

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET

Bojana Ž. Vukadinović

**Novi modeli za unapređenje energetske
efikasnosti u polimernoj i srodnim
industrijama**

Doktorska disertacija



Beograd, 2017

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Bojana Ž. Vukadinović

**New Models for Energy Efficiency
Improvements in Polymer and Related
Industry**

Doctoral Dissertation



Belgrade, 2017

Mentor: dr Ivanka Popović

redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Mentor: dr Mirjana Kiječćanin

redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Član komisije: dr Aleksandar Jovović

redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Datum odbrane:

Novi modeli za unapređenje energetske efikasnosti u polimernoj i srodnim industrijama

Apstrakt

U okviru ove doktorske disertacije su razmatrane postojeće metode koje se koriste za analizu potrošnje energije u polimernoj industriji, ali je dat i razvoj novih metoda koje uključuju multikriterijalni pristup ovom problemu. Ovaj pristup uključuje uvođenje tehnoloških inovacija, kao što je uvođenje novih katalizatora, optimizaciju energetskeg sistema i primena novih rešenja za praćenje i unapređenje energetske efikasnosti.

Ispitivanja su obuhvatila domaću polimernu industriju, odnosno proizvodne sisteme polimerne industrije (sintezu monomera i polimera kao energetske veoma intenzivne procese). Da bi se ispitaio ceo energetske bilans ovih sistema, u analizu su uključeni interni sistemi za proizvodnju energije, ali i eksterni sistemi koji služe sa snabdevanje energijom, pre svega postrojenja u okviru JP Elektroprivrede Srbije.

Podaci sakupljeni u pojedinim kompanijama i dobijeni na osnovu izvedenih industrijskih eksperimenata su bili osnov za razvoj metoda za unapređenje energetske efikasnosti. Uticaj na životnu sredinu nakon primene novog modela je prikazan korišćenjem indikatora eko-efikasnosti i razdvajanjem proizvodnog rasta od potrošnje resursa i količine nastalih emisija.

Za analizu rada termoelektrana u okviru JP Elektroprivrede Srbije korišćeni su sledeći indikatori eko-efikasnosti: potrošnja energije, klimatske promene, acidifikacija i stvaranje otpada. Predložena metoda ističe oblasti za unapređenje energetske efikasnosti, a rezultati se mogu koristiti kao referenca za slične kompanije. Primena novog modela u analizi petrohemijskog kompleksa je fokusirana na mogućnosti poboljšanja energetske efikasnosti primenom integracije celokupnog sistema. Takođe, prikazane su sve opcije koje dovode do unapređenja procesa i ostvarenja ekonomske koristi, što rezultira koristima i za životnu sredinu koje se postižu kroz smanjenje emisija CO₂, smanjenje emisija u otpadne vode i količine stvorenog otpada. Istraživanja izvršena u okviru ove teze, a u oblasti uvođenja novih katalizatora u proizvodnji polipropilena su pokazala da se tehnološkim modifikacijama pored povećanog prinosa mogu ostvariti značajni benefiti za životnu sredinu kao što su smanjenje potrošnje energije, hemikalija, sprečavanje nastajanja opasnog otpada i otpadnih voda.

Imajući u vidu da su precizne analize, kao i pouzdani modeli formulisani korišćenjem podataka dobijenih iz analize industrijskih procesa, a koji opisuju ponašanje industrijskih procesnih sistema veoma retki, ova teza daje mogućnost dalje implementacije dobijenih rezultata na industrijski sektor Republike Srbije.

Ključne reči: sirovinski efikasna i čistija proizvodnja, energetska efikasnost, polimerna industrija, uticaj na životnu sredinu, indikatori eko-efikasnosti

Naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Inženjerstvo materijala

UDK broj: 678

New Models for Energy Efficiency Improvements in Polymer and Related Industry

Abstract

This doctoral dissertation considers the existing methods for energy consumption reduction in the polymer industry, but also explores a development of new methods based on the multi-criteria analysis. The new approach introduces technological innovation including a new catalyst, optimization of the energy system and new solutions to the monitoring and improvement of energy efficiency.

