u području Bjelovarske depresije koje poseduje povišeni geotermalni tok.

Karakteristike ovog hidrotermalnog izvora su visoka temperatura vode i visoka propusna moć polja. Povišeni geotermalni gradijent ležišta Velika Ciglena uočen je već pri prvom nabušavanju ležišta sa maksimalnom izmerenom temperaturom 175°C i procenjuje se na $0.063\text{--}0.065^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

6.3.1. Fizički modeli binarnih postrojenja u geotermalnom polju Velika Ciglena

Kompjuterski podržana analiza geotermalnih postrojenja pogodnih za proizvodnju električne energije u polju Velika Ciglena, počinje sa procesom izgradnje modela. Proces izgradnje modela baziran je na preporukama iz rada Guzovića i saradnika [\[28\]](#) gde su autori koristili tehnologiju baziranu na binarnim ciklusima za iskorišćenje geotermalnog potencijala iz istog polja. Pri tome su iz pomenutog rada preuzete osnovne konfiguracije ciklusa, vrsta i broj procesnih jedinica, kao i drugi važni podaci kao što su izentropske efikasnosti pumpi i turbina i minimalna dozvoljena temperaturna razlika u razmenjivačima toplote. Ipak, u odnosu na taj rad istraživanje je znatno modifikovano uključivanjem dve nove procesne jedinice u oba postrojenja: visokopritisne donje pumpe (HPP) u ulaznom toku geotermalne vode i električnog ventilatora (FN) u sklopu sistema za vazdušno hlađenje. Uključivanjem prvog elementa, HPP, osigurava se konstantan maseni protok geotermalne vode u postrojenjima i sprečava isparavanje i taloženje unutar cevi. Na taj način oba postrojenja rade pod istim uslovima i sa zanemarljivim padovima pritiska i temperature u cevovodnim sistemima. Drugi element, FN, je prvenstveno uveden da bi se zatvorio materijalni i energetski bilans rashladnog sistema pretpostavljajući da ventilator proizvodi dovoljno vazdušnog toka i prenosa toplote kroz prihvatljivo dimenzionisan vazdušni kondenzator (AC).

U predloženim binarnim postrojenjima s ORC i Kalina ciklusom geotermalni fluid predaje toplotu radnom fluidu hlađenjem sa 175°C na 69°C. Nakon toga se geotermalna voda može koristiti za direktnu upotrebu (grejanje zgrada, staklenika, bazena itd.). Radni fluid kod ORC ciklusa je lako isparljivi izopentan, a kod Kalina ciklusa smeša amonijaka i vode čiji se sastav menja tokom ciklusa. Predložena binarna postrojenja s ORC i Kalina ciklusom prema konfiguraciji i radnim parametrima ciklusa (maksimalni pritisak i temperatura, sastav smeše itd.) su odabrana tako da s jedne strane su veoma bliska tipskim izvedenim postrojenjima vodećih svetskih proizvođača, a s druge strane optimalno iskorišćavaju toplotu geotermalnog fluida. U oba se slučaja zbog nemogućnosti hlađenja vodom na lokaciji Velika Ciglena koriste vazdušni kondenzatori.

Binarno postrojenje bazirano na ORC tehnologiji, ilustrovano na [slici 6.5a](#), sastoji se od predgrejača (PH), isparivača (EV), turbine s generatorom (TB, GN), napojne pumpe (FP), pumpe visokog pritiska (HPP), ventilatora (FN) i vazdušnog kondenzatora (AC). Geotermalni fluid (stanje 6) se iz proizvodne bušotine (PW) pumpom visokog pritiska šalje najpre do isparivača (stanje 7), a potom i predgrejača gde predaje svoju toplotu (stanje 8). Ova dovedena toplota u isparivač je potrebna latentna toplota tako da je na izlasku iz isparivača para izopentana upravo suvozasićena (stanje 1), dok se u predgrejaču kondenzat izopentana njome zagreva do stanja vrele tečnosti (stanje 5). Geotermalni fluid napušta postrojenje tako što tako ohlađen iz predgrejača (stanje 9) odlazi u utisnu bušotinu (IW). Suvozasićena para (stanje 1) ekspanduje u turbini obavljajući korisni mehanički rad koji se koristi za pogon električnog generatora. Kao što će se videti iz termodinamičkog proračuna, ekspanzija u turbini se celo vreme odvija u pregrejanom području, pa nema problema s vlažnom parom. Nakon ekspanzije u turbini para (stanje 2) se odvodi u vazdušni kondenzator na hlađenje. Spoljni vazduh (stanje 10) se uvodi u kondenzator preko ventilatora koji je na nešto nižem pritisku od atmosferskog. Nastali kondenzat (stanje 3) se napojnom pumpom vraća u predgrejač (stanje 4), a potom i u isparivač (stanje 5).

Binarno postrojenje s Kalina ciklusom se sastoji, kako je prikazano na [slici 6.6a](#) od: isparivača (EV), separatora (SP), turbine s generatorom (TB, GN), mešača (MX), visokotemperaturnog (HTR) i niskotemperaturnog rekuperatora (LTR), prigušnog ventila (TR), pumpe visokog pritiska (HPP), napojne pumpe (FP), ventilatora (FN) i vazdušnog kondenzatora (AC). Geotermalni fluid (stanje 13) se, kao i kod prethodnog ciklusa, pumpom visokog pritiska dovodi iz proizvodne bušotine (PW) u isparivač (stanje 14) gde predaje svoju toplotu potrebnu za isparavanje osnovne smeše amonijak – voda (88.5% NH₃). Ohlađeni geotermalni fluid (stanje

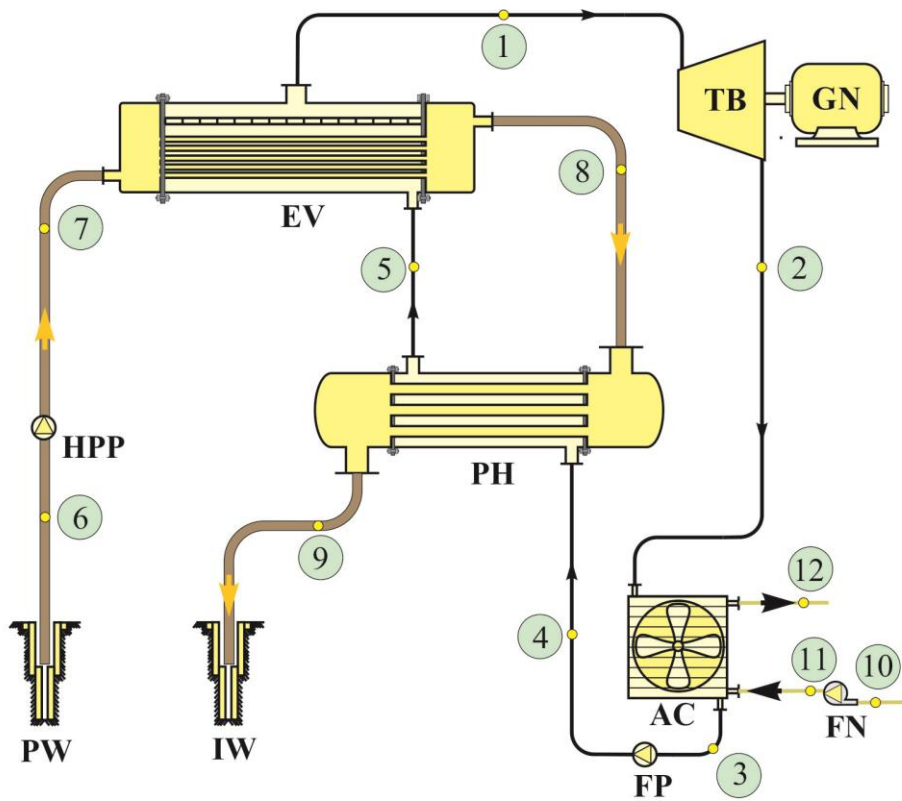
15) se iz isparivača odvodi u utisnu bušotinu (IW), dok se nastala vlažna para (stanje 2) odvodi u separator gde se razdvaja na suvozasićenu paru (stanje 3) smeše amonijak – voda bogate amonijakom (96.4% NH_3) i zasićenu tečnost (stanje 4) smeše amonijak – voda siromašne amonijakom (49.98% NH_3). Suvozasićena para bogata amonijakom potom vrši ekspanziju u turbini obavljajući korisni mehanički rad koji se koristi za pogon električnog generatora. Ekspanzija u turbini se celo vreme odvija u vlažnom području, pa se javlja problem vlažne pare koji se direktno ogled u smanjenju izentropske iskoristivosti turbine. Zasićena tečnost smeše siromašne amonijakom nastala u separatoru (stanje 4) se odvodi u visokotemperaturni rekuperator gde predaje deo svoje toplote za predgrejavanje kondenzata osnovne smeše amonijak – voda, te nakon prigušivanja na prigušnom ventilu na pritisak koji vlada iza turbine se ubacuje u mešač (stanje 7).

U mešač se takođe uvodi i vlažna para smeše bogata amonijakom (stanje 5) koja je obavila ekspanziju u turbini, te se ovde mešanjem s tečnošću smeše siromašne amonijakom dobija vlažna para osnovne smeše amonijak – voda (stanje 8). Kako vlažna para na izlazu iz mešača ima još dosta visok nivo energije, tj. entalpiju, pre odvođenja u vazdušni kondenzator na kondenzaciju prolazi kroz niskotemperaturni rekuperator gde predaje deo svoje toplote za predgrejavanje kondenzata osnovne smeše amonijak – voda. Na taj se način istovremeno smanjuje i toplotno opterećenje kondenzatora. Nastali kondenzat osnovne smeše amonijak – voda iz vazdušnog kondenzatora (stanje 10) se napojnom pumpom preko niskotemperaturnog i visokotemperaturnog rekuperatora vraća u isparivač.

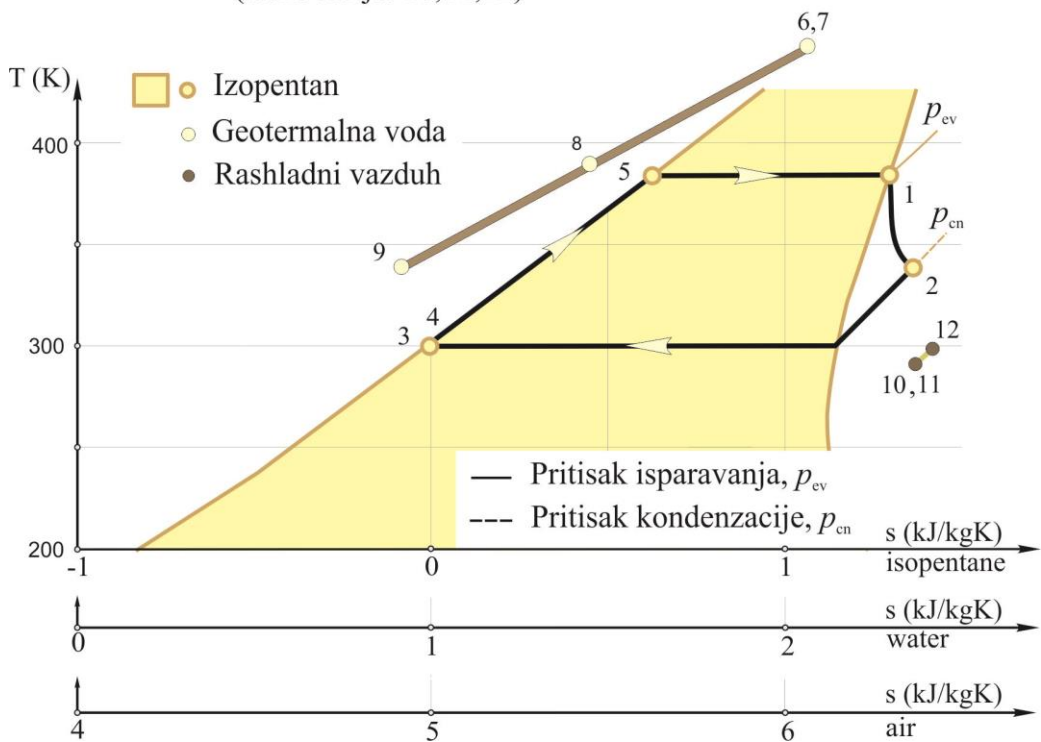
6.3.2. Matematički modeli binarnih postrojenja u geotermalnom polju Velika

Ciglena

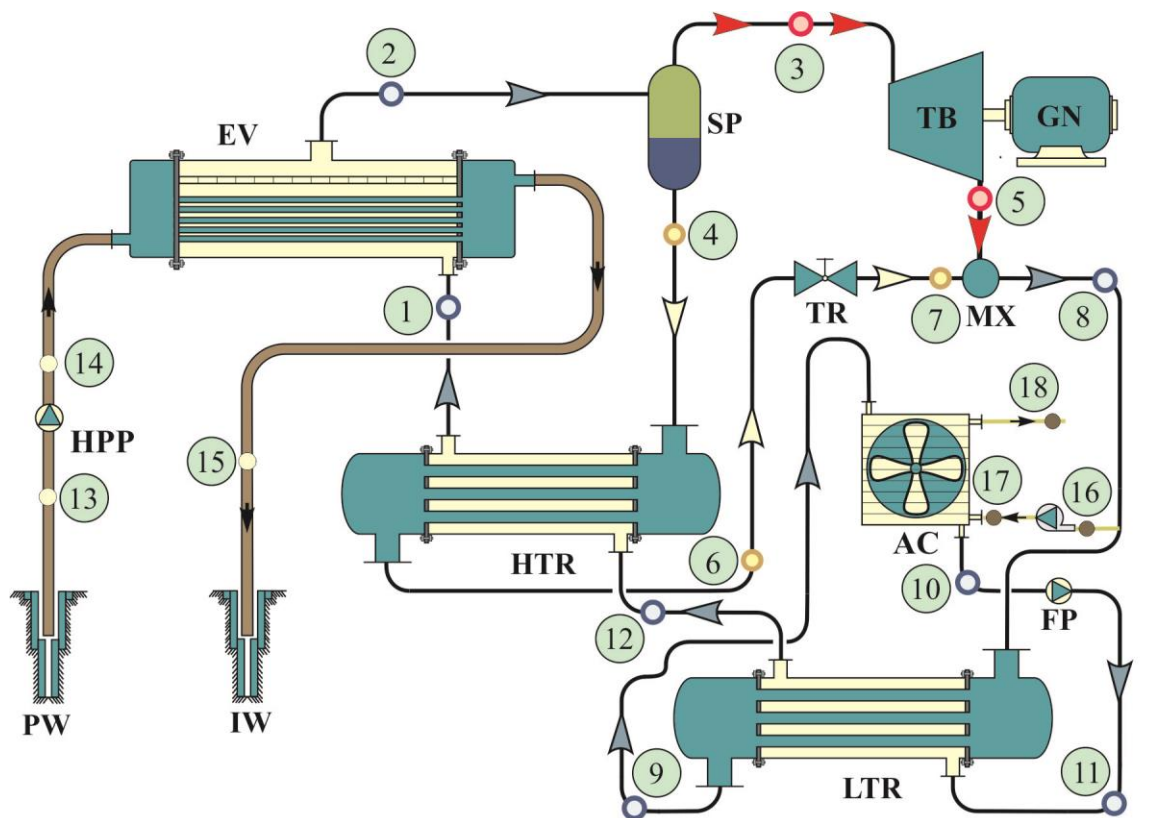
Na bazi fizičkog modela i usvojenih pretpostavki, matematički modeli procesnih jedinica se razvijaju primenama kontrolne zapremine (CV) za otvorene, stacionarne termodinamičke sistema i pomoću jednačina masenog i energetskog bilansa. Pre toga, dijagrami toka (PFD) se transformišu u blok dijagrame toka (BFD), [slika 6.7a](#) i [slika 6.7b](#), gde se skice procesnih jedinica zamenjuju kontrolnim zapreminama. Blok dijagrami toka omogućavaju lakšu analizu inputa/outputa u kontrolnoj zapremini, prepoznavanje tačaka stanja u postrojenju i dekompoziciju šeme postrojenja. Matematički modeli se razvijaju zanemarivanjem promena u kinetičkoj i potencijalnoj energiji tokova i pretpostavljanjem adijabatskih procesa u svim kontrolnim zapreminama. Jednačine bilansa energije su prikazane u vidu jednačina bilansa entalpije ([6.3](#)) i podeljene su u odnosu na tip procesa unutar jedinice u dve grupe: jednačine za jedinice razmenjivača toplote ([6.4](#)) i za jedinice povezane sa proizvodnjom snage ([6.5](#)).



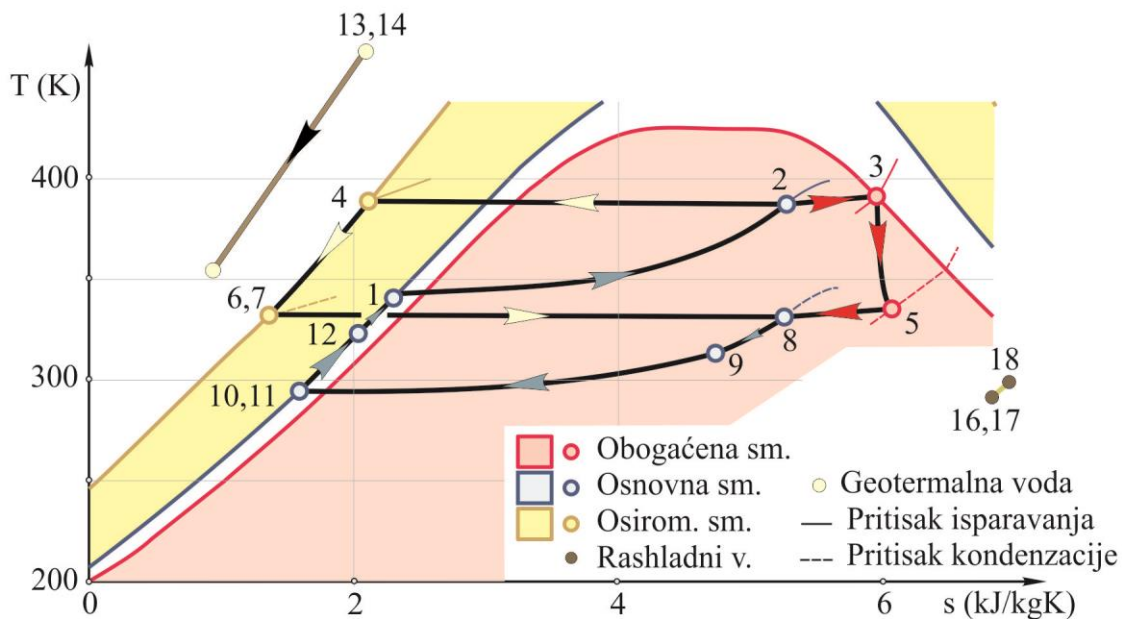
Geotermalna voda (tačke stanja: 6,7,8,9)
 Izopentan (tačke stanja: 1,2,3,4,5)
 Cooling air (tačke stanja: 10,11,12)



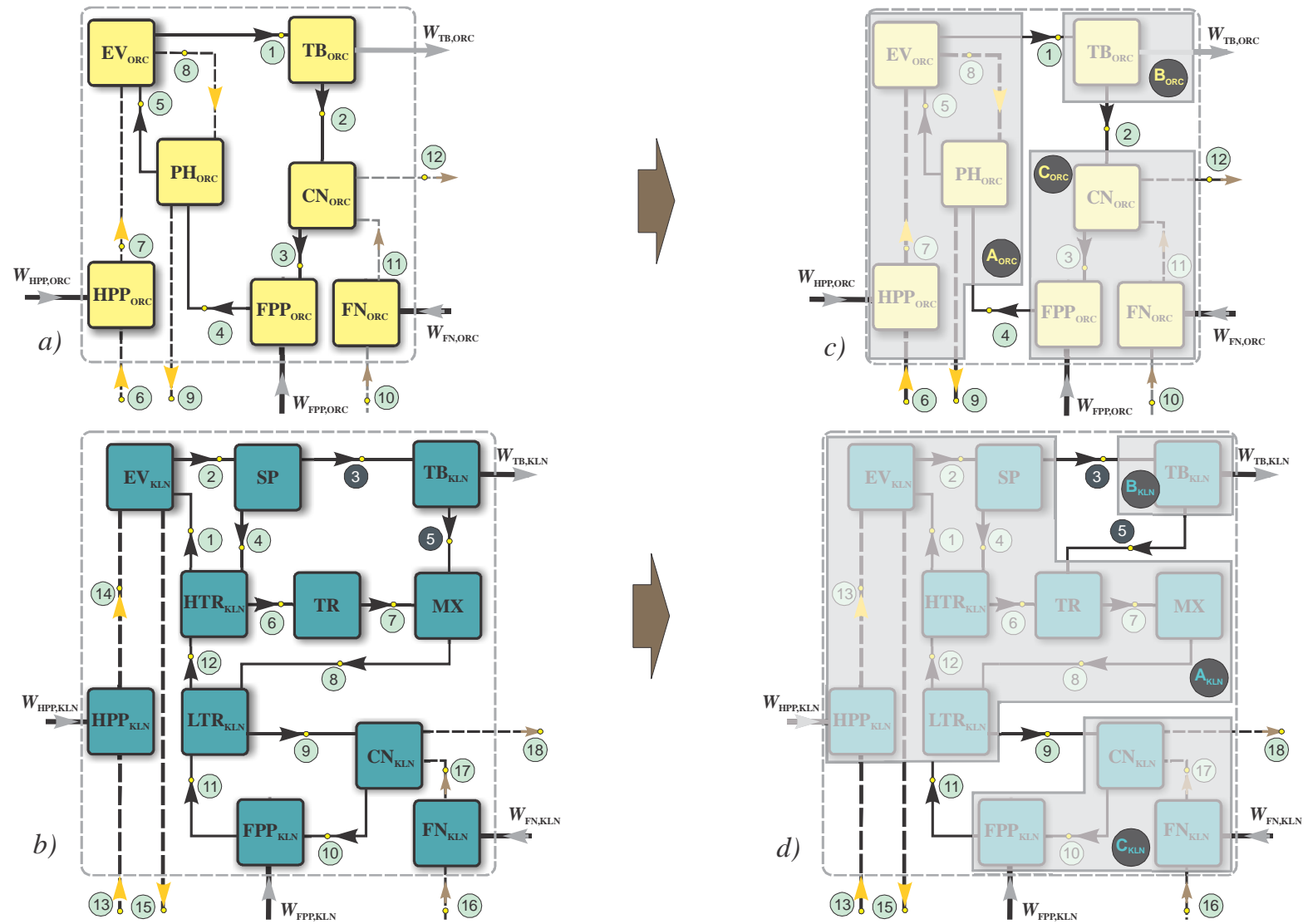
Slika 6.5. a) Fizički model binarne geotermalne elektrane Velika Ciglena u ORC ciklusu b) T-s dijagram ORC ciklusa



- Osnovna smeša, 88.5 % NH₃ (tačke stanja: 1,2,8,9,10,11,12)
- Obogaćena smeša, 96.4 % NH₃ (tačke stanja: 3,5)
- Osiromašena smeša, 88.5 % NH₃ (tačke stanja: 4,6,7)
- Geothermal water (tačke stanja: 13,14,15)
- Cooling air (tačke stanja: 16,17,18)



Slika 6.6. a) Fizički model binarne geotermalne elektrane Velika Ciglena u Kalina ciklusu b) T-s dijagram Kalina ciklusa.



Slika 6.7. Blok dijagrami toka ORC i KLN postrojenja

U slučaju jedinica koje proizvode ili koriste snagu, rad u jedinici vremena W uključuje promenljive izentropske efikasnost (6.6) i tako su matematički modeli ovih jedinica opisani dodatnom jednačinom bilansa entropije za adijabatski stacionarni proces (6.7).

$$\sum_{j \in \text{IN}(i)} G_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}(i)} G_{j,\text{out}} = 0 \quad (6.2)$$

– za $j = \text{EV, PH, HTR, LTR, AC, SP, TR, MX, AC, TB, HPP, FP, FN}$;

$i \in \{\text{ORC, KLN}\}$.

$$\sum_{j \in \text{IN}(i)} G_{j,\text{in}} h_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}(i)} G_{j,\text{out}} h_{j,\text{out}} - W_i - Q_i = 0 \quad (6.3)$$

gde je:

– za $j = \text{EV, PH, HTR, LTR, AC, SP, TR, MX, AC}$;

$$\sum_{j \in \text{IN}(i)} G_{j,\text{in}} h_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}(i)} G_{j,\text{out}} h_{j,\text{out}} = 0 \quad (6.4)$$

$i \in \{\text{ORC, KLN}\}$.

– za $j = \text{TB, HPP, FP, FN}$;

$$\sum_{j \in \text{IN}(i)} G_{j,\text{in}} h_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}(i)} G_{j,\text{out}} h_{j,\text{out}} \pm W_i = 0 \quad (6.5)$$

$i \in \{\text{ORC, KLN}\}$.

za $j = \text{TB}$;

$$h_{j,\text{in}} - h_{j,\text{out}} - \eta_{\text{is}} (h_{j,\text{in}} - h_{j,\text{out(s)}}) = 0 \quad (6.6a)$$

za $j = \text{HPP, FP, FN}$;

$$h_{j,\text{in}} - h_{j,\text{out}} - (1/\eta_{\text{is}}) \cdot (h_{j,\text{out(s)}} - h_{j,\text{in}}) = 0 \quad (6.6b)$$

$$G_{j,\text{in}} s_{j,\text{in}} - G_{j,\text{out}} s_{j,\text{out}} \pm S_{\text{gen}} = 0 \quad (6.7)$$

Kao što se vidi iz jednačina (6.2), (6.3), (6.4), (6.5), (6.6), (6.7), promenljive u bilansnim jednačinama su maseni protoci i intenzivne termodinamičke osobine materija koje ulaze ili napuštaju kontrolnu zapreminu. Relacije između termodinamičkih veličina stvaraju dodatno ograničenje za termodinamičko ponašanje sistema. To znači da ako je stanje sistema definisano sa dve osnovne termodinamičke veličine – pritiskom i temperaturom, bilo koja druga termodinamička veličina u tom stanju, uključujući i one izvedene – specifičnu entalpiju i specifičnu entropiju, može se izračunati pomoću odgovarajuće jednačine stanja (EOS). Ovaj zaključak je takođe validan za druge kombinacije veličina (npr. ako je stanje fiksirano temperaturom i specifičnom entalpijom, druge

veliĉine kao što su pritisak, gustina, specifiĉna toplota se mogu izraĉunati). U isto vreme, materija koja ĉini tok (ĉisti fluid ili smeša ĉistih fluida) mora biti odreĉena, pošto relacije izmeĉu veliĉina stanja jako zavise od vrste supstance i njegovog sastava u toku.

U tehnici *flowsheeting*-a proraĉuni termodinamiĉkih veliĉina se obiĉno izvode pomoću jednog od eksternih paketa termodinamiĉkih veliĉina (paket NIST REFPROP v8.0, program pisan u Fortranu koji sadrži jednaĉine stanja za širok spektar ĉistih fluida i smeša). U ovom spreadsheet softveru, Refprop se povezuje sa Microsoft Excel®om pomoću naredbe **dll** koja omogućava izraĉunavanje veliĉina na isti naĉin kao bilo koje druge funkcije biblioteka.

Konaĉno, kao deo procesa modelovanja, sistemi postrojenja se rastavljaju na tri meĉusobno povezana podsistema u skladu sa tehnologijama odrŹanja energije i procesa unutar njih, [slika 6.7c](#) i [slika 6.7d](#). Prvi podsistem – **A** je sistem razmenjivaĉa toplote koji inkorporira operacije razmene toplote izmeĉu geotermalne vode i radnih fluida. Kod KLN postrojenja, ovaj podsistem takoĉe ukljuĉuje procese separacije, mešanja i redukcije. Drugi podsistem – **B** je podsistem u kome se energija odrŹava, dok je treći podsistem – **C** podsistem za uklanjanje toplote. Postoje dva razloga za takvu dekompoziciju postrojenja. Prvo, podsistemi ispunjavaju iste tehnološke operacije u oba postrojenja i zato su njihove termodinamiĉke performanse uporedljivije od performansi pojedinaĉnih procesnih jedinica. Ovo je naroĉito vidljivo u sluĉaju podsistema **A** usled razlika u broju i vrsti procesnih jedinica u ORC i KLN postrojenjima. Drugi razlog se odnosi na validaciju softvera gde se podsistemi **A** i **C** tretiraju kao razdvojene jednaĉine koje se mogu rešavati nezavisno. Rešenje iz ovih razdvojenih sistema se koriste kao kontrolne vrednosti ĉitavog procesa simulacije.

6.4. DOF analiza binarnih postrojenja u geotermalnom polju Velika Ciglena

Prevoĉenje matematiĉkog modela u numerički model uz ispitivanje njegove matematiĉke konzistentnosti je omogućeno DOF analizom geotermalnog sistema za rad u oba ciklusa koja se vrši posebno za svaki procesnu jedinicu sistema. Osnovne smernice za proraĉun broja promenljivih i relacija subsistema su sledeće:

- Generalno postoji jedan nezavistan maseni bilans u sluĉaju ORC ciklusa, a raĉunajući specifikacije sastava, dva u sluĉaju KLN ciklusa;
- Postoji jedan nezavistan energetski bilans, osim jedinica kod kojih je temperaturna razlika u taĉki pincha specifiĉno definisana;

- Kod jedinica koje proizvode ili vrše rad (TB, FP, HPP, FN) koristi se izraz (6.6) kao dodatna relacija za snagu uzimajući u obzir izentropsku promenu stanja toka ovakvog tipa jedinice, tj. njenu izentropsku efikasnost koja predstavlja dodatnu promenljivu opreme;
- Kod svih razmenjivača toplote (PH, EV, AC, HTR, LTR) fluks razmenjene toplote je promenljiva u vezi s prenosom toplote, temperaturna razlika u tački pincha kao poseban parametar opreme, istovremeno izraz koji prikazuje razliku temperatura u tački pincha kao dodatna relacija; kod kondenzatora u oba ciklusa je postavljeno još jedno ograničenje putem definisanja vrednosti dozvoljene temperaturne razlike vazdušnih struja u njemu, dok je u slučaju isparivača KLN ciklusa definisana dozvoljena razlika temperatura u fazi podhlađivanja smeše, te stoga treba uračunati i ove promenljive kao parametre opreme pri analizi pomenutih jedinica.
- Temperaturni profil tokova u kondenzatoru ORC ciklusa i isparivača KLN ciklusa je takav da razlika temperatura u tački pincha ne odgovara razlici temperatura dva toka na jednom od krajeva razmenjivača, pa je neophodno odrediti ove dve temperature tokova unutar razmenjivača; pošto se kondenzator u ovom slučaju može podeliti u dve zone (hlađenja i kondenzacije) potrebno je postaviti dva nezavisna energetska bilansa i definisati razmenjenu toplotu u obe zone čiji zbir predstavlja ukupni fluks razmenjene toplote u kondenzatoru (na sličan način tretira se isparivač KLN ciklusa); pri popisu promenljivih uzimaju se dve nove promenljive u vezi s prenosom toplote (fluks razmenjene toplote u obe zone) povezanih s temperaturom tokova u tački pincha koje se nalaze iz bilansa.
- postoji 8 interkonektivnih tokova u slučaju ORC ciklusa, odnosno 14 u slučaju KLN ciklusa (12 dvokomponentnih i 2 jednokomponentna);
- u skladu sa pretpostavkom matematičkog modela, u nijednoj jedinici se ne javljaju gubici toplote, pa nema potrebe za pisanjem pomoćnih relacija koji ih definišu.

Pri vršenju analize stepena slobode usvojene su sledeće specifikacije:

- Kod ORC ciklusa, izopentan (radni fluid) na ulazu u turbinu je u stanju suvozasićene pare, dok je na izlazu iz kondenzatora u stanju ključale tečnosti što automatski daje relaciju koja povezuje temperaturu i pritisak datih stanja (za datu temperature isparavanja i kondenzacije moguće je direktno pronaći odgovarajuće pritiske zasićenja ili obrnuto).
- pritisci toplog ili hladnog toka na ulazu i izlazu iz svakog razmenjivača toplote (EV, AC, PH, HTR, LTR) su međusobno jednaki što čini specifikacije pritiska u ovim jedinicama;

Tabela 6.1. DOF analiza energetskih sistema u ORC i KLN ciklusu

Sistem (Ciklus)		ORC (Slika 6.5a)							KLN (Slika 6.6b)													
Komponenta		EV	TB	AC	Fp	HPP	PH	FN	Sistem	EV	TB	AC	Fp	HPP	HTR	LTR	TR	MX	SP	FN	Sis	
$N_{v,k}$		14	8	16	8	8	14	8		18	10	17	10	8	18	18	8	12	12	8		
$N_{v,sys,tot}, N_{v,sys,tot} = \sum N_{v,k}$									76													139
Nezavisne relacije	Bilans																					
	Materijalni	2	1	2	1	1	2	1		2	1	2	1	1	2	3	1	2	2	1	1	
	Energetski	1	1	2	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Pom. relacije	2	1	4	1	1	2	1		4	1	3	1	1	2	2					1	
	Broj specifikacija promenljivih																					
	Pritisak	2	-	2	-	-	2	-		2	-	2	-	-	3	2	-	2	2	-	-	
	Sastav	-	-	-	-	-	-	-		1	1	1	1	-	2	3	1	-	-	-	-	
	Temperatura	1	1	1	1	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Konstante	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
$N_{r,k}$		8	4	11	4	3	7	3		11	4	9	4	3	10	10	3	5	5	3		
$N_{r,sys,tot}, N_{r,sys,tot} = \sum N_{r,k}$									40													67
$N_{DOF,sys,tot}$									36													72
$N_{d,sys,tot} = N_{v,sys,tot} - N_{r,sys,tot}$									36													72
Suvišna ograničenja																						
$N_{rv,sys,tot} = \sum N_{ICS,NC} \cdot (NC+2) = 8(1+2)$									24	$= 12(2+2) + 2(1+2)$												54
Nezavisne relacije	Bilans																					
	Materijalni								1													2
	Energetski																					
	Broj specifikacija promenljivih																					
	Pritisak																					1
	Sastav																					1
Temperatura								2														
Konstante																						
$N_{rr,sp}$									3													4
$N_{rr,sys,tot}, N_{rr,sys,tot} = \sum N_{rr,sp}$									3													4
$N_{d,plant}, N_{d,plant} = N_{d,sys,tot} - N_{rv,sys,tot} + N_{rr,sys,tot}$									15													22

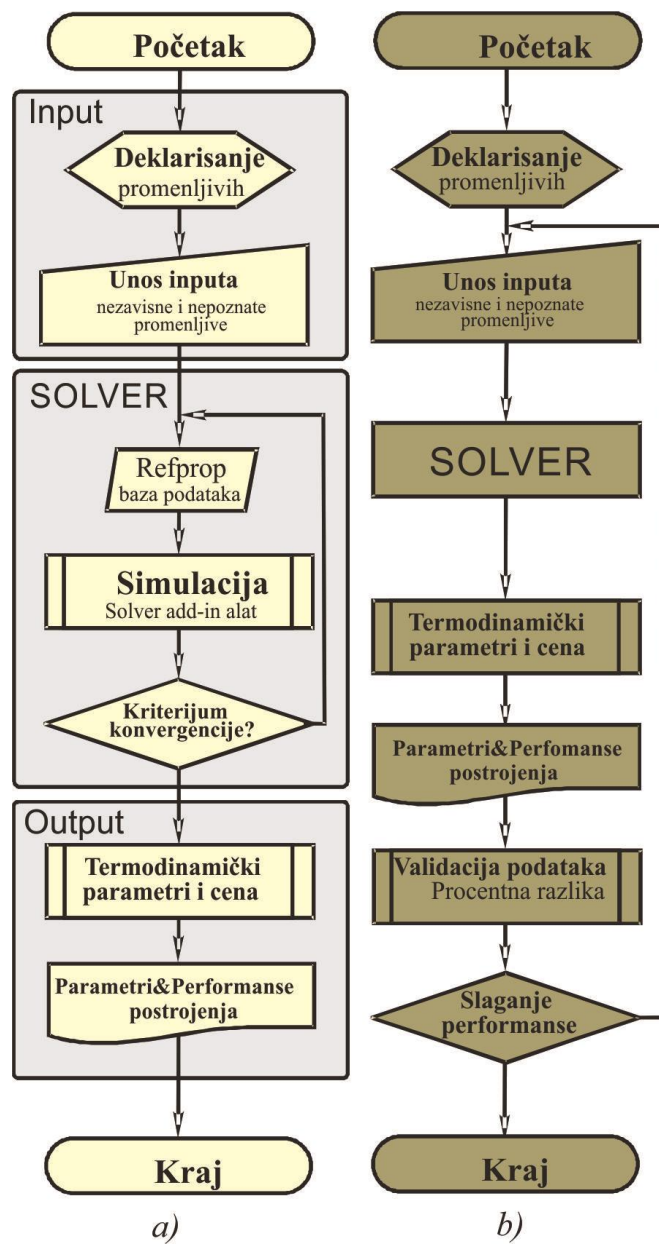
$N_{v,k}$	Broj promenljivih u komponenti k ,	$N_{d,sys,tot}$	Ukupan broj stepeni slobode u sistemu,
$N_{v,sys,tot}$	Ukupan broj promenljivih u sistemu,	$N_{r,sys,tot}$	Ukupan broj suvišnih promenljivih u međusobno povezanim tokovima,
$N_{r,k}$	Broj nezavisnih relacija u komponenti k ,	$N_{rr,sp}$	Broj suvišnih relacija istog tipa,
$N_{r,sys,tot}$	Ukupan broj nezavisnih relacija u sistemu,	$N_{rr,sys,tot}$	Ukupan broj suvišnih relacija u sistemu,
$N_{d,k}$	Broj stepeni slobode u komponenti k ,	$N_{d,plant}$	Ukupan broj stepeni slobode postrojenja

- specifikacija protoka i sastava tokova u pojedinačnim procesnim jedinicama je jasna iz samog opisa načina rada postrojenja u oba navedena ciklusa; na osnovu svih relacija jednakosti sastava u tokovima jedinica ukupni bilans i bilans amonijaka u separatoru i mešaču se svode na dve identične relacije, pa su oba bilansa u jednom od ovih jedinica suvišna na nivou analize sistema.

U [tabeli 6.1](#) prikazana je DOF analiza ispitivanih energetskih sistema.

6.5. Simulacioni softver

Glavna razlika između istraživanja u ovoj disertaciji i u radu [28] počinje u drugoj istraživačkoj fazi gde su numerički modeli i s njima povezani postupci usmerili istraživanje ka novoj vrsti kompjuterski podržane tehnike projektovanja. Sekvencijalno-modularna strategija korišćena u radu [28] omogućila je pojedinačno projektovanje i analizu bazičnog slučaja ovog postrojenja, ali je ograničila prostor za istraživanje. Postalo je očigledno da se dodatna analiza i moguća unapređenja performanse postrojenja ne mogu postići bez upotrebe specijalizovanih softverskih alata. Iz tog razloga, u ovoj disertaciji, proces projektovanja postrojenja i analiza su podržani sa dva ravnotežna spreadsheet simu-



Slika 6.8. Softverski dijagram toka a) struktura simulatora b) algoritam programa za verifikaciju i validaciju

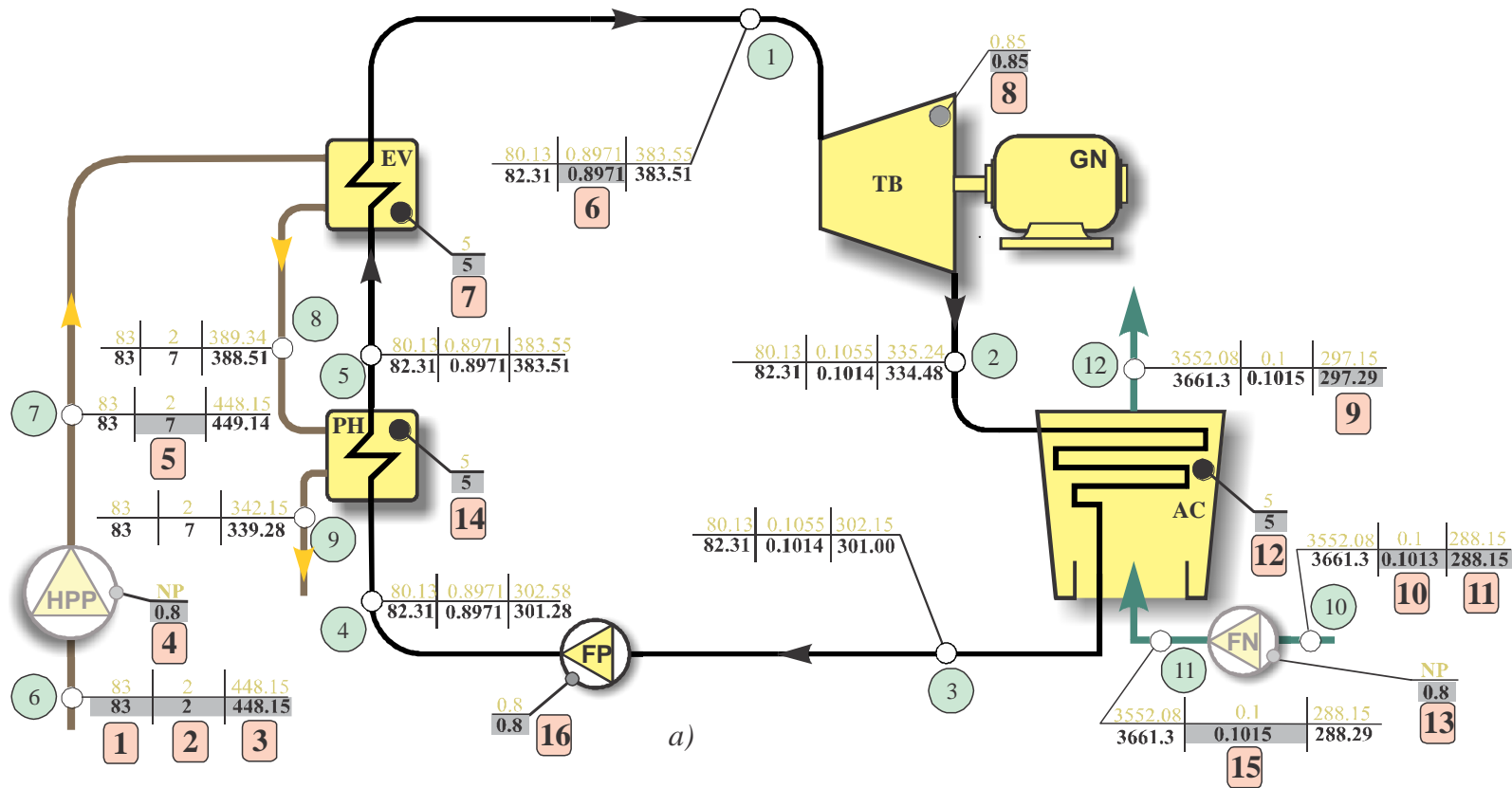
latora povezana sa fizičkim i matematičkim modelima ORC i KLN postrojenja.

Simulator postrojenja se bavi problemom *specifikacije (projektovanja)* gde umesto svih inputa, samo neki inputi i outputi ili prenosne informacije određuju preostale inpute i outpute. Tako su inputi i outputi predstavljeni radnim uslovima i parametrima opreme (veličina), dok se prenosni podaci odnose na minimalnu temperaturnu razliku tokova u procesnim jedinicama za razmenu toplote. Usled prirode problema, odlučeno je da se koristi strategija rešavanja baziranu na Pristupu generalisanih jednačina (EO) u cilju razvoja softvera.

Sledeći pravila EO strategije, jednačine koje se dobijaju procesom izgradnje modela su najpre istovremeno sakupljene u numerički model postrojenja, a zatim ispitane pomoću DOF analize. Analiza stepena slobode je obezbedila broj promenljivih koje moraju biti određene kako bi broj preostalih promenljivih bio jednak broju nezavisnih jednačina, pošto je zadatak simulacija, a ne optimizacija. Ove promenljive se označavaju kao nezavisne ili projektne ([slika 6.9](#) i [slika 6.10](#)), dok se preostale nazivaju nepoznatim promenljivama. Pre prevođenja u softverski kod, numerički model postrojenja mora sadržati samo tu informaciju, dok je deklarisanje promenljivih deo softverske procedure. Treba zapaziti da je kod simulacije proces rešavanja pristupom generalisanih jednačina izvodljiv samo kada su sve promenljive određene. Nakon toga, nezavisne promenljive postaju konstante u jednačinama, dok se vrednosti nepoznatih promenljivih menjaju i progresivno približavaju konačnom rešenju tokom iterativnog postupka. Kao posledica toga, inputi nepoznatih promenljivih se procenjuju na način da minimizuju razliku između njihovih dodeljenih vrednosti i njihovih vrednosti u konačnim rešenjima.

Nakon DOF analize numerički model postrojenja se prevodi u softverski kod simulatora. Softverski kod je razvijen od strane VBA Integrated Development Environment of Microsoft Excel® i podržan je paketom osobina pod nazivom REFPROP. Simulator postrojenja se sastoji od tri međusobno povezana funkcionalna dela koja su prikazana na dijagramu na [slici 6.8](#).

Radni postupak u fazi definisanja inputa uključuje deklarisanje promenljivih i upisivanje njihovih početnih vrednosti. Pomenuto je ranije da DOF analiza određuje samo brojeve promenljivih, ali ne određuje koja promenljiva je nezavisna ili nepoznata. Zbog toga, po pravilu se promenljive deklariraju za bazični slučaj postrojenja.

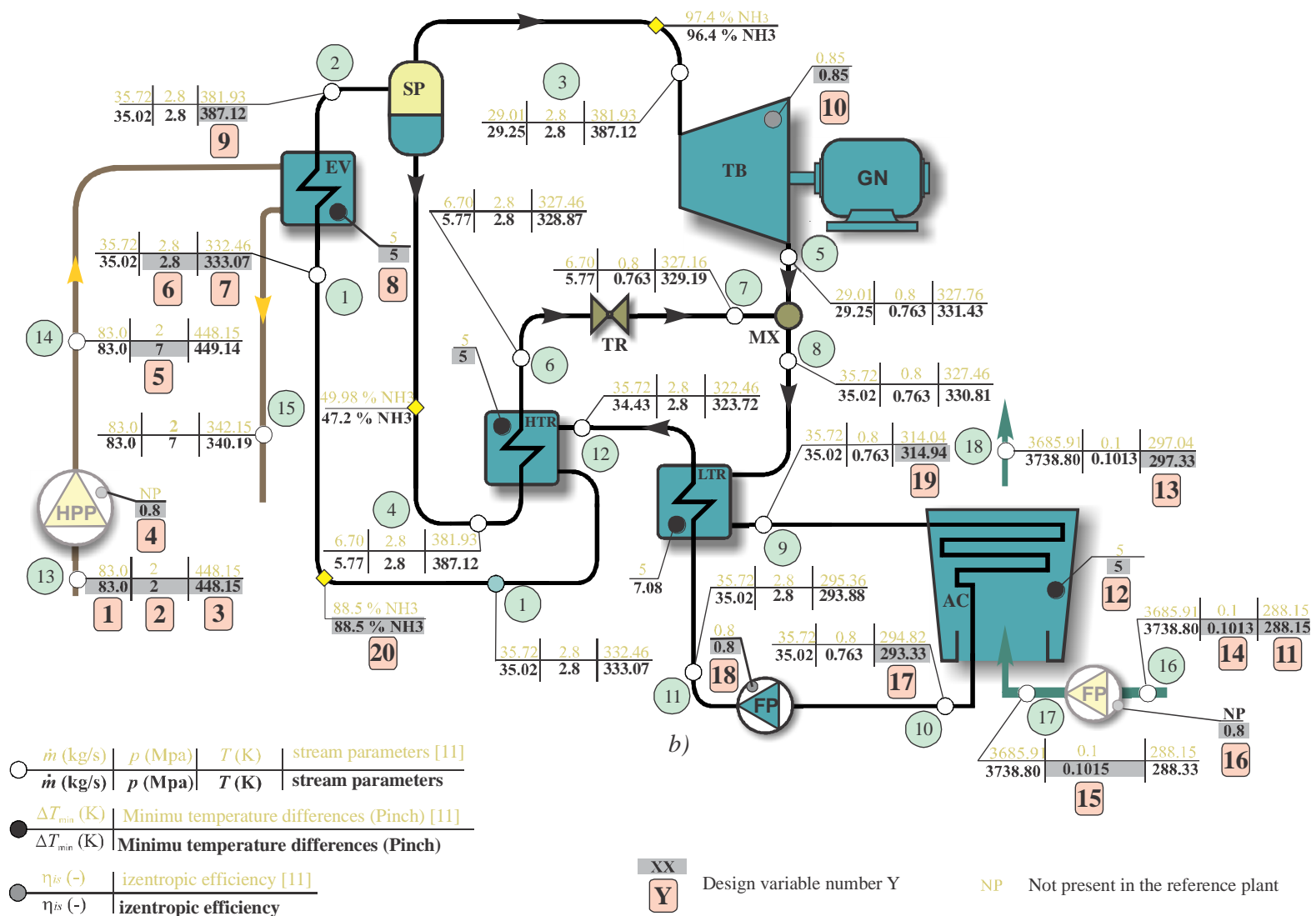


\dot{m} (kg/s)	p (Mpa)	T (K)	stream parameters [11]
\dot{m} (kg/s)	p (Mpa)	T (K)	stream parameters
ΔT_{min} (K)	Minimu temperature differences (Pinch) [11]		
ΔT_{min} (K)	Minimu temperature differences (Pinch)		
η_{is} (-)	izentropic efficiency [11]		
η_{is} (-)	izentropic efficiency		

XX
Y Design variable number Y

NP Not present in the reference plant

Slika 6.9. Bazični slučaj postrojenja koje operiše u ORC ciklusu, termodinamičke osobine i deklarisanje promenljivih



Slika 6.10. Bazični slučaj postrojenja koje operiše u KLN ciklusu, termodinamičke osobine i deklarisanje promenljivih

Tokom istraživanja, uobičajeno deklarisanje se ponekad modifikuje na način da se promenljiva koja je proglašena nepoznatom u bazičnom slučaju postrojenja pretvara u nezavisnu i obrnuto. Da bi se sprečio prekid konzistentnosti, promena deklaracije nepoznate promenljive je uvek praćena istim potezom za nezavisnu promenljivu (po slobodnom izboru operatora), ali u suprotnom smeru. Ovde se taj smer odnosi na tip promenljive, tj. da li je ona nezavisna ili nepoznata.

Solverski deo programa sadrži procedure za rešavanje skupa nelinearnih jednačina definisanih numeričkim modelima postrojenja. U prvom koraku, startuje se dinamička biblioteka koja deluje kao interfejs obzirom da su u Excelu osobine iz baze podataka REFPROP dostupne kroz čitav program. Nakon toga, proces rešavanja koristi Excelov pomoćni alat za rešavanje (Excel Solver add-in tool) za iterativnu proceduru koja stvara sukcesivne aproksimacije nepoznatih promenljivih do krajnjih rešenja. Kada se ovaj proces okonča, rešenja, termodinamičke osobine svih tokova i procesne veličine u vezi sa fluksom snage i toplote se prenose u izlazni deo simulatora radi dodatne obrade. Izlazni deo simulatora sadrži nezavisne podprograme koji izračunavaju termodinamičke i ekonomske performanse postrojenja i njegovih komponenti (procesnih jedinica i podsistema). Termodinamička performansa postrojenja se dobija pomoću energetske i eksergetske analize postrojenja, dok se ekonomska performansa postrojenja računa kao ukupna cena opreme (isključivo procesnih jedinica) u postrojenju.

6.5.1. Energetska i eksergetska analiza binarnih postrojenja

Performanse na bazi energije se bave pretvaranjem energetske veličine ciklusa i postrojenja. Ova prva veličina se odnosi na energetske efikasnosti geotermalnih ciklusa $\eta_{th,c}$, dok se druga odnosi na energetske efikasnosti postrojenja $\eta_{th,plant}$ [29]. Unutar podprograma softvera, ove veličine se dobijaju pomoću sledećeg izraza (6.8):

$$\eta_{th,K} = \frac{P_{net,K}}{Q_{in}}, \quad (6.8)$$

gde su snage:

– za ciklus: $K \equiv c$: $P_{net,c} = P_{TB} - P_{FP}$

– za postrojenje: $K \equiv plant$: $P_{net,plant} = P_{TB} - P_{FP} - (P_{HPP} + P_{FN})$

Performanse na bazi eksergije se odnose na eksergetsku efikasnost postrojenja/komponenti i koeficijenta ukupne destrukcije procesnih jedinica i podsistema. Proračun ovih performansi zahteva određivanje ukupne količine energije, mase, slobodne eksergije i destrukcije eksergi-

je. Način određivanja eksergija procesnih jedinica prema pristupu gorivo-produkt je prezentovan u Prilogu P3.

Hemijska eksergija toka se razmatra samo kod KLN postrojenja i to kroz pristup standardne hemijske eksergije. U odsustvu hemijskih reakcija u postrojenju, izračunava se samo nereaktivna eksergija idealnih smeša. Uticaj sastava komponenti na hemijsku eksergiju se zanemaruje usled slabog uticaja na ukupan bilans. Količine destrukcije eksergije operativnih jedinica se dobijaju putem bilansa eksergiju za kontrolnu zapreminu ili putem generisanja entropije unutar istih. Količine gubitaka eksergije se zanemaruju, pošto su granice kontrolne zapremine zacrtane na temperaturi okoline.

Pri proračunu eksergetске efikasnosti, pravi se jedan izuzetak koji se odnosi na disipativnu komponentu AC. Prema pristupu gorivo-proizvod, AC je disipativna komponenta, pa se za nju ne može definisati niti eksergetska namena niti eksergetska efikasnost. Umesto toga, eksergetska efikasnost ove komponente se izračunava u ovom slučaju prema Dindžeru (*Dinçer*) [30].

6.5.2. Ekonomska analiza

Ekonomska performansa postrojenja se uvodi u vidu ukupne cene opreme koja se izračunava iz izraza (6.9):

$$C_{eq} = \sum C_{base,OU} \cdot C_{qt,OU} \quad (6.9)$$

gde su:

– za jedinice za razmenu toplote, OU≡HE:

$$C_{base,HE} = 580 (\$/m^2),$$

$$C_{qt,HE} = \sum (A_{HE})^{0.8}, HE = \{EV, PH, LTR, HTR, AC\}$$

– za jedinice koje proizvode snagu, turbina OU≡TB:

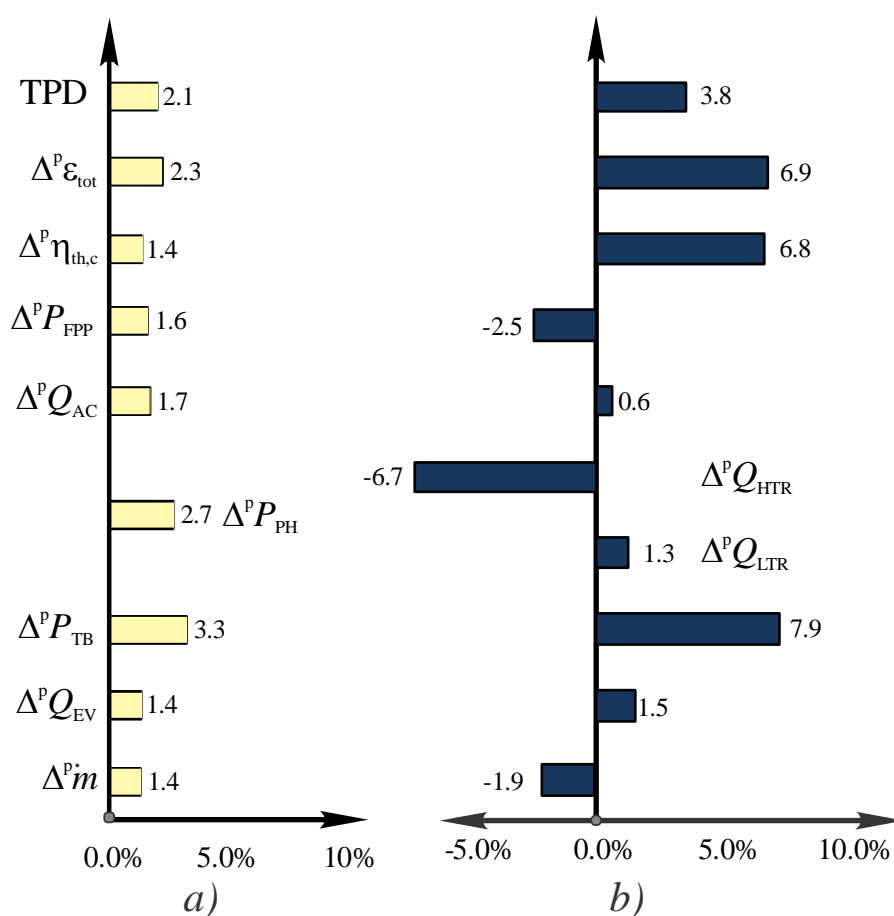
$$C_{base,TB} = 4405 (\$/kW), C_{base,(FP,HPP,FN)} = 1120 (\$/kW)$$

$$C_{qt,PU} = \sum (P_{PU})^{0.7}, PU = \{TB, HPP, FP, FN\}$$

U jednačini (6.9) C_{base} (\$) je osnovna cena, a C_{qt} (\$) je naveden iz iskustva profesionalne procene troškova [31]. Površina razmene toplote se računa po LMTD metodi (za PH, LTR i HTR) i po NTU metodi za efikasnost (za EV i AC) [32].

6.5.3. Verifikacija and validacija softvera

Verifikacija and validacija softvera (V&V), ilustrovana dijagramom na [slici 6.8b](#), izvodi se pretpostavljanjem istog inputa za nezavisne promenljive kao u referentnim postrojenjima. Ove vrednosti se predstavljaju zlatnom bojom na [slici 6.9](#) i [slici 6.10](#). Promena pritiska u dve novododate procesne jedinice, HPP i FN, se zanemaruje da bi se zadržala konfiguracija referentnih postrojenja (prema tome, nezavisna promenljiva 5 se definiše kao 2MPa, a ne kao 7MPa što je slučaj u baznom postrojenju itd.). Vrednosti inputa nepoznatih promenljivih se procenjuju kako bi se povećao ukupan kvalitet rešenja na način boljeg slaganja između rezultata simulacije i parametara u referentnom postrojenju.



Slika 6.11. Rezultati procesa V&V softvera

Izlazni rezultati simulacije se zatim upoređuju sa odgovarajućim termodinamičkim osobinama i željenim vrednostima referentnog postrojenja. Slaganje između ovih vrednosti se poboljšava metodom kalibracije softvera, pre svega promenom inputa nepoznatih promenljivih u pojedinačnim simulacijama. U nekim slučajevima, vrednost nezavisne promenljive korišćena pri simulaciji se takođe menja zbog dodatnog poboljšanja slaganja i usled ograničenja

postupka rešavanja. Naprimera, kod KLN postrojenja, nezavisna promenljiva broj 9 (temperatura osnovne smeše u stanju 2) se razlikuje od odgovarajuće promenljive u referentnom postrojenju zbog problema konvergencije sa smešom bogatom amonijakom u stanju 5. Štaviše, činjenica da se pretpostavke i postupci kod sekvencijalnog modularnog izračunavanja [28] ne mogu potpuno kopirati kod pristupa generalisanih jednačina takođe predstavlja ograničavajući faktor kod validacije softvera.

Krajnji rezultati postupka V&V gde se maksimalno slaganje postiže za oba postrojenja su dati na [slici 6.11](#). Rezultati su prikazani u vidu procentne razlike između procesnih veličina dobijenih simulacijama i odgovarajućim vrednostima koji potiču iz referentnog postrojenja. Ukupna procentna razlika (TPD) je prosečna vrednost svih istraživanih veličina. Po mišljenju autora rezultati simulacije pružaju prihvatljivo slaganje sa rezultatima iz referentnog postrojenja. Štaviše, procentne razlike energetske i eksergetske efikasnosti označavaju da se termodinamičke performanse oba postrojenja unapređuju u odnosu na referentna postrojenja.

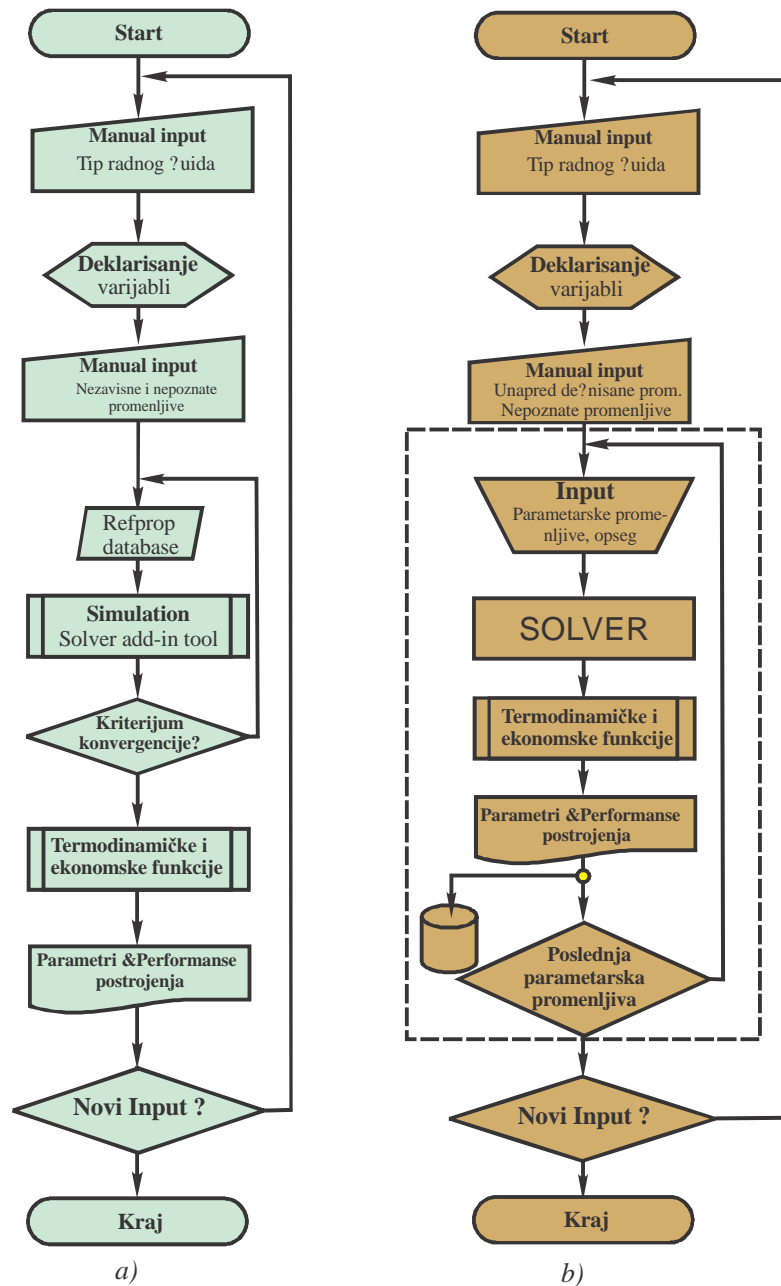
6.5.4. Projektni i parametarski mod simulacije

U preostalom delu istraživanja, u odnosu na različite projektne zadatke i ciljeve, simulatori postrojenja su delimično modifikovani i pripremljeni za upotrebu u dva moda ili režima – *projektnom* i *parametarskom*. Dijagrami oba softverska moda su dati na [slici 6.12](#).

Projektni mod ili režim rada simulatora (*projektna simulacija* ili *simulacija u cilju projektovanja*) se povezuje za pojedinačnom radnom tačkom postrojenja. Ovaj režim omogućava slobodan input svih nezavisnih i nepoznatih promenljivih, pa se one lako mogu podešavati radi projektovanja sličnih binarnih postrojenja na drugim geotermalnim lokacijama. Simulacija u cilju projektovanja se primarno koristi za analizu i poređenje bazičnog slučaja postrojenja, kao o istraživanje uticaja vrste radnog fluida na rad ORC postrojenja. Naime, vrsta radnog fluida u ORC postrojenju nije promenljiva u simulacionom zadatku i njen uticaj na performanse postrojenja se može ispitivati jedino poređenjem željenih vrednosti postrojenja koji rade pod istim radnim uslovima. Obzirom na to, analiza performanse u vezi sa radom sa različitim radnim fluidima se izvodi serijama projektnih simulacija koje imaju isti input kod svih promenljivih kao u baznom slučaju postrojenja.

Drugi režim rada, *parametarski mod* ili *parametarska simulacija* se odnosi na parametarsku analizu binarnih postrojenja. Ova vrsta analize se koristi za izučavanje uticaja pojedinačne termodinamičke veličine na performanse postrojenja. Parametarska analiza je podržana simulacionim softverom koji automatski rešava čitave opsege posmatranih veličina i generiše re-

zultate koji pokazuju trendove ponašanja neophodne za identifikaciju optimalnog projektovnja postrojenja. U literaturi, parametarska analiza se obično odnosi na analizu postrojenja koje operiše u neprojektnom modu.



Slika 6.12. Šeme tokova softvera a) algoritam projektog moda b) algoritam parametarskog moda

U prethodno objašnjenom projektom modu softvera, input nezavisnih promenljivih otkriva performanse postrojenja u pojedinačnoj operativnoj tački i ova tačka se može menjati jedino s različitim inputom nezavisne promenljive u narednoj simulaciji. Štaviše, novi input je obično praćen novom procenom za nepoznatu promenljivu i kao rezultat ove dve procedure, sakupljanje neophodnih podataka za parametarsku analizu postrojenja je sporo i ponekad nepouz-

dano. Zbog toga se softverski kod postojećeg projektnog moda modifikuje radi uvođenja pojedinačnog simulacionog postupka koji operiše u opsegu nekoliko operativnih tačaka.

Modifikacije se započinju u delu unosa inputa softvera gde se sve nezavisne promenljive dele u dve grupe:

- grupa parametara i
- grupa *unapred određenih* promenljivih koje čine sve ostale nezavisne promenljive.

U narednom koraku, polazna petlja (*for*) se dodaje postojećem softverskom kodu kako bi se omogućile višestruke simulacije sa različitim inputima parametarske promenljive. Da bi se razlikovao ovaj iterativni ciklus od onog koji je prikazan u solverskom delu softvera, njegovi elementi su prethodno fiksirani atributom *parametarski*. Sa [slike 6.12b](#) može se zaključiti da je *parametarska petlja* ograničena sa dva modula: inputom parametarske promenljive i kriterijumom izlaza iz parametarskog ciklusa.

Inkorporiranje parametarske petlje u softverski kod uzrokuje dve bitne promene u postupku simulacije unutar simulatora: jedne povezane sa inputom parametarske promenljive i druge koja se odnosi na procenjenu vrednost nepoznate promenljive. Najpre, pre same simulacije, input u simulatoru mora da definiše polaznu vrednost parametarske promenljive, opseg u kome se njena vrednost traži i broj iteracionih koraka. Indirektno, input može biti određen polaznom i krajnjom vrednošću parametarske promenljive. Polazna vrednost je obično najmanja veličina unutar opsega traženja, dok krajnja vrednost zatvara parametarski ciklus. Nakon toga, proces rešavanja počinje unutar prve parametarske iteracije i kada je okončan, rezultati simulacije se prenose u eksternu tabelu sa bazama podataka. U određenim iteracionim koracima polazna parametarska promenljiva se sukcesivno povećava za vrednost koja se izračunava kao odnos između te promenljive i broja iteracije. Proces rešavanja se ponavlja i nakon svakog koraka iteracije rezultati simulacije se sakupljaju u uzastopnim kolonama tabele sa bazama podataka.

U prethodnoj projektnoj simulaciji, procena nepoznate promenljive se izvodi u delu softvera sa inputima i pre rešavanja procedure. Jasno je da bi ista sekvenca prekinula iteracije unutar parametarskog ciklusa i kao posledicu toga, parametarski mod bi se smanjio na prosti projektni mod. Iz tog razloga, procena nepoznatih promenljivih, kao osnovni zadatak simulacija pristupom generalisanih jednačina se jedino izvodi pre početka prve iteracije. U pojedinačnim iteracionim koracima, nepoznate promenljive u trenutnoj iteraciji dobijaju vrednosti odgovarajućih rešenja iz prethodnih iteracija. Pomoću ove dve modifikacije, u svakom iteracionom

koraku unutar parametarskog ciklusa, operativna tačka postrojenja je definisana inputom parametarske promenljive, dok unapred određene promenljive ostaju iste.

Rezultati svih simulacija se izvode u jednom iteracionom ciklusu i skladište se u tabeli matrica sa podacima koja je prikazana na [slici 6.13a](#). Matrični format označava da se podaci u tabeli organizuju na način da svi redovi imaju identičan broj kolona, $m = 1, 2, \dots, M$; a sve kolone imaju isti broj redova, $n = 1, 2, \dots, N$. Kolone dobijaju naslov po vrednostima parametarske promenljive (p_{v_m}), dok ostale ćelije sadrže vrednosti termodinamičkih veličina koje se ne koriste kao parametarske promenljive, procesnih veličina i performansi postrojenja, ($v_{l_{m,n}}$). Na ovaj način, vrednosti u ćelijama su poredljive kroz redove i ova karakteristika se koristi u parametarskoj analizi postrojenja.

U ovom radu se parametarska analiza izvodi radi ispitivanja veze između parametarskih promenljivih i nekih važnih performansi postrojenja: energetske efikasnosti, eksergetske efikasnosti i ukupne cene procesnih jedinica i postrojenja (u daljem tekstu EEC performanse). Parametarska analiza je podržana dijagramima na bazi grafova, a jedan od njih je prikazan u uprošćenoj formi na [slici 6.13c](#). Dijagrami se kreiraju iz podataka koji se skladište u *modifikovanoj tabeli* ([slika 6.13b](#)) koji ima isti format i identičan naslov (prvi red tabele) kao matrična tabela, ali sve ostale vrednosti se modifikuju funkcijama procentnih razlika [\[33\]](#).

Procentna razlika pojedinačne vrednosti u modifikovanoj tabeli se izračunava sledećim izrazom [\(6.10\)](#):

$$\Delta^p v_{l_{m,n}} (\%) = 100 \frac{v_{l_{m,n}} - v_{l_{1,n}}}{v_{l_{m,n}}}, m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N \quad (6.10)$$

gde m i n predstavljaju brojeve kolone i reda u tabeli. Ako se vrednost u matričnoj tabeli meri procentima, kao kod energetske ili eksergetske efikasnosti postrojenja, procentna razlika predstavlja tzv. procentnu tačku, u ostalim slučajevima ona je procentna razlika. Vrednosti parametarske promenljive unutar istraživanog opsega se stavljaju na x -osu dijagrama, dok se vrednosti procentnih razlika u vezi sa EEC performansama prikazuju kao kutije čija visina se odnosi na primarnu y -osi, [slici 6.13c](#). Na ovaj način, kutije manifestuju trend po kom se EEC performanse menjaju u pogledu parametarske promenljive duž x -ose. Pored kutija dijagrama, u cilju jasnije analize se takođe uvodi procentna promena nekih procesnih veličina na dijagrame u vidu grafika s linijama. Tačke na ovim graphicima se dobijaju na isti način kao visina kutija i njihove vrednosti se očitavaju na y -osi.

$$pv_m = pv_{m-1} + \frac{pv_M - pv_1}{M}; m = 1, 2, \dots, M$$

pv_1	pv_2	pv_m	pv_M
$vl_{1,1}$	$vl_{2,1}$	$vl_{m,1}$	$vl_{M,1}$
$vl_{1,2}$	$vl_{2,2}$	$vl_{m,2}$	$vl_{M,2}$
$vl_{1,n}$	$vl_{2,n}$	$vl_{m,n}$	$vl_{M,n}$
$vl_{1,N}$	$vl_{2,N}$	$vl_{m,N}$	$vl_{M,N}$

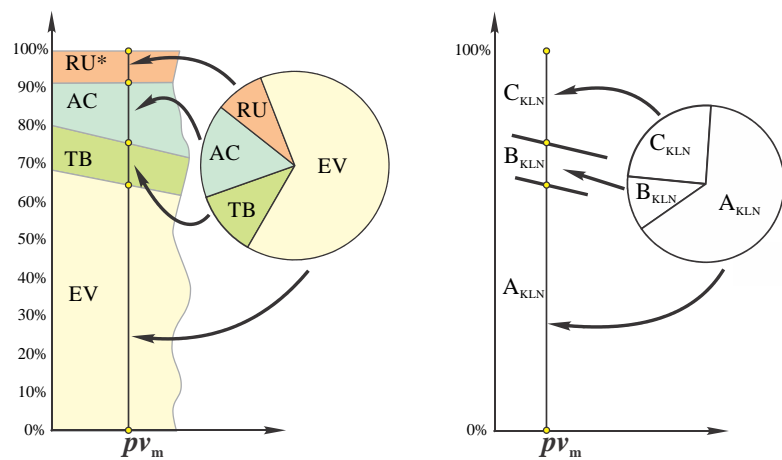
svojstva, veličine u procesu i performanse postrojenja

a)

pv_1	pv_2	pv_m	pv_M
$\Delta^p vl_{1,1}=0$	$\Delta^p vl_{2,1}$	$\Delta^p vl_{m,1}$	$\Delta^p vl_{M,1}$
$\Delta^p vl_{1,2}=0$	$\Delta^p vl_{2,2}$	$\Delta^p vl_{m,2}$	$\Delta^p vl_{M,2}$
$\Delta^p vl_{1,n}=0$	$\Delta^p vl_{2,n}$	$\Delta^p vl_{m,n}$	$\Delta^p vl_{M,n}$
$\Delta^p vl_{1,N}=0$	$\Delta^p vl_{2,N}$	$\Delta^p vl_{m,N}$	$\Delta^p vl_{M,N}$

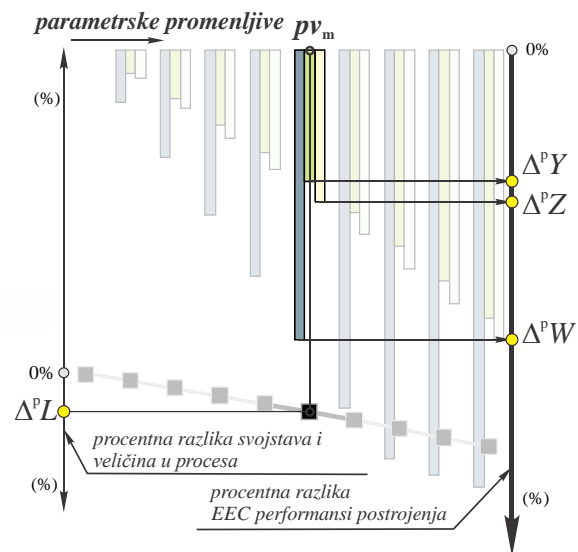
$$\Delta^p vl_{m,n} (\%) = 100 \frac{vl_{m,n} - vl_{1,n}}{vl_{m,n}}, m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$$

b)



*RU-preostale jedinice
 for ORC: $RU_{ORC} = \{PH, HPP, FP, FN\}$
 for KLN: $RU_{KLN} = \{LTR, HTR, TR, SP, HPP, FP, FN\}$

d)



$L, W, Z, Y \in \{vl_{m,1}, vl_{m,2}, \dots, vl_{m,N}\}$

c)

Slika 6.13. Grafički prikazi obrade podataka u parametarskoj analizi postrojenja

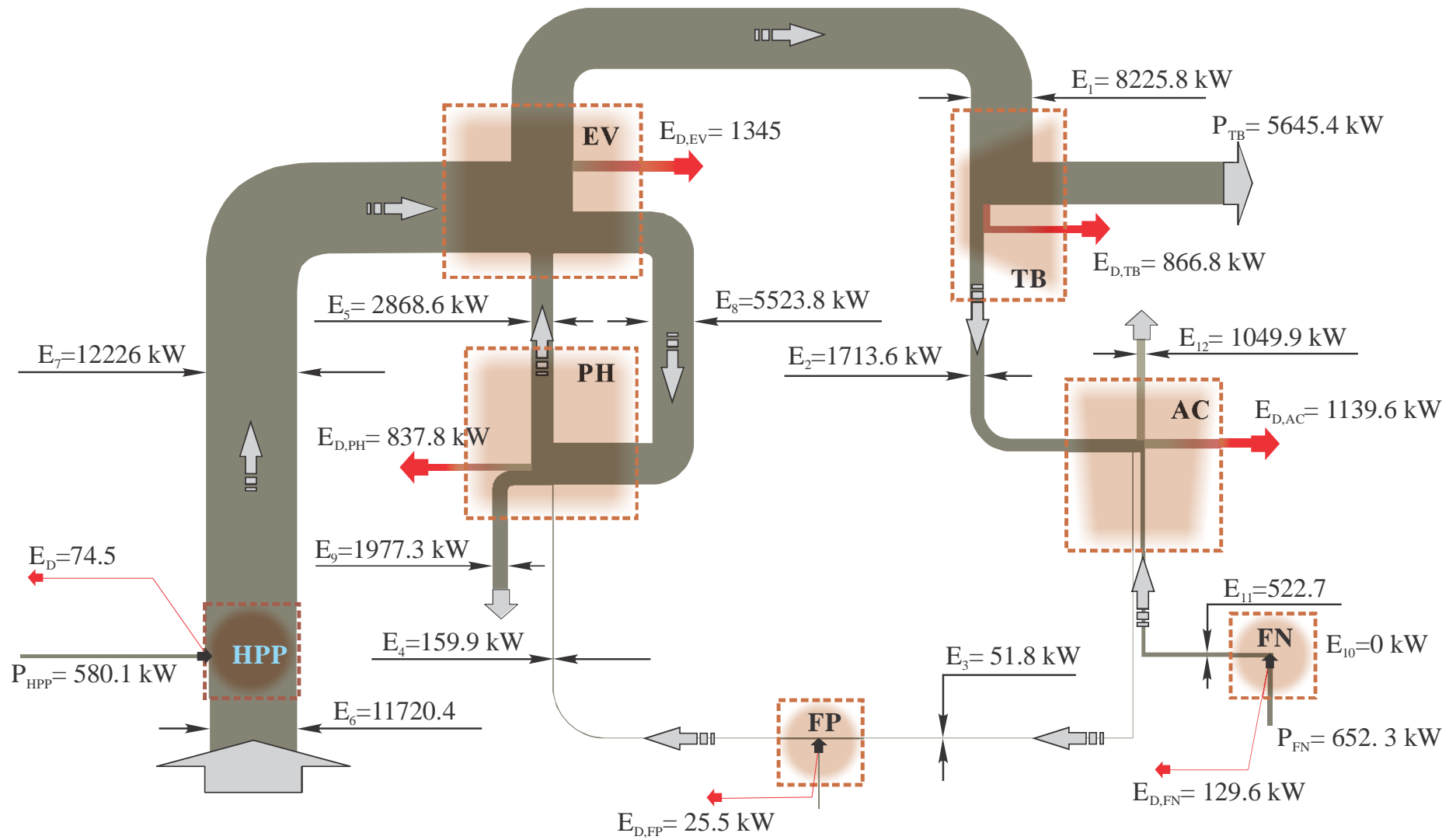
Slični prikazi na bazi grafova se takođe koriste za analizu performanse bazičnog slučaja ORC postrojenja koji operiše sa izopentanom kao radnim fluidom radi izučavanja vrste radnog fluida koji bi bio adekvatna zamena za izopentan. Projektne simulacije bazičnog slučaja postrojenja koji operiše sa različitim radnim fluidima generiše tabelu sa bazom podataka koji ima isti format i iste sastavne elemente kao što je matična tabela koja se koristi za parametarsku analizu postrojenja. Jedina razlika je u naslovu kolona, a svaka kolona je obeležena imenom radnog fluida, a ne imenom proučavane promenljive. Zbog toga, analiza se izvodi na isti način kako je ranije u tekstu opisano.

Druga vrsta dijagrama koja podržava parametarsku analizu je grafik površina čija uprošćena forma je prikazana na [slici 6.13d](#). Ovaj dijagram prikazuje procentni udeo destrukcije eksergije stvorene u operativnim jedinicama ili podsistemima u ukupnoj destrukciji postrojenja. Koeficijent ukupne destrukcije eksergije se obično prikazuje kružnim dijagramom, ali su ovde delovi kruga pretvoreni u vertikalno rastojanje smešteno na jednu ordinatu. Svaka ordinata je povezana sa parametarskom promenljivom, p_{vm} , kao na [slici 6.13d](#). Pomoću rezultata iz matične tabele, vrednosti ukupne destrukcije eksergije se sakupljaju na dva načina: pomoću dijagrama površina za procesne jedinice (levi dijagram sa [slici 6.13d](#)) i pomoću krivih za podsisteme (levi dijagram sa [slici 6.13d](#)). Na ovaj način, površine i linije pokazuju trendove ukupne destrukcije eksergije u komponentama postrojenja kroz ispitivana parametarske promenljive. U ostatku teksta ovi tipovi grafika se imenuju kao dijagrami koeficijenta ukupne destrukcije eksergije (TEDR dijagrami).

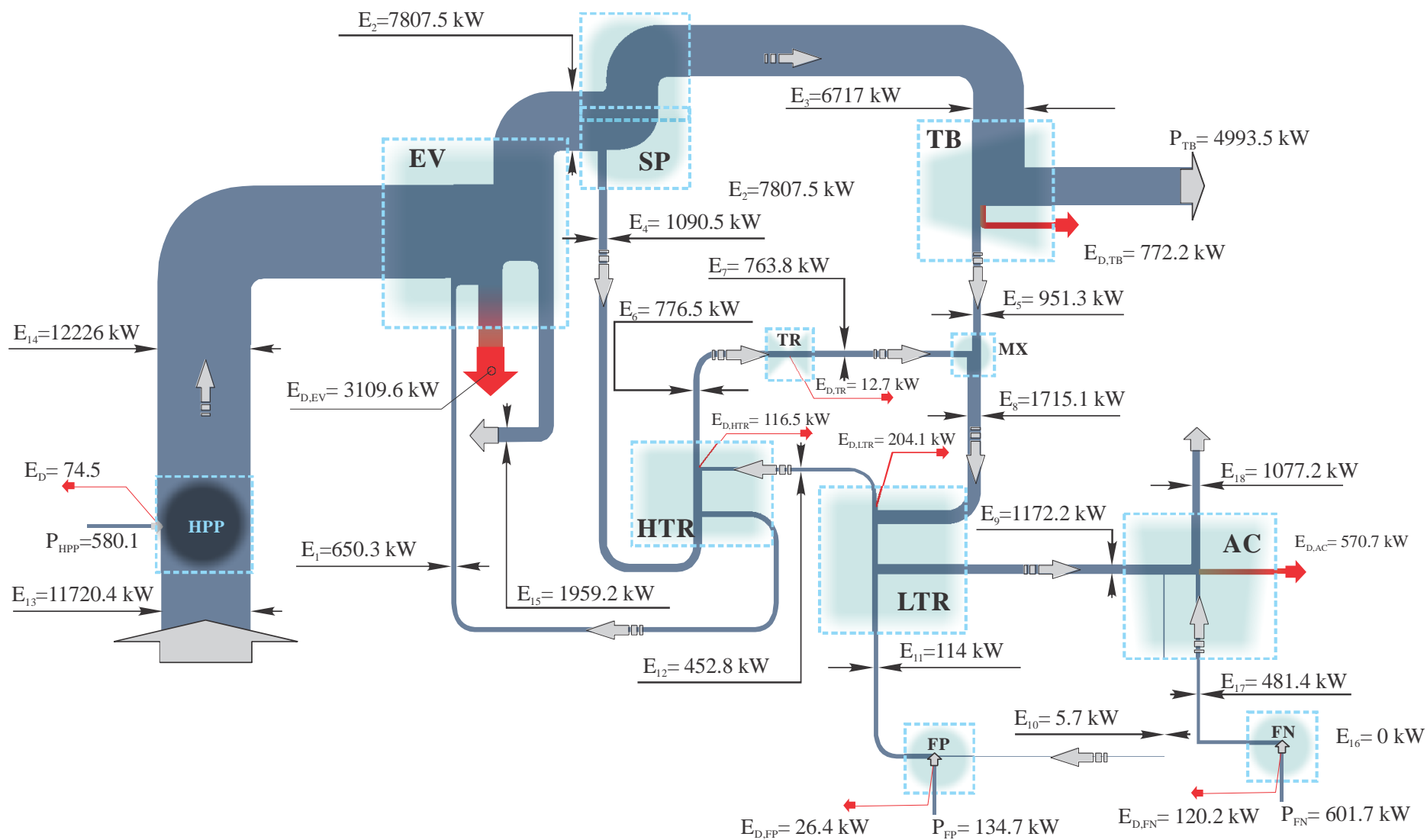
6.6. Projektovanje i analiza bazičnog slučaja postrojenja

Simulacioni softver se prvi put koristi za projektovanje i analizu bazičnog slučaja ORC i KLN postrojenja. Glavni cilj istraživanja je poređenje performansi postrojenja u slučaju kada rade pod istim uslovima energetskog izvora (geotermalna voda) i energetskog medijuma (rashladni vazduh).

Rezultati simulacije koji se tiču termodinamičkih osobina u postrojenju su prikazani vrednostima obojenim u crno na PFD dijagramu, [slika 6.9](#) i [slika 6.10](#). Na istom dijagramu mogu se primetiti nezavisne promenljive koje se koriste pri simulaciji i poređenje osobina postrojenja sa onima koji su dobijeni u radu [\[28\]](#) (zlatna boja).



Slika 6.14. Dijagram toka eksergije ORC postrojenja



Slika 6.15. Dijagram toka eksergije KLN postrojenja

Tabela 6.2. Parametri bazičnog slučaja postrojenja korišćeni za energetska i ekonomska analiza

	ORC I	KLN	ORC II
p_{ev}	0.90	2.80	0.57
p_{cn}	0.10	0.76	0.10
G	82.31	35.02	88.54
P_{TB}	5645.40	4646.90	4645.00
Δh_{TB}	68.59	158.87	52.46
P_{FP}	133.70	134.74	83.80
P_{HPP}	580.0.94	580.09	580.0.94
P_{FN}	653.30	667.11	672.00
$\eta_{th,c}$	0.14	0.12	0.12
$\eta_{th,plant}$	0.11	0.09	0.09
Q_{in}	38674.00	38376.66	38674.00
ΣA_{PU}	16206.70	38495.50	18548.20
C_n	3760510.30	5074322.70	3628478.60

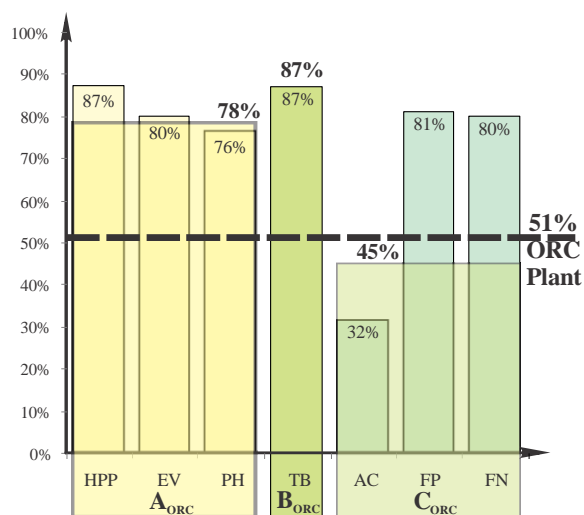
Tačke termodinamičkog stanja tokova fluida u bazičnom slučaju postrojenja i procesa u operativnim jedinicama su predstavljene na T - s dijagramima na [slici 6.5b](#) i [slici 6.6b](#). Kao i u referentnim postrojenjima, radni fluid u ORC postrojenju je lako isparljivi izopentan – C_5H_{12} , a u slučaju KLN postrojenja smeša amonijak – voda. Dijagrami temperatura-entropija su sastavljeni od podataka baznog slučaja postrojenja i dijagrama stanja fluida i smeša. Dijagrami stanja se kreiraju u softveru REFPROP. U slučaju ORC ciklusa, tačke stanja geotermalne vode i rashladnog vazduha su stavljene na x -ose iz estetskih razloga, ali se realna vrednost entropije u ovim tačkama očitava na dve dodatne apscise. Kod KLN ciklusa specifični sastav fluida u jednom stanju je iste boje kao odgovarajuća linija zasićenja smeše.

Parametri i željene vrednosti postrojenja u vezi sa energetska i ekonomskom analizom su prikazani u prve dve kolone, označene sa ORC I i KLN, [tabela 6.2](#). Kao što se vidi iz tabele, energetska efikasnost geotermalnog ciklusa, $\eta_{th,c}$ i geotermalnog postrojenja, $\eta_{th,plant}$ su veće kod postrojenja koje radi u ORC ciklusu. Glavni razlog za takve rezultate proističu iz razlike u neto snazi turbine, P_{TB} , pošto drugi važni parametri kao što su snage napojnih pumpi (P_{FP}), dodatne snage ($P_{HPP}+P_{FN}$) i ulazna toplota u ciklus (Q_{in}) imaju slične vrednosti. Pošto je snaga turbine nelinearna funkcija masenog protoka radnog fluida (G_{wf}) i pada pritiska u turbini ($\Delta p_{TB}=p_{ev}-p_{cn}$), KLN postrojenje operiše sa znatno većim protokom i većim padom specifične entalpije (Δh_{TB}) u turbini. Cena turbine u ORC ciklusu je zato veća, a s druge strane, veći maseni protok smanjuje površinu razmenjivača toplote u drugim operativnim jedinicama i tako smanjuje cenu ovih jedinica.