The research relates to the domestic polymer industry focusing on processing systems of polymer industry (the synthesis of polymers as high-energy intensive industry). To examine the energy balance of these systems, the analysis includes internal systems for energy production as well as the external systems for the energy supply including plants within the Electric Power Industry of Serbia.

The data collected in the companies and obtained during the performed industrial experiments, were the basis for the development of methods for improving energy efficiency. The impact on the environment after the implementation of the new model, is shown using eco-efficiency indicators and by decoupling of production growth from resources consumption and emissions generation.

For the thermal power plants of Electric Power Industry of Serbia analysis, following eco-efficiency indicators were used: energy consumption, climate change, acidification, and waste generation. The proposed method highlights the areas for energy efficiency improvements and the results can be utilised as a reference for comparable companies. The application of the new model in the study of petrochemical complex emphasises the possibility of efficiency increase through the total site integration. In addition, the analysis recognises different options, which led to the improvement of the processes on one side and economic benefits resulting in the environmental benefits on the other side. The later was achieved through the reduction of CO₂ emission, reduction of emissions to waste water and amount of generated waste. Research performed in this thesis in the area of introduction of new catalyst in the polypropylene production have shown that technological modifications can lead to increase in the production, but also can bring significant benefits to the environment, such as reduction in energy consumption, chemicals, the elimination of hazardous wastes and waste water.

Bearing in mind a rarity of the precise analysis and reliable models based on the data obtained through the analysis of the industrial processes, this dissertation provides unique opportunity to the industry of the Republic of Serbia to utilise the results.

Key words: resource efficient and cleaner production, energy efficiency, electricity generation, polymer industry, environmental impact, eco-efficiency indicators

Scientific area: Technological Engineering

Field: Material Engineering

UDC number: 678

Ova doktorska disertacija je rezultat višegodišnjeg rada sa velikim brojem kompanija na projektima sirovinske i energetske efikasnosti, kao i drugim projektima u oblasti zaštite životne sredine. Posebnu zahvalnost svakako dugujem predstavnicima kompanija JP Elektroprivrede Srbije, HIP Petrohemije i Hipola na predusretljivosti i pomoći pri sakupljanju, analizi i obradi podataka.

Htela bih posebno da se zahvalim prof. dr Ivanki Popović koja me je uvela u ovu oblast i svojim dobronamernim savetima, razumevanjem, širinom i energijom, pružala podršku ne samo tokom izrade disertacije, već i u mom celokupnom profesionalnom radu.

Neizmernu zahvalnost dugujem prof. dr Mirjani Kiječanin koja je prepoznala značaj ove teme i na njenoj bezrezervnoj pomoći na realizaciji same teze. Zahvaljujem joj se na divnoj saradnji, uloženom vremenu i trudu, stručnim i prijateljskim savetima tokom pisanja radova i izrade disertacije.

Takođe želim da se zahvalim i prof. dr Aleksandru Jovoviću na korisnim sugestijama i velikoj i nesebičnoj pomoći i saradnji kako bi se ovaj rad na što kvalitetniji način priveo kraju.

Na kraju bih volela da se zahvalim svim predstavnicima kompanija i domaćim i međunarodnim stručnjacima sa kojima sam sarađivala na različitim projektima. Svako iskustvo iz ovih kompanija, posvećenost i stručnost zaposlenih, kao i znanje tima stručnjaka uključenih u rad sa kompanijama, su na svoj način doprineli realizaciji ove teze.