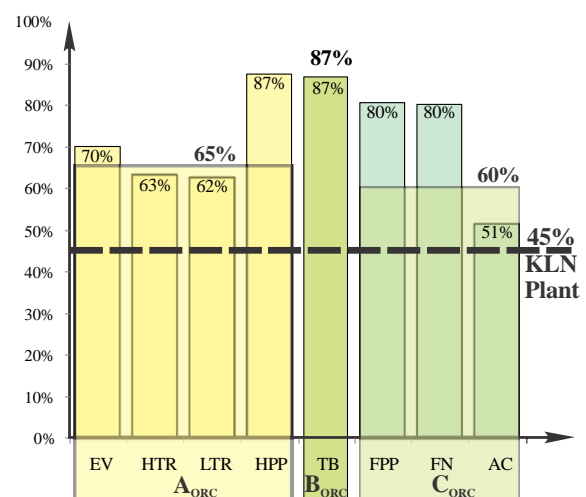
Sledeći zaključak da energetska efikasnost postrojenja primarno zavisi od snage turbine, u narednoj simulaciji ova veličina je smanjena kod ORC ciklusa tako da bude jednaka vrednosti u KLN ciklusu. Nova vrednost se dobija s istom ulaznom toplotom (Q_{in}) i smanjenjem pritiska isparavanja (p_{ev}) u pravcu koji smanjuje pad pritiska u turbini. Istovremeno, radni fluid na ulazu u turbini se održava u stanju zasićene pare. Zbog toga se modifikuje deklaracija promenljivih: nezavisna promenljiva 6 se proglašava nepoznatom, dok temperatura geotermalne vode u stanju 9 postaje nova nezavisna promenljiva ([slika 6.9](#))

Novodobijene performanse su prikazane u trećoj koloni, označene kao ORC II u tabeli 6.2. Odgovarajuća energetska efikasnost oba postrojenja je sada skoro identična, ali je maseni protok radnog fluida dodatno porastao kod ORC postrojenja i usled toga je cena opreme neznatno opala.

Pregled najvažnijih podataka u vezi sa protočnim eksergijama geotermalnih postrojenja je prikazan na dijagramima toka eksergije na [slici 6.14](#) i [slici 6.15](#). Na prvi pogled izvori neefikasnosti koje se odnose na destrukciju eksergije u ORC ciklusu su skoro jednako raspodeljene između četiri procesne jedinice (EV, TB, PH, AC), dok to očito nije slučaj kod KLN ciklusa. Zatim, vrednost eksergijske destrukcije kod jedinica s ulaznim energijama (EV+PH kod ORC, samo EV kod KLN) je takođe veći kod postrojenja koje operiše u KLN ciklusu. S druge strane, veličina termodinačke neefikasnosti u jedinici s gubitkom energije (AC kod oba postrojenja) je znatno viša unutar ORC postrojenja.



Slika 6.16. Eksergetska efikasnost bazičnog slučaja ORC postrojenja

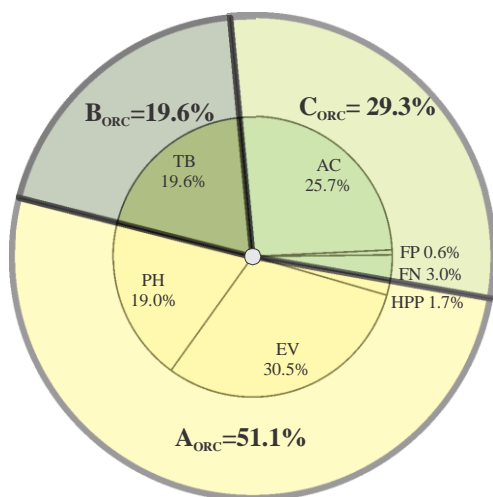


Slika 6.17. Eksergetska efikasnost bazičnog slučaja KLN postrojenja

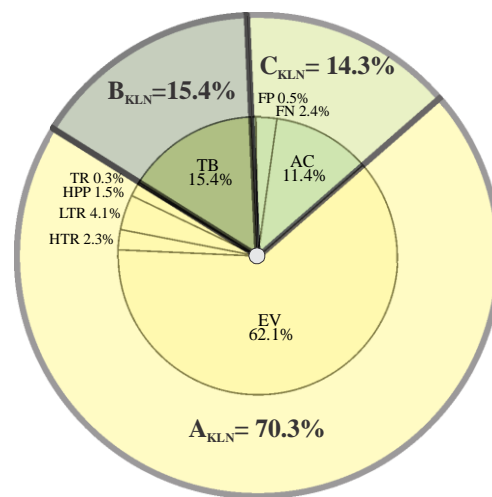
Kvantifikacija eksergetskih performansi postrojenja se izvodi pomoću eksergetske efikasnosti postrojenja/komponenti, i koeficijenta ukupne destrukcije eksergije procesnih jedinica i pod-sistema. [Slika 6.16](#) i [slika 6.17](#) označavaju eksergetsku efikasnost svih procesnih jedinica, podsystema i čitavog postrojenja.

Opšti zaključak je da je eksergetska efikasnost postrojenja veća kod ORC, nego kod KLN ciklusa. Zatim, kod ORC ciklusa, eksergetska efikasnost podsystema A je viša od podsystema C, dok su performanse ovih podsystema u različitim relacijama kod KLN ciklusa.

Dodatna analiza je prikazana na [slici 6.18](#) i [slici 6.19](#) gde je koeficijent ukupne destrukcije eksergije procesnih jedinica prikazan u unutrašnjem delu kružnog dijagrama, dok je ista veličina za podsysteme data u spoljašnjem delu istog dijagrama. Prikazani rezultati potvrđuju opservacije proistekle iz analize dijagrama toka eksergije.



Slika 6.18. Raspodela destrukcije eksergije kod bazičnog slučaja ORC postrojenja



Slika 6.19. Raspodela destrukcije eksergije kod bazičnog slučaja KLN postrojenja

Analiza performanse baznog slučaja postrojenja ukazuje da projektovanje postrojenja u ORC ciklusu ima veću termodinamičku efikasnost i nižu cenu opreme i po tome je pogodnije za buduće geotermalno postrojenje u Velikoj Cigleni. Nezavisno od ovog zaključka, analiza performanse takođe izlaže najmanje efikasne procesne jedinice i delove postrojenja i pokazuje pravce mogućeg unapređenja postrojenja. Ovi pravci će biti dodatno razjašnjeni parametarskom analizom prezentovanom u narednom odeljku rada.

6.6.1. Analiza performanse bazičnog slučaja ORC postrojenja koje operiše sa različitim radnim fluidima

Simulacioni softver u projektnom modu je takođe upotrebljen u cilju istraživanja mogućnosti upotrebe različitih radnih fluida kod baznog slučaja ORC postrojenja. Metoda selekcije radnih fluida se bazira na termodinamičkom kriterijumu, pa su jedino fluidi sa pozitivnom vrednošću parametra inverzne krive, ξ , koji se obično imenuju kao "izentropski" ($\xi \approx 0$) i "suvi" ($\xi > 0$) fluidi [34], [35] uključeni u analizu.

Glavne termodinamičke osobine izučavanih fluida koje su usvojene iz baze podataka REFPROP su smešteni u prvom delu [tabele 6.3](#). Poslednje tri kolone u [tabeli 6.3](#) predstavljaju osobine i veličine koje su dobijene simulacijom pomoću projektnog moda softvera.

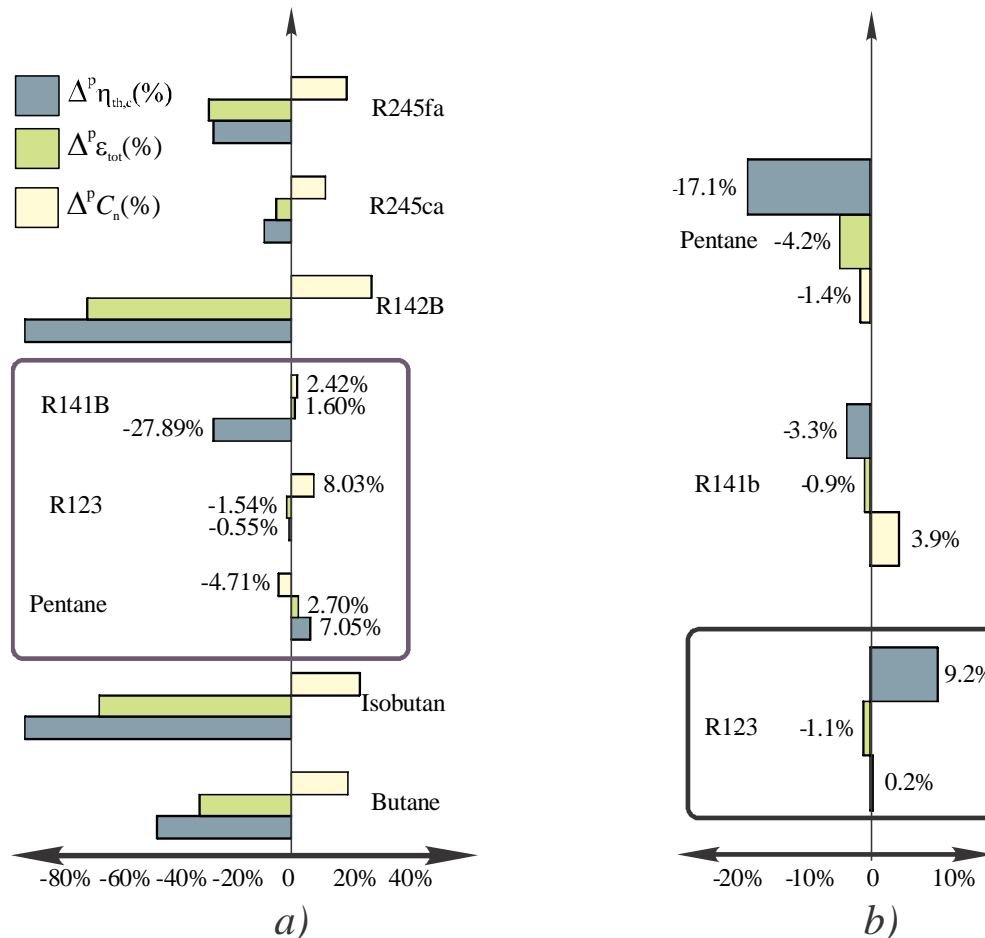
Tabela 6.3. Osobine proučavanih radnih fluida u ORC postrojenju.

Vrsta fluida	ξ (J/kgK)	Δh_{TB} (kJ/kg)	ρ_q (kg/m ³)	ρ_p (kg/m ³)	$c_{p,lq}$ (kJ/kgK)	$c_{p,vp}$ (kJ/kgK)	T_{ev} (K)	Δp_{TB} (MPa)	G (kg/s)	P_{net} (kW)
R141b	0.00	222.71	1039.41	39.33	1.16	0.81	386.22	0.81	117.20	5040.24
R142b	0.00	223.25	1011.87	39.65	1.23	0.82	334.14	0.52	222.03	3518.81
R123	0.26	170.19	1226.03	53.92	1.02	0.70	379.20	0.79	177.10	5358.67
R245ca	0.60	200.97	1170.63	48.56	1.33	0.93	371.68	0.78	168.20	5514.18
R245fa	0.19	196.05	1151.31	50.28	1.30	0.92	358.35	0.73	204.70	5184.25
Butan	1.03	385.71	508.60	22.18	2.31	1.64	347.70	0.62	112.99	4561.00
Izobutan	1.03	365.11	500.61	23.17	2.22	1.55	334.53	0.51	136.43	3632.80
Pentan	1.51	357.59	510.77	24.90	2.37	1.76	392.62	0.82	67.49	5252.46
Izopentan	1.37	343.29	513.26	25.44	2.29	1.71	383.51	0.80	82.31	5511.75

Dijagram u vidu grafa koji se koristi za analizu performanse ORC postrojenja koje operiše sa različitim radnim fluidima je predstavljen na [slici 6.20a](#). Rezultati simulacija ukazuju da su EEC performanse postrojenja koji radi sa pentanom, R141B i R123 kao radnim fluidom imaju najniže vrednosti procentne razlike. To znači da ova tri fluida mogu zameniti izopentan kao radni fluid u bazičnom slučaju postrojenja bez ikakvih značajnih promena u EEC performansama.

Prema podacima iz [tabele 6.3](#) izabrani fluidi imaju sličnu temperaturu isparavanja i stvaraju skoro isti pad pritiska u turbini kao izopentan. Zbog toga se naredne projektne simulacije izvode podešavanjem bazičnog slučaja postrojenja tako da operiše pod istim pritiskom kondenzacije bez obzira na vrstu radnog fluida. Ipak, nasuprot pritisku isparavanja, pritisak kondenzacije nije nezavisna promenljiva kod bazičnog slučaja postrojenja i u novim simulacijama mora da se promeni deklaracija promenljivih. Pritisak kondenzacije se smatra nezavisnom

promenljivo, dok promenljiva broj 10 (minimalna temperaturna razlika u AC) postaje nepoznata promenljiva. Rezultati novih simulacija koje su prezentovani na Slici 6.20b, identifikuju R123 kao najadekvatniji radni fluid koji može da zameni izopentan kod bazičnog slučaja postrojenja.



Slika 6.20. Analiza performanse ORC postrojenja koje operiše sa različitim radnim fluidima

6.6.2. Parametarska analiza ORC i KLN postrojenja

U ovom radu, parametarska analiza se izvodi za sledeće promenljive:

- Sastav polazne smeše u KLN postrojenju, promenljiva broj 20 na [slici 6.10](#);
- Temperatura okoline, promenljiva broj 1 na [slici 6.9](#) i [slici 6.10](#);
- Minimalna temperaturna razlika u AC, promenljiva broj 12 na [slici 6.9](#) i [slici 6.10](#); i
- Pritisak isparavanja, promenljiva broj 6 na [slici 6.9](#) i [slici 6.10](#).

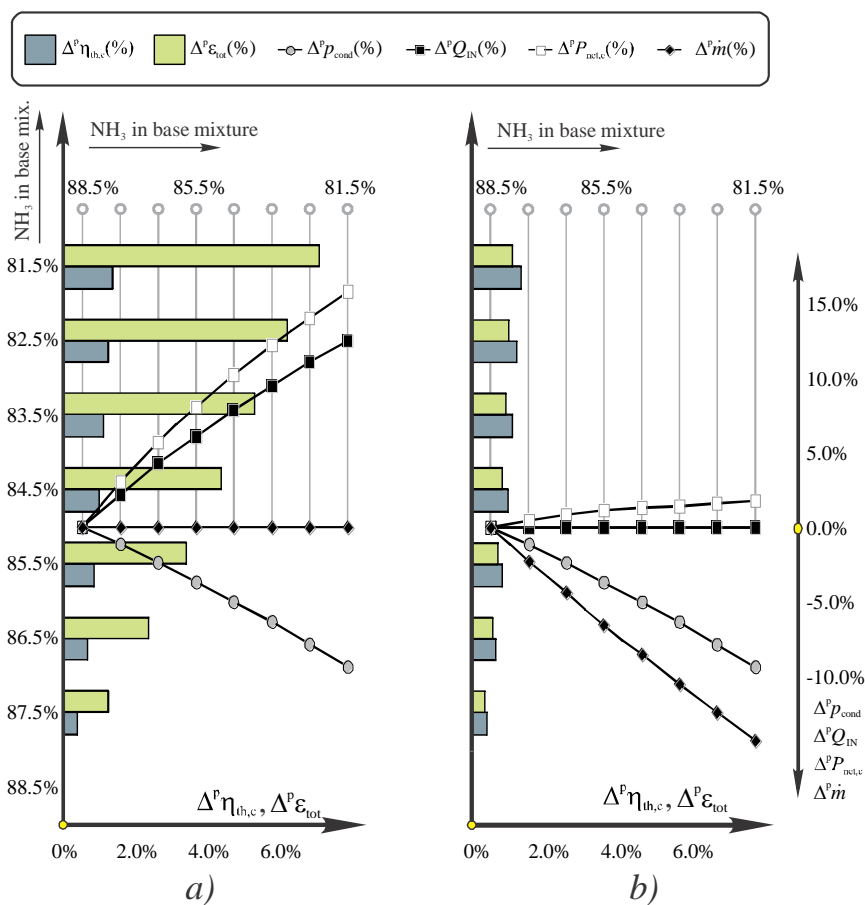
Rezultati simulacija za svaku promenljivu su prikazane na grafovima čija je struktura objašnjena u odeljku 6.5. Dijagrami označavaju trendove performansi postrojenja kroz ispitivani opseg definisan parametarskom promenljivom i omogućavaju identifikaciju mera koje vode

poboljšanju projektovanju postrojenja i operacija. Takođe, rezultati simulacija se koriste za testiranje softvera sa različitim kombinacijama inputa i početnih uslova.

Pored činjenice da se trenutni simulacioni softver može lako pretvoriti u optimizacioni softver ($DOF > 0$), optimizacija postrojenja se ne izvodi u ovom radu. Po mišljenju autora, ovaj zadatak treba izvesti definisanjem šireg opsega osobina i analize performanse i većom diskusijom što bi vodilo do preopširnog rada. Zato su izdvojena samo neka važna razmatranja, posebno u slučaju KLN ciklusa, sa naznakom da će biti prezentovani u narednim radovima.

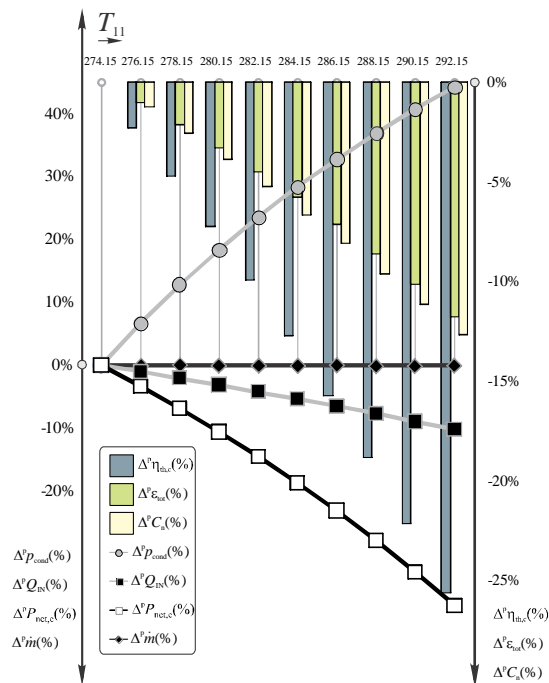
Dalje istraživanje o uticaju radnog fluida na rad postrojenja, prva parametarska simulacija se izvodi u KLN ciklusu. Nasuprot analize koja se primenjuje kod ORC ciklusa gde istraživanje uključuje različite vrste čistih fluida, parametarska analiza kod KLN ciklusa ispituje vezu između sastava polazne smeše i EEC performansi postrojenja.

Koncentracija amonijaka u polaznoj smeši voda – amonijak je nezavisna promenljiva u baznom slučaju postrojenja, a kao parametarska promenljiva proučavana je u opsegu 88.5 % do 81.5 %.

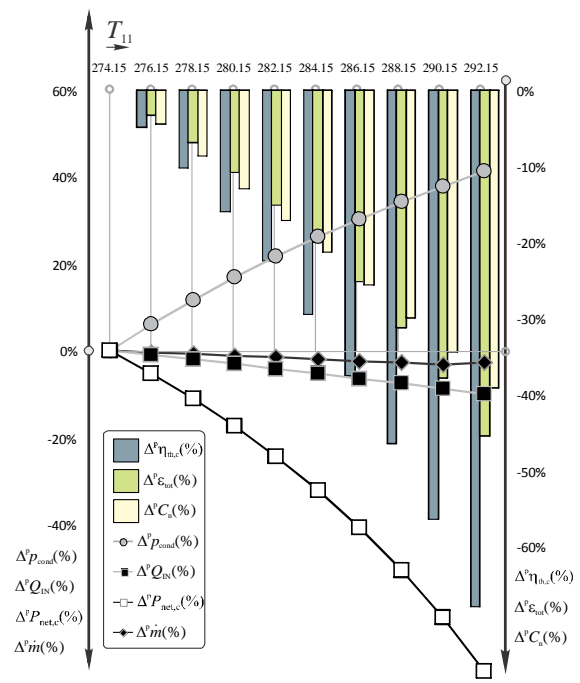


Slika 6.21. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: sastav polazne smeše

Analiza performansi postrojenja razmatra rezultate iz prve dve parametarske simulacije. U prvom unapred definisanoj simulaciji, promenljive se određuju na način koji omogućava simulaciju sa konstantnim masenim protokom, a rezultati ovih simulacija se preuređuju i prikazuju graf-dijagramom na [slici 6.21a](#). Druga simulacija pretpostavlja konstantnu ulaznu toplotu u sistem. Termin ulazna toplota, Q_{in} , je količina toplote koja se prenosi iz geotermalnog vode u ciklus. Rezultati druge simulacije su prikazani na [slici 6.21b](#). Na oba dijagrama, procentne tačke performansi postrojenja ($\Delta^P \eta_{th,c}$, $\Delta^P \varepsilon_{tot}$) se nanose na dno x-ose, dok se procentna razlika osobina i količina ($\Delta^P p_{cn}$, $\Delta^P Q_{in}$, $\Delta^P P_{net,c}$, $\Delta^P G$) se nanose na desnu y-osu. U oba slučaja, pad koncentracije amonijaka ima pozitivan uticaj na performanse postrojenja. Ovi rezultati se slažu sa sličnim istraživanjem izvođenim od strane drugih autora i samog autora ove disertacije [\[36\]](#), [\[37\]](#).



Slika 6.22. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: temperatura okoline



Slika 6.23. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: temperatura okoline

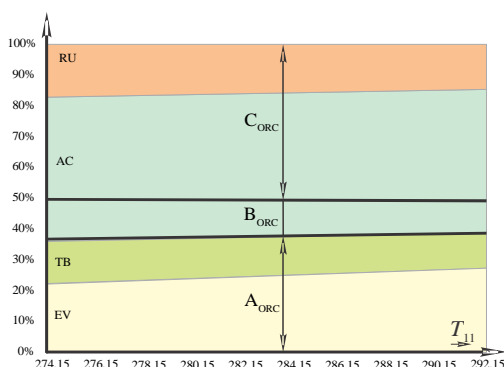
Naredna parametarska analiza izučava uticaj okolne temperature na EEC performanse u oba postrojenja. Pošto se procesi u postrojenju smatraju adijabatskim, uticaj okolne temperature se odnosi samo na ulaznu temperaturu okolnog vazduha u AC. Ova parametarska promenljiva označava nezavisnu promenljivu broj 11 ([slika 6.9](#) i [slika 6.10](#)). S teorijske tačke gledišta, temperatura okolnog vazduha određuje temperaturu kondenzacije radnog fluida i preko njega, pritisak kondenzacije u postrojenju. U matematičkom modelu AC, promenljiva koja određuje

razliku između temperatura kondenzacije i okoline je ΔT_{\min} u AC (broj 12 u oba postrojenja) i u parametarskoj simulaciji njena vrednost je 20°C . Simulacije se takođe izvode sa konstantnim masenim protokom radnog fluida u ORC postrojenju, dok se kod KLN ciklusa maseni protok polazne smeše menja u dozvoljenom opsegu od 2%.

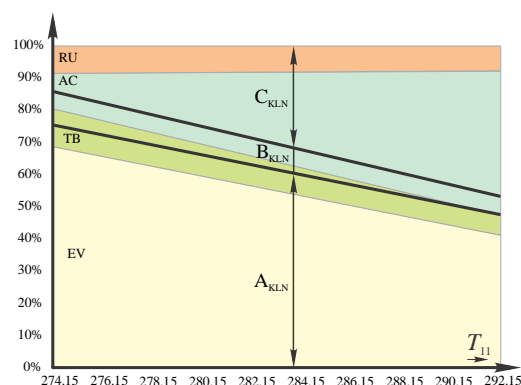
Rezultat parametarske analize ORC postrojenja je prikazan na [slici 6.22](#), a za KLN postrojenja na [slici 6.23](#). Procentne promene performansi postrojenja ($\Delta^P \eta_{\text{th,c}}$, $\Delta^P \varepsilon_{\text{tot}} / \Delta^P C_n$) su date s desne strane y-ose, dok se procentna prazlika osobina i veličina ($\Delta^P p_{\text{cn}}$, $\Delta^P Q_{\text{in}}$, $\Delta^P P_{\text{net,c}}$, $\Delta^P G$) nanosi s leve strane y-ose.

U oba postrojenja, porast okolne temperature ima negativan uticaj na termodinamičke performanse postrojenja i primarno je uzrokovan porastom pritiska kondenzacije. Kod ORC postrojenja, usled konstantnog masenog protoka i fiksnih termodinamičkih osobina izopentana u stanjima 5 i 1, porast pritiska kondenzacije ne dovodi samo do smanjenja ulazne toplote (Q_{in}) i neto snage turbine (P_{TB}), ali je takođe porast ulazne energije koja se mora izvesti iz postrojenja. Tako se količina ulazne toplote menja samo smanjenjem razmenjenog toplotnog fluksa u PH, dok je količina odate toplote toplotni fluks AC. Rezultati simulacija takođe ukazuju da porast okolne temperature smanjuje ukupne cene opreme što se smatra pozitivnim trendom u projektovanju procesa.

Slični trendovi analize se mogu ispratiti kod KLN ciklusa uz napomenu da upotreba smeše kao radnog fluida dodaje jedan stepen slobode. Pad pritiska kondenzacije pod konstantnim pritiskom isparavanja i fiksnim sastavom polazne smeše, takođe smanjuje koncentraciju amonijaka u tokovima gde se sastav smeše označava kao obogaćena smeša. Zbog toga, uticaj okolne temperature na performanse postrojenja je naglašeniji u slučaju KLN ciklusa, nego ORC ciklusa.



Slika 6.24. TEDR dijagram ORC postrojenja; parametarska promenljiva: okolna temperatura

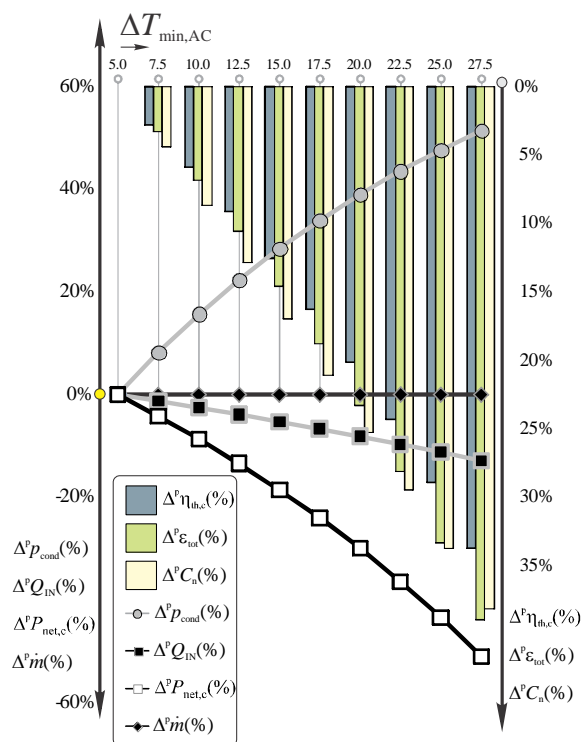


Slika 6.25. TEDR dijagram KLN postrojenja; parametarska promenljiva: okolna temperatura

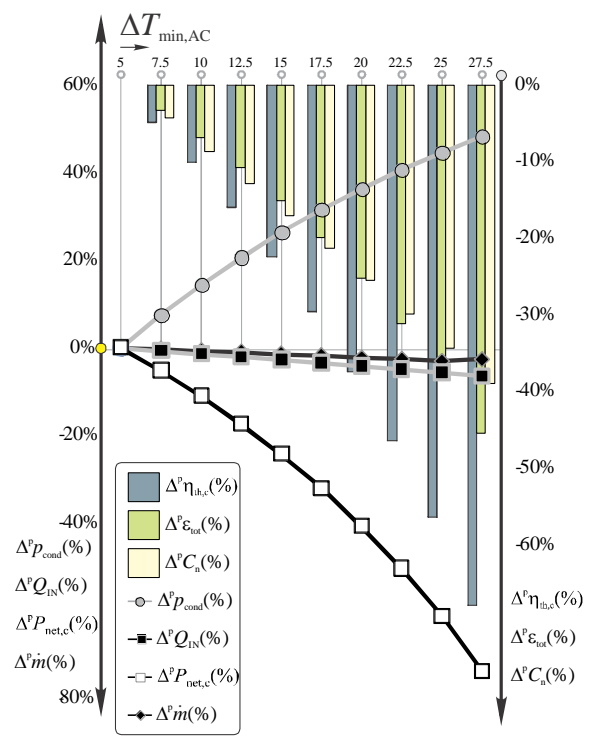
Ovaj zaključak je dodatno potvrđen pomoću TEDR dijagrama na [slici 6.24](#) i [slici 6.25](#). Jasno je da porast okolne temperature kod ORC postrojenja samo neznatno menja raspodelu destrukcije eksergije u komponentama u ukupnoj destrukciji eksergije postrojenja kroz ispitivani opseg. Kod KLN ciklusa je potpuno drugačija situacija. Izvor destrukcije se smenjuje od EV do AC, tj. od podsistema A do podsistema C.

U narednoj parametarskoj simulaciji, temperatura ulaznog rashladnog vazduha u AC se definiše kao unapred fiksirana promenljiva (broj 11 na [slici 6.9](#) i [slici 6.10](#)) sa vrednošću od 15°C, kao i u bazičnom slučaju postrojenja. Nova parametarska promenljiva je minimalna dozvoljena temperaturna razlika u AC u opsegu od 5°C do 27.5°C.

Parametarske simulacije se vrše pod istim početnim uslovima kao i slučaju sa analize okolne temperature. EEC performanse postrojenja prikazane na [slici 6.26](#) i [slici 6.27](#) pokazuju isti trend, pošto porast minimalne temperaturne razlike utiče na sistem na isti način kao i porast ulazne temperature rashladnog vazduha u AC.



Slika 6.26. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: min.temp.razlika AC

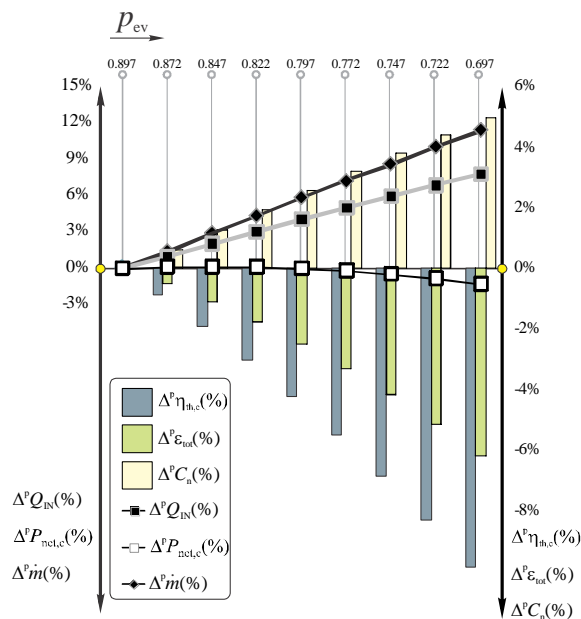


Slika 6.27. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: min.temp.razlika AC

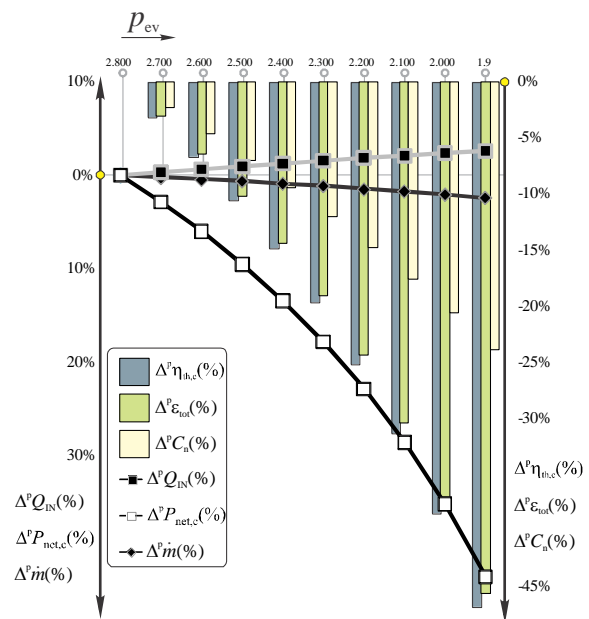
Treća parametarska analiza istražuje vezu između novodefinisane parametarske promenljive pritiska isparavanja i performansi postrojenja. Za razliku od prethodnih slučajeva, parametarska promenljiva u ORC ciklusu ima različite vrednosti i opsege ispitivanja u KLN ciklusu. Za

trenutne simulacije, pritisci kondenzacije u oba postrojenja se prilagođavaju kao nezavisne, unapred definisane promenljive i njihove vrednosti se usvajaju iz bazičnog slučaja postrojenja (slika 6.9 i slika 6.10).

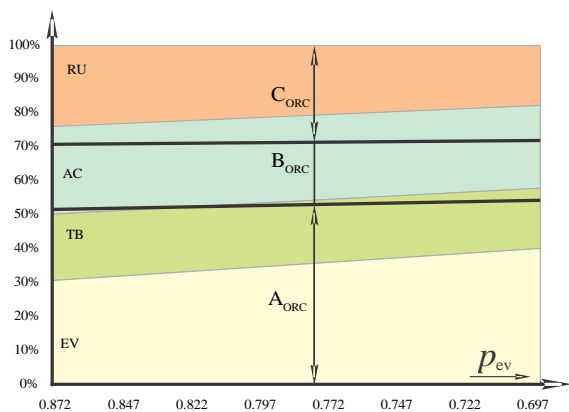
U slučaju ORC postrojenja, pad pritiska isparavanja uzrokuje dva efekta u tačkama stanja koja određuju proces u EV (slika 6.28): temperatura isparavanja (T_5) se smanjuje dok se latentna toplota isparavanja (h_1-h_5) uvećava. Rezultati simulacije isto pokazuju nižu temperaturu geotermalne vode na izlazu iz PH što znači da je ulazna toplota za ciklus (Q_{in}) neznatno porasla kroz ispitivani opseg, slika 6.28. Niža izlazna temperatura geotermalne vode je određena konstantnom vrednošću ΔT_{min} u PH (kao kod bazičnog slučaja). S druge strane, kao posledica energetskog bilansa ORC ciklusa, porast ulazne toplote je praćen skoro konstantnom vrednošću neto snage turbine (i preko nje, minimalnog pada neto snage ciklusa, ($P_{net,c}$) i odgovarajućim porastom toplotnog fluksa u AC. Nova raspodela energije, prouzrokovana nižim pritiskom isparavanja u ciklusu, povećava potrebni maseni protok radnog fluida u postrojenju (G_{wf}). Termodinamičke performanse postrojenja su niže u odnosu na bazični slučaj, dok je ukupna cena procesnih jedinica iznad opsega parametarske promenljive



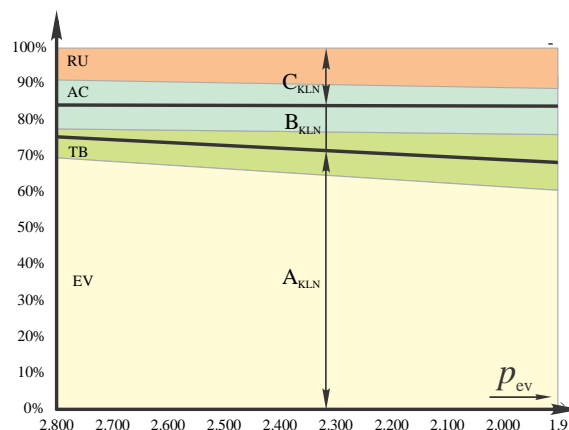
Slika 6.28. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja



Slika 6.29. Analiza performanse KLN postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja



Slika 6.30. TEDR dijagram ORC postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja



Slika 6.31. TEDR dijagram KLN postrojenja; parametarska promenljiva: pritisak isparavanja

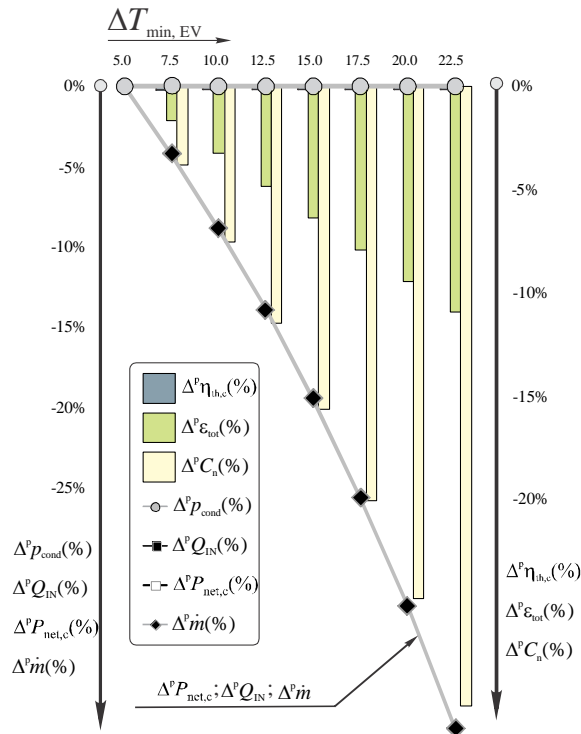
U slučaju KLN postrojenja, [slika 6.29](#), gde je pritisak isparavanja znatno viši od onog u ORC postrojenju, pad ove parametarske promenljive je praćen negativnom procentnom razlikom termodinamičkih performansi i neto snage u postrojenju. S druge strane, ima pozitivan ekonomski efekat na projektovanje postrojenje (ukupna cena procesnih jedinica opada).

Na [slici 6.30](#) TEDR dijagram ORC postrojenja ukazuje da koeficijent ukupne destrukcije u EV raste dok pritisak isparavanja opada. Istovremeno, oblik koji definiše ukupnu destrukciju preostalih procesnih jedinica (RU) ukazuje na trendove opadanja. Dijagram isto pokazuje da ukupne destrukcije između podsistema ostaju skoro iste kroz ispitivani opseg parametarske promenljive. Ovi trendovi pokazuju se količine destrukcije eksergije menjaju samo u dve operacione jedinice, EV i PH, dok kod ostalih one ostaju skoro iste. Kako je prikazano na [slici 6.30](#), količina destrukcije u EV i PH, kroz promenljive pritiske isparavanja u postrojenju, menja se u suprotnim smerovima. Ipak, trend eksergetske efikasnosti postrojenja, [slika 6.28](#), pokazuje da je ukupna destrukcija eksergije u ovim operacionim jedinicama i dalje raste.

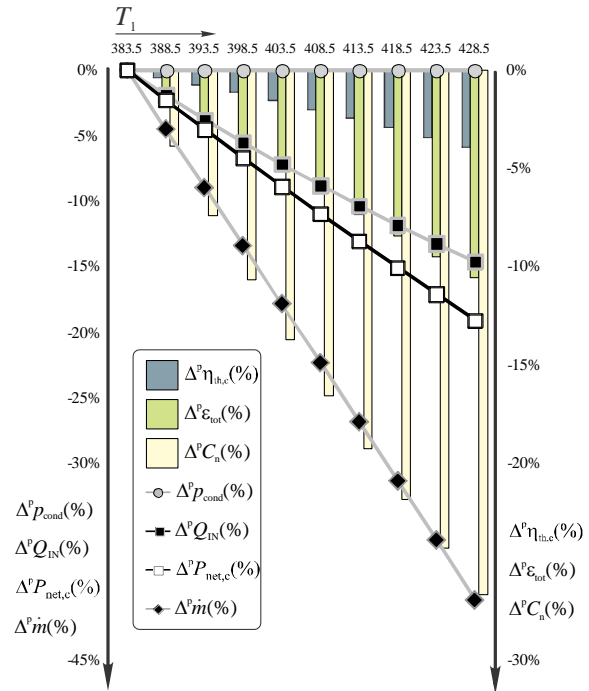
Dijagram ukupne destrukcije eksergije KLN postrojenja, [slika 6.31](#), pokazuje da količina destrukcije raste u turbini kroz ispitivani opseg. Na taj način, KLN postrojenje koje operiše sa nižim pritiskom isparavanja uzrokuje dva negativna efekta u odnosu na bazični slučaj postrojenja: pad snage turbine i porast termodinamičke neefikasnosti u TB. Mada se to ne vidi sa [slike 6.31](#), pad pritiska isparavanja takođe stvara povećanje destrukcije u AC.

Poslednje dve parametarske analize se izvode samo za ORC ciklus. U prvoj, parametarska promenljiva je minimalna dozvoljena temperaturna razlika između geotermalne vode (topli tokovi) i radnog fluida u ciklusu (hladni tokovi) gde stanje 5 u ciklusu definiše poziciju pinč tačke za ove tokove. Teoretski, dozvoljena temperaturna razlika određuje temperaturu ispara-

vanja radnog fluida u ciklusu i indirektno njegov pritisak isparavanja. Prema tome, promena ΔT_{\min} utiće na performanse postrojenja na isti način kao promena pritiska isparavanja o čemu je diskutovano u prethodnoj analizi. Iz tog razloga, u novoj parametarskoj simulaciji, pritisak isparavanja i kondenzacije su prethodno definisane promenljive sa usvojenim vrednostima iz bazičnog slučaja (slika 6.9).



Slika 6.32. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: min.temp.razlika u EV



Slika 6.33. Analiza performanse ORC postrojenja; parametarska promenljiva: temperatura pregrevanja

U ovom slučaju porast ΔT_{\min} u EV smanjuje ulaznu toplotu ciklusa i kao posledicu toga maseni protok radnog fluida. Indirektno, sledeći energetski bilans postrojenja, ove modifikacije takođe snižavaju neto snagu turbine i količinu odate toplote iz postrojenja. Matematička konzistentnost novog simulacionog modela se postiže različitim deklarisanjem promenljive broj 12 (slika 6.9), minimalne dozvoljene temperaturne razlike u AC, od nezavisne promenljive u baznom slučaju postrojenja do nepoznate promenljive. Rezultati simulacija koji su preuređeni i prikazani na slici 6.32 ukazuju na identičan graf procentnih razlika i ΔT_{\min} u EV za maseni protok radnih fluida, ulaznu energiju i neto snagu turbine i kao posledicu toga konstantnu vrednost $\eta_{th,c}$ kroz ispitivani opseg. Kao što se očekuje, eksergetska efikasnost postrojenja je niža od one za bazični slučaj postrojenja.

Druga parametarska analiza istražuje uticaj pregrevanja na performanse postrojenja. U prethodnoj analizi radni fluid u ORC postrojenju isparava do dostizanja stanja zasićene pare, tačka ciklusa 1 na [slici 6.5b](#). Sledeći praksu tradicionalnog Rankinovog parnog ciklusa sa većim stepenom pregrevanja koji povećava toplotnu efikasnost postrojenja, proces isparavanja u ORC ciklusu se proširuje na pregrejanu paru. U novoj parametarskoj simulaciji, izlazna temperatura isparivača postaje nova parametarska promenljiva. Pritisci isparavanja i kondenzacije se proglašavaju unapred definisanim promenljivama i nalaze se na istom nivou kao u baznom slučaju. Parametarska simulacija pretpostavlja konstantni toplotni fluks u EV. To je takođe važeće za druge važne elemente projektovanja postrojenja, posebno kod minimalne dozvoljene temperaturne razlike u razmenjivačima toplote.

Rezultati analize prikazani na [slici 6.33](#) označavaju porast masenog protoka radnog fluida sa većim stepenom pregrevanja. Ovaj trend je posledica energetskog bilansa u EV i konstantne vrednosti ΔT_{\min} u istoj operacionoj jedinici. Pored toga, veći stepen pregrevanja smanjuje toplotni fluks u PH i usled toga se smanjuje ulazna energija u ciklus kroz ispitivani opseg. Neto snaga turbine se snižava usled manjeg masenog protoka i usled činjenice da izopentan pripada grupi suvih ($\xi > 0$) fluida [\[17\]](#). Termodinamička performansa postrojenja koje operiše u režimu pregrevanja je niža od one u bazičnom slučaju postrojenja, dok se ukupna cena procesnih jedinica smanjuje primarno usled nižih vrednosti procesnih količina u postrojenju.

6.7. Zaključna razmatranja poglavlja 6

- Geotermalno polje Velika Ciglena u Hrvatskoj je identifikovano kao jedan od najvrednijih geotermalnih toplotnih izvora i verovatno lokacija na kojoj će biti izgrađeno prvo geotermalno postrojenje na Zapadnom Balkanu.
- Istraživanje prikazano u ovoj disertaciji sadrži projektovanje i analizu performanse binarnog geotermalnog postrojenja koji su predloženi za proizvodnju električne energije u Velikoj Cigleni.
- Plan istraživanja razmatra tri koherentna cilja: projektovanje bazičnog slučaja binarnih postrojenja, razvoj kompjuterskih alata za projektovanje i analizu performanse postrojenja pod nekoliko operativnih uslova.
- Uprkos različitom pristupu istraživanju, konačni rezultati projektovanja i analize potvrđuju zaključak iz rada Guzovića i saradnika [\[28\]](#) da je "ORC ciklus u termodinamičkom smislu bolji što se može objasniti relativno visokim temperaturama geotermalne vode (175°C) i rashladnog vazduha (15°C)."

- Ovaj zaključak može biti od velikog značaja ne samo za primenu binarnih postrojenja u geotermalnom polju Velika Ciglena, već takođe i za druge srednjetermperaturne geotermalne izvore sa sličnim geotermalnim osobinama i okolnim uslovima u Hrvatskoj i Srbiji.
- Autor takođe predlaže da jedino detaljna termodinamička analiza bazirana na pristupu i metodologiji prezentovanom u ovom radu, može biti neophodna praksa za projektovanje geotermalnog postrojenja na svim pojedinačnim lokacijama.

Literatura poglavlja 6

- [1] Antics M, Sanner B, editors. Status of geothermal energy use and resources in Europe. Proceedings of the European Geothermal Congress; 2007; Unterhaching, Germany. [\[citat u tekstu\]](#)
- [2] Doroodchi E, Behdad Moghtaderi B. State-of-the-art in power cycles for geothermal applications and bottoming cycles. Department of Primary Industry and Resources South Australia (PIRSA); 2009. [\[citat u tekstu\]](#)
- [3] Dickson M, Fanelli M. Geothermal power plants: principles, applications and case studies. Kidlington (UK): Elsevier; 2005. [\[citat u tekstu\]](#)
- [4] Sanyal SK. Classification of geothermal systems – a possible scheme. Proceedings Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford (CA); Stanford University, 2005. [\[citat u tekstu\]](#)
- [5] Lee KC. Classification of Geothermal Resources: an Engineering Approach. Proceedings of the 21st Workshop SGP-TR-151 on Geothermal Reservoir Engineering; 1996; Stanford (CA): Stanford University; Tapir Academic Press: 85–92. [\[citat u tekstu\]](#)
- [6] Lee KC. Classification of geothermal resources by exergy. Geothermics 2001; 30(4);431–42. [\[citat u tekstu\]](#)
- [7] Quijano J. Exergy Analysis for the Ahuachapán and Berlin Geothermal Fields. Proceedings of the World Geothermal Congress; 2000; Kyushu-Tohoku, Japan. Tapir Academic Press:861–6. [\[citat u tekstu\]](#)
- [8] Baba A, Ozgener L, Hepbasli A. Environmental and exergetic aspects of geothermal energy. Energ Source 2006;28(7);597–609. [\[citat u tekstu\]](#)
- [9] Hepbasli A. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. Renew Sust Energ Rev 2008;12(3);593–661. [\[citat u tekstu\]](#)
- [10] Ozgener L, Hepbasli A, Dincer I. Energy and exergy analysis of the Gonen geothermal district heating system, Turkey. Geothermics 2005;34;632–45. [\[citat u tekstu\]](#)
- [11] Ozgener L, Hepbasli A, Dincer I. Exergy analysis of Salihli geothermal district heating system in Manisa, Turkey. Int J Energy Res 2005;29(5);398–408. [\[citat u tekstu\]](#)
- [12] Etemoglu AB, Can M. Classification of geothermal resources in Turkey by exergy analysis. Renew Sust Energ Rev 2006;11;1596–1606. [\[citat u tekstu\]](#)
- [13] Ramajo H, Tritlla J, Levresse G, Tello-Hinojosa E, Ramírez G, Pérez H. New SEI tools to evaluate the evolution and anthropic disturbance in geothermal fields: the case of Los Azufres geothermal field, México. Rev Mex Cienc Geol 2010;27(3);520–9. [\[citat u tekstu\]](#)

- [14] Bodvarsson G, Eggers DE. The exergy of thermal water. *Geothermics* 1972;1(3):93–5. [\[citat u tekstu\]](#)
- [15] Brook CA, Mariner RH, Makey DR, Swanson JR, Guffanti M, Muffler LJP. Hydrothermal convection systems with reservoir temperature X90 1C. In: Muffler LJP, editor. Assessment of geothermal resources of the United States-1978. US Geological Survey Circular 790; Library of Congress Card No.:79-600006; 1979. p. 18–85. [\[citat u tekstu\]](#)
- [16] Kestin J. Available work in geothermal energy. Technical Report Contract No.: EY-76-S-02-4051.A001. [\[citat u tekstu\]](#)
- [17] DiPippo R, Marcille DF. Exergy analysis of geothermal power plants. *Geotherm Res Counc Trans* 1984;8:47–52. [\[citat u tekstu\]](#)
- [18] DiPippo R. Second law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. *Geothermics* 2004;33:565–86. [\[citat u tekstu\]](#)
- [19] Cerci Y. Performance evaluation of a single flash geothermal power plant in Denizli, Turkey. *Energy* 2003;28:27–35. [\[citat u tekstu\]](#)
- [20] Dagdas A, Ozturk R, Bekdemir S. Thermodynamic evaluation of Denizli Kızıldere geothermal power plant and its performance improvement. *Energ Convers Manage* 2005;46:245–56. [\[citat u tekstu\]](#)
- [21] Yildirim ED, Gokcen G. Exergy analysis and performance evaluation of Kizildere geothermal power plant, Turkey. *Int J Exergy* 2004;1:316–33. [\[citat u tekstu\]](#)
- [22] Ozturk HK, Atalay O, Yilan A, Hepbasli A. Energy and exergy analysis of Kizildere geothermal power plants, Turkey. *Energ Source A* 2006;28(15):1415–24. [\[citat u tekstu\]](#)
- [23] Koreneos C, Bobolias C, Spachos T. Evaluation of utilization opportunities of geothermal energy in the Kavala region, Greece, using exergy analysis. *Int J Exergy* 2004;1(1):111–27. [\[citat u tekstu\]](#)
- [24] Kanoglu M. Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant. *Geothermics* 2004;31:709–24. [\[citat u tekstu\]](#)
- [25] Setiawan B. Exergy analysis and performance evaluation of Salak geothermal power plant, Indonesia. Auckland, New Zealand: The University of Auckland, Geothermal Institute; 1996. Project Report No.: GEOTHERM 96.24. [\[citat u tekstu\]](#)
- [26] Ganjehsarabi H, Gungor A, Dincer I. Exergetic Performance Analysis of a “Dora II” Geothermal Power Plant in Turkey. *International Green Energy Conference-VI (IGEC-VI)*; 2011; Eskişehir, Turkey. Tapir Academic Press:116–26. [\[citat u tekstu\]](#)
- [27] Kwambai CB. Exergy Analysis of Olkaria I Power Plant, Kenya. *Proceedings World Geothermal Congress*; 2010; Bali, Indonesia. [\[citat u tekstu\]](#)
- [28] Guzović Z, Lončar D, Ferdelji N. Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia by means of geothermal energy. *Energy* 2010;35(8):3429–40. [\[citat u tekstu\]](#)
- [29] Köhler S, Saadat A. Thermodynamic modeling of binary cycles looking for best case scenarios, *International Geothermal Conference*, 2003 Sep; Reykjavík, Iceland. [\[citat u tekstu\]](#)
- [30] Dincer I, Kanoglu M. Refrigeration systems and applications. Chichester (UK): 2nd edition, Wiley; 2010. [\[citat u tekstu\]](#)

- [31] Dorj P. Thermoeconomic Analysis of a New Geothermal Utilization CHP Plant in Tsetserleg, Mongolia [master thesis]. University of Iceland, Department of Mechanical and Industrial Engineering; 2005. ISBN 9979-68-166-7. [\[citat u tekstu\]](#)
- [32] Holman JP. Heat transfer. New York: McGraw-Hill Companies; 2002. [\[citat u tekstu\]](#)
- [33] Bird J. Basic engineering mathematics. Oxford (UK): 4th edition, Elsevier Science & Technology; 2005. [\[citat u tekstu\]](#)
- [34] Chen HJ, Goswami DY, Stefanakos EK. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renew Sust Energ Rev* 2010;14:3059–67. [\[citat u tekstu\]](#)
- [35] Liu B, Chien K, Wang C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery. *Energy* 2004;29:1207–17. [\[citat u tekstu\]](#)
- [36] Majcen B. Steam Turbine for Geothermal Power Plant Lunjkovec–Kutnjak [master thesis]. Zagreb, Croatia. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb; 2009. [\[citat u tekstu\]](#)
- [37] Guzović Z, Majcen B, Cvetković S. Possibilities of electricity generation in the Republic of Croatia from medium-temperature geothermal sources. *Appl Energ* 2012;98:404–14. [\[citat u tekstu\]](#)

7. Analiza energetskeg sistema za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije

Kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije, kogeneracija, predstavlja jedan od ključnih načina racionalnog iskorišćenja energije. U odnosu na odvojenu proizvodnju električne energije u termoelektranama i toplotne energije u kotlarnicama, kogeneracijska postrojenja omogućuju veću energetske efikasnost, značajnu uštedu fosilnih goriva čime se ujedino i smanjuje zagađenje okoline. U našoj zemlji proizvodnja električne energije u kogenerativni postrojenjima je (uobičajen naziv za ovakav tip postrojenja je Termoelektrane-toplane) još uvek malo zastupljena (oko 5%).

U ovom poglavlju predstavljena je analiza rada šest različitih režima rada referentnog kogenerativnog postrojenja (TE-TO Zrenjanin u Zrenjaninu, Srbija). Za analizu je korišćen simulacioni softver sekvencijalnog tipa urađen na programskih platformama EES-a i Microsoft Excel-a. U cilju evaluacije različitih operativnih režima korišćeni su različiti indikatori eksergetske analize. Indikatori su ukazali na osnovne generatore destrukcije eksergije u sistemu (kotlovski set) i na režim sa maksimalnom eksergetskom efikasnošću (Zimski režim 3).

7.1. Postrojenja za kombinovanu proizvodnju korisne snage i toplote

Kombinovana proizvodnja korisne snage i toplotne energije (CHP – combined heat and power) predstavlja proizvodnja dvaju ili više korisnih oblika energije, iz istog primarnog energetskeg izvora [1], [2]. Obzirom da su dva najzastupljenija oblika energije mehanička i toplotna energija, pri čemu se mehanička energija uobičajeno koristi za pokretanje elektrogeneratora, kogeneracija se može definisati kao proces kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije korišćenjem istog primarnog energetskeg izvora. Treba naglasiti da se dobijena mehanička energija takođe može koristiti za pokretanje pomoćne opreme kao što su kompresori i pumpe, dok toplotnu energiju možemo koristiti za procese zagrevanja ili hlađenja, koje se obavlja uz učešće uređaja za apsorpciju baziranih na radnim fluidima u obliku vruće vode, vodene pare ili vrućih gasova [3].

Primene procesa kogeneracije se, obično, klasifikuju u zavisnosti od sektora u kome se on pojavljuje na: kogeneracijska postrojenja u javnom sektoru, kogeneracijska postrojenja u industrijskom sektoru, kogeneracijska postrojenja u gradskom stambenom sektoru i kogeneracijska postrojenja u seoskom sektoru. Najveći broj postrojenja zastupljen je u javnom sektoru, gde ova postrojenja, pored primarne proizvodnje električne energije, služe i kao izvori snabdevanja toplotnom energijom obližnjih gradova ili njihovih delova, industrijskih objekata itd. U klimatski toplijim predelima toplotna energija iz kombinovanih postrojenja služi kao pogon uređaja za hlađenje pomoću apsorpcije. U tom slučaju projektuje se centralno rashladno postrojenje uz distribuciju rashladne vode prema lokalnim rashladnim jedinicama. Toplotna energija može se i direktno isporučivati lokalnim klima uređajima. U novije vreme kombinovana postrojenja mogu se koristiti i kao proizvodna jedinica u tretmanu otpadnih voda i materija. Pri tome se otpad koristi kao primarno gorivo, a dobijena toplotna energija transferiše, kako komunalnim potrošačima, tako i fabrici otpadne vode za realizaciju procesa u digestorima [4].

Kogenerativna postrojenja mogu pripadati *topping* ili *bottoming* sistemima [5]. U *topping* sistemima, radni fluid visokog energetskeg potencijala i visoke temperature (otpadni gasovi, vodena para) primarno se koristi za generisanje korisne snage, dok se toplotna energija transferiše ka drugim procesima tek kada radni fluid dostigne nižu temperaturu.

Kod *bottoming* sistema, radni fluid visoke temperature se primarno koristi za transfer toplotne energije u proizvodne procese, te se nakon toga otpadna toplota iz procesa koristi kao di-

rektan pokretač gasno-turbinskih postrojenja ili indirektno u utilizatorskim kotlovima za generisanje pare.

Kogeneracijski sistemi bazirani na parnoj turbini sastoje se iz tri glavne komponente: izvora toplote, parne turbine i rashladnog profila. Sistemi rade u Rankinovom ciklusu, u osnovnoj formi ili sa poboljšanjima u vidu međupregrevanja ili regenerativnog zagrevanja napojne vode [6], [7].

Kogeneracijski sistemi zasnovani na parnoj turbini uglavnom se klasifikuju u dve grupe: kogeneracijski sistemi sa protivpritisnom turbinom i kogeneracijski sistemi sa kondenzacionom turbinom i regulisanim odvođenjem pare. Kod prvog tipa postrojenja vodena para se po korišćenju u turbini, upućuje u proces izvan kogeneracijskog postrojenja u cilju transfera toplotne energije. Iz procesa, para se u sistem vraća u vidu kondenzata, koji se upućivanjem u kotao ponovno energetski oplemenjuje. Teorijska ukupna energetska efikasnost ovog postrojenja može da dostigne 85%.

Kod sistema sa kondenzacijskom turbinom i regulisanim oduzimanjem pare, vodena para kao izvor toplotne energije generiše se regulisanim oduzimanjem iz turbine pri odgovarajućem pritisku i temperaturi. Preostala vodena para se koristi u turbini za generisanje mehaničkog rada do pritiska koji vlada u kondenzatoru. Izdvojena vodena para takođe, može da se koristi za regenerativno zagrevanje napojne vode kojom se napaja kotlovsko postrojenje, što povećava energetska efikasnost sistema. U poređenju sa prethodnim postrojenjem sistema sa kondenzacijskom turbinom i regulisanim oduzimanjem pare ima povećan nivo operativnih troškova i manju ukupnu energetska efikasnosti. Međutim, kod ovakvih sistema regulacija proizvodnje električne energije je znatno savršenija nego u prethodnom slučaju [8].

7.2. Opis tehnološkog procesa u energetskom sistemu TE-TO Zrenjanin

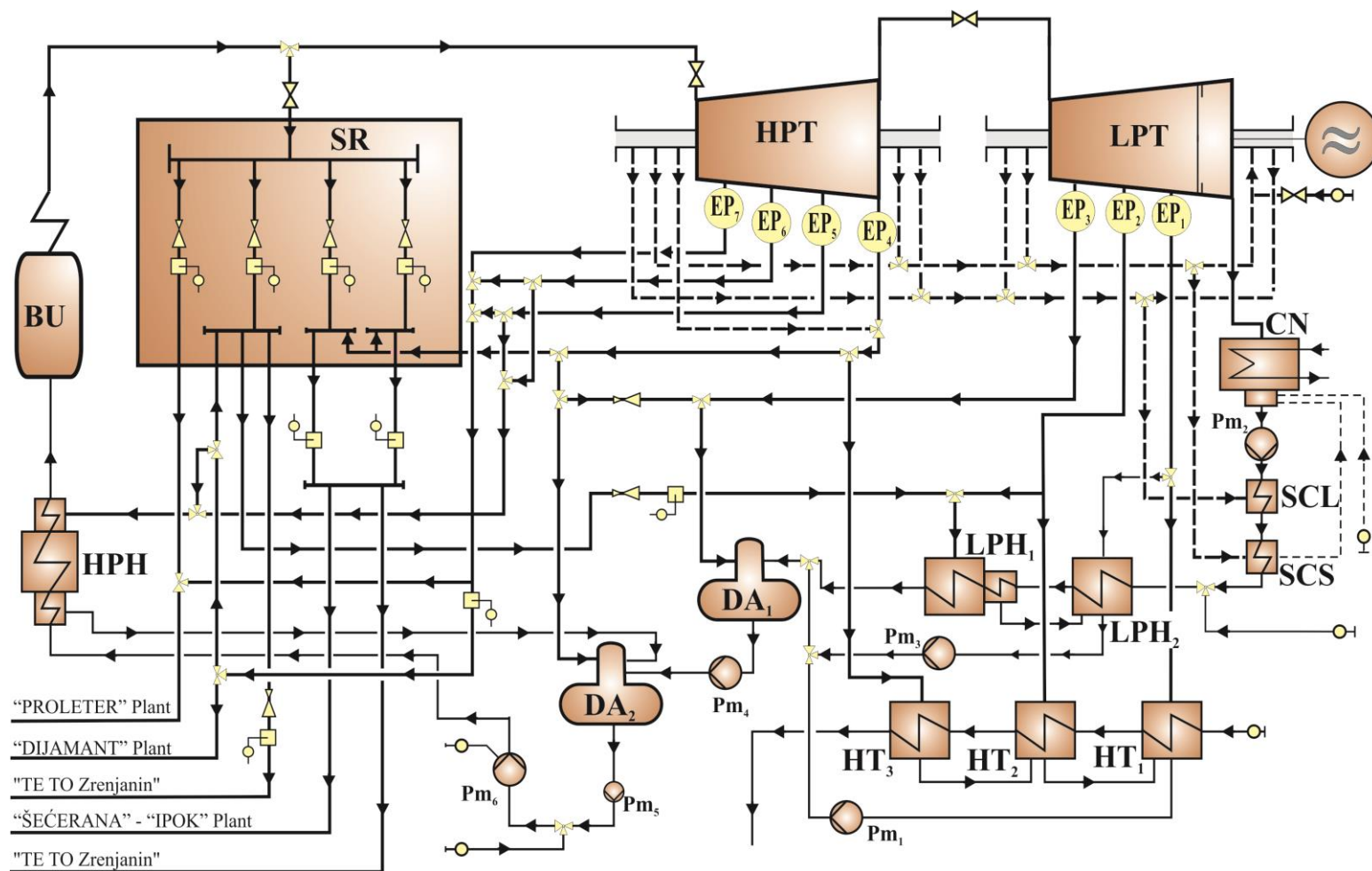
Postrojenje za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije termoelektrana-toplana Zrenjanin (TE-TO Zrenjanin) pripada grupaciji kogeneracijskih postrojenja sa kondenzacijskom turbinom i regulisanim oduzimanjem pare. Ovo postrojenje predstavlja energetski izvor za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije za podmirenje potreba grada Zrenjanina. Tehnološka šema postrojenje prikazana je na [slici 7.1](#), a njen detaljni opis dat je u [\[9\]](#).

U slučaju nominalnog opterećenja turbina, za obezbeđenje potrebne količine pare koriste se dva kotlovska agregata (BU) jedinične maksimalne trajne produkcije pare od 91.66 kg/s

(pritisak pare na izlazu iz kotla 11.77 MPa, temperatura pare na izlazu iz kotla 540°C). Turbina je snabdevena sa ukupno sedam oduzimanja pare (EP), od kojih su oduzimanja br. 1÷4 (EP₁, EP₂, EP₃) nalaze na turbini niskog pritiska (LPT), a oduzimanja 4÷7 (EP₄, EP₅, EP₆, EP₇), na turbini visokog pritiska (HPT). Oduzimanja br. 1 i 4 (EP₁, EP₄) su sa mogućnošću regulisanja pritiska, dok su ostala neregulisana.

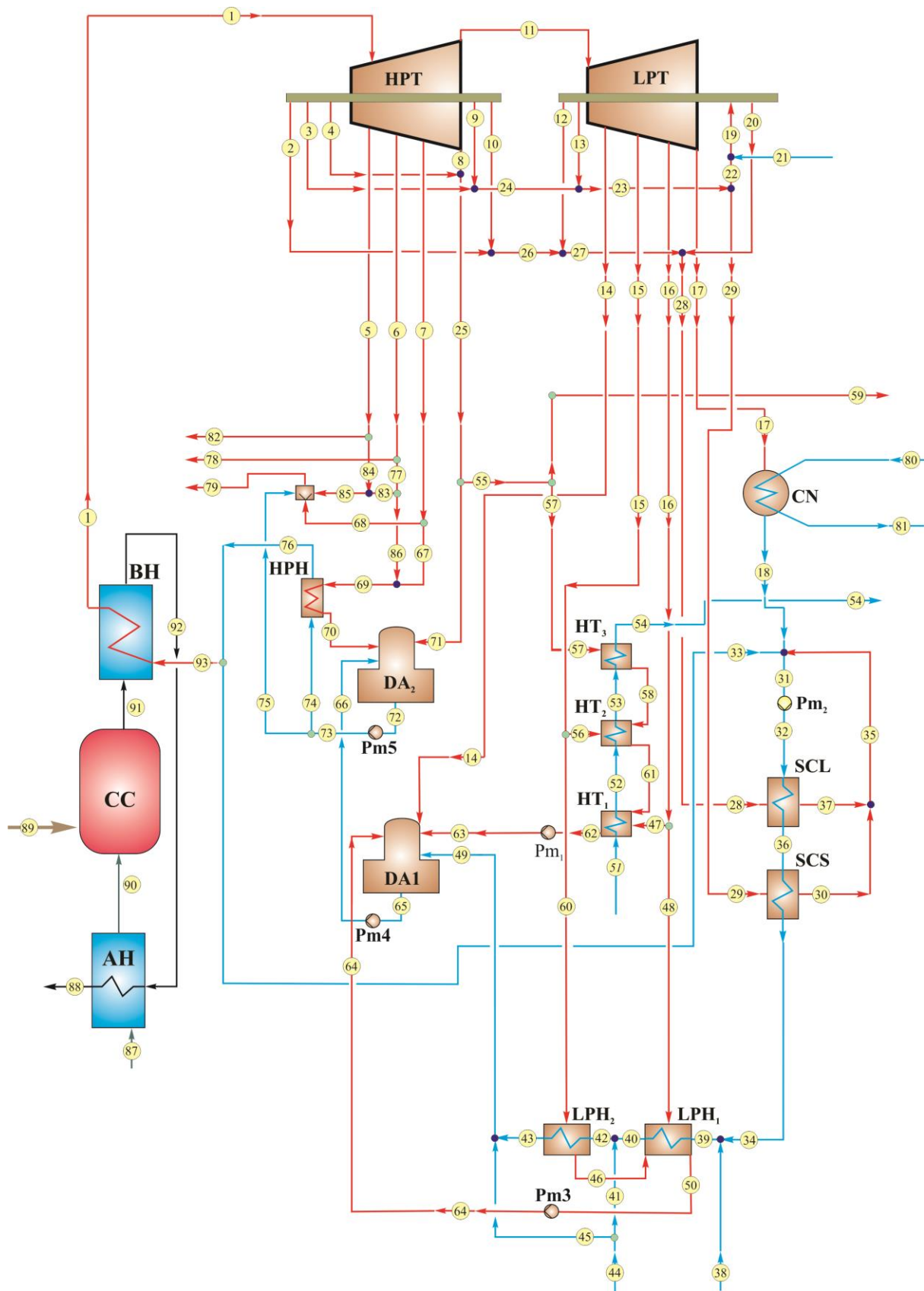
Kondenzovanje pare na izlasku iz turbine vrši se u dvodelnom, dvoprotočnom površinskom kondenzatoru (CN). Pritisak kondenzacije zavisi od temperature rashladne vode i količine dovedene pare u kondenzator (interval 3.4-12.7 kPa). Pored pare iz turbine u kondenzator se dovodi i para i kondenzat iz vakumskog ekspandera, paro-vazдушna smeša iz uređaja u kojima se u toku pogona javlja vakuum, kao i dodatna demineralizovana voda. Predgrevanje kondenzata ostvaruje se njegovim provođenjem kroz hladnjak pare iz labirintskih zaptivača (SCL), hladnjak zaptivne pare (SCS) i dva zagrejača niskog pritiska (LPH). Snabdevanje parom navedenih uređaja vrši se iz labirintskih zaptivača, odnosno turbinskih oduzimanja 1 i 2 (EP₁, EP₂). U slučaju rada bloka bez turbine parom se snabdeva samo regenerativni zagrejač br. 2. Temperatura kondenzata na izlazu iz postrojenja za predgrevanje niskog pritiska kreće se u intervalu 101 do 121°C. Kondenzat koja se javlja u pogonu TE-TO oslobađa se rastvorljivih količina vazduha dvostepenom deaeracijom. Prvi stepen deaeracije obavlja se u dva deaeratora (DA₁, DA₂) postavljena na zajedničkom napojnom rezervoaru niskog pritiska. U režimima rada postrojenja sa turbinom, deaeratori niskog pritiska snabdevaju se parom iz trećeg turbinskog oduzimanja (EP₃) ili se snabdevanje parom vrši pomoću stanice za redukciju pritiska pare (SR). Parametri oduzete pare variraju u zavisnosti od režima rada postrojenja, u granicama od 0.2 do 0.4 MPa, pri čemu se ostvaruje zagrevanje kondenzata do temperature 140°C. U napojni rezervoar niskog pritiska, dovodi se i kondenzat iz zagrejača dodatno omekšane vode toplifikacionog sistema, kondenzat iz hladnjaka parovazdušne smese, kao i recirkulacioni kondenzat. Zagrevanje napojne vode od temperature u napojnom rezervoaru (157°C), do konačne temperature napojne vode na ulazu u kotao (180 do 210°C), vrši se pomoću regenerativnih zagrejača visokog pritiska (HPH).

Postrojenje za toplifikaciju obuhvata opremu za zagrevanje vode toplifikacionog sistema, set pumpnih jedinica potrebnih za savlađivanje otpora u magistralnim cevovodima i gradskoj razvodnoj mreži, kao i procesne jedinice za termičku pripremu dodatne vode.



Legenda: BU-kotlovska jedinica, CN-kondenzator, DA-deaerator, EP-tehnološko oduzimanje pare, HPH-grejač visokog pritiska, HPT-turbina visokog pritiska, HT-zagrejač toplifikacionog sistema, LPH-grejač niskog pritiska, LPT-turbina niskog pritiska, Pm-pumpa, SCL-hladnjak pare sa labirintskih zaptivača, SCS-hladnjak pare sa zaptivača, SR-stanica za redukciju pritiska pare

Slika 7.1. Tehnološka šema postrojenja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije



Slika 7.2. Fizički model kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin

Tabela 7.1. Pregled strujnih tokova u tehnološkoj šemi postrojenja

Br. toka	Opis strujnog toka	Br. toka	Opis strujnog toka
1	Osnovna para	48	Para ka grejaču niskog pritiska LPH ₁
2	Para iz labirintskih zaptivača	49	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂
3	Para iz labirintskih zaptivača	50	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁
4	Para iz labirintskih zaptivača	51	Voda na ulazu u toplifikacioni sistem
5	Para iz tehnološkog oduzimanja	52	Voda između baznih zagrejača HT ₁ , HT ₂
6	Para iz tehnološkog oduzimanja	53	Voda između zagrejača HT ₂ , HT ₃
7	Para iz tehnološkog oduzimanja	54	Voda na izlazu iz toplifikacionog sistema
8	Para iz tehnološkog oduzimanja	55	Para iz tehnološkog oduzimanja
9	Para iz labirintskih zaptivača	56	Para iz tehnološkog oduzimanja
10	Para iz labirintskih zaptivača	57	Para ka vršnom zagrejaču HT ₃
11	Para ka turbini niskog pritiska	58	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₂
12	Para iz labirintskih zaptivača	59	Para iz tehnološkog oduzimanja
13	Para iz labirintskih zaptivača	60	Para iz tehnološkog oduzimanja
14	Para iz tehnološkog oduzimanja	61	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₁
15	Para iz tehnološkog oduzimanja	62	Topla voda iz baznog zagrejača HT ₁
16	Para iz tehnološkog oduzimanja	63	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
17	Para ka kondenzatoru	64	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
18	Kondenzat iz kondenzatora	65	Voda iz deaeratora DA ₁
19	Para iz labirintskih zaptivača	66	Voda ka deaeratoru DA ₂
20	Para iz labirintskih zaptivača	67	Para iz labirintskih zaptivača
21	Rashladna voda	68	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
22	Para iz labirintskih zaptivača	69	Para ka grejaču visokog pritiska HPH
23	Para iz labirintskih zaptivača	70	Para iz grejaču visokog pritiska HPH
24	Para iz labirintskih zaptivača	71	Para iz tehnološkog oduzimanja
25	Para iz tehnološkog oduzimanja	72	Voda iz deaeratora DA ₂
26	Para iz labirintskih zaptivača	73	Voda ka tehnološkom oduzimanju
27	Para iz labirintskih zaptivača	74	Napojna voda ka grejaču v.p. HPH
28	Para iz labirintskih zaptivača	75	Voda ka ekspanderu
29	Para iz labirintskih zaptivača	76	Para iz grejača visokog pritiska HPH
30	Para iz hladnjaka pare sa zaptivača	77	Para iz tehnološkog oduzimanja HPH
31	Para iz hladnjaka pare iz lab.zaptivača	78	Para iz tehnološkog oduzimanja na izlazu
32	Para ka kondenzatoru	79	Para iz ekspandera
33	Demineralizovana voda	80	Voda ka kondenzatoru
34	Kondenzat iz kondenzatora	81	Voda iz kondenzatora
35	Kondenzat ka hladnjaku pare iz lab. zapt.	82	Para iz tehnološkog oduzimanja
36	Kondenzat iz hladnjaka pare iz lab. zapt.	83	Para iz tehnološkog oduzimanja
37	Kondenzat iz hladnjaka pare sa zaptivača	84	Para iz tehnološkog oduzimanja
38	Demineralizovana voda	85	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
39	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₁	86	Para iz tehnološkog oduzimanja ka izlazu
40	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁	87	Hladan vazduh ka predgrejaču
41	Povratna voda ka grejaču LPH ₂	88	Dimni gasovi iz predgrejača
42	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₂	89	Gorivo ka ložištu
43	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂	90	Topao vazduh ka ložištu
44	Povratna voda na ulazu u postrojenje	91	Dimni gasovi ka razmenjivaču kotla
45	Povratna voda ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
46	Voda iz grejača ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
47	Para ka vršnom zagrejaču HT ₁	93	Napojna voda ka razmenjivaču kotla

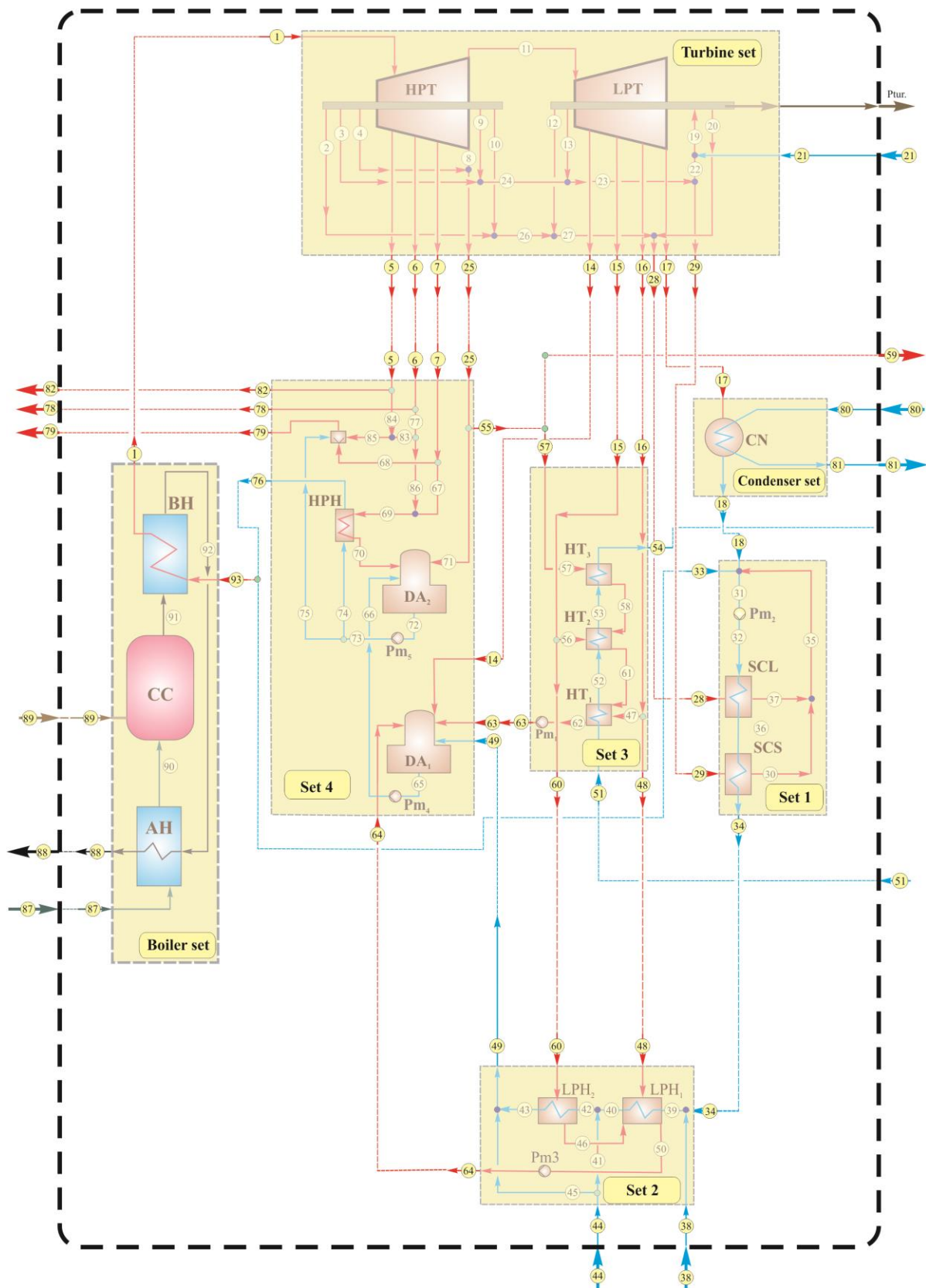
Toplifikacioni set obezbeđuje sve potrebne funkcije izvora za grejanje grada Zrenjanina. Zadana temperatura vode za toplifikaciju postiže se trostepenim zagrevanjem. Prva dva zagrejača (HT₁, HT₂) su bazna i koriste se za zagrevanje vode do 110°C, dok se za zagrevanje vode do viših temperatura uključuje i vršni zagrejač (HT₃). Bazni zagrejač HT₁ se snabdeva parom sa iz turbinskog oduzimanja br.1 (EP₁). U slučaju radnog režima sa proizvodnjom električne snage bazni zagrejač HT₂ i vršni zagrejač HT₃ se snabdevaju parom iz turbinskih oduzimanja br. 2 i 4, respektivno (EP₂, EP₄) ili se neophodna para u ova dva uređaja dobija pomoću iz stanice za redukciju pritiska pare (SR).

7.2. Fizički i matematički model kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin

Radi definisanja matematičkog modela energetskog sistema TE-TO Zrenjanin izvršeno je sagledavanje materijalnih i energetskih tokova u okviru postojećeg postrojenja. Na [slici 7.2](#) je prikazan fizički model kogenerativnog postrojenja²⁸, dok je u [tabeli 7.1](#) dat opis svih strujnih tokova sa date tehnološke šeme posmatranog sistema. Dekompozicija fizičkog modela na funkcionalne sisteme prikazana je [slici 7.3](#), dok je opis sastavnih elemenata tih sistema dat u [tabeli 7.2](#).

U odnosu na prethodne studije u ispitivani sistem je uveden je novi zaseban podsistem za proizvodnju tehnološke (primarne) pare koji zamenjuje kotlovsku jedinicu (BU) sa [slike 7.1](#) i čiji je zadatak da proizvedenu paru šalje ka turbini visokog pritiska. Ovaj tzv. kotlovski set se sastoji od tri procesne jedinice: predgrejača vazduha (AH), ložišta (CC) i razmenjivačkog dela kotla (BH). Zagrevanje spoljašnjeg hladnog vazduha na oko 500°C vrši se u predgrejaču (AH) putem toplote dimnih gasova iz razmenjivačkog dela kotla (BH). Dobijeni topao vazduh i gorivo ulaze u ložište (CC) gde se obavlja sagorevanje goriva, a dobijeni produkti sagorevanja se direktno uvode u razmenjivački deo kotla (BH). Korišćenjem toplote produkata sagorevanja (dimni gasovi) u razmenjivačkom delu kotla (BH) vrši se produkcija tehnološke pare temperature oko 540°C iz napojne vode koja odgovara delu povratne vode iz grejača visokog pritiska (HPH) ka kondenzatoru (CN).

²⁸ Fizički model postrojenja, kao i modeli operativnih režima, predstavljaju redefinisane tehnološke šeme iz [9], obzirom da se tokom istraživanja u ovoj tezi pojavila potreba za redukcijom broja strujnih tokova i njihovom drugačijom numeracijom.



Slika 7.3. Funkcionalna šema kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin sa podelom na sastavne podsisteme

Tabela 7.2. Elementi sistema i podsistema u modelu TE-TO Zrenjanin

Podsistem broj 1 – Turbinski set		
Turbina visokog pritiska HPT, tehnološka turbinska oduzimanja pare		Turbina niskog pritiska LPT, tehnološka turbinska oduzimanja pare
-Turbinsko oduzimanje 7- strujni tok 5.		-Turbinsko oduzimanje 3- strujni tok 14.
-Turbinsko oduzimanje 6- strujni tok 6.		-Turbinsko oduzimanje 2- strujni tok 15.
-Turbinsko oduzimanje 5- strujni tok 7.		-Turbinsko oduzimanje 1- strujni tok 16.
-Turbinsko oduzimanje 4- strujni tok 8.		
Podsistem broj 2 – Set 1	Podsistem broj 3 – Set 2	Podsistem broj 4 – Set 3
Toplifikacioni set	Set za predgrevanje kondenzata	Set za pripremu napojne vode kotla
1. Razmenjivač HT ₁ -prvi bazni zagrejač vode za toplifikaciju.	1. Kondenzator CN	1. Deaerator DA ₁ -deaerator niskog pritiska.
2. Razmenjivač HT ₂ -drugi bazni zagrejač vode za toplifikaciju.	2. Razmenjivač LPH ₂ -regenerativni zagrejač niskog pritiska 2	2. Deaerator DA ₂ -deaerator visokog pritiska.
3. Razmenjivač HT ₃ -vršni zagrejač vode toplifikaciju	3. Razmenjivač LPH ₁ -regenerativni zagrejač niskog pritiska 1	3. Razmenjivač HPH -grejač visokog pritiska
4. Pumpa Pm ₁	4. Razmenjivač SCS-hladnjak pare sa zaptivača 1	4. Atmosferski ekspander EX
	5. Razmenjivač SCL-hladnjak pare iz labirintskih zaptivača 2	5. Kondenzatorska pumpa Pm ₄
	6. Pumpa Pm ₂	6. Kondenzatorka pumpa Pm ₅
	7. Pumpa Pm ₃	
Podsistem broj 5 –Kotlovski set		
1. Razmenjivač AH- predgrejač vazduha		
2. Ložište CC		
3. Razmenjivač BH- razmenjivački deo kotla		

Proizvedena para se prosleđuje ka turbini visokog pritiska (HPT), a ohlađeni dimni gasovi se koriste za zagrevanje hladnog vazduha u predgrejaču (AH) gde se oni dodatno hlade i na kraju uklanjaju iz sistema

Pri izradi matematičkog modela kako komponenti tako i subsistema izučavanog postrojenja usvojena su određena uprošćenja:

- Procesi u svim komponentama, podsistemima i celokupnom sistemu stacionarni.
- Pretpostavlja se adijabatski karakter ($\delta Q_0=0$) procesa ekspanzije, razmene toplote, mešanja i deareacije u sistemu.
- U modelu su zanemarene komponente vezane za kinetičku i potencijalnu energiju strujnih tokova ($v_i=0$, $z_i=0$), kao i komponente.
- U proračunu nisu definisane snage pumpnih jedinica.

Matematički model svake od komponenta, seta i sistema baziran je na jednačinama:

- Materijalnog bilansa za stacionarne stujne procese, [\(7.1\)](#):

$$\sum_{j \in \text{IN}} G_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}} G_{j,\text{out}} = 0 \quad (7.1)$$

– za $j = \text{CN, DA, EX, HPH, HPT, HT, LPH, LPT, SCS, SCL}$

- Energetskog bilansa za adijabatske stacionarne stujne procese, [\(7.2\)](#):

$$\sum_{j \in \text{IN}} G_{j,\text{in}} h_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}} G_{j,\text{out}} h_{j,\text{out}} = 0 \quad (7.2a)$$

– za $j = \text{CN, DA, EX, HPH, HT, LPH, SCS, SCL}$

$$\sum_{j \in \text{IN}} G_{j,\text{in}} h_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}} G_{j,\text{out}} h_{j,\text{out}} - W_j = 0 \quad (7.2b)$$

$$h_{j,\text{in}} - h_{j,\text{out}} - \eta_{\text{is}} (h_{j,\text{in}} - h_{j,\text{out(s)}}) = 0 \quad (7.2c)$$

– za $j = \text{LPT, HPT}$;

- Eksenergetskog bilansa za adijabatske stacionarne stujne procese, [\(7.3\)](#):

$$\sum_{j \in \text{IN}} G_{j,\text{in}} e_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}} G_{j,\text{out}} e_{j,\text{out}} - E_{D,j} = 0 \quad (7.3a)$$

– za $j = \text{CN, DA, HPH, HT, LPH, SCS, SCL}$

$$\sum_{j \in \text{IN}} G_{j,\text{in}} e_{j,\text{in}} - \sum_{j \in \text{OUT}} G_{j,\text{out}} e_{j,\text{out}} - W_j - E_{D,j} = 0 \quad (7.3b)$$

– za $j = \text{LPT, HPT}$;

$\text{IN} \in \{1, 2, \dots, \text{in}, \dots\}$ skup ulaznih strujnih tokova,

$OUT \in \{1, 2, \dots, out, \dots\}$ skup izlaznih strujnih tokova.

Obzirom da je kotlovski set pridodat modelu dodatne jednačine su:

- ukupni maseni bilans kotlovskog seta, (7.4):

$$G_{87} + G_{89} + G_{93} = G_1 + G_{88} \quad (7.4)$$

- ukupni energetska bilans kotlovskog seta, (7.5):

$$H_{D,89} + G_{87}h_{87} + G_{89}h_{89} + G_{93}h_{93} = G_1h_1 + G_{88}h_{88} \quad (7.5)$$

gde je $H_{D,88}$ donja toplotna moć goriva.

Matematički model komponenti razvijen je na bazi generičkih bilansa prikazanih u Prilogu P3.

7.4. Simulacioni softver za analizu kogenerativnog postrojenja TE-TO Zrenjanin

U cilju energetske analize i ispitivanja eksergetske efikasnosti referentnog postrojenja korišćen je simulacioni paket EXCHP na programskoj platformi *Microsoft Excel*-a preuzet iz rada [10]. Simulacioni paket je sekvencijalnog tipa sa dodatkom funkcija za automatski proračun parametara vodene pare/kondenzata, napravljen je kao kombinacija grafičkih i tabelarnih datoteka u okviru platforme *Microsoft Excel*-a [11], [12]. Strukturalno je podeljen na tri osnovna dela paketa u kojima se: bira režim rada referentnog postrojenja, unose ulazni podaci neophodni za simulaciju izabranog režima rada i vrši pregled simulacionih rezultata.

Softverski paket je baziran na ispitivanju 6 različitih režima rada postrojenja TE-TO Zrenjanin za slučaj upotrebe dve vrste goriva (prirodni gas i mazut), uz eksergijsku analizu kako elemenata, tako i sistema i podsistema u okviru postrojenja. Ovaj osnovni paket je proširen upotrebom softvera EES (Engineering Equation Solver) u cilju simulacije kotlovskog seta i turbinskog seta.

7.5. DOF analiza kotlovskog seta - sistema za produkciju tehnološke pare

Prevođenje matematičkog modela kotlovskog seta u numerički model uz ispitivanje njegove matematičke konzistentnosti je omogućeno analizom stepena slobode izučavanog kotlovskog seta (podsistema za proizvodnju tehnološke pare) koja se vrši posebno za tri sastavna dela tog sistema – predgrejača vazduha, ložišta i razmenjivačkog dela kotla.

Osnovne smernice za proračun broja promenljivih i relacija podsistema kotlovskeg seta su sledeće:

- broj materijalnih bilansa u jedinicama odgovara broju hemijskih komponenti, dok za sva tri subsistema postoji jedan nezavistan energetski bilans;
- dodatne promenljive u energetskom bilansu (promenljive u vezi sa razmenom toplote) su donja toplotna moć goriva kod analize ložišta, a fluks razmenjene toplote kod analize pregrejača vazduha i razmenjivačkog dela kotla;
- kod analize ložišta, konstanta u vezi sa transformacijom materijalnih tokova (parametar opreme) koja se uzima u obzir pri popisu promenljivih je koeficijent viška vazduha;
- postoje dva interkonektivna toka na nivou čitavog kotlovskeg seta (podsistema za proizvodnju pare) sa jednakim brojem hemijskih komponenti za istu vrstu goriva: dimni gasovi iz ložišta ka kotlovskom razmenjivaču i dimni gasovi iz razmenjivača kotla ka predgrejaču vazduha.