Posvećeno mojoj porodici

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KONCEPT ČISTIJE PROIZVODNJE I ENERGETSKE EFIKASNOSTI.....	15
2.1 Razvoj koncepta čistije proizvodnje.....	16
2.1.1 Kontrola zagađivanja životne sredine	16
2.1.2 Rad na primeni preventivnih rešenja – koncept čistije proizvodnje.....	17
2.1.3 Uvođenje koncepta sirovinski efikasne i čistije proizvodnje	20
2.2 Osnovni principi metodologije sirovinski efikasne i čistije proizvodnje	21
2.2.1 Izrada bilansa i planiranje.....	22
2.2.2 Određivanje indikatora	25
2.2.3 Analiza problema i definisanje opcija	28
2.3 Uvođenje novih modela za primenu i evaluaciju opcija čistije proizvodnje.....	29
2.4 Razdvajanje privrednog rasta od potrošnje resursa i zagađenja.....	33
3. PRIMENA METODOLOGIJE ČISTIJE PROIZVODNJE U POLIMERNOJ INDUSTRIJI I ENERGETSKOM SEKTORU U REPUBLICI SRBIJI.....	36
3.1 Mogućnosti primene RECP metodologije u sektoru energetike	36
3.2 Implementacija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje u termoelektranama Nikola Tesla	37
3.2.1 Maseni i energetske bilans	37
3.2.2 Emisioni faktori.....	40
3.2.3 Analiza podataka i identifikacija opcija	41
3.3 Mogućnosti primene RECP metodologije u polimernoj industriji.....	42
3.3.1 Osnovni podaci o kompaniji HIP Petrohemija.....	42
3.3.2 Osnovni podaci o kompaniji Hipol Odžaci	46
3.4 Implementacija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje optimizacijom procesa u polimernoj industriji - na primeru HIP Petrohemija	50

3.4.1 Izrada bilansa.....	50
3.4.2 Preliminarna procena.....	51
3.5 Mogućnosti za unapređenje efikasnosti i smanjenje uticaja na životnu sredinu uvođenjem novih tehnologija u polimernoj industriji - na primeru Hipol A.D.	52
3.5.1 Potencijal za primenu opcija čistije proizvodnje.....	52
3.5.2 Prednosti uvođenja novog katalitičkog sistema	53
4.1 Analiza primene RECP metodologije i opcija u termoelektrani TENT A	57
4.1.1 Potencijali za unapređenje efikasnosti i povećanje snage	57
4.1.2. Dodatni potencijal za smanjenje potrošnje vode i energije	63
4.1.3 Problem odlaganja pepela.....	64
4.1.4 Homogenizacija uglja.....	64
4.1.5 Sistem monitoringa emisija i mere kontrole zagađenja.....	66
4.2 Analiza primene RECP tehnika optimizacije procesa u proizvodnji polimera	66
4.2.1 Optimizacija procesnih parametara pare za prodivavanje na pirolitičkim pećima u fabrici Etilen	67
4.2.2 Iskorišćenje otpadnih komponenti iz toka zauljenih voda	68
4.2.3 Integracija celokupnog sistema („Total site integration“).....	69
4.2.4 Poboljšanje rada sistema pare niskog pritiska	70
4.2.5 Optimizacija rada turbina	70
4.2.6 Rekonstrukcija pirolitičkih peći i/ili delimična zamena novim pećima	73
4.2.7 Izmene na aktivatoru katalizatora u procesu proizvodnje polietilena visoke gustine	74
4.2.8 Mogućnosti za smanjenje emisije isparljivih organiskih jedinjenja (VOC) – analiza emisija iz rezervoara.....	76
4.3 Analiza primene RECP tehnika zasnovanih na izmeni tehnologije u slučaju proizvodnje polipropilena	76
4.3.1 Izvorna tehnologija i katalizatori I generacije	76
4.3.2 Proces proizvodnje polipropilena korišćenjem katalizatora II generacije.....	78

4.3.3 Uvođenje visokoaktivnog katalizatora prilagođenog uslovima proizvodnje u Hipol-u	79
5. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA – UTICAJ NA ŽIVOTNU SREDINU	88
5.1 Rezultati RECP opcija u termoelektrani TENT A – indikatori eko-efikasnosti.....	88
5.1.1 Potrošnja energije	89
5.1.2 Generisanje otpada	90
5.1.3 Emisije u vazduh	91
5.1.4 Analiza principa decoupling u slučaju termoelektrane Nikola Tesla A	94
5.2 Rezultati RECP opcija u Petrohemiji – uticaj primenjenih opcija na životnu sredinu	95
5.3 Rezultati RECP mera vezanih za promene tehnologije u proizvodnji polipropilena i uticaj na životnu sredinu	98
5.3.1 Potrošnja sirovina	102
5.3.2 Potrošnja energije	104
5.3.3 Generisanje otpadnog proizvoda	105
5.3.4 Emisije u vazduh	107
5.3.5 Analiza principa decoupling u slučaju proizvodnje polipropilena	109
6. ZAKLJUČAK.....	112
7. LITERATURA	118
PRILOZI.....	129