Pri vršenju analize stepena slobode posmatranog sistema i njegovih podjedinica usvojene su sledeće specifikacije:

- tokovi vazduha, dimnih gasova i goriva se nalaze na pritisku okoline za koju se pretpostavljaju atmosferski uslovi, (7.6):

$$p_i = 0.1 \text{ MPa} \quad (i = 87..92) \quad (7.6)$$

- temperatura goriva prema jednačini (7.7) odgovara temperaturi ulaznog vazduha za koju se pretpostavlja vrednost 5°C za zimski režim, a 20°C za letnji režim rada postrojenja.

$$T_{87} = T_{89} \quad (7.7)$$

- smatra se da su vazdušni tokovi idealne dvokomponentne smeše azota i kiseonika, dok se udeo ostalih komponenti zanemaruje tako da važi jednačina (7.8):

$$x_{N_2,i} + x_{O_2,i} = 1 \quad (i = 87, 90) \quad (7.8)$$

- udeo pepela i vlage u gorivu (prirodni gas, mazut) se zanemaruje, (7.9):

$$x_w = x_{ash} = 0 \quad (7.9)$$

- prirodni gas se pri analizi smatra smešom četiri elementa (ugljenika, vodonika, azota i kiseonika) čiji su udeli definisani sadržajem gasovitih ugljovodoničnih komponenti goriva (metan, etan, butan, pentan, heksan, heptan), azota i ugljendioksida, dok mazut sadrži pet hemijskih elemenata (ugljenik, vodonik, azot, kiseonik, sumpor).

Tabela 7.3. DOF analiza predgrejača vazduha (AH)

Gorivo: Prirodni gas		Predgrejač vazduha	Gorivo: Mazut		Predgrejač vazduha
$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C+2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [2(2+2) + 2(4+2)] + 1 + 0 + 0$		21	$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C+2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [2(2+2) + 2(5+2)] + 1 + 0 + 0$		23
Nezavisne relacije	Bilans		Nezavisne relacije	Bilans	
	Materijalni	2		Materijalni	2
	Energetski	1		Energetski	1
	Pomoćne relacije	1		Pomoćne relacije	1
	Broj specifikacija promenljivih			Broj specifikacija promenljivih	
	Pritisak	4		Pritisak	4
	Temperatura	1		Temperatura	1
	Sastav	5		Sastav	6
Konstante	0	Konstante	0		
N_f		14	N_f		15
$N_d, N_d = N_v - N_f$		7	$N_d, N_d = N_v - N_f$		8

Tabela 7.4. DOF analiza ložišta (CC)

Gorivo: Prirodni gas		Ložište	Gorivo: Mazut		Ložište
$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C+2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [1(2+2) + 2(4+2)] + 1 + 0 + 1$		18	$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C+2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [1(2+2) + 2(5+2)] + 1 + 0 + 1$		20
Nezavisne relacije	Bilans		Nezavisne relacije	Bilans	
	Materijalni	4		Materijalni	5
	Energetski	1		Energetski	1
	Pomoćne relacije	-		Pomoćne relacije	-
	Broj specifikacija promenljivih			Broj specifikacija promenljivih	
	Pritisak	3		Pritisak	3
	Temperatura	-		Temperatura	-
	Sastav	1		Sastav	1
Konstante	-	Konstante	-		
N_f		9	N_f		10
$N_d, N_d = N_v - N_f$		9	$N_d, N_d = N_v - N_f$		10

Tabela 7.5. DOF analiza razmenjivačkog dela kotla (BH)

Gorivo: Prirodni gas		Razmenjivački deo kotla (BH)	Gorivo: Mazut		Razmenjivački deo kotla (BH)
$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C+2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [2(1+2) + 2(4+2)] + 1 + 0 + 0$		19	$N_v = \sum N_{S,NC} \cdot (N_C+2) + N_Q + N_W + N_{CONST} = [2(1+2) + 2(5+2)] + 1 + 0 + 0$		21
Nezavisne relacije	Bilans		Nezavisne relacije	Bilans	
	Materijalni	2		Materijalni	2
	Energetski	1		Energetski	1
	Pomoćne relacije	1		Pomoćne relacije	1
	Broj specifikacija promenljivih			Broj specifikacija promenljivih	
	Pritisak	2		Pritisak	2
	Temperatura	-		Temperatura	-
	Sastav	3		Sastav	4
Konstante	-	Konstante	-		
N_f		9	N_f		10
$N_d, N_d = N_v - N_f$		10	$N_d, N_d = N_v - N_f$		11

*Legenda: N_v Ukupan broj promenljivih u sistemu, N_f Ukupan broj nezavisnih relacija u sistemu, N_d Ukupan broj stepeni slobode u sistemu

Tabela 7.6. DOF analiza kotlovsog seta

Sistem: Kotlovski set					Gorivo: Prirodni gas				Gorivo: Mazut			
Komponenta	AH	CC	BH	Sistem	AH	CC	BH	Sistem	AH	CC	BH	Sistem
$N_{v,k}$	21	18	19	58	23	20	21	64				
$N_{v,sys,tot}, N_{v,sys,tot} = \sum N_{v,k}$				58				64				64
Nezavisne relacije	Bilans											
	Materijalni	2	4	2	8	2	5	2	9			
	Energetski	1	1	1	3	1	1	1	3			
	Broj specifikacija promenljivih											
	Pritisak	4	3	2	9	4	3	2	9			
	Temperatura	1	-	-	1	1	-	-	1			
	Sastav	5	1	3	9	6	1	4	11			
	Konstante	-	-	-	-	-	-	-	-			
Pomoćne relacije	1	-	1	2	1	-	1	2				
$N_{r,k}$	14	9	9	32	15	10	10	35				
$N_{rv,sys,tot}, N_{rv,sys,tot} = \sum N_{r,k}$				32				35				35
$N_{d,sys,tot}, N_{d,sys,tot} = N_{v,sys,tot} - N_{r,sys,tot}$				26				29				29
Suvišna ili dodatna ograničenja												
$N_{rv,sys,tot} = \sum N_{ICS,NC} (N_C + 2) = 1(2+2) + 2(4+2)$				16	$=1(2+2) + 2(5+2)$				18			
Nezavisne relacije	Bilans											
	Materijalni				-				-			
	Energetski				-				-			
	Broj specifikacija promenljivih											
	Pritisak				3				3			
	Sastav				-				-			
	Temperatura				-				-			
Konstante				-				-				
$N_{r,sp}$				3				3				3
$N_{tr}, N_{tr} = \sum N_{tr,sp}$				3				3				3
N_{ar}				1				1				1
$N_d, N_d = N_{d,sys,tot} - N_{rv} + N_{tr} - N_{ar}$				12				13				13
*Legenda												
N_{ar}	Broj dodatnih relacija u odnosu na analizu komponenti											
N_d	Konačan ukupan broj stepeni slobode sistema											
$N_{d,k}$	Broj stepeni slobode u komponenti k											
$N_{d,sys,tot}$	Preliminaran broj stepeni slobode u sistemu											
$N_{ICS,NC}$	Broj interkonektivnih tokova sa brojem hemijskih komponenti N_C											
$N_{r,k}$	Broj nezavisnih relacija u komponenti k											
$N_{r,sys,tot}$	Ukupan broj nezavisnih relacija u sistemu dobijen iz analize komponenti											
N_{tr}	Ukupan broj suvišnih relacija u sistemu											
N_{rv}	Ukupan broj suvišnih promenljivih											
$N_{tr,sp}$	Broj suvišnih bilansa ili specifikacija veličina na nivou analize sistema											
$N_{rv,j}$	Broj suvišnih promenljivih u interkonektivnom toku j između dve komponente											
$N_{v,k}$	Broj promenljivih u komponenti k											
$N_{v,sys,tot}$	Ukupan broj promenljivih u sistemu dobijen iz analize komponenti											

- specifikacije koje se uzimaju u obzir kod analize stepena slobode odgovaraju pomenutim specifikacijama simulacionog modela (adijabatski procesi).
- analiza stepena slobode na nivou jedinica prikazana je u [tabeli 7.3](#), [tabeli 7.4](#) i [tabeli 7.5](#).

Povezivanjem dobijenih rezultata analize stepena slobode pojedinačnih komponenti moguće je predstaviti analizu čitavog sistema na način koji je prikazan u [tabeli 7.6](#).

7.6. Eksergijska analiza kotlovsog seta - subsistema za proizvodnju tehnološke pare

Primenom osnovne jednačine eksergijskog bilansa adijabatskog strujnog procesa, dobija se bilansna jednačina eksergije kotlovsog seta [\(7.10\)](#) koja glasi:

$$E_{87} + E_{89} + E_{93} = E_1 + E_{88} + E_{92} + E_D + E_L \quad (7.10)$$

Podelom sistema na tri nova subsistema datom u fizičkom modelu moguće je izvršiti eksergijsku analizu dobijenih subsistema prema pristupu gorivo-produkt u skladu sa pravilima koje važi za specifične procesne jedinice (Prilog P4). Na osnovu toga, moguće je formirati bilanse eksergije na nivou čitavog kotlovsog seta i izračunati osnovne parametre eksergijske analize za šest različitih režima rada postrojenja i dve vrste goriva.

Osnovne smernice za izvođenje eksergijske analize posmatranog sistema su sledeće:

- Kako su brzina i visina sistema zanemarljivi u odnosu na referentnu okolinu i njenu ravan, kinetička i potencijalna eksergija svakog toka neće biti uzete u obzir, već samo njegova fizička i hemijska eksergija.
- Sledeći pristup gorivo-produkt, za eksergije goriva i produkata predgrejača vazduha i razmenjivačkog dela kotla biće primenjen opšti izraz koji se koristi za razmenjivače toplote.
- Termodinamički koji ne nastaju usled ireverzibilnosti procesa se zanemaruju pri analizi kotlovsog seta i njegovih podsystema usled pretpostavljenih adijabatskih procesa u jedinicama. Koeficijenti gubitka eksergije u pojedinačnim subistemima biće tako smatrani 0, odnosno konstatuje se da neefikasnosti sistema skoro potpuno potiču od ireverzibilnosti.
- Destrukcija eksergije na nivou sva tri subsistema i čitavog sistema nalazi se iz bilansa entropije pri čemu se zadavanjem odgovarajuće termodinamičke funkcije u softveru prati promena entropije vode i gasova sa temperaturom.

predgrejač vazduha (AH), [\(7.11\)](#):

$$T_0[G_{87}(s_{90} - s_{87}) + G_{92}(s_{88} - s_{92})] \quad (7.11)$$

ložište (CC), (7.12):

$$T_0(G_{91}s_{91} - G_{89}s_{89} - G_{90}s_{90}) \quad (7.12)$$

razmenjivački deo kotla (BH), (7.13):

$$T_0[G_1(s_1 - s_{93}) + G_{91}(s_{92} - s_{91})] \quad (7.13)$$

Na osnovu jednačine za protočnu eksergiju preostali vidovi eksergije koji se javljaju u njoj biće posebno analiziran za svaki strujni tok.

Kad je fizička eksergija u pitanju, ona je za sve tokove izražena preko specifičnog toplotnog kapaciteta i temperature toka. Obzirom da sledeće pretpostavke uzete pri vršenju DOF analize, može se zaključiti sledeće:

- Tokovi vazduha, dimnih gasova i goriva se nalaze na pritisku okoline 0.1MPa, pa je mehanički deo u izrazu za fizičku eksergiju zanemarljiv.
- Temperature goriva na ulazu u ložište odgovara temperaturi ulaznog vazduha (koji se smatra referentnom okolinom) za koju se pretpostavlja da iznosi 5°C u zimskom, a 20°C u letnjem režimu, pa je fizička eksergija pomenutih tokova jednaka 0.
- Količina i sastav dimnih gasova na izlazu se procenjuje na osnovu jednačina sagorevanja koje definišu specifične količine gasova po kilogramu goriva za poznati sastav prirodnog gasa i mazuta datih u matematičkom modelu, a preko njih i specifični toplotni kapacitet dimnih gasova u tokovima. Vrednosti specifičnih toplotnih kapaciteta smeše dimnih gasova u funkciji temperature i njihovog sastava nalaze se pomoću termodinamičkih funkcija u softveru.

Što se tiče hemijske eksergije tokova, ona se uzima u obzir samo kod tokova 89 (gorivo), 90 (topao vazduh) i 91 (dimni gasovi iz ložišta) koji učestvuju u reakciji sagorevanja.

- Proračun eksergije koja se dobija iz procesa sagorevanja na bazi je opšte reakcije sagorevanja kako je prikazano kod eksergijske analize dela postrojenja za proizvodnju natrijum tripolifosfata. Po istom principu se određuje hemijska eksergija komponenti dimnih gasova i kiseonika za sagorevanje po kilogramu goriva iz promene Gibsove energije opšte reakcije sagorevanja.
- Za poznati sastav prirodnog gasa i mazuta njihova hemijska eksergija se određuje preko koeficijenta eksergije goriva i donje toplotne moći.

- Kad je nereakciona eksergija u pitanju, jedini njen oblik uzet u obzir kod posmatranih tokova je eksergija mešanja i to kod dimnih gasova na izlazu iz ložišta, razmenjivača kotla i predgrejaču vazduha.

7.6.1 Eksergijske analize kotlovsog seta i postrojenja

Eksergijska analiza kombinovanog postrojenja izvedena je na dva nivoa:

1. Eksergijska analiza kotlovsog podsistema (kotlovski set)
2. Eksergijska analiza postrojenja

U oba slučaja razmatrana su četiri zimska (ZR) i dva letnja (LR) režima rada postrojenja kao i mogućnost korišćenja različitih vrsta goriva (prirodni gas i mazut). Rezultati simulacije ispitivanih energetske sistema predstavljani su u Prilogu P4, pri čemu su termodinamički parametri strujnih tokova u svakom od režima korišćeni za kalkulaciju eksergetskih indikatora prikazanih u ovom poglavlju. U [tabeli 7.7](#) prikazani su indikatori eksergetske efikasnosti kotlovsog seta. Rezultati ukazuju da korišćenje različitog goriva u postrojenju ne dovodi do značajnijih razlika u energetskej efikasnosti ispitivanog seta. Raspodela destrukcije eksergije u jedinicama se takođe ne menja drastično sa promenom režima rada ili vrste goriva i ona je takva da najveći deo destrukcije nastaje u razmenjivaču kotla (preko 60 %), gotovo upola manje u ložištu (preko 30 %), dok su u odnosu na njih, ireverzibilnosti procesa u predgrejaču vazduha gotovo zanemarljive.

Eksergijska analiza postrojenja izvedena je na osnovu kalkulacije indikatora prikazanih u narednim tabelama. U [tabeli 7.8](#) analizirana je količine destrukcije eksergije u pojedinim komponentama i subsistemima i zaključeno da se najveći gubitak eksergije (u svim režimima) javlja u turbinskom i kotlovskom setu. Nešto detaljniji pregled raspodele gubitaka eksergije u okviru podsistema prikazan je u [tabeli 7.9](#) gde su evidentirane komponente sa najvećim udelom u gubitku eksergije u svakom podsistemu. Pregled eksergetske efikasnosti komponenti sistema za sva šest režima prikazan je u [tabeli 7.10](#). Dok je pregled eksergetske efikasnosti (proste) subsistema i celih sistema dat u [tabeli 7.11](#). U [tabeli 7.12](#) dat je prikaz uticaja pojedinih setova na ukupnu destrukciju eksergije u sistemu. Rezultati ukazuju da je zimski režim 3 (ZM₃) režim sa najvećom eksergetskom efikasnošću, dok je uticaj kotlovskih setova u svim režimima najznačajniji po količini gubitka eksergije u sistemu.

Tabela 7.7. Indikatori eksergijske analize kotlovsog seta TE-TO Zrenjanin zimski režim

Vrsta goriva		PRIRODNI GAS %-nog sastava: C=65.7, H=33.1, N=1.2; koeficijent viška vazduha 1.08						MAZUT %-nog sastava: C=85.3, H=12.4, N=0.2, O=0.5, S=1.5; koef. viška vazduha 1.08					
Indikatori		Eksergija produkta, E_P (kW)	Eksergija goriva, E_F (kW)	Destrukcija eksergije, E_D (kW)	Eksergetska efikasnost [-]	Koeficijent destrukcije [-]	Koef. ukup. destrukcije [-]	Eksergija produkta, E_P (kW)	Eksergija goriva, E_F (kW)	Destrukcija eksergije, E_D (kW)	Eksergetska efikasnost [-]	Koeficijent destrukcije [-]	Koef. ukup. destrukcije [-]
Zimski režim 1	Predgrejač vazduha (AH)	40978.112	47169.002	6191.211	0.869	0.131	0.014	39753.035	45708.905	5956.030	0.870	0.130	0.014
	Ložište (CC)	345917.883	489921.102	144003.213	0.706	0.294	0.336	348373.129	489432.789	141060.102	0.712	0.288	0.329
	Razmenjivački deo kotla (BH)	56436.052	335176.964	278741.007	0.168	0.832	0.650	56436.052	338028.021	281592.311	0.167	0.833	0.657
	Kotlovski set	56436.052	485371.025	428935.431	0.116	0.884		56436.052	485044.102	428608.443	0.116	0.884	
Zimski režim 1	Predgrejač vazduha (AH)	40970.011	47150.124	6180.203	0.869	0.131	0.014	39744.783	45700.114	5955.014	0.870	0.130	0.014
	Ložište (CC)	345849.021	489824.020	143975.125	0.706	0.294	0.336	348304.762	489295.820	140991.203	0.712	0.288	0.329
	Razmenjivački deo kotla (BH)	56393.933	335119.621	278725.955	0.168	0.832	0.650	56393.933	337962.203	281567.874	0.167	0.833	0.657
	Kotlovski set	56393.933	485274.835	428881.283	0.116	0.884		56393.933	484908.023	428514.091	0.116	0.884	
Zimski režim 1	Predgrejač vazduha (AH)	14570.017	16767.678	2198.042	0.869	0.131	0.015	14135.070	16252.113	2117.311	0.870	0.130	0.014
	Ložište (CC)	123863.502	175213.514	51350.025	0.707	0.293	0.342	123874.021	174009.222	50134.904	0.712	0.288	0.334
	Razmenjivački deo kotla (BH)	22253.993	119031.201	96776.864	0.187	0.813	0.644	22253.993	120195.954	97942.211	0.185	0.815	0.652
	Kotlovski set	22253.993	172578.607	150324.931	0.129	0.871		22253.993	172448.000	150194.426	0.129	0.871	
Zimski režim 1	Predgrejač vazduha (AH)	40931.213	47105.134	6173.802	0.869	0.131	0.014	39661.055	45603.203	5941.903	0.870	0.130	0.014
	Ložište (CC)	348264.326	492680.326	144416.157	0.707	0.293	0.336	347569.401	488262.115	140693.068	0.712	0.288	0.329
	Razmenjivački deo kotla (BH)	56008.122	334689.111	278681.025	0.167	0.833	0.649	56008.122	337247.312	281306.245	0.166	0.834	0.657
	Kotlovski set	56008.122	485278.995	429270.984	0.115	0.885		56008.122	483883.041	427941.216	0.116	0.884	
Zimski režim 1	Predgrejač vazduha (AH)	26972.000	30554.000	3582.213	0.883	0.117	0.012	26173.000	29620.908	3447.703	0.884	0.116	0.012
	Ložište (CC)	241022.000	346970.000	105947.824	0.695	0.305	0.355	242975.000	346689.784	103715.322	0.701	0.299	0.348
	Razmenjivački deo kotla (BH)	46362.050	234974.000	188612.325	0.197	0.803	0.633	46362.050	237149.208	190787.040	0.195	0.805	0.640
	Kotlovski set	46362.050	344504.000	298142.362	0.135	0.865		46362.050	3441312.105	297950.063	0.135	0.116	
Zimski režim 1	Predgrejač vazduha (AH)	13453.211	15239.334	1786.023	0.883	0.117	0.012	13054.345	14774.022	1720.241	0.884	0.116	0.011
	Ložište (CC)	120215.455	173057.933	52844.153	0.695	0.305	0.352	121188.445	172917.103	51729.342	0.701	0.299	0.345
	Razmenjivački deo kotla (BH)	21857.133	117197.783	95341.354	0.186	0.814	0.636	21857.133	118283.223	96426.462	0.185	0.815	0.644
	Kotlovski set	21857.133	171828.342	149971.146	0.127	0.873		21857.133	171731.966	149876.045	0.127	0.873	

Tabela 7.8. Pregled veličina destrukcije eksergije komponenti, subsystema i sistema postrojenja (gorivo prirodni gas)

Set		ZR ₁	ZR ₂	ZR ₃	ZR ₄	LR ₁	LR ₂
Turbinski set	LPT	8400.522	8028.316	6193.819	9557.091	7781.448	1277.706
	HPT	11313.166	11783.108	9480.527	11959.570	6346.405	10368.010
	M ₁	94.410	566.431	5.448	727.839	99.538	180.131
	M ₂	9.925	9.856	2.757	9.987	6.375	2.086
	M ₃	4.001	4.948	1.503	4.790	3.177	0.897
	M ₆	0.924	0.924	0.258	0.928	0.598	0.196
	M ₇	0.658	0.620	0.197	0.688	0.413	0.429
	M ₈	0.031	0.005	0.003	0.144	0.003	0.054
	suma	19823.638	20394.209	15684.512	22261.037	14237.955	11829.511
Kondenzatorski set	CN	626.039	3325.688	5647.190	564.173	7405.205	3096.315
	suma	626.039	3325.688	5647.190	564.173	7405.205	3096.315
Set 1	SCL	53.990	44.009	42.236	55.779	35.529	38.982
	SCS	209.233	264.217	244.212	208.979	205.417	164.241
	M ₉	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	M ₁₂	532.135	506.950	43.838	533.144	13.746	9.796
	suma	795.363	815.177	330.286	797.903	254.693	213.018
Set 2	LPH ₁	1088.321	2001.047	364.397	1253.845	1174.189	242.967
	LPH ₂	23.219	581.063	174.728	194.498	1096.434	118.612
	M ₁₀	118.531	442.689	-	41.327	225.875	28.684
	M ₁₁	219.308	7.479	-	249.827	384.725	263.128
	suma	1449.379	3032.277	539.125	1739.496	2881.222	653.392
Set 3	HT ₁	1936.430	-	-	1850.123	-	-
	HT ₂	416.806	-	-	1330.155	-	-
	HT ₃	1788.889	-	-	-	-	-
	suma	4142.125	-	-	3180.278	-	-
Set 4	DA ₁	649.981	380.544	57.823	825.489	313.449	118.138
	DA ₂	686.660	237.591	111.332	307.178	897.984	493.637
	HPH	2186.513	2164.262	379.823	2219.813	1912.015	258.450
	EX	584.889	593.209	-	575.440	505.007	432.672
	suma	4108.044	3375.606	548.979	3927.920	3628.455	118.138
Kotlovski set	AH	6190.880	4751.460	2198.040	6174.090	3681.360	1785.940
	CC	144003.470	139574.330	51350.070	144416.220	105848.450	52844.010
	BH	202769.095	208551.772	22462.828	201960.604	59688.735	35157.361
	suma	352963.445	352877.562	76010.938	352550.914	169218.545	89787.311
Sistem		383908.032	383820.520	98761.031	381841.443	197626.075	106882.444

Tabela 7.9. Pregled koeficijenta ukupne destrukcije komponenti u odnosu na pripadajući set (gorivo prirodni gas)

Set (subsistem)	Procesne jedinice u setu	ZR ₁	ZR ₂	ZR ₃	ZR ₄	LR ₁	LR ₂
Turbinski set	LPT	0.424	0.394	0.395	0.429	0.547	0.547
	HPT	0.571	0.578	0.604	0.537	0.446	0.446
	M ₁	0.005	0.028	0.001	0.033	0.007	0.007
	M ₂	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	M ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	M ₆	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	M ₇	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	M ₈	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Kondenzatorski set	CN	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Set 1	SCL	0.068	0.054	0.128	0.070	0.139	0.139
	SCS	0.263	0.324	0.739	0.262	0.807	0.807
	M ₉	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	M ₁₂	0.669	0.622	0.133	0.668	0.054	0.054
Set 2	LPH ₁	0.751	0.660	0.676	0.721	0.408	0.408
	LPH ₂	0.016	0.192	0.324	0.112	0.381	0.381
	M ₁₀	0.082	0.146	-	0.024	0.078	0.078
	M ₁₁	0.151	0.002	-	0.144	0.134	0.133
Set 3	HT ₁	0.467	-	-	0.582	-	-
	HT ₂	0.101	-	-	0.418	-	-
	HT ₃	0.432	-	-	-	-	-
Set 4	DA ₁	0.158	0.113	0.105	0.210	0.086	0.122
	DA ₂	0.167	0.070	0.203	0.078	0.248	0.350
	HPH	0.533	0.641	0.692	0.565	0.527	0.331
	EX	0.142	0.176	-	0.147	0.139	0.197
Kotlovski set	AH	0.018	0.013	0.029	0.018	0.022	0.021
	CC	0.408	0.396	0.676	0.410	0.626	0.626
	BH	0.574	0.591	0.295	0.572	0.352	0.353

Tabela 7.10. Pregled eksergetske efikasnosti komponenti (gorivo prirodni gas)

Set	Komponenta	ZR ₁	ZR ₂	ZR ₃	ZR ₄	LR ₁	LR ₂
Turbinski set	LPT	0.476	0.754	0.807	0.506	0.726	0.912
	HPT	0.898	0.894	0.742	0.892	0.908	0.643
	M ₁	0.311	0.350	0.483	0.260	0.097	0.047
	M ₂	0.793	0.792	0.893	0.792	0.818	0.904
	M ₃	0.824	0.826	0.913	0.818	0.851	0.874
	M ₆	0.792	0.792	0.893	0.792	0.818	0.904
	M ₇	0.813	0.820	0.912	0.808	0.845	0.860
	M ₈	0.964	0.985	0.990	0.929	0.989	0.957
Kondenzatorski set	CN	0.491	0.747	0.625	0.523	0.437	0.372
Set 1	SCL	0.369	0.483	0.516	0.359	0.541	0.506
	SCS	0.603	0.532	0.562	0.613	0.595	0.601
	M ₉	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	M ₁₂	0.099	0.551	0.944	0.097	0.978	0.957
Set 2	LPH ₁	0.670	0.725	0.880	0.623	0.682	0.694
	LPH ₂	0.970	0.861	0.900	0.893	0.725	0.867
	M ₁₀	0.831	0.445	-	0.883	0.550	0.874
	M ₁₁	0.379	0.986	-	0.342	0.353	0.306
Set 3	HT ₁	0.867	-	-	0.824	-	-
	HT ₂	0.930	-	-	0.915	-	-
	HT ₃	0.931	-	-	-	-	-
Set 4	DA ₁	0.894	0.944	0.966	0.903	0.903	0.889
	DA ₂	0.886	0.903	0.887	0.926	0.681	0.227
	HPH	0.877	0.885	0.896	0.879	0.939	0.890
	EX	0.878	0.881	-	0.647	0.877	0.348
Kotlovski set	AH	0.869	0.869	0.869	0.869	0.883	0.883
	CC	0.706	0.706	0.707	0.707	0.695	0.695
	BH	0.168	0.168	0.187	0.167	0.197	0.186

Tabela 7.11. Prosta eksergetska efikasnost subsystema i sistema

	ZR ₁	ZR ₂	ZR ₃	ZR ₄	LR ₁	LR ₂
Turbinski set	0.844	0.862	0.772	0.835	0.855	0.757
Kondenzatorski set	0.491	0.747	0.625	0.523	0.437	0.372
Kotlovski set	0.116	0.116	0.129	0.115	0.135	0.127
Set 1	0.341	0.542	0.769	0.345	0.787	0.703
Set 2	0.751	0.803	0.899	0.785	0.693	0.773
Set 3	0.943	-	-	0.933	-	-
Set 4	0.983	0.973	0.954	0.969	0.355	0.966
Sistem	0.180	0.236	0.292	0.203	0.234	0.194

Tabela 7.12. Pregled koeficijenta ukupne destrukcije subsystema (gorivo prirodni gas)

	ZR ₁	ZR ₂	ZR ₃	ZR ₄	LR ₁	LR ₂
Turbinski set	0.052	0.053	0.159	0.058	0.072	0.111
Kondenzatorski set	0.002	0.009	0.057	0.001	0.037	0.029
Kotlovski set	0.929	0.919	0.770	0.923	0.856	0.840
Set 1	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002
Set 2	0.004	0.007	0.005	0.005	0.015	0.006
Set 3	0.001	-	-	0.001	-	-
Set 4	0.010	0.008	0.006	0.010	0.018	0.012
Sistem	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

7.7. Zaključna razmatranja poglavlja 7

- Kombinovana proizvodnja korisne snage i toplotne energije (CHP-combined heat and power) predstavlja energetska efikasan način spregnute proizvodnje dvaju ili više korisnih oblika energije, iz istog primarnog energetskeg izvora.
- U cilju ispitivanja energetske efikasnosti referentnog postrojenja, TE-TO Zrenjanin u Zrenjaninu kreiran je sekvencijalni simulacioni softver na platformama EES i Microsoft excel. Subsistemi kotlovski set i turbinski set simulirani su tehnikom generisanih jednačina uz korišćenje postupka DOF analize.
- Rezultati simulacije korišćeni su za određivanje indikatora eksergetske efikasnosti.
- Najviši stepen eksergetske efikasnosti (proste) indikovao je u Zimskom režimu 3, dok je kao najveći generator destrukcije eksergije u svim režimima indikovao kotlovski set.

Literatura poglavlja 7

- [1] <http://www.cogen.org/projects/educogen.htm>. [citat u tekstu]
- [2] <http://www.cogen.org/projects/prosmaco.htm>. [citat u tekstu]
- [3] Živković D, Milenković D, Bajmak Š. Toplotne turbomašine. Priština; 1997: Univerzitet u Prištini. [citat u tekstu]
- [4] Korobitsyn MA, Hirs GG. Analysis of Cogeneration Alternatives. ASME, 1995. Sweden; Proceedings of the ECOS '96 Symposium; 1996. [citat u tekstu]
- [5] Mihajlov J. Termoelektrane. Zagreb; 1976: Tehnika knjiga. [citat u tekstu]
- [6] Bogner M. Projektovanje termotehničkih i procesnih sistema. Beograd; 1998: SMEITS. [citat u tekstu]
- [7] Bilten EPS-a: Osnovna tehnička dokumentacija HE i TE u Srbiji. Beograd; 1998: EPS. [citat u tekstu]
- [8] Horlock JH. Cogeneration Combined Heat and Power (CHP). Malabar, (FL); 1997: Krieger Publishing Company. [citat u tekstu]
- [9] Stojilković S. Eksergijska i tehnoe ekonomska analiza procesa sa kombinovanim dobijanjem toplote i električne energije [magistarska teza]. Niš; 2003: MFN, Univerzitet u Nišu. [citat u tekstu]
- [10] Rašković P, Cvetković S, Stoilković S. Exergy Analyse of CHP Plant TE-TO Zrenjanin. In: Afgan N, Bogdan Ž, Duić N, Guzović Z, editors. Proceedings of the 3rd Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems; 2005 Jun 6-10; Dubrovnik, Croatia. World Scientific Publishing Co: 518–30. [citat u tekstu]
- [11] Priljeva N, Rašković P, Stojilković S. Software Tool for Exergy Analyses of Energy system TE-TO Zrenjanin. Vrnjačka Banja, Serbia; Proceedings Elektrane 2004; 2004. [citat u tekstu]
- [12] Rosen EM. Excel Solutions to the Chemical Engineering Problem Set. EMR Technology Group; 1997. [citat u tekstu]

8. Zaključak

Tematika ove teze je postupak analize složenih hemijskih i energetskih postrojenja kao obavezanog dela u fazi konceptualnog projektovanja istih. Uloga i zadatak analize u fazi konceptualnog projektovanja objašnjeni su pregledom osnovnih postulata inženjerskog projektovanja i razradom elemenata bazičnog projektnog ciklusa. Posebna pažnja je posvećena postupku modelovanja i simulacije otvorenih stacionarnih termodinamičkih sistema, a ujedno i kompjuterski podržanom postupku projektovanja takvih sistema putem generisanja *flowsheeting* softvera. Kao osnovni alat za evaluaciju projektnih rešenja, sa ciljem povećanja nivoa njihove energetske efikasnosti, koristila se metoda eksergetske analize.

U praktičnom delu rada teorijska razmatranja ilustrovana su u okviru analize tri složena postrojenja od kojih su dva trenutno operativna, dok je analiza geotermalnog postrojenja iskorišćena u funkciji preliminarnih proračuna za izgradnju budućeg postrojenja. Rezultati dobijeni u tezi ukazuju na značajne mogućnosti poboljšanja energetske efikasnosti u sva tri postrojenja.

Na kraju treba istaći da je cilj ove teze bio i sistematizacija najnovijih istraživanja i dostignuća iz prethodno opisane tematike procesnog sistemskog inženjeringa. Postulati i ilustracije prezentovane u tezi mogu se smatrati malim, ali vrednim doprinosom u stalnom osavremenjivanju procesa projektovanja složenih postrojenja namenjenih stručnim i naučnim krugovima naše zemlje.

Prilozi

3. Prilog P1. Stehiometrijske jednačine sagorevanja tečnog i gasovitog goriva
4. Prilog P2. Rezultati simulacije subsystema za konverziju ortofosfata u cilju određivanja specifične toplote kalcinacije
5. Prilog P3. Pregled matematičkih modela komponenti i indikatora ekseretske analize u ispitivanim postrojenjima
6. Prilog P4. Rezultati simulacija operativnih režima u TE-TO Zrenjanin

Prilog P1. Stehiometrijske jednačine sagorevanja tečnog i gasovitog goriva

Tabela P1.1. Stehiometrijske jednačine sagorevanja tečnog goriva

Veličina	Matematički izraz	jedinica
Minimalno potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje	$L_{O_2, \min} = 1.867(C/100) + 5.6(H/100) + 0.7(S/100) - 0.7(O/100)$	[m ³ N / kg]
Minimalna potrebna količina vazduha za potpuno sagorevanje	$L_{\min} = \frac{L_{O_2, \min}}{0.21}$	[m ³ N / kg]
Stvarna potrebna zapremina vazduha po 1 kg goriva za potpuno sagorevanje	$L_s = \lambda \cdot L_{\min}$	[m ³ N / kg]
Stvarna potrebna masa vazduha po 1 kg goriva za potpuno sagorevanje	$G_s = L_s \cdot \rho_F$	[kg / kg]
Količina troatomnih gasova CO ₂ i SO ₂ u produktima sagorevanja (p.s.)	$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1.867(C/100) + 0.7(S/100)$	[m ³ N / kg]
Količina azota u p.s.	$V_{N_2} = 0.8(N/100) + 0.79L_s$	[m ³ N / kg]
Količina vode u p.s.	$V_{H_2O} = 1.244(W/100 + 9H/100)$	[m ³ N / kg]
Količina kiseonika u p.s.	$V_{O_2} = 0.21(\lambda - 1)L_{\min}$	[m ³ N / kg]
Ukupna količina vlažnih p.s. po 1 m ³ N goriva	$V_w = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}$	[m ³ N / kg]
Ukupna količina suvih produkata sagorevanja po 1 m ³ N goriva	$V_d = V_w - V_{H_2O}$	[m ³ N / kg]
Zapreminski udeo troatomnih gasova u vlažnim p.s.	$r_{RO_2}^w = V_{RO_2} / V_w$	[-]
Zapreminski udeo azota u vlažnim p.s.	$r_{N_2}^w = V_{N_2} / V_w$	[-]
Zapreminski udeo kiseonika u vlažnim p.s.	$r_{O_2}^w = V_{O_2} / V_w$	[-]
Zapreminski udeo vode u vlažnim p.s.	$r_{H_2O}^w = V_{H_2O} / V_w$	[-]
Zapreminski udeo troatomnih gasova u suvim p.s.	$r_{RO_2}^d = V_{RO_2} / V_d$	[-]
Zapreminski udeo azota u suvim p.s.	$r_{N_2}^d = V_{N_2} / V_d$	[-]
Zapreminski udeo kiseonika u suvim p.s.	$r_{O_2}^d = V_{O_2} / V_d$	[-]
Molekulska masa vlažnih p.s.	$M_{fg}^w = r_{CO_2}^w M_{CO_2} + r_{SO_2}^w M_{SO_2} + r_{N_2}^w M_{N_2} + r_{O_2}^w M_{O_2} + r_{H_2O}^w M_{H_2O}$	[kg / kmol]
Molekulska masa suvih p.s.	$M_{fg}^d = r_{CO_2}^d M_{CO_2} + r_{SO_2}^d M_{SO_2} + r_{N_2}^d M_{N_2} + r_{O_2}^d M_{O_2}$	[kg / kmol]
Gustina vlažnih p.s.	$\rho_{fg}^w = M_{fg}^w / (22.4 \cdot 10^{-3})$	[kg / m ³ N]
Gustina suvih p.s.	$\rho_{fg}^d = M_{fg}^d / (22.4 \cdot 10^{-3})$	[kg / m ³ N]
Zapreminska specifična toplota vlažnih p.s. pri normalnim uslovima	$c_{p,fg}^w = 1.725r_{CO_2}^w + 1.847r_{SO_2}^w + 1.283r_{N_2}^w + 1.304r_{O_2}^w + 1.480r_{H_2O}^w$	[kJ / m ³ NK]
Ukupna količina vlažnih p.s. po 1 kg goriva	$G_w = V_w \cdot \rho_{fg}^w$	[kg / kg]
Ukupna količina suvih p.s. po 1 kg goriva	$G_d = V_d \cdot \rho_{fg}^d$	[kg / kg]
Ukupna količina vlage u p.s. po 1 kg goriva	$G_{H_2O} = G_w - G_d$	[kg / kg]
Masena specifična toplota vlažnih p.s.	$c_{p,fg}^w = c_{p,fg}^w / \rho_{fg}^w$	[kJ / kgK]
Masena specifična toplota suvih p.s.	$c_{p,fg}^d = c_{p,fg}^d / \rho_{fg}^d$	[kJ / kgK]
Donja toplotna moć goriva	$H_{D,F} = 340C + 1190(H - \frac{O+N}{8}) + 93S - 25W$	[kJ / kg]
Temperatura sagorevanja	$T_{comb} = \frac{H_{D,F} + G_s c_{air} t_{air} + c_F t_F}{G_w c_{p,fg}^w}$	[°C]

Spisak oznaka u tabeli P1.1.

Procentualno učešće ugljenika u gorivu	C	[%]
Procentualno učešće vodonika u gorivu	H	[%]
Procentualno učešće sumpora u gorivu	S	[%]
Procentualno učešće kiseonika	O	[%]
Procentualno učešće azota u gorivu	N	[%]
Procentualno učešće vlage u gorivu	W	[%]
Koeficijent viška vazduha za sagorevanje tečnog goriva	λ	[-]
Gustina goriva	ρ_F	[kg / m ³ _N]
Specifični toplotni kapacitet spoljašnjeg vazduha	c_{air}	[kJ / kgK]
Specifični toplotni kapacitet goriva	c_F	[kJ / kgK]
Temperatura primarnog vazduha za sagorevanje	t_{air}	[K]
Temperatura goriva za LK	t_F	[K]

Tabela P2.2. Stehiometrijske jednačine sagorevanja gasovitog goriva

Veličina	Matematički izraz	jedinica
Minimalna potrebna količina kiseonika za potpuno sagorevanje	$L_{O_2, \min} = 0.5(CO/100) + 0.5(H/100) + 1.5(HS/100) + \sum (m + \frac{n}{4})(C_m H_n / 100) - (O/100)$	$[m^3 / m^3]$
Minimalna potrebna količina vazduha za potpuno sagorevanje	$L_{\min} = \frac{L_{O_2, \min}}{0.21}$	$[m^3 / m^3]$
Stvarna potrebna zapremina vazduha po $1 m^3$ goriva za proces potpunog sagorevanja	$L_s = \lambda \cdot L_{\min}$	$[m^3 / m^3]$
Stvarna potrebna zapremina vazduha po 1 kg goriva za proces potpunog sagorevanja	$G_s = \frac{L_s}{\rho_F} \cdot \rho_{air}$	$[kg / kg]$
Količina troatomnih gasova CO_2 i SO_2 u produktima sagorevanja	$V_{RO_2} = 0.5(CO/100) + \sum m(C_m H_n / 100)$	$[m^3 / m^3]$
Količina azota u produktima sagorevanja	$V_{N_2} = 0.8(N/100) + 0.79L_s$	$[m^3 / m^3]$
Količina vode u produktima sagorevanja	$V_{H_2O} = H/100 + HS/100 + \sum \frac{n}{2}(C_m H_n / 100)$	$[m^3 / m^3]$
Količina kiseonika u produktima sagorevanja	$V_{O_2} = 0.21(\lambda - 1)L_s$	$[m^3 / m^3]$
Ukupna količina vlažnih produkata sagorevanja po $1 m^3_N$ goriva	$V_w = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2}$	$[m^3 / m^3]$
Ukupna količina suvih produkata sagorevanja po $1 m^3_N$ goriva	$V_d = V_w - V_{H_2O}$	$[m^3 / m^3]$
Zapreminski udeo troatomnih gasova u vlažnim produktima sagorevanja	$r_{RO_2}^w = V_{RO_2} / V_w$	$[-]$
Zapreminski udeo azota u vlažnim produktima sagorevanja	$r_{N_2}^w = V_{N_2} / V_w$	$[-]$
Zapreminski udeo kiseonika u vlažnim produktima sagorevanja	$r_{O_2}^w = V_{O_2} / V_w$	$[-]$
Zapreminski udeo troatomnih gasova u suvim produktima sagorevanja	$r_{RO_2}^d = V_{RO_2} / V_d$	$[-]$
Zapreminski udeo azota u suvim produktima sagorevanja	$r_{N_2}^d = V_{N_2} / V_d$	$[-]$
Zapreminski udeo kiseonika u suvim produktima sagorevanja	$r_{O_2}^d = V_{O_2} / V_d$	$[-]$
Molekulska masa suvih produkata sagorevanja	$M_{fg}^w = r_{CO_2}^w M_{CO_2} + r_{SO_2}^w M_{SO_2} + r_{N_2}^w M_{N_2} + r_{O_2}^w M_{O_2} + r_{H_2O}^w M_{H_2O}$	$[kg / kmol]$
Gustina vlažnih produkata sagorevanja	$M_{fg}^d = r_{CO_2}^d M_{CO_2} + r_{SO_2}^d M_{SO_2} + r_{N_2}^d M_{N_2} + r_{O_2}^d M_{O_2}$	$[kg / m^3N]$
Gustina suvih produkata sagorevanja	$\rho_{fg}^w = M_{fg}^w / (22.4 \cdot 10^{-3})$	$[kg / m^3N]$

nastavak tabele P2.2.

Veličina	Matematički izraz	jedinica
Zapreminska specifična toplota vlažnih produkata sagorevanja pri normalnim uslovima	$c_{p,fg}^w = 1.725r_{CO_2}^w + 1.847r_{SO_2}^w + 1.283r_{N_2}^w + 1.304r_{O_2}^w + 1.480r_{H_2O}^w$	[kJ / m ³ NK]
Ukupna količina vlažnih pr. sagorevanja po 1 kg goriva	$G_w = V_w \cdot \rho_{fg}^w$	[kg / kg]
Ukupna količina suvih produkata sagorevanja po 1 kg goriva	$G_d = V_d \cdot \rho_{fg}^d$	[kg / kg]
Ukupna količina vlage u pr. sagorevanja po 1 kg goriva	$G_{H_2O} = G_w - G_d$	[kg / kg]
Masena specifična toplota vlažnih produkata sagorevanja	$c_{p,fg}^w = c_{p,fg}^w / \rho_{fg}^w$	[kJ / kgK]
Masena specifična toplota suvih produkata sagorevanja	$c_{p,fg}^d = c_{p,fg}^d / \rho_{fg}^d$	[kJ / kgK]
Donja toplotna moć goriva	$H_{D,F} = \sum_{i=1}^n (r_i H_{D,i})$	[kJ / m ³ N]
Temperatura sagorevanja	$T_{comb} = \frac{H_{D,F} + G_s c_{air} t_{air} + c_F t_F}{G_w c_{p,fg}^w}$	[K]

Spisak oznaka u tabeli P2.2.

Procentualno učešće ugljendioksida u gorivu	<i>CO</i>	[%]
Procentualno učešće gasovitog vodonika u gorivu	<i>H</i>	[%]
Procentualno učešće sumporvodonika u gorivu	<i>HS</i>	[%]
Procentualno učešće ugljovodonika u gorivu	<i>C_mH_n</i>	[%]
Procentualno učešće azota u gorivu	<i>N</i>	[%]
Koeficijent viška vazduha za sagorevanje tečnog goriva	<i>λ</i>	[-]
Gustina spoljašnjeg vazduha	<i>ρ_{air}</i>	[kg/m ³ N]
Gustina goriva	<i>ρ_F</i>	[kg/m ³ N]
Zapreminski udeo komponente goriva	<i>r_i</i>	[-]
Donja toplotna moć komponente goriva	<i>H_{d,i}</i>	[kJ / m ³ N]
Specifični toplotni kapacitet spoljašnjeg vazduha	<i>c_{air}</i>	[kJ/kgK]
Specifični toplotni kapacitet goriva	<i>c_F</i>	[kJ/kgK]
Temperatura primarnog vazduha za sagorevanje	<i>t_{air}</i>	[K]
Temperatura goriva za LK	<i>t_F</i>	[K]

Prilog P2. Rezultati simulacije subsystema za konverziju ortofosfata u cilju određivanja specifične toplote kalcinacije

Tabela P2.1. Parametri vazduha i vlažnih produkata sagorevanja

	Vrsta tripolifosfata	Inputi u softver											Output softvera										
		G_F	C	H	N	O	S	λ	$T_{FG,II}$	$T_{FG,III}$	$T_{air,par}=T_{air,I}$ $T_{air,II}=T_F$	$c_{p,air}$	$T_{FG,I}$	$G_{FG,I}$	$G_{FG,II}$	$G_{FG,III}$	$G_{air,par}$	G_{wp}	$G_{air,I}$	$G_{air,II}$	$c_{p,FG,I}$	$c_{p,FG,II}$	$c_{p,FG,III}$
18.01	niskotemperaturni	[kg/s]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[kJ/kg]	[°C]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]
18.01	niskotemperaturni	0.151	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	432.5	237.5	2	1.006	1576	3.002	13.845	16.286	2.182	0.259	2.863	10.843	1.369	1.161	1.100
29.01	niskotemperaturni	0.162	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	402	233	1	1.006	1576	3.221	16.132	18.949	2.539	0.278	3.071	12.911	1.369	1.152	1.098
26.07.	niskotemperaturni	0.168	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	443.3	240	25	1.007	1592	2.311	15.782	18.594	2.492	0.320	3.185	12.442	1.370	1.165	1.100
1.08	niskotemperaturni	0.145	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	417.1	240.7	23	1.007	1590	2.883	14.606	17.171	2.301	0.264	2.749	11.723	1.370	1.157	1.101
2.08	niskotemperaturni	0.142	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	421.7	240	23	1.007	1590	2.823	14.113	16.596	2.224	0.259	2.692	11.290	1.370	1.158	1.100
19.08	visokotemperaturni	0.171	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	631.9	236.1	21	1.007	1589	3.399	10.352	12.232	1.639	0.241	3.242	6.953	1.370	1.218	1.099
5.09.	visokotemperaturni	0.204	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	591.7	173.3	18	1.007	1587	4.055	13.304	15.700	2.104	0.292	3.868	9.249	1.370	1.207	1.081
27.07	visokotemperaturni	0.148	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	611.3	260.4	22	1.007	1590	2.942	9.341	11.058	1.482	0.235	2.806	6.399	1.370	1.213	1.107
30.06.	niskotemperaturni	0.108	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	530	244	19	1.007	1588	2.147	8.059	9.551	1.280	0.212	2.048	5.912	1.370	1.190	1.102
21.07.	niskotemperaturni	0.096	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	480	175	25	1.007	1592	1.909	8.181	9.789	1.312	0.297	1.820	6.272	1.370	1.176	1.082
25.07	niskotemperaturni	0.092	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	519	211	24	1.007	1591	1.829	7.111	8.486	1.137	0.238	1.744	5.282	1.370	1.187	1.092
25.08.	niskotemperaturni	0.088	86	13	0.5	0.3	0.2	1.32	574.4	233.1	22	1.007	1590	1.749	5.990	7.150	0.958	0.202	1.668	4.241	1.370	1.203	1.098

Tabela P2.2. Parametri tripolifosfata i ortofosfata

	Vrsta tripolifosfata	Inputi u softver							Output	
		Kapacitet G_{STPP} [kg/s]	T_{ORPH} [°C]	$T_{STPP,CBK}$ [°C]	T_{STPP} [°C]	$c_{p,ORPH}$ [kJ/kg]	$c_{p,STPP}$ [kJ/kg]	G_{ORPH} [kg/s]	G_{wp} [kJ/kg]	
18.01	niskotemperaturni	1.528	78	237.5	349.9	1.227	1	1.869	0.259	
29.01	niskotemperaturni	1.639	77	233	349.2	1.227	1	2.005	0.278	
26.07.	niskotemperaturni	1.889	82	240	371.5	1.227	1	2.311	0.320	
1.08	niskotemperaturni	1.556	81	240.7	364.6	1.227	1	1.904	0.264	
2.08	niskotemperaturni	1.528	82	240	368.5	1.227	1	1.869	0.259	
19.08	visokotemperaturni	1.417	81	236.1	445.3	1.227	1	1.734	0.241	
5.09.	visokotemperaturni	1.722	80	173.3	360.2	1.227	1	2.107	0.292	
27.07	visokotemperaturni	1.389	82	260.4	402.3	1.227	1	1.699	0.235	
30.06.	niskotemperaturni	1.250	81	244	347.6	1.227	1	1.529	0.212	
21.07.	niskotemperaturni	1.750	81	175	346.3	1.227	1	2.141	0.297	
25.07	niskotemperaturni	1.406	82	211	376	1.227	1	1.720	0.238	
25.08.	niskotemperaturni	1.194	80	233.1	364.5	1.227	1	1.461	0.202	

Tabela P2.3. Parametri toplote kalcinacije

	Vrsta tripolifosfata	Inputi u softver							Output softvera							
		Kapacitet G_{STPP} [kg/s]	$T_{air,par}=T_{air,I}$ $T_{air,II}=T_F$ [°C]	T_{ORPH} [°C]	$T_{FG,II}$ [°C]	$T_{FG,III}$ [°C]	T_{STPP} [°C]	G_F [kg/s]	G_{ORPH} [kg/s]	$G_{FG,II}$ [kg/s]	$G_{FG,I}$ [kg/s]	$G_{STPP,CBK}$ [kg/s]	$T_{FG,I}$ [°C]	Q_L [kW]	Q_{calc} [kW]	$Q_{calc,s}$ [kJ/kg]
18.01.	niskotemperaturni	1.528	2	78	432.5	237.5	349.9	0.151	1.869	13.845	3.002	0.082	1576	39.64	2179	1426
29.01.	niskotemperaturni	1.639	1	77	402	233	349.2	0.162	2.005	16.132	3.221	0.088	1576	37.67	2059	1256
26.07.	niskotemperaturni	1.889	25	82	443.3	240	371.5	0.168	2.311	15.782	2.311	0.102	1592	37.69	2611	1382
1.08.	niskotemperaturni	1.556	23	81	417.1	240.7	364.6	0.145	1.904	14.606	2.883	0.084	1590	36.41	1970	1266
2.08.	niskotemperaturni	1.528	23	82	421.7	240	368.5	0.142	1.869	14.113	2.823	0.082	1590	36.64	1988	1301
19.08	visokotemperaturni	1.417	21	81	631.9	236.1	445.3	0.171	1.734	10.352	3.399	0.076	1589	49.16	4214	2974
5.09.	visokotemperaturni	1.722	18	80	591.7	173.3	360.2	0.204	2.107	13.304	4.055	0.093	1587	43.38	6029	3501
27.07.	visokotemperaturni	1.389	22	82	611.3	260.4	402.3	0.148	1.699	9.341	2.942	0.075	1590	49.26	3227	2323
30.06.	niskotemperaturni	1.250	19	81	530	244	347.6	0.108	1.529	8.059	2.147	0.067	1588	43.8	2124	1699
21.07.	niskotemperaturni	1.750	25	81	480	175	346.3	0.096	2.141	8.181	1.909	0.094	1592	36.01	2280	1303
25.07	niskotemperaturni	1.406	24	82	519	211	376	0.092	1.720	7.111	1.829	0.076	1591	40.59	1975	1405
25.08.	niskotemperaturni	1.194	22	80	574.4	233.1	364.5	0.088	1.461	5.990	1.749	0.065	1590	45.44	1921	1609

Prilog P3. Pregled matematičkih modela komponenti i indikatora eksergetske analize u ispitivanim postrojenjima

Tabela P3.1. Pregled masenih, energetskih i eksergijskih bilansa komponenti

Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model	Bilans komponente	Matematički izraz bilansa
Turbina sa R izlaznih tokova (adijabatski proces)		CHP	Materijalni	$G_{in} - \sum_{i=1}^R G_{out,i} = 0$
			Energetski	$G_{in} h_{in} - \sum_{i=1}^R G_{out,i} h_{out,i} - W_{TB} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{in} - \sum_{i=1}^R E_{out,i} - W_{TB} - E_D = 0$
Turbina sa jednim izlaznim tokom (adijabatski proces)		CHP GTM	Materijalni	$G_{in} - G_{out} = 0$
			Energetski	$G_{in} h_{in} - G_{out} h_{out} - W_{TB} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{in} - E_{out} - W_{TB} - E_D = 0$
Pumpa, ventilator (adijabatski proces)		GTM	Materijalni	$G_{in} - G_{out} = 0$
			Energetski	$G_{in} h_{in} - G_{out} h_{out} + W = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{in} - E_{out} + W - E_D = 0$

Tabela P3.1. nastavak

Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model	Bilans komponente	Matematički izraz bilansa
Mešač sa R ulaznih tokova i jednim izlaznim tokom (adijabatski proces)		CHP	Materijalni	$\sum_{i=1}^R G_{in,i} - G_{out} = 0$
			Energetski	$\sum_{i=1}^R G_{in,i} h_{in,i} - G_{out} h_{out} = 0$
			Eksergetski bilans	$\sum_{i=1}^R E_{in,i} - E_{out} - E_D = 0$
Mešač sa dva ulaznih tokova i jednim izlaznim tokom (adijabatski proces)		CHP	Materijalni	$G_{1,in} + G_{2,in} - G_{out} = 0$
			Energetski	$G_{1,in} h_{1,in} + G_{2,in} h_{2,in} - G_{out} h_{out} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{1,in} + E_{2,in} - E_{out} - E_D = 0$
Ekspander (specijalni slučaj mešača)		CHP	Materijalni	$G_{1,in,w} + G_{2,in,st} + G_{3,in,st} - G_{out,st} = 0$
			Energetski	$G_{1,in,w} h_{1,in,w} + G_{2,in,st} h_{2,in,st} + G_{3,in,st} h_{3,in,st} - G_{out,st} h_{out,st} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{1,in,w} + E_{2,in,st} + E_{3,in,st} - E_{out,st} - E_D = 0$

Tabela P3.1. nastavak

Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model	Bilans komponente	Matematički izraz bilansa
Deareator (specijalni slučaj mešača)		CHP GTM	Materijalni	$G_{1,in,w} + G_{2,in,st} + G_{3,in,st} - G_{out,w} = 0$
			Energetski	$G_{1,in,w} h_{1,in,w} + G_{2,in,st} h_{2,in,st} + G_{3,in,st} h_{3,in,st} - G_{out,w} h_{out,w} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{1,in,w} + E_{2,in,st} + E_{3,in,st} - E_{out,w} - E_D = 0$
Komora za sagorevanje(ložište) (adijabatski proces)			Materijalni	$G_{fuel} + G_{air} - G_{fg} = 0$
			Energetski	$G_{fuel} H_{D,fuel} + G_{fuel} h_{fuel} + G_{air} h_{air} - G_{fg} h_{fg} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{fuel} + E_{air} - E_{fg} - E_D = 0$
Razdelnika sa R izlaznih tokova (adijabatski proces)		CHP GTM	Materijalni	$G_{in} - \sum_{i=1}^R G_{out,i} = 0$
			Energetski	$G_{in} h_{in} - \sum_{i=1}^R G_{out,i} h_{out,i} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{in} - \sum_{i=1}^R E_{out,i} - E_D = 0$

Tabela P3.1. nastavak

Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model	Bilans komponente	Matematički izraz bilansa
Separator sa dva izlazna toka (adijabatski proces)		GTM	Materijalni	$G_{w,in} - G_{w,out} - G_{st,out} = 0$
			Energetski	$G_{w,in} h_{w,in} - G_{w,out} h_{w,out} - G_{st,out} h_{st,out} = 0$
			Eksergetski bilans	$G_{w,in} - G_{w,out} - G_{st,out} - E_D = 0$
Razmenjivač toplote (adijabatski proces)		CHP GTM	Materijalni	$G_{C,in} + G_{H,in} - G_{C,out} - G_{H,out} = 0$
			Energetski	$G_{C,in} h_{C,in} + G_{H,in} h_{H,in} - G_{C,out} h_{C,out} - G_{H,out} h_{H,out} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{C,in} + E_{H,in} - E_{C,out} - E_{H,out} - E_D = 0$
Isparivač (adijabatski proces)		GTM	Materijalni	$G_{C,w,in} + G_H - G_{C,st,out} - G_{H,out} = 0$
			Energetski	$G_{C,w,in} h_{C,w,in} + G_H h_H - G_{C,st,out} h_{C,st,out} - G_{H,out} h_{H,out} = 0$
			Eksergetski bilans	$E_{C,w,in} + E_H - E_{C,st,out} - E_{H,out} - E_D = 0$

Tabela P3.2. Pregled eksergetskih efikasnosti komponenti po pristupu gorivo-produkt

Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model		Matematički izraz bilansa
Turbina sa R izlaznih tokova (adijabatski proces)		CHP	Eksergija goriva	$E_{in} - \sum_{i=1}^R E_{out,i}$
			Eksergija produkta	W_{TB}
			Destrukcija eksergije	$T_0 \left(\sum_{i=1}^R G_{out,i} s_{out,i} - G_{in} s_{in} \right)$
			Eksergetska efikasnost	$W_{TB} / \left(E_{in} - \sum_{i=1}^R E_{out,i} \right)$
Turbina sa jednim izlaznim tokom (adijabatski proces)		CHP GTM	Eksergija goriva	$E_{in} - E_{out}$
			Eksergija produkta	W_{TB}
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{out} s_{out} - G_{in} s_{in})$
			Eksergetska efikasnost	$W_{TB} / (E_{in} - E_{out})$
Pumpa, ventilator (adijabatski proces)		CHP GTM	Eksergija goriva	W
			Eksergija produkta	$E_{in} - E_{out}$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{out} s_{out} - G_{in} s_{in})$
			Eksergetska efikasnost	$(E_{in} - E_{out}) / W$

Tabela P3.2. nastavak

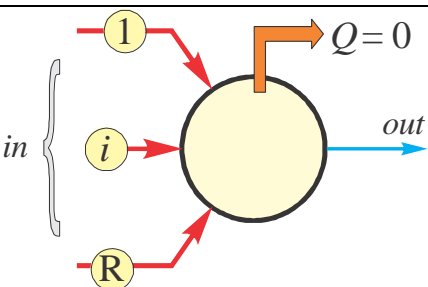
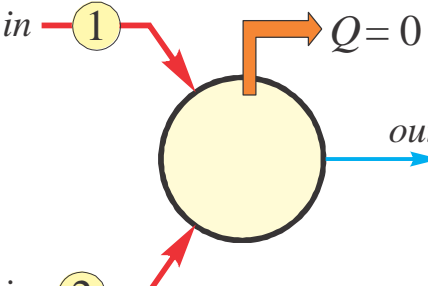
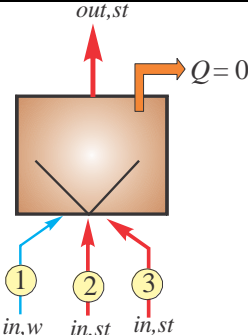
Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model		Matematički izraz bilansa
Mešač sa R ulaznih tokova i jednim izlaznim tokom (adijabatski proces)		CHP	Eksergija goriva	$\sum_{i=1}^R E_{in,i}$
			Eksergija produkta	E_{out}
			Destrukcija eksergije	$T_0 \left(G_{out} s_{out} - \sum_{i=1}^R G_{in,i} s_{in,i} \right)$
			Eksergetska efikasnost	$E_{out} / \sum_{i=1}^R E_{in,i}$
Mešač sa dva ulaznih tokova i jednim izlaznim tokom (adijabatski proces)		CHP	Eksergija goriva	$G_{2,in} (e_{2,in} - e_{out})$
			Eksergija produkta	$G_{1,in} (e_{out} - e_{2,in})$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{out} s_{out} - G_{1,in} s_{1,in} - G_{2,in} s_{2,in})$
			Eksergetska efikasnost	$G_{1,in} (e_{out} - e_{2,in}) / G_{2,in} (e_{2,in} - e_{out})$
Ekspander (specijalni slučaj mešača)		CHP	Eksergija goriva	$E_{1,in,w} - E_{2,in,st} - E_{3,in,st}$
			Eksergija produkta	$E_{out,st}$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{out,st} s_{out,st} - G_{1,in,w} s_{1,iw} - G_{2,in,st} s_{2,in,st} - G_{3,in,st} s_{3,in,st})$
			Eksergetska efikasnost	$(E_{1,in,w} - E_{2,in,st} - E_{3,in,st}) / E_{out,st}$

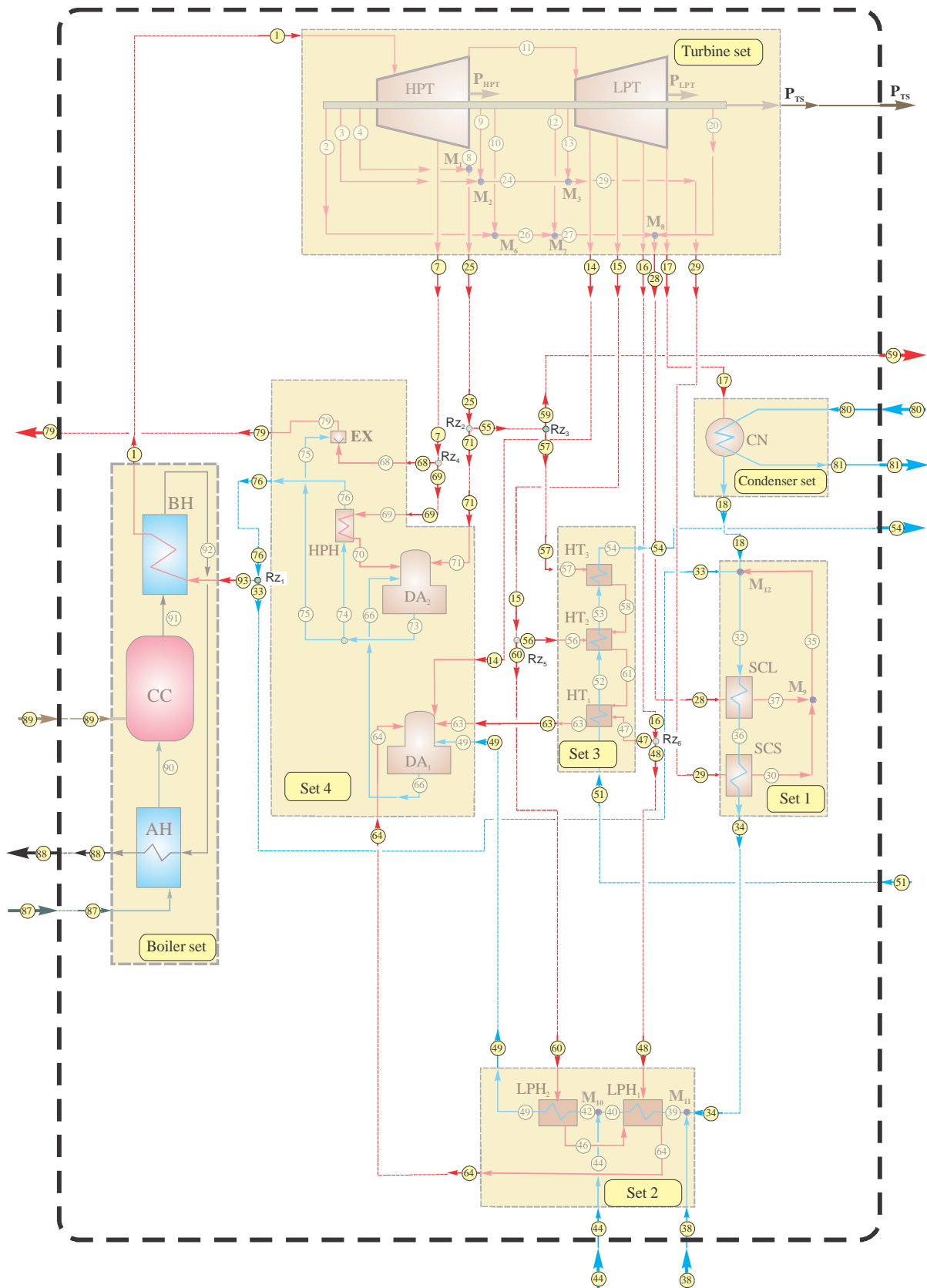
Tabela P3.2. nastavak

Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model		Matematički izraz bilansa
Deareator (specijalni slučaj mešača)		CHP GTM	Eksergija goriva	$E_{2,in,st} + E_{3,in,st} - G_{1,in,w} (e_{out,w} - e_{1,in,w})$
			Eksergija produkta	$G_{1,in,w} (e_{out,w} - e_{1,in,w})$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{out,w} s_{out,w} - G_{1,in,w} s_{1,iw} - G_{2,in,st} s_{2,in,st} - G_{3,in,st} s_{3,in,st})$
			Eksergetska efikasnost	$G_{1,in,w} (e_{out,w} - e_{1,in,w}) / [E_{2,in,st} + E_{3,in,st} - G_{1,in,w} (e_{out,w} - e_{1,in,w})]$
Komora za sagorevanje (ložište) (adijabatski proces)			Eksergija goriva	$E_{CH,fuel} + E_{CH,air}$
			Eksergija produkta	$E_{fg} + (E_{PHfg} - E_{PHfuel} - E_{PHair})$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{fg} s_{fg} - G_{fuel} s_{fuel} - G_{air} s_{air})$
			Eksergetska efikasnost	$[E_{fg} + (E_{PHfg} - E_{PHfuel} - E_{PHair})] / (E_{CH,fuel} + E_{CH,air})$
Razdelnik sa R izlaznih tokova (adijabatski proces)		CHP GTM	Eksergija gor.	E_{in}
			Eksergija produkta	$\sum_{i=1}^R E_{out,i}$
			Destrukcija eksergije	$T_0 \left(\sum_{i=1}^R G_{out,i} s_{out,i} - G_{in} s_{in} \right)$
			Eksergetska efikasnost	$\sum_{i=1}^R E_{out,i} / E_{in}$

Tabela P3.2. nastavak

Opis komponente	Šematski prikaz komponente	Model		Matematički izraz bilansa
Separator sa dva izlazna toka (adijabatski proces)		CHP GTM	Eksergija goriva	$G_{out,w} (e_{in,w} - e_{out,w})$
			Eksergija produkta	$G_{out,st} (e_{out,st} - e_{in,w})$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{out,w} s_{out,w} - G_{out,st} s_{out,st} - G_{in,w} s_{in,w})$
			Eksergetska efikasnost	$G_{out,st} (e_{out,st} - e_{in,w}) / G_{out,w} (e_{in,w} - e_{out,w})$
Razmenjivač toplote (adijabatski proces)		CHP GTM	Eksergija goriva	$E_{H,in} - E_{H,out}$
			Eksergija produkta	$E_{C,out} - E_{C,in}$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{C,out} s_{C,out} + G_{H,out} s_{H,out} - G_{C,in} s_{C,in} - G_{H,in} s_{H,in})$
			Eksergetska efikasnost	$(E_{C,out} - E_{C,in}) / (E_{H,in} - E_{H,out})$
Isparivač (adijabatski proces)			Eksergija goriva	$E_H - E_{H,out}$
			Eksergija produkta	$E_{C,st,out} - E_{C,w,in}$
			Destrukcija eksergije	$T_0 (G_{H,out} s_{H,out} + G_{C,st,out} s_{C,st,out} - G_H s_H - G_{C,w,in} s_{C,w,in})$
			Eksergetska efikasnost	$(E_{C,st,out} - E_{C,w,in}) / (E_H - E_{H,out})$

Prilog P4. Rezultati simulacija operativnih režima u TE-TO Zrenjanin



Slika P4.1. Šema strujnih tokova - Zimski režim 1

Tabela P4.1. Opis strujnih tokova- Zimski režim 1

Br. toka	Opis strujnog toka	Br. toka	Opis strujnog toka
1	Osnovna para	48	Para ka grejaču niskog pritiska LPH ₁
2	Para iz labirintskih zaptivača	49	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂
3	Para iz labirintskih zaptivača	50	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁
4	Para iz labirintskih zaptivača	51	Voda na ulazu u toplifikacioni sistem
5	Para iz tehnološkog oduzimanja	52	Voda između baznih zagrejača HT ₁ , HT ₂
6	Para iz tehnološkog oduzimanja	53	Voda između zagrejača HT ₂ , HT ₃
7	Para iz tehnološkog oduzimanja	54	Voda na izlazu iz toplifikacionog sistema
8	Para iz tehnološkog oduzimanja	55	Para iz tehnološkog oduzimanja
9	Para iz labirintskih zaptivača	56	Para iz tehnološkog oduzimanja
10	Para iz labirintskih zaptivača	57	Para ka vršnom zagrejaču HT ₃
11	Para ka turbini niskog pritiska	58	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₂
12	Para iz labirintskih zaptivača	59	Para iz tehnološkog oduzimanja
13	Para iz labirintskih zaptivača	60	Para iz tehnološkog oduzimanja
14	Para iz tehnološkog oduzimanja	61	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₁
15	Para iz tehnološkog oduzimanja	62	Topla voda iz baznog zagrejača HT ₁
16	Para iz tehnološkog oduzimanja	63	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
17	Para ka kondenzatoru	64	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
18	Kondenzat iz kondenzatora	65	Voda iz deaeratora DA ₁
19	Para iz labirintskih zaptivača	66	Voda ka deaeratoru DA ₂
20	Para iz labirintskih zaptivača	67	Para iz labirintskih zaptivača
21	Rashladna voda	68	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
22	Para iz labirintskih zaptivača	69	Para ka grejaču visokog pritiska HPH
23	Para iz labirintskih zaptivača	70	Para iz grejaču visokog pritiska HPH
24	Para iz labirintskih zaptivača	71	Para iz tehnološkog oduzimanja
25	Para iz tehnološkog oduzimanja	72	Voda iz deaeratora DA ₂
26	Para iz labirintskih zaptivača	73	Voda ka tehnološkom oduzimanju
27	Para iz labirintskih zaptivača	74	Napojna voda ka grejaču v.p. HPH
28	Para iz labirintskih zaptivača	75	Voda ka ekspanderu
29	Para iz labirintskih zaptivača	76	Para iz grejača visokog pritiska HPH
30	Para iz hladnjaka pare sa zaptivača	77	Para iz tehnološkog oduzimanja HPH
31	Para iz hladnjaka pare iz lab.zaptivača	78	Para iz tehnološkog oduzimanja na izlazu
32	Para ka kondenzatoru	79	Para iz ekspandera
33	Demineralizovana voda	80	Voda ka kondenzatoru
34	Kondenzat iz kondenzatora	81	Voda iz kondenzatora
35	Kondenzat ka hladnjaku pare iz lab. zapt.	82	Para iz tehnološkog oduzimanja
36	Kondenzat iz hladnjaka pare iz lab. zapt.	83	Para iz tehnološkog oduzimanja
37	Kondenzat iz hladnjaka pare sa zaptivača	84	Para iz tehnološkog oduzimanja
38	Demineralizovana voda	85	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
39	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₁	86	Para iz tehnološkog oduzimanja ka izlazu
40	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁	87	Hladan vazduh ka predgrejaču
41	Povratna voda ka grejaču LPH ₂	88	Dimni gasovi iz predgrejača
42	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₂	89	Gorivo ka ložištu
43	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂	90	Topao vazduh ka ložištu
44	Povratna voda na ulazu u postrojenje	91	Dimni gasovi ka razmenjivaču kotla
45	Povratna voda ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivača kotla
46	Voda iz grejača ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivača kotla
47	Para ka vršnom zagrejaču HT ₁	93	Napojna voda ka razmenjivaču kotla

Tabela P4.2. Pregled parametara strujnih tokova –Zimski režim 1 (gorivo: prirodni gas)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	173.61	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	599786.00	283895.71
2	1.00	0.02	0.96	470.00	3425.02	8.77	1030.27	78.43	23.59
3	1.00	0.25	1.00	470.00	3424.97	8.75	1035.38	852.82	257.81
4	1.00	1.26	1.00	474.00	3433.44	8.76	1040.74	4322.70	1310.29
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.00	43.20	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	132395.19	51967.05
8	1.00	71.48	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	201294.77	66567.95
9	1.00	0.29	1.00	169.80	2815.81	7.71	711.97	816.59	206.47
10	1.00	0.03	0.96	169.60	2815.66	7.72	706.80	76.59	19.22
11	1.00	57.09	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	160784.88	53171.38
12	1.00	0.04	0.96	138.30	2753.64	7.58	684.45	96.65	24.02
13	1.00	0.17	1.00	138.40	2753.51	7.56	689.50	465.07	116.46
14	1.00	8.40	3.07	146.41	2752.81	7.05	828.17	23126.32	6957.49
15	1.00	15.01	1.00	113.30	2703.04	7.43	673.59	40578.03	10111.88
16	1.00	28.00	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	74896.15	18638.96
17	1.00	5.44	0.04	27.78	2551.58	8.50	231.19	13882.11	1257.81
18	0.00	5.44	0.04	27.70	116.13	0.40	5.27	631.81	28.68
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	275.76	3026.03	8.15	800.93	103.79	27.47
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	311.27	3097.25	8.26	842.96	1669.42	454.35
25	1.00	72.73	5.70	188.54	2827.07	6.94	931.94	205624.01	67783.83
26	1.00	0.05	0.96	309.72	3094.22	8.27	836.21	155.02	41.89
27	1.00	0.09	0.96	239.60	2954.01	8.01	765.96	251.68	65.26
28	1.00	0.12	0.96	250.01	2974.69	8.05	775.74	355.48	92.70
29	1.00	0.71	1.00	270.45	3015.30	8.11	800.69	2134.53	566.81
30	0.00	0.71	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	295.48	39.17
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	9.74	10.00	27.29	115.25	0.40	6.02	1123.00	58.66
33	0.00	3.48	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	146.40	508.89
34	0.00	9.74	10.00	79.93	335.41	1.07	41.93	3268.22	408.57
35	0.00	0.83	0.96	98.47	416.71	1.29	64.33	344.79	53.22
36	0.00	9.74	10.00	34.81	146.67	0.50	9.25	1429.17	90.17
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	49.31	7.20
38	0.00	32.00	10.00	10.00	42.99	0.15	1.47	1375.83	46.98
39	0.00	41.74	10.00	26.33	111.25	0.39	5.66	4644.05	236.24
40	0.00	41.74	10.00	96.28	404.11	1.26	58.70	16868.98	2450.32
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	73.74	5.00	80.46	337.23	1.08	41.94	24868.98	3092.95
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.00	32.00	1.00	59.71	250.00	0.83	23.79	8000.00	761.16
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.31	1.94	1.60	113.30	1165.12	3.24	280.33	2258.00	543.29

nastavak Tabele P4.2.

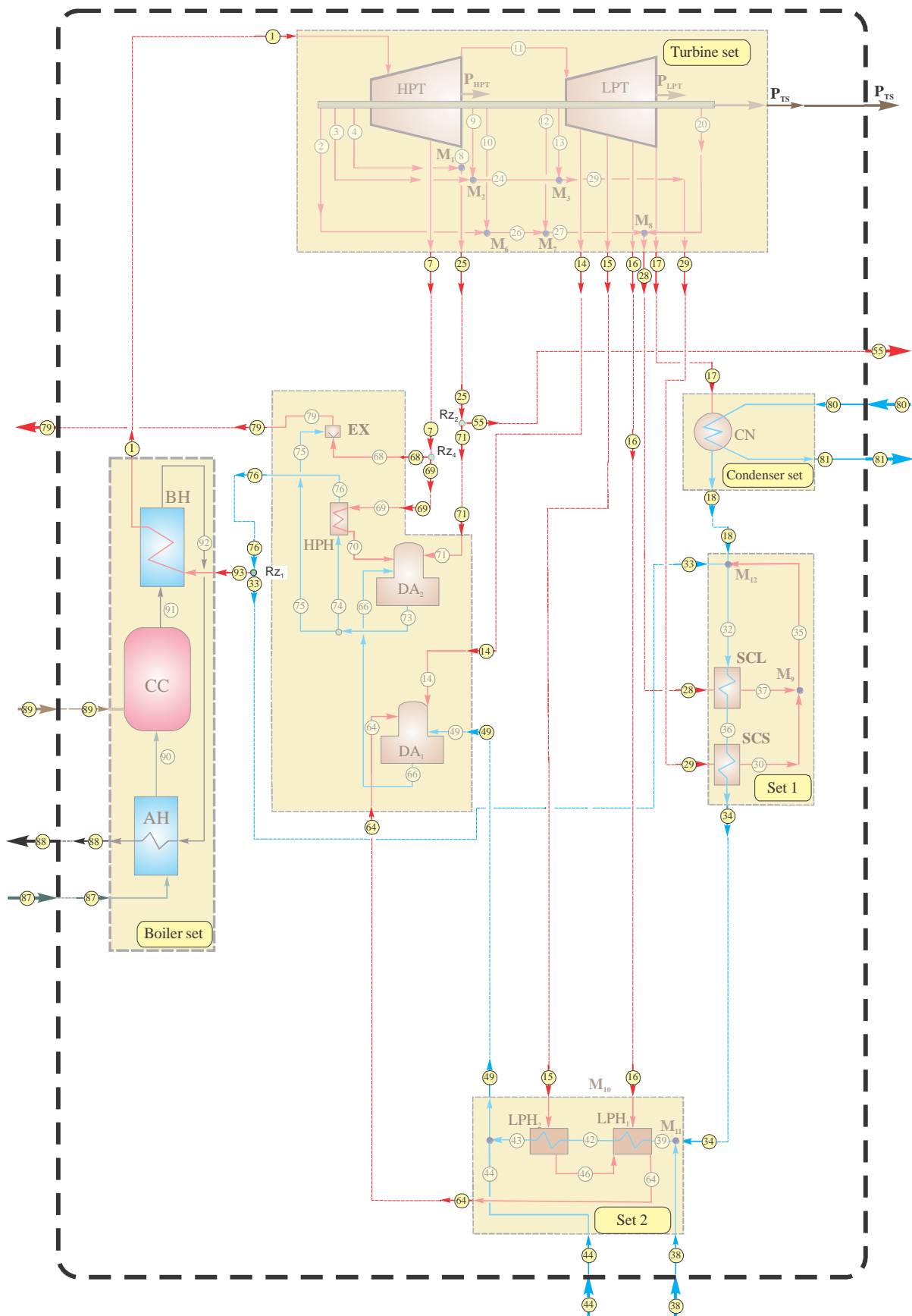
<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	1.00	23.05	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	61655.11	15343.74
48	1.00	4.95	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	13241.04	3295.22
49	0.00	73.74	10.00	89.99	377.65	1.19	51.96	27849.47	3831.86
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	0.00	510.00	20.00	70.00	294.63	0.95	33.93	150260.17	17304.58
52	0.00	510.00	20.00	95.45	401.37	1.25	58.75	204696.55	29965.00
53	0.00	510.00	20.00	105.00	441.60	1.36	69.57	225217.63	35480.96
54	0.00	510.00	20.00	141.00	594.55	1.75	117.05	303218.16	59697.89
55	1.00	66.18	5.70	188.54	2827.07	6.94	931.94	187086.92	61673.09
56	1.00	13.07	1.60	113.30	2703.04	7.43	673.59	35339.54	8806.47
57	1.00	29.42	5.70	188.54	2826.22	6.94	896.37	83147.42	26371.29
58	0.00	29.42	5.70	41.67	174.95	0.59	12.42	5146.88	365.47
59	1.00	36.76	5.70	188.54	2826.22	6.94	896.37	103883.41	32947.98
60	1.00	1.94	1.60	113.30	2703.04	7.43	673.59	5238.49	1305.41
61	0.00	42.49	1.60	112.00	469.84	1.44	76.23	19965.34	3239.17
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	0.00	65.54	1.00	98.97	414.75	1.30	60.82	27184.07	3986.06
64	0.00	6.89	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	3274.12	536.11
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	154.58	20.00	125.14	526.82	1.58	94.85	81433.97	14661.54
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	25.92	5.70	318.70	3064.92	6.82	1203.02	79437.11	31180.23
69	1.00	17.28	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	52958.07	20786.82
70	0.00	17.28	20.90	175.37	743.32	2.09	171.69	12843.71	2966.65
71	1.00	6.56	5.70	188.54	2827.07	6.94	931.94	18537.09	6110.74
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	178.41	6.00	150.00	632.33	1.84	129.21	112814.78	23052.27
74	0.00	173.61	150.00	147.90	632.39	1.80	139.33	109788.67	24189.03
75	0.00	4.80	150.00	147.90	632.39	1.80	139.33	3036.59	669.03
76	0.00	173.61	150.00	201.22	863.45	2.32	229.38	149903.03	39822.69
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.94	30.72	20.00	212.38	2684.69	6.11	1017.72	82473.71	31264.37
80	0.00	1600.00	5.00	15.00	63.46	0.22	1.90	101537.02	3033.44
81	0.00	1600.00	5.00	17.00	71.74	0.25	2.27	114787.32	3636.54
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	177.30	1.01	5.00	279.78	5.63	0.00	49605.02	0.00
88	0.00	186.96	1.01	400.00	451.29	7.24	23.45	84373.24	4385.01
89	0.00	9.66	1.01	5.00	650.83	-0.16	50699.39	6287.03	489756.12
90	0.00	177.30	1.01	500.00	844.22	7.85	231.12	149680.82	40978.32
91	0.00	186.96	1.01	1961.00	3353.33	9.46	2068.52	626937.90	386730.97
92	0.00	186.96	1.01	514.60	986.57	8.03	275.75	184449.04	51554.21
93	0.00	173.61	150.00	210.66	906.03	2.41	872.57	157297.14	151488.05

Tabela P4.3. Pregled parametara strujnih tokova –Zimski režim 1 (gorivo: mazut)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	173.61	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	599786.00	283895.71
2	1.00	0.02	0.96	470.00	3425.02	8.77	1030.27	78.43	23.59
3	1.00	0.25	1.00	470.00	3424.97	8.75	1035.38	852.82	257.81
4	1.00	1.26	1.00	474.00	3433.44	8.76	1040.74	4322.70	1310.29
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.00	43.20	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	132395.19	51967.05
8	1.00	71.48	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	201294.77	66567.95
9	1.00	0.29	1.00	169.80	2815.81	7.71	711.97	816.59	206.47
10	1.00	0.03	0.96	169.60	2815.66	7.72	706.80	76.59	19.22
11	1.00	57.09	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	160784.88	53171.38
12	1.00	0.04	0.96	138.30	2753.64	7.58	684.45	96.65	24.02
13	1.00	0.17	1.00	138.40	2753.51	7.56	689.50	465.07	116.46
14	1.00	8.40	3.07	146.41	2752.81	7.05	828.17	23126.32	6957.49
15	1.00	15.01	1.00	113.30	2703.04	7.43	673.59	40578.03	10111.88
16	1.00	28.00	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	74896.15	18638.96
17	1.00	5.44	0.04	27.78	2551.58	8.50	231.19	13882.11	1257.81
18	0.00	5.44	0.04	27.70	116.13	0.40	5.27	631.81	28.68
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	275.76	3026.03	8.15	800.93	103.79	27.47
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	311.27	3097.25	8.26	842.96	1669.42	454.35
25	1.00	72.73	5.70	188.54	2827.07	6.94	931.94	205624.01	67783.83
26	1.00	0.05	0.96	309.72	3094.22	8.27	836.21	155.02	41.89
27	1.00	0.09	0.96	239.60	2954.01	8.01	765.96	251.68	65.26
28	1.00	0.12	0.96	250.01	2974.69	8.05	775.74	355.48	92.70
29	1.00	0.71	1.00	270.45	3015.30	8.11	800.69	2134.53	566.81
30	0.00	0.71	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	295.48	39.17
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	9.74	10.00	27.29	115.25	0.40	6.02	1123.00	58.66
33	0.00	3.48	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	146.40	508.89
34	0.00	9.74	10.00	79.93	335.41	1.07	41.93	3268.22	408.57
35	0.00	0.83	0.96	98.47	416.71	1.29	64.33	344.79	53.22
36	0.00	9.74	10.00	34.81	146.67	0.50	9.25	1429.17	90.17
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	49.31	7.20
38	0.00	32.00	10.00	10.00	42.99	0.15	1.47	1375.83	46.98
39	0.00	41.74	10.00	26.33	111.25	0.39	5.66	4644.05	236.24
40	0.00	41.74	10.00	96.28	404.11	1.26	58.70	16868.98	2450.32
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	73.74	5.00	80.46	337.23	1.08	41.94	24868.98	3092.95
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.00	32.00	1.00	59.71	250.00	0.83	23.79	8000.00	761.16
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.31	1.94	1.60	113.30	1165.12	3.24	280.33	2258.00	543.29

nastavak Tabele P4.3.