SPISAK SLIKA

Slika 1.1 Potrošnja primarne energije (ten) po jedinici BDP (svedeno na paritet kupovne moći u Republici Srbiji u 2010. godini (Strategija razvoja energetike, 2015).....	7
Slika 1.2 Ukupna finalna potrošnja energije u 2013. godini (APPE, 2016).....	8
Slika 1.3 Projekcija finalne potrošnje energije u Republici Srbiji bez i nakon uvođenja mera energetske efikasnosti (Strategija razvoja energetike, 2015)	10
Slika 2.1 Kontrola zagađivanja životne sredine i tretman otpada na kraju proizvodnog procesa (OECD, 2009)	16
Slika 2.2 Koncept čistije proizvodnje (OECD, 2009)	18
Slika 2.3 Princip prevencije zagađenja i tehnike čistije proizvodnje (Vukadinović i saradnici, 2008b)	19
Slika 2.4 Demingov (PDCA) krug (Stamenić i saradnici, 2017)	22
Slika 2.5 Princip analize ulaz – izlaz.....	24
Slika 2.6 Koraci u definisanju opcija čistije proizvodnje (Fresner i saradnici, 2010b)..	28
Slika 2.7 Struktura uvođenja i primene sirovinski efikasne i čistije proizvodnje (Vukadinović i saradnici, 2010)	29
Slika 2.8 Relativno i apsolutno razdvajanje privrednog rasta od potrošnje resursa (<i>relative and absolute decoupling</i>) (UNIDO, 2011a).....	34
Slika 3.1 Blok šema procesa proizvodnje u sistemu HIP Petrohemija (Izveštaj čistije proizvodnje, 2010).....	43
Slika 3.2 Proces proizvodnje etilena (Izveštaj čistije proizvodnje, 2010).....	44
Slika 3.3 Proces proizvodnje polietilena visoke gustine	45
Slika 3.4 Šema procesa proizvodnje u kompaniji Hipol (Izveštaj čistije proizvodnje, 2008).....	48
Slika 4.1 Prikaz procesa u bloku A5 (B – kotao sa predgrejačima i dogrejačima (<i>superheaters</i> i <i>reheaters</i>), HPT – turbina visokog pritiska, IPT – turbina srednjeg pritiska, LPT – turbina niskog pritiska, G – generator, FWT – tank sveže vode, FWP – pumpa za svežu vodu, C – kondenzator, CP – pumpa kondenzatora, LP – razmenjivač toplote niskog pritiska, HP – razmenjivač toplote visokog pritiska) (Vukadinović i saradnici, 2016)	60