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	1.00	23.05	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	61655.11	15343.74
48	1.00	4.95	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	13241.04	3295.22
49	0.00	73.74	10.00	89.99	377.65	1.19	51.96	27849.47	3831.86
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	0.00	510.00	20.00	70.00	294.63	0.95	33.93	150260.17	17304.58
52	0.00	510.00	20.00	95.45	401.37	1.25	58.75	204696.55	29965.00
53	0.00	510.00	20.00	105.00	441.60	1.36	69.57	225217.63	35480.96
54	0.00	510.00	20.00	141.00	594.55	1.75	117.05	303218.16	59697.89
55	1.00	66.18	5.70	188.54	2827.07	6.94	931.94	187086.92	61673.09
56	1.00	13.07	1.60	113.30	2703.04	7.43	673.59	35339.54	8806.47
57	1.00	29.42	5.70	188.54	2826.22	6.94	896.37	83147.42	26371.29
58	0.00	29.42	5.70	41.67	174.95	0.59	12.42	5146.88	365.47
59	1.00	36.76	5.70	188.54	2826.22	6.94	896.37	103883.41	32947.98
60	1.00	1.94	1.60	113.30	2703.04	7.43	673.59	5238.49	1305.41
61	0.00	42.49	1.60	112.00	469.84	1.44	76.23	19965.34	3239.17
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	0.00	65.54	1.00	98.97	414.75	1.30	60.82	27184.07	3986.06
64	0.00	6.89	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	3274.12	536.11
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	154.58	20.00	125.14	526.82	1.58	94.85	81433.97	14661.54
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	25.92	5.70	318.70	3064.92	6.82	1203.02	79437.11	31180.23
69	1.00	17.28	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	52958.07	20786.82
70	0.00	17.28	20.90	175.37	743.32	2.09	171.69	12843.71	2966.65
71	1.00	6.56	5.70	188.54	2827.07	6.94	931.94	18537.09	6110.74
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	178.41	6.00	150.00	632.33	1.84	129.21	112814.78	23052.27
74	0.00	173.61	150.00	147.90	632.39	1.80	139.33	109788.67	24189.03
75	0.00	4.80	150.00	147.90	632.39	1.80	139.33	3036.59	669.03
76	0.00	173.61	150.00	201.22	863.45	2.32	229.38	149903.03	39822.69
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.94	30.72	20.00	212.38	2684.69	6.11	1017.72	82473.71	31264.37
80	0.00	1600.00	5.00	15.00	63.46	0.22	1.90	101537.02	3033.44
81	0.00	1600.00	5.00	17.00	71.74	0.25	2.27	114787.32	3636.54
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	172.1	1.01	5	278.3	5.63	0	48153.58	0
88	0.00	189.2	1.01	400	431.32	7	22.42	81601.96	4243.21
89	0.00	11.83	1.01	5	464.31	-0.16	41360.97	5492.67	489287.11
90	0.00	172.1	1.01	500	844.51	7.85	230.21	145338.45	39752.97
91	0.00	189.2	1.01	2028	3283.01	9.18	2268.03	621143.6	387980.05
92	0.00	189.2	1.01	514.6	944.79	7.76	264.21	178756.16	49952.17
93	0.00	173.61	150	210.66	905.49	2.41	872.61	157202.41	151487.87



Slika P4.2. Zimski režim 2

Tabela P4.4. Opis strujnih tokova postrojenja - zimski režim 2

Br. toka	Opis strujnog toka	Br. toka	Opis strujnog toka
1	Osnovna para	48	Para ka grejaču niskog pritiska LPH ₁
2	Para iz labirintskih zaptivača	49	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂
3	Para iz labirintskih zaptivača	50	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁
4	Para iz labirintskih zaptivača	51	Voda na ulazu u toplifikacioni sistem
5	Para iz tehnološkog oduzimanja	52	Voda između baznih zagrejača HT ₁ , HT ₂
6	Para iz tehnološkog oduzimanja	53	Voda između zagrejača HT ₂ , HT ₃
7	Para iz tehnološkog oduzimanja	54	Voda na izlazu iz toplifikacionog sistema
8	Para iz tehnološkog oduzimanja	55	Para iz tehnološkog oduzimanja
9	Para iz labirintskih zaptivača	56	Para iz tehnološkog oduzimanja
10	Para iz labirintskih zaptivača	57	Para ka vršnom zagrejaču HT ₃
11	Para ka turbini niskog pritiska	58	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₂
12	Para iz labirintskih zaptivača	59	Para iz tehnološkog oduzimanja
13	Para iz labirintskih zaptivača	60	Para iz tehnološkog oduzimanja
14	Para iz tehnološkog oduzimanja	61	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₁
15	Para iz tehnološkog oduzimanja	62	Topla voda iz baznog zagrejača HT ₁
16	Para iz tehnološkog oduzimanja	63	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
17	Para ka kondenzatoru	64	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
18	Kondenzat iz kondenzatora	65	Voda iz deaeratora DA ₁
19	Para iz labirintskih zaptivača	66	Voda ka deaeratoru DA ₂
20	Para iz labirintskih zaptivača	67	Para iz labirintskih zaptivača
21	Rashladna voda	68	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
22	Para iz labirintskih zaptivača	69	Para ka grejaču visokog pritiska HPH
23	Para iz labirintskih zaptivača	70	Para iz grejača visokog pritiska HPH
24	Para iz labirintskih zaptivača	71	Para iz tehnološkog oduzimanja
25	Para iz tehnološkog oduzimanja	72	Voda iz deaeratora DA ₂
26	Para iz labirintskih zaptivača	73	Voda ka tehnološkom oduzimanju
27	Para iz labirintskih zaptivača	74	Napojna voda ka grejaču v.p. HPH
28	Para iz labirintskih zaptivača	75	Voda ka ekspanderu
29	Para iz labirintskih zaptivača	76	Para iz grejača visokog pritiska HPH
30	Para iz hladnjaka pare sa zaptivača	77	Para iz tehnološkog oduzimanja HPH
31	Para iz hladnjaka pare iz lab.zaptivača	78	Para iz tehnološkog oduzimanja na izlazu
32	Para ka kondenzatoru	79	Para iz ekspandera
33	Demineralizovana voda	80	Voda ka kondenzatoru
34	Kondenzat iz kondenzatora	81	Voda iz kondenzatora
35	Kondenzat ka hladnjaku pare iz lab. zapt.	82	Para iz tehnološkog oduzimanja
36	Kondenzat iz hladnjaka pare iz lab. zapt.	83	Para iz tehnološkog oduzimanja
37	Kondenzat iz hladnjaka pare sa zaptivača	84	Para iz tehnološkog oduzimanja
38	Demineralizovana voda	85	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
39	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₁	86	Para iz tehnološkog oduzimanja ka izlazu
40	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁	87	Hladan vazduh ka predgrejaču
41	Povratna voda ka grejaču LPH ₂	88	Dimni gasovi iz predgrejača
42	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₂	89	Gorivo ka ložištu
43	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂	90	Topao vazduh ka ložištu
44	Povratna voda na ulazu u postrojenje	91	Dimni gasovi ka razmenjivaču kotla
45	Povratna voda ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivača kotla
46	Voda iz grejača ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivača kotla
47	Para ka vršnom zagrejaču HT ₁	93	Napojna voda ka razmenjivaču kotla

Tabela P4.5. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 2 (gorivo:prirodni gas)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	173.61	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	599786.00	283895.71
2	1.00	0.02	0.96	470.00	3425.02	8.77	1030.27	78.43	23.59
3	1.00	0.24	1.00	470.00	3424.97	8.75	1035.38	838.43	253.46
4	1.00	1.26	1.00	474.00	3433.44	8.76	1040.74	4322.70	1310.29
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.00	43.20	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	132395.19	51967.05
8	1.00	57.81	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	162807.26	53840.18
9	1.00	0.29	1.00	169.80	2815.81	7.71	711.97	817.99	206.83
10	1.00	0.03	0.96	169.60	2815.66	7.72	706.80	76.59	19.22
11	1.00	70.76	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	199282.80	65902.60
12	1.00	0.04	0.96	142.60	2762.20	7.60	687.35	96.95	24.13
13	1.00	0.25	1.00	142.70	2762.08	7.58	692.41	677.54	169.85
14	1.00	9.17	4.09	154.40	2761.98	6.94	866.45	25335.64	7947.95
15	1.00	5.57	2.53	127.81	2717.06	7.05	792.53	15136.72	4415.20
16	1.00	10.74	0.93	97.59	2671.75	7.38	655.84	28691.95	7043.03
17	0.90	44.96	0.09	42.82	2328.57	7.41	304.81	104699.13	13705.14
18	0.00	44.96	0.09	42.82	179.33	0.61	12.52	8063.28	562.93
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	256.50	2987.60	8.08	781.96	102.77	26.90
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	309.87	3094.42	8.25	841.45	1656.45	450.43
25	1.00	59.07	5.30	188.60	2829.54	6.98	924.09	167135.43	54584.04
26	1.00	0.05	0.96	309.72	3094.22	8.27	836.21	155.02	41.89
27	1.00	0.09	0.96	241.37	2957.52	8.02	767.61	251.98	65.40
28	1.00	0.12	0.96	245.73	2966.18	8.04	771.69	354.76	92.29
29	1.00	0.78	1.00	257.80	2990.06	8.06	788.28	2334.04	615.33
30	0.00	0.78	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	325.82	50.75
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	49.34	10.00	41.35	174.00	0.59	12.62	8584.86	622.82
33	0.00	3.48	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	146.40	508.89
34	0.00	49.34	10.00	52.57	220.89	0.74	19.54	10898.48	964.26
35	0.00	0.90	0.96	98.47	416.77	1.29	64.38	375.18	57.96
36	0.00	49.34	10.00	42.83	180.19	0.61	13.46	8890.26	663.90
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	49.35	7.21
38	0.00	50.00	10.00	10.00	42.99	0.15	1.47	2149.74	73.40
39	0.00	99.34	10.00	31.14	131.35	0.45	7.59	13048.22	753.91
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	99.34	10.00	86.00	360.88	1.15	47.87	35849.86	4755.30
43	0.00	99.34	10.00	117.69	494.51	1.50	84.16	49124.16	8360.58
44	0.00	33.00	1.00	99.61	420.00	1.31	62.22	13860.00	2053.22
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.00	5.57	2.53	79.81	334.31	1.07	41.08	1862.42	228.86

nastavak Tabele P4.5.

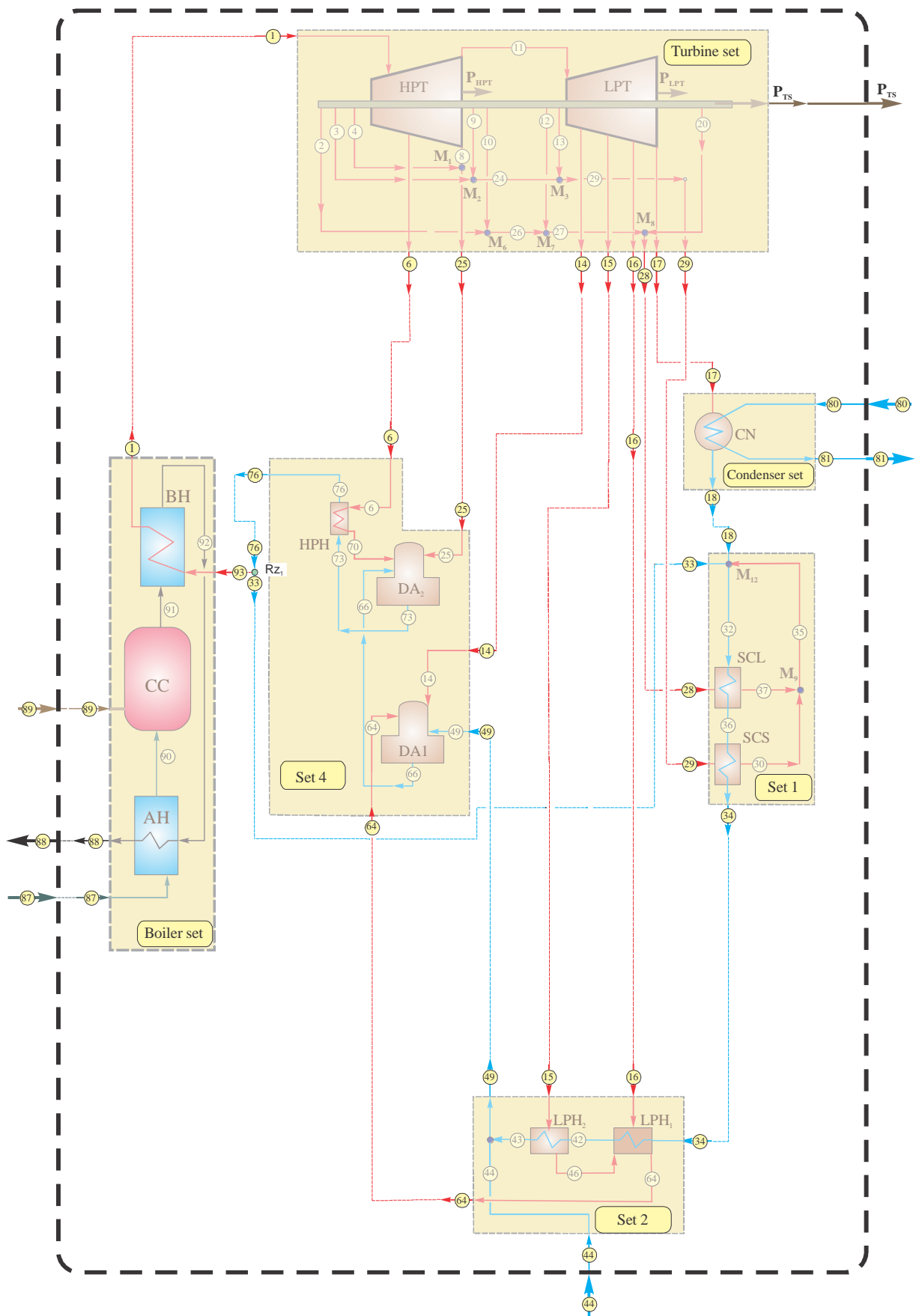
<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i> kg/s	<i>p</i> bar	<i>t</i> C	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kgK	<i>e</i> kJ/kg	<i>H</i> kW	<i>E</i> kW
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	132.34	10.00	113.30	475.93	1.45	78.63	62984.16	10406.32
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	55.56	5.30	188.60	2829.54	6.98	924.09	157198.07	51338.64
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	16.31	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	7752.73	1269.44
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	157.82	20.00	144.33	608.74	1.78	121.93	96072.53	19243.17
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	25.92	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	79437.11	31180.23
69	1.00	17.28	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	52958.07	20786.82
70	0.00	17.28	20.90	140.95	594.31	1.75	117.04	10268.92	2022.27
71	1.00	3.51	5.30	188.60	2829.54	6.98	924.09	9937.35	3245.40
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	178.61	6.00	154.33	651.01	1.89	135.90	116278.81	24273.25
74	0.00	173.61	150.00	145.60	622.59	1.78	135.90	108088.12	23594.10
75	0.00	5.00	150.00	145.60	622.59	1.78	135.90	3114.70	679.90
76	0.00	173.61	150.00	202.35	868.48	2.33	231.52	150777.27	40194.39
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.93	30.92	20.00	212.38	2669.77	6.07	1011.19	82551.81	31266.91
80	0.00	1600.00	5.00	20.00	84.39	0.30	3.17	135024.00	5068.87
81	0.00	1600.00	5.00	35.91	150.83	0.52	9.30	231659.85	14885.40
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	177.27	1.01	5.00	279.83	6.79	0.00	49605.02	0.00
88	0.00	186.93	1.01	400.00	450.85	7.24	23.45	84277.12	4384.12
89	0.00	9.66	1.01	5.00	650.62	-0.16	50689.36	6285.02	489659.23
90	0.00	177.27	1.01	500.00	844.54	7.85	239.17	149712.10	42398.21
91	0.00	186.93	1.01	1961.50	3354.02	9.46	2099.63	626967.17	392483.11
92	0.00	186.93	1.01	514.60	986.38	8.03	275.68	184384.20	51533.79
93	0.00	173.61	150.00	210.66	905.49	2.41	872.63	157203.02	151498.17

Tabela P4.6. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 2 (gorivo:mazut)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	173.61	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	599786.00	283895.71
2	1.00	0.02	0.96	470.00	3425.02	8.77	1030.27	78.43	23.59
3	1.00	0.24	1.00	470.00	3424.97	8.75	1035.38	838.43	253.46
4	1.00	1.26	1.00	474.00	3433.44	8.76	1040.74	4322.70	1310.29
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.00	43.20	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	132395.19	51967.05
8	1.00	57.81	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	162807.26	53840.18
9	1.00	0.29	1.00	169.80	2815.81	7.71	711.97	817.99	206.83
10	1.00	0.03	0.96	169.60	2815.66	7.72	706.80	76.59	19.22
11	1.00	70.76	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	199282.80	65902.60
12	1.00	0.04	0.96	142.60	2762.20	7.60	687.35	96.95	24.13
13	1.00	0.25	1.00	142.70	2762.08	7.58	692.41	677.54	169.85
14	1.00	9.17	4.09	154.40	2761.98	6.94	866.45	25335.64	7947.95
15	1.00	5.57	2.53	127.81	2717.06	7.05	792.53	15136.72	4415.20
16	1.00	10.74	0.93	97.59	2671.75	7.38	655.84	28691.95	7043.03
17	0.90	44.96	0.09	42.82	2328.57	7.41	304.81	104699.13	13705.14
18	0.00	44.96	0.09	42.82	179.33	0.61	12.52	8063.28	562.93
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	256.50	2987.60	8.08	781.96	102.77	26.90
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	309.87	3094.42	8.25	841.45	1656.45	450.43
25	1.00	59.07	5.30	188.60	2829.54	6.98	924.09	167135.43	54584.04
26	1.00	0.05	0.96	309.72	3094.22	8.27	836.21	155.02	41.89
27	1.00	0.09	0.96	241.37	2957.52	8.02	767.61	251.98	65.40
28	1.00	0.12	0.96	245.73	2966.18	8.04	771.69	354.76	92.29
29	1.00	0.78	1.00	257.80	2990.06	8.06	788.28	2334.04	615.33
30	0.00	0.78	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	325.82	50.75
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	49.34	10.00	41.35	174.00	0.59	12.62	8584.86	622.82
33	0.00	3.48	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	146.40	508.89
34	0.00	49.34	10.00	52.57	220.89	0.74	19.54	10898.48	964.26
35	0.00	0.90	0.96	98.47	416.77	1.29	64.38	375.18	57.96
36	0.00	49.34	10.00	42.83	180.19	0.61	13.46	8890.26	663.90
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	49.35	7.21
38	0.00	50.00	10.00	10.00	42.99	0.15	1.47	2149.74	73.40
39	0.00	99.34	10.00	31.14	131.35	0.45	7.59	13048.22	753.91
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	99.34	10.00	86.00	360.88	1.15	47.87	35849.86	4755.30
43	0.00	99.34	10.00	117.69	494.51	1.50	84.16	49124.16	8360.58
44	0.00	33.00	1.00	99.61	420.00	1.31	62.22	13860.00	2053.22
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.00	5.57	2.53	79.81	334.31	1.07	41.08	1862.42	228.86

nastavak Tabele P4.6.

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	132.34	10.00	113.30	475.93	1.45	78.63	62984.16	10406.32
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	55.56	5.30	188.60	2829.54	6.98	924.09	157198.07	51338.64
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	16.31	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	7752.73	1269.44
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	157.82	20.00	144.33	608.74	1.78	121.93	96072.53	19243.17
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	25.92	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	79437.11	31180.23
69	1.00	17.28	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	52958.07	20786.82
70	0.00	17.28	20.90	140.95	594.31	1.75	117.04	10268.92	2022.27
71	1.00	3.51	5.30	188.60	2829.54	6.98	924.09	9937.35	3245.40
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	178.61	6.00	154.33	651.01	1.89	135.90	116278.81	24273.25
74	0.00	173.61	150.00	145.60	622.59	1.78	135.90	108088.12	23594.10
75	0.00	5.00	150.00	145.60	622.59	1.78	135.90	3114.70	679.90
76	0.00	173.61	150.00	202.35	868.48	2.33	231.52	150777.27	40194.39
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.93	30.92	20.00	212.38	2669.77	6.07	1011.19	82551.81	31266.91
80	0.00	1600.00	5.00	20.00	84.39	0.30	3.17	135024.00	5068.87
81	0.00	1600.00	5.00	35.91	150.83	0.52	9.30	231659.85	14885.40
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	172.00	1.01	5.00	278.30	5.63	0.00	48125.60	0.00
88	0.00	189.20	1.01	400.00	431.32	7.00	22.42	81601.96	4242.04
89	0.00	11.83	1.01	5.00	464.31	-0.11	41348.27	5492.67	489150.12
90	0.00	172.00	1.01	500.00	844.51	7.85	231.08	145254.02	39744.97
91	0.00	189.20	1.01	2028.00	3283.01	9.18	2050.23	621143.60	387903.79
92	0.00	189.20	1.01	514.60	944.79	7.76	263.96	178756.16	49942.15
93	0.00	173.61	150.00	210.78	905.49	2.41	872.81	157202.42	151530.04



Slika P4.3. Zimski režim 3

Tabela P4.7. Opis strujnih tokova postrojenja - zimski režim 3

Br. toka	Opis strujnog toka	Br. toka	Opis strujnog toka
1	Osnovna para	48	Para ka grejaču niskog pritiska LPH ₁
2	Para iz labirintskih zaptivača	49	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂
3	Para iz labirintskih zaptivača	50	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁
4	Para iz labirintskih zaptivača	51	Voda na ulazu u toplifikacioni sistem
5	Para iz tehnološkog oduzimanja	52	Voda između baznih zagrejača HT ₁ , HT ₂
6	Para iz tehnološkog oduzimanja	53	Voda između zagrejača HT ₂ , HT ₃
7	Para iz tehnološkog oduzimanja	54	Voda na izlazu iz toplifikacionog sistema
8	Para iz tehnološkog oduzimanja	55	Para iz tehnološkog oduzimanja
9	Para iz labirintskih zaptivača	56	Para iz tehnološkog oduzimanja
10	Para iz labirintskih zaptivača	57	Para ka vršnom zagrejaču HT ₃
11	Para ka turbini niskog pritiska	58	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₂
12	Para iz labirintskih zaptivača	59	Para iz tehnološkog oduzimanja
13	Para iz labirintskih zaptivača	60	Para iz tehnološkog oduzimanja
14	Para iz tehnološkog oduzimanja	61	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₁
15	Para iz tehnološkog oduzimanja	62	Topla voda iz baznog zagrejača HT ₁
16	Para iz tehnološkog oduzimanja	63	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
17	Para ka kondenzatoru	64	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
18	Kondenzat iz kondenzatora	65	Voda iz deaeratora DA ₁
19	Para iz labirintskih zaptivača	66	Voda ka deaeratoru DA ₂
20	Para iz labirintskih zaptivača	67	Para iz labirintskih zaptivača
21	Rashladna voda	68	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
22	Para iz labirintskih zaptivača	69	Para ka grejaču visokog pritiska HPH
23	Para iz labirintskih zaptivača	70	Para iz grejaču visokog pritiska HPH
24	Para iz labirintskih zaptivača	71	Para iz tehnološkog oduzimanja
25	Para iz tehnološkog oduzimanja	72	Voda iz deaeratora DA ₂
26	Para iz labirintskih zaptivača	73	Voda ka tehnološkom oduzimanju
27	Para iz labirintskih zaptivača	74	Napojna voda ka grejaču v.p. HPH
28	Para iz labirintskih zaptivača	75	Voda ka ekspanderu
29	Para iz labirintskih zaptivača	76	Para iz grejača visokog pritiska HPH
30	Para iz hladnjaka pare sa zaptivača	77	Para iz tehnološkog oduzimanja HPH
31	Para iz hladnjaka pare iz lab.zaptivača	78	Para iz tehnološkog oduzimanja na izlazu
32	Para ka kondenzatoru	79	Para iz ekspandera
33	Demineralizovana voda	80	Voda ka kondenzatoru
34	Kondenzat iz kondenzatora	81	Voda iz kondenzatora
35	Kondenzat ka hladnjaku pare iz lab. zapt.	82	Para iz tehnološkog oduzimanja
36	Kondenzat iz hladnjaka pare iz lab. zapt.	83	Para iz tehnološkog oduzimanja
37	Kondenzat iz hladnjaka pare sa zaptivača	84	Para iz tehnološkog oduzimanja
38	Demineralizovana voda	85	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
39	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₁	86	Para iz tehnološkog oduzimanja ka izlazu
40	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁	87	Hladan vazduh ka predgrejaču
41	Povratna voda ka grejaču LPH ₂	88	Dimni gasovi iz predgrejača
42	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₂	89	Gorivo ka ložištu
43	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂	90	Topao vazduh ka ložištu
44	Povratna voda na ulazu u postrojenje	91	Dimni gasovi ka razmenjivaču kotla
45	Povratna voda ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
46	Voda iz grejača ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
47	Para ka vršnom zagrejaču HT ₁	93	Napojna voda ka razmenjivaču kotla

Tabela P4.8. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 3 (gorivo:prirodni gas)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	59.08	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	204121.60	96616.54
2	1.00	0.02	0.96	423.00	3326.36	8.63	969.05	77.84	22.68
3	1.00	0.25	1.00	423.00	3326.31	8.61	974.15	831.24	243.44
4	1.00	0.28	1.00	427.00	3334.65	8.63	979.23	933.70	274.18
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.00	3.25	12.90	336.70	3123.65	7.13	1176.37	10158.12	3825.56
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1.00	1.16	5.88	262.30	2983.84	7.24	1006.47	3473.19	1171.53
9	1.00	0.27	1.00	254.30	2983.09	8.05	784.91	793.50	208.78
10	1.00	0.02	0.96	254.20	2983.02	8.07	779.74	74.28	19.42
11	1.00	53.82	5.88	261.80	2982.80	7.24	1005.96	160545.44	54144.60
12	1.00	0.03	0.96	228.40	2931.81	7.97	755.71	92.94	23.96
13	1.00	0.21	1.00	228.40	2931.66	7.95	760.77	605.09	157.02
14	1.00	2.09	3.83	233.38	2931.00	7.34	928.23	6111.13	1935.36
15	1.00	2.24	2.42	193.28	2855.11	7.39	837.93	6386.87	1874.44
16	1.00	3.51	0.99	116.26	2709.17	7.45	673.90	9498.37	2362.70
17	0.94	45.72	0.10	46.58	2447.34	7.70	343.90	111900.56	15724.34
18	0.00	45.72	0.10	46.58	195.04	0.66	14.74	8917.91	673.96
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	305.00	3084.70	8.25	831.17	106.11	28.59
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.52	1.00	336.99	3149.33	8.34	871.23	1624.74	449.47
25	1.00	1.44	4.15	292.70	3051.75	7.52	997.42	4406.72	1440.27
26	1.00	0.05	0.96	336.96	3149.35	8.36	866.11	152.11	41.83
27	1.00	0.08	0.96	294.29	3063.16	8.22	819.90	245.05	65.59
28	1.00	0.11	0.96	297.51	3069.63	8.23	823.26	351.17	94.18
29	1.00	0.72	1.00	306.25	3087.13	8.24	837.58	2229.83	604.99
30	0.00	0.72	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	301.49	46.96
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	47.75	10.00	46.40	195.12	0.66	15.57	9316.60	743.31
33	0.00	1.19	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	49.99	59.34
34	0.00	47.75	10.00	57.59	241.88	0.80	23.08	11548.90	1102.18
35	0.00	0.84	0.96	98.47	416.75	1.29	64.36	348.70	53.85
36	0.00	47.75	10.00	47.93	201.49	0.68	16.51	9620.56	788.37
37	0.00	0.11	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	47.21	6.89
38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	0.00	47.75	10.00	57.59	241.88	0.80	23.08	11548.90	1102.18
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	47.75	10.00	96.00	402.93	1.26	58.39	19238.49	2788.00
43	0.00	47.75	10.00	123.08	517.40	1.56	91.17	24704.28	4353.21
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.00	2.24	2.42	98.23	411.75	1.29	60.13	921.08	134.50

nastavak Tabele P4.8.

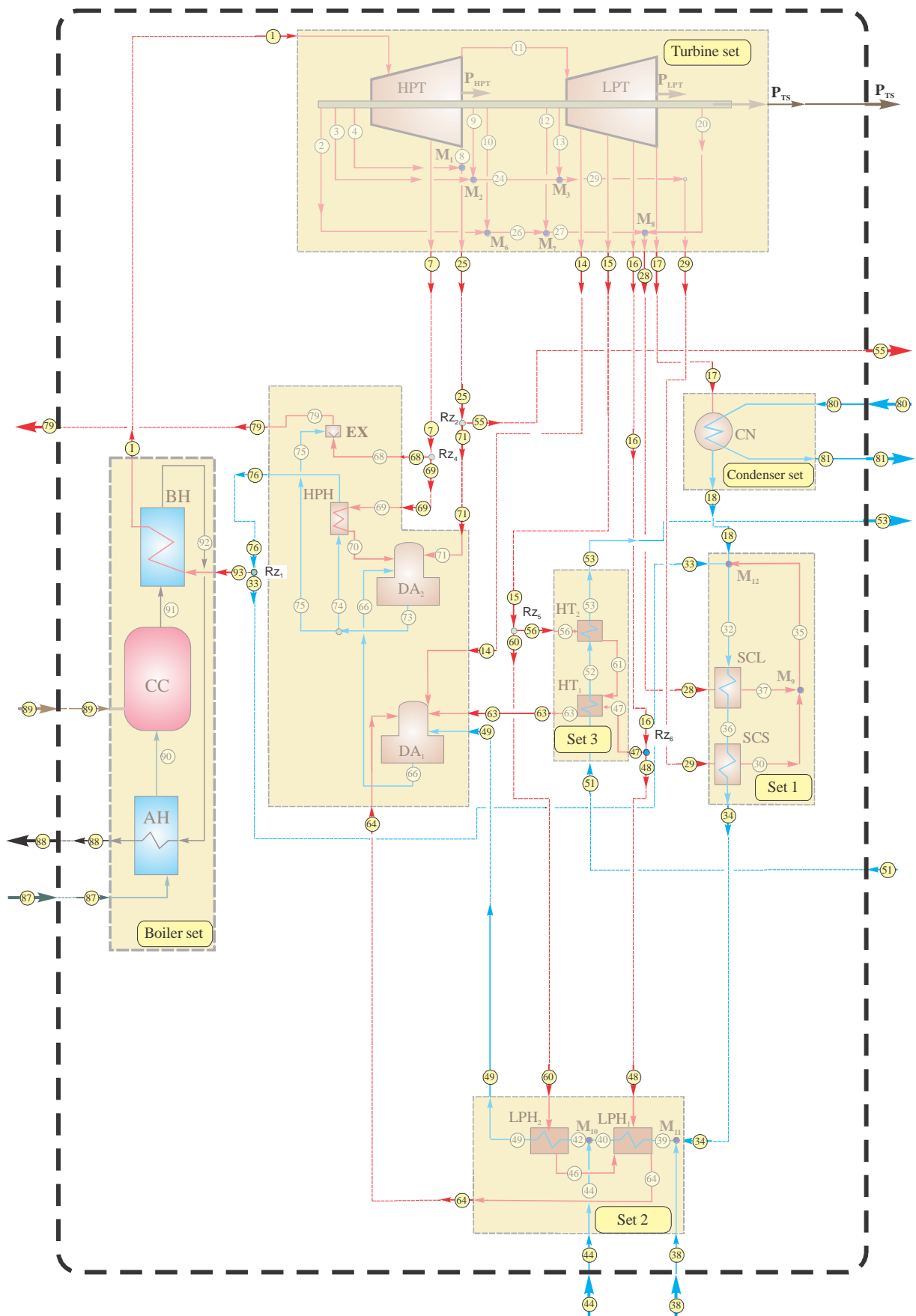
<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	47.75	10.00	123.08	517.40	1.56	91.17	24704.28	4353.21
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	1.00	13.07	1.60	113.30	2703.04	7.43	673.59	35339.54	8806.47
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	5.74	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	2729.86	446.99
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	55.58	20.00	143.13	603.60	1.77	120.16	33545.27	6677.73
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0.00	3.25	12.90	94.10	395.16	1.24	56.61	1285.06	184.08
71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	60.27	6.00	154.33	651.01	1.89	135.90	39237.05	8190.75
74	0.00	60.27	6.00	154.33	651.01	1.89	135.90	39237.05	8190.75
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	0.06	60.27	6.00	158.83	798.23	2.23	190.02	48110.11	11452.40
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0.00	1600.00	5.00	20.00	84.39	0.30	3.17	135024.00	5068.87
81	0.00	1600.00	5.00	35.42	148.75	0.51	9.05	238006.65	14472.07
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	63.04	1.01	5.00	279.78	5.63	0.00	17637.34	0.00
88	0.00	66.48	1.01	400.00	451.29	7.24	23.45	30001.78	1559.02
89	0.00	3.44	1.01	5.00	649.74	-0.16	50621.51	2235.11	174137.99
90	0.00	63.04	1.01	500.00	844.22	7.85	231.12	53219.85	14570.07
91	0.00	66.48	1.01	1953.00	3339.63	9.46	2066.16	222018.53	137358.02
92	0.00	66.48	1.01	514.50	986.53	8.03	275.68	65584.28	18327.16
93	0.00	59.08	150.00	184.78	905.49	2.41	821.00	47687.35	48.51

Tabela P4.9. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 3 (gorivo:mazut)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	59.08	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	204121.60	96616.54
2	1.00	0.02	0.96	423.00	3326.36	8.63	969.05	77.84	22.68
3	1.00	0.25	1.00	423.00	3326.31	8.61	974.15	831.24	243.44
4	1.00	0.28	1.00	427.00	3334.65	8.63	979.23	933.70	274.18
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.00	3.25	12.90	336.70	3123.65	7.13	1176.37	10158.12	3825.56
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1.00	1.16	5.88	262.30	2983.84	7.24	1006.47	3473.19	1171.53
9	1.00	0.27	1.00	254.30	2983.09	8.05	784.91	793.50	208.78
10	1.00	0.02	0.96	254.20	2983.02	8.07	779.74	74.28	19.42
11	1.00	53.82	5.88	261.80	2982.80	7.24	1005.96	160545.44	54144.60
12	1.00	0.03	0.96	228.40	2931.81	7.97	755.71	92.94	23.96
13	1.00	0.21	1.00	228.40	2931.66	7.95	760.77	605.09	157.02
14	1.00	2.09	3.83	233.38	2931.00	7.34	928.23	6111.13	1935.36
15	1.00	2.24	2.42	193.28	2855.11	7.39	837.93	6386.87	1874.44
16	1.00	3.51	0.99	116.26	2709.17	7.45	673.90	9498.37	2362.70
17	0.94	45.72	0.10	46.58	2447.34	7.70	343.90	111900.56	15724.34
18	0.00	45.72	0.10	46.58	195.04	0.66	14.74	8917.91	673.96
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	305.00	3084.70	8.25	831.17	106.11	28.59
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.52	1.00	336.99	3149.33	8.34	871.23	1624.74	449.47
25	1.00	1.44	4.15	292.70	3051.75	7.52	997.42	4406.72	1440.27
26	1.00	0.05	0.96	336.96	3149.35	8.36	866.11	152.11	41.83
27	1.00	0.08	0.96	294.29	3063.16	8.22	819.90	245.05	65.59
28	1.00	0.11	0.96	297.51	3069.63	8.23	823.26	351.17	94.18
29	1.00	0.72	1.00	306.25	3087.13	8.24	837.58	2229.83	604.99
30	0.00	0.72	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	301.49	46.96
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	47.75	10.00	46.40	195.12	0.66	15.57	9316.60	743.31
33	0.00	1.19	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	49.99	59.34
34	0.00	47.75	10.00	57.59	241.88	0.80	23.08	11548.90	1102.18
35	0.00	0.84	0.96	98.47	416.75	1.29	64.36	348.70	53.85
36	0.00	47.75	10.00	47.93	201.49	0.68	16.51	9620.56	788.37
37	0.00	0.11	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	47.21	6.89
38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	0.00	47.75	10.00	57.59	241.88	0.80	23.08	11548.90	1102.18
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	47.75	10.00	96.00	402.93	1.26	58.39	19238.49	2788.00
43	0.00	47.75	10.00	123.08	517.40	1.56	91.17	24704.28	4353.21
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.00	2.24	2.42	98.23	411.75	1.29	60.13	921.08	134.50

nastavak Tabele P4.9.

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	47.75	10.00	123.08	517.40	1.56	91.17	24704.28	4353.21
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	1.00	13.07	1.60	113.30	2703.04	7.43	673.59	35339.54	8806.47
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	5.74	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	2729.86	446.99
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	55.58	20.00	143.13	603.60	1.77	120.16	33545.27	6677.73
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0.00	3.25	12.90	94.10	395.16	1.24	56.61	1285.06	184.08
71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	60.27	6.00	154.33	651.01	1.89	135.90	39237.05	8190.75
74	0.00	60.27	6.00	154.33	651.01	1.89	135.90	39237.05	8190.75
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	0.06	60.27	6.00	158.83	798.23	2.23	190.02	48110.11	11452.40
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0.00	1600.00	5.00	20.00	84.39	0.30	3.17	135024.00	5068.87
81	0.00	1600.00	5.00	35.42	148.75	0.51	9.05	238006.65	14472.07
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	61.18	1.01	5.00	278.30	5.63	0.00	48032.15	0.00
88	0.00	67.29	1.01	400.00	431.32	7.00	7.99	81431.17	1559.10
89	0.00	3.44	1.01	5.00	464.31	-0.11	14740.87	7676.55	174138.04
90	0.00	61.18	1.01	500.00	844.51	7.85	82.34	144971.94	14570.02
91	0.00	67.29	1.01	2028.00	3283.01	9.18	730.69	619843.53	137358.23
92	0.00	67.29	1.01	514.60	944.79	7.76	94.07	178382.02	18326.99
93	0.00	59.08	150.00	184.78	791.22	2.17	282.57	135824.83	48508.10



Slika P4.4. Zimski režim 4

Tabela P4.10. Opis strujnih tokova postrojenja - zimski režim 4

Br. toka	Opis strujnog toka	Br. toka	Opis strujnog toka
1	Osnovna para	48	Para ka grejaču niskog pritiska LPH ₁
2	Para iz labirintskih zaptivača	49	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂
3	Para iz labirintskih zaptivača	50	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁
4	Para iz labirintskih zaptivača	51	Voda na ulazu u toplifikacioni sistem
5	Para iz tehnološkog oduzimanja	52	Voda između baznih zagrejača HT ₁ , HT ₂
6	Para iz tehnološkog oduzimanja	53	Voda između zagrejača HT ₂ , HT ₃
7	Para iz tehnološkog oduzimanja	54	Voda na izlazu iz toplifikacionog sistema
8	Para iz tehnološkog oduzimanja	55	Para iz tehnološkog oduzimanja
9	Para iz labirintskih zaptivača	56	Para iz tehnološkog oduzimanja
10	Para iz labirintskih zaptivača	57	Para ka vršnom zagrejaču HT ₃
11	Para ka turbini niskog pritiska	58	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₂
12	Para iz labirintskih zaptivača	59	Para iz tehnološkog oduzimanja
13	Para iz labirintskih zaptivača	60	Para iz tehnološkog oduzimanja
14	Para iz tehnološkog oduzimanja	61	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₁
15	Para iz tehnološkog oduzimanja	62	Topla voda iz baznog zagrejača HT ₁
16	Para iz tehnološkog oduzimanja	63	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
17	Para ka kondenzatoru	64	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
18	Kondenzat iz kondenzatora	65	Voda iz deaeratora DA ₁
19	Para iz labirintskih zaptivača	66	Voda ka deaeratoru DA ₂
20	Para iz labirintskih zaptivača	67	Para iz labirintskih zaptivača
21	Rashladna voda	68	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
22	Para iz labirintskih zaptivača	69	Para ka grejaču visokog pritiska HPH
23	Para iz labirintskih zaptivača	70	Para iz grejaču visokog pritiska HPH
24	Para iz labirintskih zaptivača	71	Para iz tehnološkog oduzimanja
25	Para iz tehnološkog oduzimanja	72	Voda iz deaeratora DA ₂
26	Para iz labirintskih zaptivača	73	Voda ka tehnološkom oduzimanju
27	Para iz labirintskih zaptivača	74	Napojna voda ka grejaču v.p. HPH
28	Para iz labirintskih zaptivača	75	Voda ka ekspanderu
29	Para iz labirintskih zaptivača	76	Para iz grejača visokog pritiska HPH
30	Para iz hladnjaka pare sa zaptivača	77	Para iz tehnološkog oduzimanja HPH
31	Para iz hladnjaka pare iz lab.zaptivača	78	Para iz tehnološkog oduzimanja na izlazu
32	Para ka kondenzatoru	79	Para iz ekspandera
33	Demineralizovana voda	80	Voda ka kondenzatoru
34	Kondenzat iz kondenzatora	81	Voda iz kondenzatora
35	Kondenzat ka hladnjaku pare iz lab. zapt.	82	Para iz tehnološkog oduzimanja
36	Kondenzat iz hladnjaka pare iz lab. zapt.	83	Para iz tehnološkog oduzimanja
37	Kondenzat iz hladnjaka pare sa zaptivača	84	Para iz tehnološkog oduzimanja
38	Demineralizovana voda	85	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
39	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₁	86	Para iz tehnološkog oduzimanja ka izlazu
40	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁	87	Hladan vazduh ka predgrejaču
41	Povratna voda ka grejaču LPH ₂	88	Dimni gasovi iz predgrejača
42	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₂	89	Gorivo ka ložištu
43	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂	90	Topao vazduh ka ložištu
44	Povratna voda na ulazu u postrojenje	91	Dimni gasovi ka razmenjivaču kotla
45	Povratna voda ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
46	Voda iz grejača ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
47	Para ka vršnom zagrejaču HT ₁	93	Napojna voda ka razmenjivaču kotla

Tabela P4.11. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 4 (gorivo:prirodni gas)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	173.81	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	600483.86	284226.03
2	1.00	0.02	0.96	470.00	3425.02	8.77	1030.27	78.43	23.59
3	1.00	0.25	1.00	470.00	3424.97	8.75	1035.38	852.82	257.81
4	1.00	1.26	1.00	474.00	3433.44	8.76	1040.74	4326.13	1311.33
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.00	43.23	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	132490.20	52004.34
8	1.00	59.44	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	167395.01	55357.34
9	1.00	0.29	1.00	169.20	2814.63	7.70	711.51	817.93	206.77
10	1.00	0.03	0.96	169.10	2814.67	7.72	706.42	76.56	19.21
11	1.00	69.30	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	195161.72	64539.76
12	1.00	0.04	0.96	135.00	2747.07	7.56	682.25	96.70	24.02
13	1.00	0.20	1.00	135.10	2746.92	7.54	687.30	554.88	138.83
14	1.00	11.61	3.52	145.39	2746.61	6.97	842.73	31890.85	9784.89
15	1.00	25.29	1.40	109.30	2690.01	7.25	711.54	68024.90	17993.46
16	1.00	26.59	0.63	87.10	2654.80	7.52	602.51	70577.88	16017.62
17	1.00	5.54	0.03	26.13	2548.60	8.54	218.13	14123.07	1208.78
18	0.00	5.54	0.03	26.10	109.44	0.38	4.67	606.45	25.87
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	317.51	3109.94	8.30	844.62	107.60	29.22
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	310.80	3096.30	8.25	842.45	1670.76	454.59
25	1.00	60.70	5.20	188.18	2829.20	6.99	921.63	171727.06	55940.83
26	1.00	0.05	0.96	309.46	3093.69	8.27	835.93	154.99	41.88
27	1.00	0.09	0.96	237.97	2950.78	8.01	764.45	251.70	65.21
28	1.00	0.12	0.96	261.07	2996.70	8.10	786.39	359.30	94.29
29	1.00	0.74	1.00	263.40	3001.23	8.08	793.73	2225.71	588.63
30	0.00	0.74	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	309.55	48.21
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	9.88	10.00	26.65	112.55	0.39	5.78	1111.88	57.05
33	0.00	3.48	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	146.40	508.89
34	0.00	9.88	10.00	80.52	337.88	1.08	42.49	3337.87	419.78
35	0.00	0.86	0.96	98.47	416.74	1.29	64.35	359.02	55.44
36	0.00	9.88	10.00	34.15	143.91	0.49	8.94	1421.70	88.34
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	49.48	7.22
38	0.00	50.00	10.00	10.00	42.99	0.15	1.47	2149.74	73.40
39	0.00	59.88	10.00	21.64	91.64	0.32	4.06	5487.61	243.35
40	0.00	59.88	10.00	76.38	320.52	1.03	38.61	19192.31	2311.64
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	91.88	5.00	82.42	345.45	1.10	43.83	31739.51	4027.23
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.00	32.00	1.00	93.59	392.10	1.23	54.90	12547.20	1756.92
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.06	3.06	1.60	113.30	617.20	1.82	119.48	1888.00	365.49

nastavak Tabele P4.11.

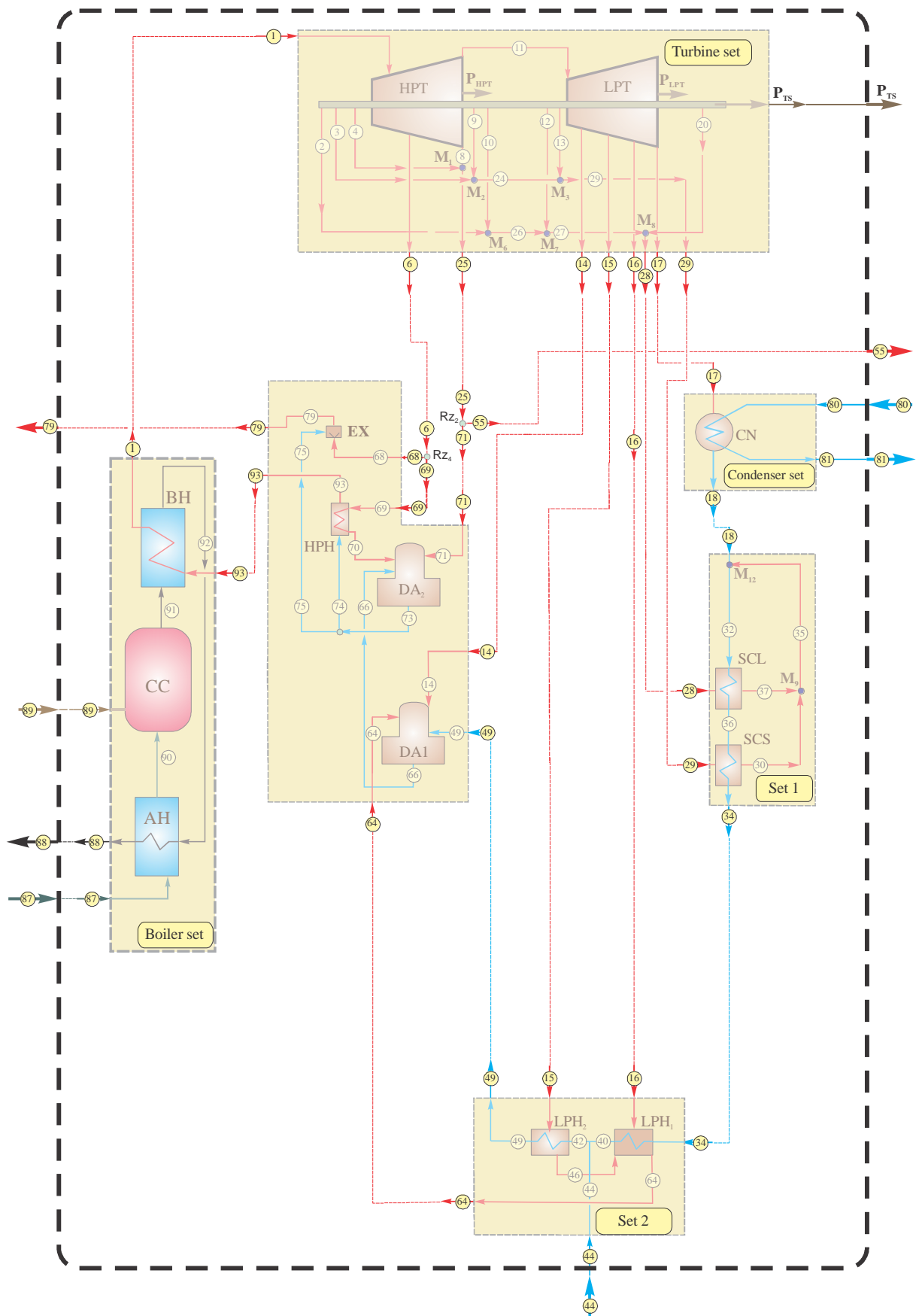
<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	1.00	20.50	0.63	87.10	2654.80	7.52	602.51	54412.80	12348.96
48	1.00	6.09	0.63	87.10	2654.80	7.52	602.51	16165.08	3668.66
49	0.00	91.88	10.00	98.74	414.46	1.29	61.43	38080.25	5643.85
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	0.00	510.00	20.00	60.00	252.82	0.83	25.88	128936.63	13197.46
52	0.00	510.00	20.00	79.85	335.88	1.07	42.83	171300.68	21841.75
53	0.00	510.00	20.00	106.00	445.82	1.37	70.75	227369.58	36081.39
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	55.56	5.20	188.18	2829.20	6.99	921.63	157179.29	51201.83
56	0.97	22.23	1.60	109.30	2690.01	7.25	711.54	59796.17	15816.85
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.97	3.06	1.60	109.30	2690.01	7.25	711.54	8228.73	2176.61
61	0.00	22.23	1.60	40.00	167.68	0.57	11.11	3727.28	247.06
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	0.00	42.73	1.00	88.16	369.25	1.17	49.19	15776.01	2101.61
64	0.00	9.15	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	4348.38	712.01
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	155.36	20.00	137.60	579.90	1.71	112.10	90095.48	17416.87
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	25.94	5.70	318.70	3064.92	6.82	1203.02	79494.12	31202.60
69	1.00	17.29	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	52996.08	20801.74
70	0.00	17.29	20.90	159.00	672.00	1.93	144.59	11619.62	2500.19
71	1.00	5.14	5.20	188.18	2829.20	6.99	921.63	14547.77	4739.00
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	177.80	6.00	155.00	653.91	1.89	136.95	116262.87	24348.89
74	0.00	170.34	150.00	146.30	625.57	1.79	136.94	108605.47	23774.45
75	0.00	7.46	150.00	146.30	625.57	1.79	136.94	2618.77	573.27
76	0.00	170.34	150.00	201.32	863.90	2.32	229.57	149981.93	39856.18
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.96	33.40	20.00	212.38	2725.92	6.19	1035.77	82112.89	31200.43
80	0.00	1600.00	5.00	15.00	63.46	0.22	1.90	101537.02	3033.44
81	0.00	1600.00	5.00	17.04	71.91	0.25	2.28	115053.64	3652.18
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	177.11	1.01	5.00	278.30	6.79	0.00	49548.14	0.00
88	0.00	186.36	1.01	400.00	447.70	7.24	23.34	84276.01	4380.24
89	0.00	9.25	1.01	5.00	650.51	-0.16	50678.00	6279.42	489659.02
90	0.00	177.11	1.01	500.00	844.50	7.85	230.21	149559.73	40930.99
91	0.00	186.36	1.01	1963.00	3360.32	9.46	2052.00	626216.21	386173.79
92	0.00	186.36	1.01	514.60	979.11	8.03	273.50	184287.10	51485.32
93	0.00	173.81	150.00	211.98	905.49	2.41	1226.71	157203.02	151498.17

Tabela P4.12. Pregled parametara strujnih tokova –zimski režim 4 (gorivo:mazut)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	173.81	108.90	535.00	3454.77	6.66	1635.24	600483.86	284226.03
2	1.00	0.02	0.96	470.00	3425.02	8.77	1030.27	78.43	23.59
3	1.00	0.25	1.00	470.00	3424.97	8.75	1035.38	852.82	257.81
4	1.00	1.26	1.00	474.00	3433.44	8.76	1040.74	4326.13	1311.33
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1.00	43.23	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	132490.20	52004.34
8	1.00	59.44	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	167395.01	55357.34
9	1.00	0.29	1.00	169.20	2814.63	7.70	711.51	817.93	206.77
10	1.00	0.03	0.96	169.10	2814.67	7.72	706.42	76.56	19.21
11	1.00	69.30	5.88	184.20	2816.30	6.90	931.35	195161.72	64539.76
12	1.00	0.04	0.96	135.00	2747.07	7.56	682.25	96.70	24.02
13	1.00	0.20	1.00	135.10	2746.92	7.54	687.30	554.88	138.83
14	1.00	11.61	3.52	145.39	2746.61	6.97	842.73	31890.85	9784.89
15	1.00	25.29	1.40	109.30	2690.01	7.25	711.54	68024.90	17993.46
16	1.00	26.59	0.63	87.10	2654.80	7.52	602.51	70577.88	16017.62
17	1.00	5.54	0.03	26.13	2548.60	8.54	218.13	14123.07	1208.78
18	0.00	5.54	0.03	26.10	109.44	0.38	4.67	606.45	25.87
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	317.51	3109.94	8.30	844.62	107.60	29.22
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	310.80	3096.30	8.25	842.45	1670.76	454.59
25	1.00	60.70	5.20	188.18	2829.20	6.99	921.63	171727.06	55940.83
26	1.00	0.05	0.96	309.46	3093.69	8.27	835.93	154.99	41.88
27	1.00	0.09	0.96	237.97	2950.78	8.01	764.45	251.70	65.21
28	1.00	0.12	0.96	261.07	2996.70	8.10	786.39	359.30	94.29
29	1.00	0.74	1.00	263.40	3001.23	8.08	793.73	2225.71	588.63
30	0.00	0.74	0.96	98.47	417.40	1.29	65.01	309.55	48.21
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	9.88	10.00	26.65	112.55	0.39	5.78	1111.88	57.05
33	0.00	3.48	1.00	10.00	42.12	0.15	0.57	146.40	508.89
34	0.00	9.88	10.00	80.52	337.88	1.08	42.49	3337.87	419.78
35	0.00	0.86	0.96	98.47	416.74	1.29	64.35	359.02	55.44
36	0.00	9.88	10.00	34.15	143.91	0.49	8.94	1421.70	88.34
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	60.25	49.48	7.22
38	0.00	50.00	10.00	10.00	42.99	0.15	1.47	2149.74	73.40
39	0.00	59.88	10.00	21.64	91.64	0.32	4.06	5487.61	243.35
40	0.00	59.88	10.00	76.38	320.52	1.03	38.61	19192.31	2311.64
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	91.88	5.00	82.42	345.45	1.10	43.83	31739.51	4027.23
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.00	32.00	1.00	93.59	392.10	1.23	54.90	12547.20	1756.92
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.06	3.06	1.60	113.30	617.20	1.82	119.48	1888.00	365.49

nastavak Tabele P4.12.

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	1.00	20.50	0.63	87.10	2654.80	7.52	602.51	54412.80	12348.96
48	1.00	6.09	0.63	87.10	2654.80	7.52	602.51	16165.08	3668.66
49	0.00	91.88	10.00	98.74	414.46	1.29	61.43	38080.25	5643.85
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	0.00	510.00	20.00	60.00	252.82	0.83	25.88	128936.63	13197.46
52	0.00	510.00	20.00	79.85	335.88	1.07	42.83	171300.68	21841.75
53	0.00	510.00	20.00	106.00	445.82	1.37	70.75	227369.58	36081.39
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	55.56	5.20	188.18	2829.20	6.99	921.63	157179.29	51201.83
56	0.97	22.23	1.60	109.30	2690.01	7.25	711.54	59796.17	15816.85
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.97	3.06	1.60	109.30	2690.01	7.25	711.54	8228.73	2176.61
61	0.00	22.23	1.60	40.00	167.68	0.57	11.11	3727.28	247.06
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	0.00	42.73	1.00	88.16	369.25	1.17	49.19	15776.01	2101.61
64	0.00	9.15	1.60	113.30	475.34	1.45	77.83	4348.38	712.01
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	155.36	20.00	137.60	579.90	1.71	112.10	90095.48	17416.87
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	25.94	5.70	318.70	3064.92	6.82	1203.02	79494.12	31202.60
69	1.00	17.29	20.90	318.70	3064.92	6.82	1203.02	52996.08	20801.74
70	0.00	17.29	20.90	159.00	672.00	1.93	144.59	11619.62	2500.19
71	1.00	5.14	5.20	188.18	2829.20	6.99	921.63	14547.77	4739.00
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	177.80	6.00	155.00	653.91	1.89	136.95	116262.87	24348.89
74	0.00	170.34	150.00	146.30	625.57	1.79	136.94	108605.47	23774.45
75	0.00	7.46	150.00	146.30	625.57	1.79	136.94	2618.77	573.27
76	0.00	170.34	150.00	201.32	863.90	2.32	229.57	149981.93	39856.18
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.96	33.40	20.00	212.38	2725.92	6.19	1035.77	82112.89	31200.43
80	0.00	1600.00	5.00	15.00	63.46	0.22	1.90	101537.02	3033.44
81	0.00	1600.00	5.00	17.04	71.91	0.25	2.28	115053.64	3652.18
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	171.67	1.01	5.00	278.30	6.79	0.00	48032.15	0.00
88	0.00	188.80	1.01	400.00	431.32	7.00	22.42	81431.17	4233.02
89	0.00	11.80	1.01	5.00	464.31	-0.16	41362.26	5479.20	488116.12
90	0.00	171.67	1.01	500.00	844.51	7.85	231.04	144971.94	39660.98
91	0.00	188.80	1.01	2028.00	3283.01	9.18	2050.19	619843.53	387083.80
92	0.00	188.80	1.01	514.60	944.79	7.76	263.96	178382.02	49836.03
93	0.00	171.67	150.00	211.98	910.71	2.42	885.34	156336.23	151982.11



Slika P4.5. Letnji režim 1

Tabela P4.13. Opis strujnih tokova postrojenja - letnji režim 1

Br. toka	Opis strujnog toka	Br. toka	Opis strujnog toka
1	Osnovna para	48	Para ka grejaču niskog pritiska LPH ₁
2	Para iz labirintskih zaptivača	49	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂
3	Para iz labirintskih zaptivača	50	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁
4	Para iz labirintskih zaptivača	51	Voda na ulazu u toplifikacioni sistem
5	Para iz tehnološkog oduzimanja	52	Voda između baznih zagrejača HT ₁ , HT ₂
6	Para iz tehnološkog oduzimanja	53	Voda između zagrejača HT ₂ , HT ₃
7	Para iz tehnološkog oduzimanja	54	Voda na izlazu iz toplifikacionog sistema
8	Para iz tehnološkog oduzimanja	55	Para iz tehnološkog oduzimanja
9	Para iz labirintskih zaptivača	56	Para iz tehnološkog oduzimanja
10	Para iz labirintskih zaptivača	57	Para ka vršnom zagrejaču HT ₃
11	Para ka turbini niskog pritiska	58	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₂
12	Para iz labirintskih zaptivača	59	Para iz tehnološkog oduzimanja
13	Para iz labirintskih zaptivača	60	Para iz tehnološkog oduzimanja
14	Para iz tehnološkog oduzimanja	61	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₁
15	Para iz tehnološkog oduzimanja	62	Topla voda iz baznog zagrejača HT ₁
16	Para iz tehnološkog oduzimanja	63	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
17	Para ka kondenzatoru	64	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
18	Kondenzat iz kondenzatora	65	Voda iz deaeratora DA ₁
19	Para iz labirintskih zaptivača	66	Voda ka deaeratoru DA ₂
20	Para iz labirintskih zaptivača	67	Para iz labirintskih zaptivača
21	Rashladna voda	68	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
22	Para iz labirintskih zaptivača	69	Para ka grejaču visokog pritiska HPH
23	Para iz labirintskih zaptivača	70	Para iz grejaču visokog pritiska HPH
24	Para iz labirintskih zaptivača	71	Para iz tehnološkog oduzimanja
25	Para iz tehnološkog oduzimanja	72	Voda iz deaeratora DA ₂
26	Para iz labirintskih zaptivača	73	Voda ka tehnološkom oduzimanju
27	Para iz labirintskih zaptivača	74	Napojna voda ka grejaču v.p. HPH
28	Para iz labirintskih zaptivača	75	Voda ka ekspanderu
29	Para iz labirintskih zaptivača	76	Para iz grejača visokog pritiska HPH
30	Para iz hladnjaka pare sa zaptivača	77	Para iz tehnološkog oduzimanja HPH
31	Para iz hladnjaka pare iz lab.zaptivača	78	Para iz tehnološkog oduzimanja na izlazu
32	Para ka kondenzatoru	79	Para iz ekspandera
33	Demineralizovana voda	80	Voda ka kondenzatoru
34	Kondenzat iz kondenzatora	81	Voda iz kondenzatora
35	Kondenzat ka hladnjaku pare iz lab. zapt.	82	Para iz tehnološkog oduzimanja
36	Kondenzat iz hladnjaka pare iz lab. zapt.	83	Para iz tehnološkog oduzimanja
37	Kondenzat iz hladnjaka pare sa zaptivača	84	Para iz tehnološkog oduzimanja
38	Demineralizovana voda	85	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
39	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₁	86	Para iz tehnološkog oduzimanja ka izlazu
40	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁	87	Hladan vazduh ka predgrejaču
41	Povratna voda ka grejaču LPH ₂	88	Dimni gasovi iz predgrejača
42	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₂	89	Gorivo ka ložištu
43	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂	90	Topao vazduh ka ložištu
44	Povratna voda na ulazu u postrojenje	91	Dimni gasovi ka razmenjivaču kotla
45	Povratna voda ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
46	Voda iz grejača ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
47	Para ka vršnom zagrejaču HT ₁	93	Napojna voda ka razmenjivaču kotla

Tabela P4.14. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 1 (gorivo:prirodni gas)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	113.28	108.90	535.00	3454.77	6.66	1569.54	391342.48	177791.67
2	1.00	0.02	0.96	421.00	3322.20	8.63	881.18	80.40	21.32
3	1.00	0.26	1.00	421.00	3322.14	8.61	886.47	857.44	228.80
4	1.00	0.52	1.00	424.00	3328.39	8.62	890.18	1720.78	460.22
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.00	32.88	33.40	304.90	2996.37	6.50	1157.72	98526.75	38068.13
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1.00	17.39	5.88	201.60	2854.80	6.99	878.37	49633.48	15271.33
9	1.00	0.28	1.00	189.00	2853.75	7.79	650.07	810.46	184.62
10	1.00	0.03	0.96	188.90	2853.75	7.81	644.77	75.91	17.15
11	1.00	61.90	5.88	201.60	2854.80	6.99	878.37	176706.44	54369.38
12	1.00	0.03	0.96	164.40	2805.38	7.70	626.84	95.38	21.31
13	1.00	0.23	1.00	164.50	2805.33	7.68	632.11	637.37	143.62
14	1.00	4.55	3.92	173.90	2806.05	7.06	808.14	12773.14	3678.65
15	1.00	4.54	2.42	411.93	3301.17	8.17	989.32	14990.60	4492.49
16	0.97	6.79	1.00	99.61	2607.90	7.18	576.90	17710.26	3917.73
17	0.92	45.72	0.14	52.84	2401.56	7.43	299.85	109794.78	13708.57
18	0.00	45.72	1.00	52.84	221.21	0.74	12.40	10113.29	566.79
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	257.32	2989.23	8.08	702.88	103.73	24.39
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	301.11	3076.77	8.22	750.86	1667.92	407.04
25	1.00	17.90	5.40	206.81	2868.50	7.05	873.15	51354.76	15632.01
26	1.00	0.05	0.96	301.14	3076.93	8.24	745.62	156.31	37.88
27	1.00	0.08	0.96	246.69	2968.09	8.04	693.13	251.69	58.78
28	1.00	0.12	0.96	249.78	2974.23	8.05	695.94	355.42	83.16
29	1.00	0.77	1.00	261.10	2996.64	8.08	711.66	2305.32	547.48
30	0.00	0.77	0.96	98.47	417.40	1.29	53.06	321.11	40.82
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	46.61	1.00	53.72	224.94	0.75	12.87	10483.71	599.63
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	0.00	46.61	1.00	65.47	274.08	0.90	20.23	12774.02	942.74
35	0.00	0.89	0.96	98.47	416.76	1.29	52.42	370.42	46.59
36	0.00	46.61	1.00	55.29	231.51	0.77	13.76	10789.82	641.50
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	48.30	49.31	5.77
38	0.00	32.00	10.00	10.00	42.99	0.15	0.90	1375.83	28.80
39	0.00	78.61	1.00	42.98	180.01	0.61	7.47	14149.86	586.82
40	0.00	78.61	1.00	89.41	374.50	1.19	39.57	29438.61	3110.11
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	86.94	5.00	81.76	342.69	1.10	33.18	29792.63	2884.24
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.00	8.33	1.00	10.11	42.50	0.15	0.00	354.03	0.00
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.08	4.54	1.60	113.30	652.94	1.91	111.77	2965.00	507.55

nastavak Tabele P4.15.

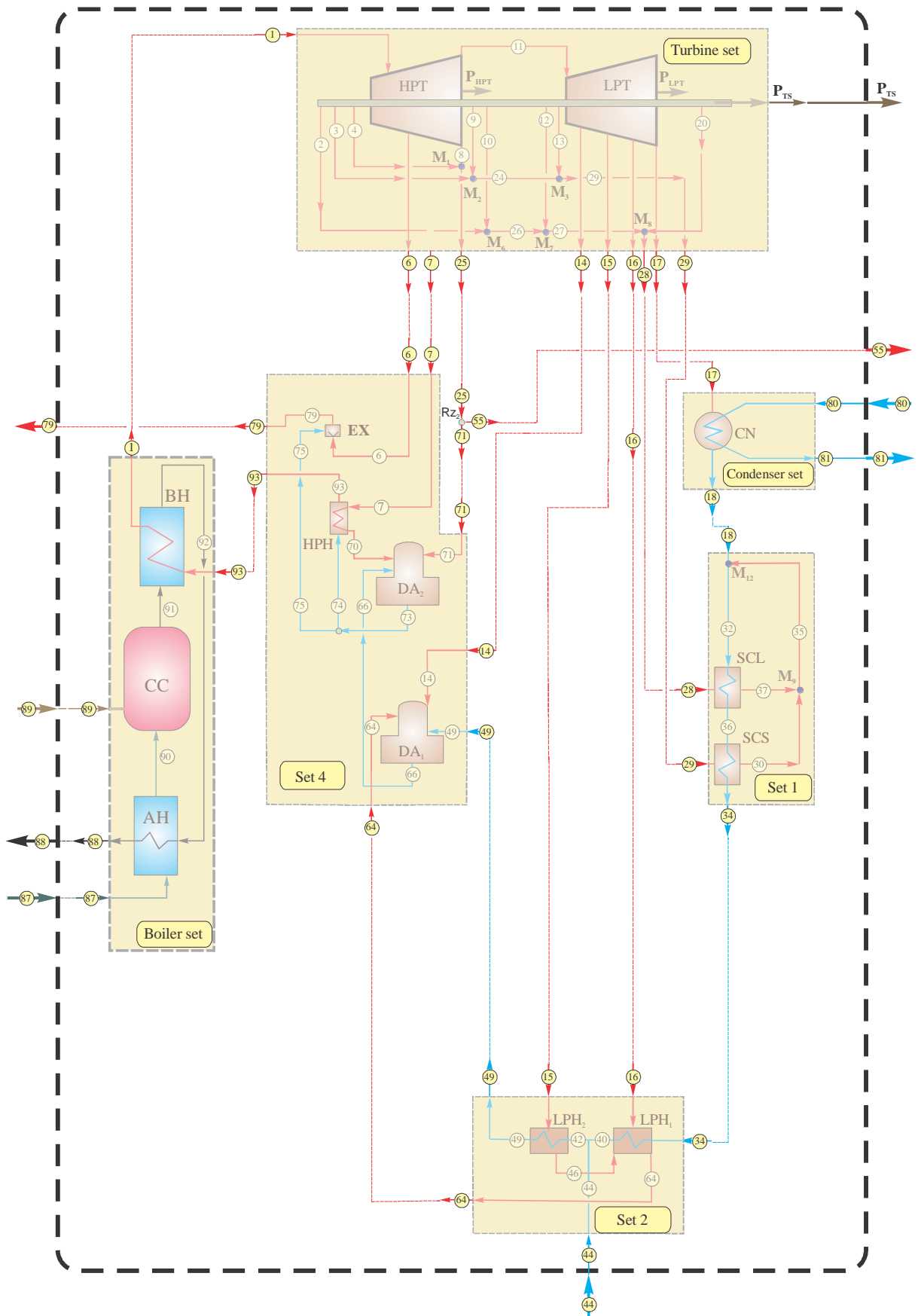
<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	86.94	10.00	114.50	481.02	1.47	66.40	41818.24	5772.75
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	15.28	5.40	206.81	2868.50	7.05	873.15	43824.95	13339.99
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	11.33	1.60	113.30	475.34	1.45	64.22	5386.51	727.80
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	102.82	6.00	138.61	583.32	1.72	95.95	59977.88	9865.75
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	4.93	33.40	304.90	2996.37	6.50	1157.72	14779.01	5710.22
69	1.00	27.95	33.40	304.90	2996.37	6.50	1157.72	83747.73	32357.91
70	0.00	27.95	33.40	60.15	254.58	0.83	19.94	7115.43	557.31
71	1.00	2.63	5.40	206.81	2868.50	7.05	873.15	7529.81	2292.02
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	133.40	6.00	133.00	559.41	1.67	88.59	74623.13	11817.09
74	0.00	113.28	150.00	130.71	559.41	1.63	99.32	63368.01	11251.06
75	0.00	16.10	150.00	130.71	559.41	1.63	99.32	9004.14	1598.69
76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.00	21.03	140.00	259.40	1131.02	2.86	323.56	23783.15	6803.91
80	0.00	2500.00	5.00	33.00	138.73	0.48	0.82	346832.60	2052.40
81	0.00	2500.00	5.00	54.92	230.32	0.77	3.12	575798.62	7788.97
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	125.57	1.01	20.00	294.90	6.84	0.00	37063.27	0.00
88	0.00	132.45	1.01	400.00	447.71	7.24	17.62	59754.79	2349.43
89	0.00	6.88	1.01	20.00	685.64	-0.04	50678.00	6279.02	346853.23
90	0.00	125.57	1.01	500.00	844.50	7.85	213.91	106043.05	26872.24
91	0.00	132.45	1.01	1962.00	3327.02	9.46	2006.91	444248.24	267877.02
92	0.00	132.45	1.01	505.00	964.81	8.03	246.51	74585.02	32903.03
93	0.00	113.28	150.00	42.56	191.38	0.60	22.13	21679.26	2506.42

Tabela P4.15. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 1 (gorivo:mazut)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	113.28	108.90	535.00	3454.77	6.66	1569.54	391342.48	177791.67
2	1.00	0.02	0.96	421.00	3322.20	8.63	881.18	80.40	21.32
3	1.00	0.26	1.00	421.00	3322.14	8.61	886.47	857.44	228.80
4	1.00	0.52	1.00	424.00	3328.39	8.62	890.18	1720.78	460.22
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.00	32.88	33.40	304.90	2996.37	6.50	1157.72	98526.75	38068.13
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1.00	17.39	5.88	201.60	2854.80	6.99	878.37	49633.48	15271.33
9	1.00	0.28	1.00	189.00	2853.75	7.79	650.07	810.46	184.62
10	1.00	0.03	0.96	188.90	2853.75	7.81	644.77	75.91	17.15
11	1.00	61.90	5.88	201.60	2854.80	6.99	878.37	176706.44	54369.38
12	1.00	0.03	0.96	164.40	2805.38	7.70	626.84	95.38	21.31
13	1.00	0.23	1.00	164.50	2805.33	7.68	632.11	637.37	143.62
14	1.00	4.55	3.92	173.90	2806.05	7.06	808.14	12773.14	3678.65
15	1.00	4.54	2.42	411.93	3301.17	8.17	989.32	14990.60	4492.49
16	0.97	6.79	1.00	99.61	2607.90	7.18	576.90	17710.26	3917.73
17	0.92	45.72	0.14	52.84	2401.56	7.43	299.85	109794.78	13708.57
18	0.00	45.72	1.00	52.84	221.21	0.74	12.40	10113.29	566.79
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	257.32	2989.23	8.08	702.88	103.73	24.39
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.54	1.00	301.11	3076.77	8.22	750.86	1667.92	407.04
25	1.00	17.90	5.40	206.81	2868.50	7.05	873.15	51354.76	15632.01
26	1.00	0.05	0.96	301.14	3076.93	8.24	745.62	156.31	37.88
27	1.00	0.08	0.96	246.69	2968.09	8.04	693.13	251.69	58.78
28	1.00	0.12	0.96	249.78	2974.23	8.05	695.94	355.42	83.16
29	1.00	0.77	1.00	261.10	2996.64	8.08	711.66	2305.32	547.48
30	0.00	0.77	0.96	98.47	417.40	1.29	53.06	321.11	40.82
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	46.61	1.00	53.72	224.94	0.75	12.87	10483.71	599.63
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	0.00	46.61	1.00	65.47	274.08	0.90	20.23	12774.02	942.74
35	0.00	0.89	0.96	98.47	416.76	1.29	52.42	370.42	46.59
36	0.00	46.61	1.00	55.29	231.51	0.77	13.76	10789.82	641.50
37	0.00	0.12	0.96	98.47	412.64	1.29	48.30	49.31	5.77
38	0.00	32.00	10.00	10.00	42.99	0.15	0.90	1375.83	28.80
39	0.00	78.61	1.00	42.98	180.01	0.61	7.47	14149.86	586.82
40	0.00	78.61	1.00	89.41	374.50	1.19	39.57	29438.61	3110.11
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	86.94	5.00	81.76	342.69	1.10	33.18	29792.63	2884.24
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.00	8.33	1.00	10.11	42.50	0.15	0.00	354.03	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
46	0.08	4.54	1.60	113.30	652.94	1.91	111.77	2965.00	507.55

nastavak Tabele P4.15.

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	86.94	10.00	114.50	481.02	1.47	66.40	41818.24	5772.75
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	15.28	5.40	206.81	2868.50	7.05	873.15	43824.95	13339.99
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	11.33	1.60	113.30	475.34	1.45	64.22	5386.51	727.80
65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
66	0.00	102.82	6.00	138.61	583.32	1.72	95.95	59977.88	9865.75
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	1.00	4.93	33.40	304.90	2996.37	6.50	1157.72	14779.01	5710.22
69	1.00	27.95	33.40	304.90	2996.37	6.50	1157.72	83747.73	32357.91
70	0.00	27.95	33.40	60.15	254.58	0.83	19.94	7115.43	557.31
71	1.00	2.63	5.40	206.81	2868.50	7.05	873.15	7529.81	2292.02
72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
73	0.00	133.40	6.00	133.00	559.41	1.67	88.59	74623.13	11817.09
74	0.00	113.28	150.00	130.71	559.41	1.63	99.32	63368.01	11251.06
75	0.00	16.10	150.00	130.71	559.41	1.63	99.32	9004.14	1598.69
76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	0.00	21.03	140.00	259.40	1131.02	2.86	323.56	23783.15	6803.91
80	0.00	2500.00	5.00	33.00	138.73	0.48	0.82	346832.60	2052.40
81	0.00	2500.00	5.00	54.92	230.32	0.77	3.12	575798.62	7788.97
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	102.82	20.00	141.38	596.17	1.75	84.52	61296.92	8690.29
88	0.00	9.10	33.40	156.60	619.02	1.80	92.77	5633.05	844.23
89	0.00	114.54	10.00	154.00	649.83	1.88	100.50	74433.53	11511.41
90	0.00	114.54	150.00	156.40	668.69	1.89	116.91	76593.63	13390.98
91	0.00	1.27	150.00	156.40	668.69	1.89	116.91	76593.63	13390.98
92	0.00	113.28	150.00	156.40	668.69	1.89	116.91	75746.40	13242.86
93	0.00	114.54	150.00	156.40	668.69	1.89	116.91	847.23	148.12



Slika P4.6. Letnji režim 2

Tabela P4.16. Opis strujnih tokova postrojenja - letnji režim 2

Br. toka	Opis strujnog toka	Br. toka	Opis strujnog toka
1	Osnovna para	48	Para ka grejaču niskog pritiska LPH ₁
2	Para iz labirintskih zaptivača	49	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂
3	Para iz labirintskih zaptivača	50	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁
4	Para iz labirintskih zaptivača	51	Voda na ulazu u toplifikacioni sistem
5	Para iz tehnološkog oduzimanja	52	Voda između baznih zagrejača HT ₁ , HT ₂
6	Para iz tehnološkog oduzimanja	53	Voda između zagrejača HT ₂ , HT ₃
7	Para iz tehnološkog oduzimanja	54	Voda na izlazu iz toplifikacionog sistema
8	Para iz tehnološkog oduzimanja	55	Para iz tehnološkog oduzimanja
9	Para iz labirintskih zaptivača	56	Para iz tehnološkog oduzimanja
10	Para iz labirintskih zaptivača	57	Para ka vršnom zagrejaču HT ₃
11	Para ka turbini niskog pritiska	58	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₂
12	Para iz labirintskih zaptivača	59	Para iz tehnološkog oduzimanja
13	Para iz labirintskih zaptivača	60	Para iz tehnološkog oduzimanja
14	Para iz tehnološkog oduzimanja	61	Topla voda ka baznom zagrejaču HT ₁
15	Para iz tehnološkog oduzimanja	62	Topla voda iz baznog zagrejača HT ₁
16	Para iz tehnološkog oduzimanja	63	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
17	Para ka kondenzatoru	64	Topla voda ka deaeratoru DA ₁
18	Kondenzat iz kondenzatora	65	Voda iz deaeratora DA ₁
19	Para iz labirintskih zaptivača	66	Voda ka deaeratoru DA ₂
20	Para iz labirintskih zaptivača	67	Para iz labirintskih zaptivača
21	Rashladna voda	68	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
22	Para iz labirintskih zaptivača	69	Para ka grejaču visokog pritiska HPH
23	Para iz labirintskih zaptivača	70	Para iz grejaču visokog pritiska HPH
24	Para iz labirintskih zaptivača	71	Para iz tehnološkog oduzimanja
25	Para iz tehnološkog oduzimanja	72	Voda iz deaeratora DA ₂
26	Para iz labirintskih zaptivača	73	Voda ka tehnološkom oduzimanju
27	Para iz labirintskih zaptivača	74	Napojna voda ka grejaču v.p. HPH
28	Para iz labirintskih zaptivača	75	Voda ka ekspanderu
29	Para iz labirintskih zaptivača	76	Para iz grejača visokog pritiska HPH
30	Para iz hladnjaka pare sa zaptivača	77	Para iz tehnološkog oduzimanja HPH
31	Para iz hladnjaka pare iz lab.zaptivača	78	Para iz tehnološkog oduzimanja na izlazu
32	Para ka kondenzatoru	79	Para iz ekspandera
33	Demineralizovana voda	80	Voda ka kondenzatoru
34	Kondenzat iz kondenzatora	81	Voda iz kondenzatora
35	Kondenzat ka hladnjaku pare iz lab. zapt.	82	Para iz tehnološkog oduzimanja
36	Kondenzat iz hladnjaka pare iz lab. zapt.	83	Para iz tehnološkog oduzimanja
37	Kondenzat iz hladnjaka pare sa zaptivača	84	Para iz tehnološkog oduzimanja
38	Demineralizovana voda	85	Para iz tehn. oduzimanja ka ekspanderu
39	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₁	86	Para iz tehnološkog oduzimanja ka izlazu
40	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₁	87	Hladan vazduh ka predgrejaču
41	Povratna voda ka grejaču LPH ₂	88	Dimni gasovi iz predgrejača
42	Voda ka grejaču niskog pritiska LPH ₂	89	Gorivo ka ložištu
43	Voda iz grejača niskog pritiska LPH ₂	90	Topao vazduh ka ložištu
44	Povratna voda na ulazu u postrojenje	91	Dimni gasovi ka razmenjivaču kotla
45	Povratna voda ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
46	Voda iz grejača ka deaeratoru DA ₁	92	Dimni gasovi iz razmenjivaču kotla
47	Para ka vršnom zagrejaču HT ₁	93	Napojna voda ka razmenjivaču kotla

Tabela P4.17. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 2 (gorivo:prirodni gas)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
1	1.00	58.70	108.90	535.00	3454.77	6.66	1569.54	202777.70	92124.39
2	1.00	0.02	0.96	418.00	3315.95	8.62	877.49	78.59	20.80
3	1.00	0.25	1.00	418.00	3315.89	8.60	882.78	838.92	223.34
4	1.00	0.16	1.00	421.00	3322.14	8.61	886.47	528.22	140.95
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.00	10.06	16.80	373.40	3195.50	7.13	1179.09	39534.76	14587.66
7	1.00	2.31	10.70	322.10	3097.24	7.17	1068.15	7154.63	2467.43
8	1.00	19.37	5.88	279.10	3018.89	7.31	951.80	58466.88	18433.58
9	1.00	0.26	1.00	272.00	3018.40	8.12	722.01	790.82	189.17
10	1.00	0.02	0.96	272.00	3018.51	8.14	716.75	73.95	17.56
11	1.00	23.92	5.88	279.10	3018.89	7.31	951.80	72223.37	22770.76
12	1.00	0.03	0.96	192.70	2861.25	7.82	647.69	94.14	21.31
13	1.00	0.05	1.00	194.20	2864.02	7.81	654.09	138.33	31.59
14	1.00	1.72	1.56	155.10	2782.77	7.43	681.83	4775.24	1170.03
15	1.00	1.78	0.96	154.60	2786.00	7.66	620.13	4959.08	1103.84
16	0.97	1.81	0.38	82.53	2565.36	7.49	447.54	4645.86	810.50
17	0.92	18.50	0.12	49.08	2394.18	7.48	276.80	44300.00	5121.68
18	0.00	18.50	0.12	49.08	205.49	0.69	10.33	3802.23	191.07
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	335.61	3146.61	8.36	781.96	101.95	25.34
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.52	1.00	344.47	3164.55	8.37	796.94	1629.74	410.42
25	1.00	19.53	5.40	279.61	3021.33	7.35	942.05	58994.47	18394.40
26	1.00	0.05	0.96	344.53	3164.75	8.39	791.72	152.54	38.16
27	1.00	0.08	0.96	283.57	3041.66	8.18	728.00	246.68	59.04
28	1.00	0.11	0.96	298.49	3071.60	8.23	742.93	348.63	84.32
29	1.00	0.56	1.00	331.79	3138.77	8.33	783.10	1768.07	441.12
30	0.00	0.56	0.96	98.47	417.40	1.29	53.06	235.12	29.89
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	19.18	1.00	50.85	212.94	0.71	11.30	4084.19	216.64
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	0.00	19.18	1.00	73.71	308.60	1.00	26.25	5918.93	503.49
35	0.00	0.68	0.96	98.47	416.60	1.29	52.26	281.96	35.37
36	0.00	19.18	1.00	54.62	228.67	0.76	13.37	4385.98	256.50
37	0.00	0.11	0.96	98.47	412.64	1.29	48.30	46.83	5.48
38	0.00	20.83	10.00	10.00	42.99	0.15	0.90	895.71	18.75
39	0.00	40.01	1.00	40.66	170.31	0.58	6.48	6814.64	259.11
40	0.00	40.01	1.00	65.53	274.34	0.90	20.28	10977.01	811.35
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	48.34	5.00	71.85	301.16	0.98	25.23	14558.91	1219.78
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.01	8.33	1.00	99.61	430.00	1.34	52.47	3581.90	437.11
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.10	1.78	1.60	113.30	687.33	2.00	120.98	1223.45	215.34

nastavak Tabele P4.17.

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	1.00	23.05	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	61655.11	15343.74
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	48.34	10.00	90.18	378.43	1.19	41.16	18294.54	1989.67
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	15.28	5.40	279.61	3021.33	7.35	942.05	46159.86	14392.58
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	3.59	1.60	113.30	475.34	1.45	64.22	1706.93	230.63
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	53.65	6.00	110.03	461.82	1.42	60.99	24776.71	3272.19
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0.00	2.31	10.70	100.96	423.89	1.32	51.78	979.18	119.61
71	1.00	4.25	5.40	279.61	3021.33	7.35	942.05	12834.61	4001.81
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	60.21	6.00	152.00	640.95	1.86	114.60	38590.50	6899.97
74	0.00	58.70	150.00	142.35	608.77	1.75	114.58	35731.71	6725.52
75	0.00	1.51	150.00	142.35	608.77	1.75	114.58	921.07	173.37
76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	1.00	11.58	140.00	367.46	2857.38	5.72	1237.87	33074.22	14328.35
80	0.00	2500.00	5.00	23.00	96.94	0.34	1.64	242340.03	4100.47
81	0.00	2500.00	5.00	26.90	113.14	0.39	2.37	282837.80	5934.76
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	62.63	1.01	20.00	294.91	6.84	0.00	18472.01	0.00
88	0.00	66.57	1.01	400.00	447.71	7.24	17.62	29804.13	1172.34
89	0.00	3.94	1.01	20.00	685.64	-0.04	50678.00	2341.42	173000.13
90	0.00	62.63	1.01	500.00	844.50	7.85	213.91	59891.03	13453.23
91	0.00	66.57	1.01	1962.00	3327.02	9.46	2006.91	221577.02	133609.35
92	0.00	66.57	1.01	505.00	964.81	8.03	246.51	64222.36	16411.51
93	0.00	58.70	150.00	180.57	772.94	2.13	171.80	45367.56	10083.91

Tabela P4.18. Pregled parametara strujnih tokova –letnji režim 2 (gorivo:mazut)

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i> kg/s	<i>p</i> bar	<i>t</i> C	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kgK	<i>e</i> kJ/kg	<i>H</i> kW	<i>E</i> kW
1	1.00	58.70	108.90	535.00	3454.77	6.66	1569.54	202777.70	92124.39
2	1.00	0.02	0.96	418.00	3315.95	8.62	877.49	78.59	20.80
3	1.00	0.25	1.00	418.00	3315.89	8.60	882.78	838.92	223.34
4	1.00	0.16	1.00	421.00	3322.14	8.61	886.47	528.22	140.95
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.00	10.06	16.80	373.40	3195.50	7.13	1179.09	39534.76	14587.66
7	1.00	2.31	10.70	322.10	3097.24	7.17	1068.15	7154.63	2467.43
8	1.00	19.37	5.88	279.10	3018.89	7.31	951.80	58466.88	18433.58
9	1.00	0.26	1.00	272.00	3018.40	8.12	722.01	790.82	189.17
10	1.00	0.02	0.96	272.00	3018.51	8.14	716.75	73.95	17.56
11	1.00	23.92	5.88	279.10	3018.89	7.31	951.80	72223.37	22770.76
12	1.00	0.03	0.96	192.70	2861.25	7.82	647.69	94.14	21.31
13	1.00	0.05	1.00	194.20	2864.02	7.81	654.09	138.33	31.59
14	1.00	1.72	1.56	155.10	2782.77	7.43	681.83	4775.24	1170.03
15	1.00	1.78	0.96	154.60	2786.00	7.66	620.13	4959.08	1103.84
16	0.97	1.81	0.38	82.53	2565.36	7.49	447.54	4645.86	810.50
17	0.92	18.50	0.12	49.08	2394.18	7.48	276.80	44300.00	5121.68
18	0.00	18.50	0.12	49.08	205.49	0.69	10.33	3802.23	191.07
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1.00	0.03	0.96	335.61	3146.61	8.36	781.96	101.95	25.34
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1.00	0.52	1.00	344.47	3164.55	8.37	796.94	1629.74	410.42
25	1.00	19.53	5.40	279.61	3021.33	7.35	942.05	58994.47	18394.40
26	1.00	0.05	0.96	344.53	3164.75	8.39	791.72	152.54	38.16
27	1.00	0.08	0.96	283.57	3041.66	8.18	728.00	246.68	59.04
28	1.00	0.11	0.96	298.49	3071.60	8.23	742.93	348.63	84.32
29	1.00	0.56	1.00	331.79	3138.77	8.33	783.10	1768.07	441.12
30	0.00	0.56	0.96	98.47	417.40	1.29	53.06	235.12	29.89
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	0.00	19.18	1.00	50.85	212.94	0.71	11.30	4084.19	216.64
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	0.00	19.18	1.00	73.71	308.60	1.00	26.25	5918.93	503.49
35	0.00	0.68	0.96	98.47	416.60	1.29	52.26	281.96	35.37
36	0.00	19.18	1.00	54.62	228.67	0.76	13.37	4385.98	256.50
37	0.00	0.11	0.96	98.47	412.64	1.29	48.30	46.83	5.48
38	0.00	20.83	10.00	10.00	42.99	0.15	0.90	895.71	18.75
39	0.00	40.01	1.00	40.66	170.31	0.58	6.48	6814.64	259.11
40	0.00	40.01	1.00	65.53	274.34	0.90	20.28	10977.01	811.35
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	0.00	48.34	5.00	71.85	301.16	0.98	25.23	14558.91	1219.78
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	0.01	8.33	1.00	99.61	430.00	1.34	52.47	3581.90	437.11
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	0.10	1.78	1.60	113.30	687.33	2.00	120.98	1223.45	215.34

nastavak Tabele P4.18.

<i>br</i>	<i>x</i>	<i>G</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>e</i>	<i>H</i>	<i>E</i>
	-	kg/s	bar	C	kJ/kg	kJ/kgK	kJ/kg	kW	kW
47	1.00	23.05	1.00	99.61	2674.96	7.36	665.70	61655.11	15343.74
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	0.00	48.34	10.00	90.18	378.43	1.19	41.16	18294.54	1989.67
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	1.00	15.28	5.40	279.61	3021.33	7.35	942.05	46159.86	14392.58
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	0.00	3.59	1.60	113.30	475.34	1.45	64.22	1706.93	230.63
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	0.00	53.65	6.00	110.03	461.82	1.42	60.99	24776.71	3272.19
67	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0.00	2.31	10.70	100.96	423.89	1.32	51.78	979.18	119.61
71	1.00	4.25	5.40	279.61	3021.33	7.35	942.05	12834.61	4001.81
72	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	0.00	60.21	6.00	152.00	640.95	1.86	114.60	38590.50	6899.97
74	0.00	58.70	150.00	142.35	608.77	1.75	114.58	35731.71	6725.52
75	0.00	1.51	150.00	142.35	608.77	1.75	114.58	921.07	173.37
76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	1.00	11.58	140.00	367.46	2857.38	5.72	1237.87	33074.22	14328.35
80	0.00	2500.00	5.00	23.00	96.94	0.34	1.64	242340.03	4100.47
81	0.00	2500.00	5.00	26.90	113.14	0.39	2.37	282837.80	5934.76
82	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	0.00	60.80	1.01	20.00	294.91	6.84	0.00	17011.56	0.00
88	0.00	66.87	1.01	400.00	431.29	7.00	16.96	28838.87	1134.00
89	0.00	4.18	1.01	20.00	489.32	-0.04	41365.40	2044.78	172866.00
90	0.00	60.80	1.01	500.00	844.51	7.85	214.71	51344.76	13054.00
91	0.00	66.87	1.01	2029.00	3284.03	9.18	2006.89	219584.66	134191.00
92	0.00	66.87	1.01	505.00	979.09	8.03	237.91	65467.52	15908.00
93	0.00	58.70	150.00	180.57	772.86	2.13	817.74	45362.79	47997.00

Biografija autora

Svetislav Cvetković, rođen u Leskovcu 24. februara 1983. godine, student je doktorskih studija na Tehnološkom fakultetu u Leskovcu. Osnovnu i srednju školu završio je u Leskovcu, nosilac je Vukovih diploma za osnovno i srednje obrazovanje. Tehnološki fakultet u Leskovcu, smer Hemijsko i biohemijsko inženjerstvo, upisao je školske 2001/02 godine i 2006. diplomirao kao prvi u generaciji sa prosečnom ocenom 9,29. Diplomski rad pod nazivom "Tehnoekonomska analiza složenih energetske postrojenja" odbranio je sa ocenom 10. Za vreme osnovnih studija nosilac je stipendije Ministarstva prosvete Republike Srbije.

Po završetku osnovnih studija nastavio je naučno usavršavanje upisom doktorskih studija na matičnom fakultetu (šk. 2007/08 god.) na studijskom programu Tehnološko inženjerstvo. Ispite na doktorskim studijama definisane planom i programom položio je sa prosečnom ocenom 9,93. Juna 2008. godine postao je istraživač-stipendista Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije uključivanjem u realizaciju projekta "Numerička i eksperimentalna simulacija rada sistema rashladne vode kondenzatora u cilju povećanja energetske efikasnosti termoelektrana" na Mašinskom fakultetu u Nišu (Ev.br. TR 018006). Tokom 2010. godine bio je angažovan na projektu "Razvoj kontinualnih postupaka alkoholize biljnih ulja na niskoj, umerenoj i povišenoj temperaturi" na Tehnološkom fakultetu u Leskovcu (Ev.br. TR 019062A). Juna 2011. dobio je angažman u svojstvu istraživača-stipendiste na projektu "Unapređenje energetske karakteristika i kvaliteta unutrašnjeg prostora u zgradama obrazovnih ustanova u Srbiji sa uticajem na zdravlje" na Institutu za nuklearne nauke "Vinča" u Beogradu (Ev.br. 042008) gde se zadržao godinu dana do prestanka statusa stipendiste.

Rezultati njegovog istraživačkog rada objavljeni su u vrhunskom međunarodnom časopisu (dva rada), u tematskom zborniku radova međunarodnog značaja (jedan rad) i na skupu nacionalnog značaja štampan u celini (jedan rad).

Izjave autora

1. Izjava o autorstvu
2. Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorske disertacije
3. Izjava o korišćenju



Прилог 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

**Анализа хемијских и енергетских постројења у функцији унапређења
концептуалне фазе пројектовања**

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација, ни у целини, ни у деловима, није била предложена за добијање било које дипломе, према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

У Нишу, 20.12.2013

Аутор дисертације: Светислав С. Цветковић

Потпис докторанда:

Светислав Цветковић



Прилог 2.

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Име и презиме аутора: **Светислав С. Цветковић**

Студијски програм: **Технолошко инжењерство**

Наслов рада: **Анализа хемијских и енергетских постројења у функцији унапређења концептуалне фазе пројектовања**

Ментор: **Проф. др Предраг О. Рашковић**

Изјављујем да је штампана верзија моје докторске дисертације истоветна електронској верзији, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 20.12.2013

Аутор дисертације: **Светислав С. Цветковић**

Потпис докторанда:

Светислав Цветковић



Прилог 3.

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да, у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

Анализа хемијских и енергетских постројења у функцији унапређења концептуалне фазе пројектовања

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство – некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да подвучете само једну од шест понуђених лиценци; кратак опис лиценци је у наставку текста).

У Нишу, 20.12.2013

Аутор дисертације: Светислав С. Цветковић

Потпис докторанда:

Светислав Цветковић