Slika 4.2 Prikaz procesa u bloku A3 (B – kotao sa pregrejačima i dogrejačima (<i>superheaters</i> i <i>reheaters</i>), HPT – turbina visokog pritiska, IPT – turbina srednjeg pritiska, LPT – turbina niskog pritiska, G – generator, FWT – tank sveže vode, FWP – pumpa za svežu vodu, C – kondenzator, CP – pumpa kondenzatora, LP – razmenjivač toplote niskog pritiska, HP – razmenjivač toplote visokog pritiska, DHE – razmenjivač toplote daljinskog grejanja) (Vukadinović i saradnici, 2016)	62
Slika 4.3 Promene emisije CO ₂ u zavisnosti od analiza kvaliteta uglja (Vukadinović i saradnici, 2016)	65
Slika 4.4 Promene emisije SO ₂ u zavisnosti od analiza kvaliteta uglja (Vukadinović i saradnici, 2016)	65
Slika 4.5 Šema sistema za odvajanje, pranje i sakupljanje toka polimera sa piro-uljem (A1 - kaustična kolona, M1 - separator gas-tečnost, Q3 – tank za pranje polimera vodom i uljem za pranje, P2 – pumpa za transport polimera do pumpe P3 za sakupljanje, A2 – dodatnu korak u separaciji u uljnom stripperu, Q1 i Q2 – tankovi za sakupljanje otpadne vode nakon izdvajanja polimernog toka)	69
Slika 4.6 Šema analiziranog sistema pare pre rekonstrukcije (B-1 A/B – dva kotla za proizvodnju pare, F-1 A/H – pirolitičke peći, F-2 A/B – dve etanske peći, B-2 A/B – pregrejači, RT 1-3 – turbine, P 1-8 – pumpe za napojnu vodu totlova, M 1-6 – separatori) (Vukadinović i saradnici, 2017)	71
Slika 4.7 Šema optimizovanog sistema pare nakon rekonstrukcije (B-1 A/B – dva kotla za proizvodnju pare, F-1 A/H – pirolitičke peći, F-2 A/B – dve etanske peći, B-2 A/B – pregrejači, RT 1-2 – turbine, P 1-8 – pumpe za napojnu vodu totlova, M 1-6 – separatori) (Vukadinović i saradnici, 2017)	72
Slika 4.8 Postavljanje unutrašnjeg filtera u cilju poboljšanja rada aktivatora.....	75
Slika 4.9 Šema laboratorijskog reaktora (RU Laboratorijski reaktor, 2014)	81
Slika 4.10 Polimerizacione krive izabranog katalizatora	86
Slika 4.11 Raspodela veličine čestica izabranog katalizatora	87
Slika 5.1 Promene u % u potrošnji uglja i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za energiju u odnosu na referentnu godinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016).....	90
Slika 5.2 Promene u % u ukupnoj emisiji GHG i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za klimatske promene u odnosu na referentnu godinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	92

Slika 5.3 Promene u % u emisiji SO ₂ e i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za acidifikaciju u odnosu na referentnu godinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	94
Slika 5.4 Prikaz razdvajanja proizvodnje i uticaja na životnu sredinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	95
Slika 5.5 Razlike u emisijama pre i posle implementiranih mera u slučaju HIP Petrohemija	97
Slika 5.6 Promene u % u potrošnji monomera i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za potrošnju sirovina nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje	102
Slika 5.7 Promene u % u potrošnji katalizatora i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za potrošnju sirovina nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje	103
Slika 5.8 Promene u % u potrošnji mazuta i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za potrošnju energije nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje	105
Slika 5.9 Promene u % u količini otpadnog polipropilena i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za generisanje otpada nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje	106
Slika 5.10 Promene u % u ukupnoj emisiji GHG i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za klimatske promene nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje	108
Slika 5.11 Promene u % u ukupnoj emisiji C ₂ H ₄ e i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za stvaranje fotohemijskog smoga nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje	109
Slika 5.12 Prikaz razdvajanja proizvodnje i potrošnje sirovina u slučaju proizvodnje polipropilena nakon tehnoloških izmena	110
Slika 5.13 Prikaz razdvajanja proizvodnje i uticaja na životnu sredinu u slučaju proizvodnje polipropilena nakon tehnoloških izmena	111

SPISAK TABELA

Tabela 3.1 Izabrani indikatori učinka za termoelektrane koje koriste ugalj u okviru ogranka TENT (Vukadinović i saradnici, 2016)	38
Tabela 3.2 Emisioni faktori zasnovani na analizi kvaliteta uglja za termoelektranu TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	41
Tabela 3.3 Razvoj Z-N katalitičkih sistema za polimerizaciju polipropilena (Moore, 1996)	55
Tabela 4.1 Rezultati retrofita turbine na bloku A5 (Vukadinović i saradnici, 2016)	59
Tabela 4.2 Rezultati retrofita turbine na bloku A3 (Vukadinović i saradnici, 2016)	62
Tabela 4.3 Rezultati optimizacije procesnih parametara pare za prođuvavanje na pirolitičkim pećima u fabrici Etilen	67
Tabela 4.4 Rezultati ispitivanja izabranog katalizatora u Hipolu	85
Tabela 5.1 Potrošnja uglja i indikatori eko-efikasnosti za energiju u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	89
Tabela 5.2 Količine nastalog pepela i indikatori eko-efikasnosti u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	91
Tabela 5.3 Emisije gasova sa efektom staklene bašte i indikatori eko-efikasnosti za klimatske promene u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	92
Tabela 5.4 Ukupne emisije SO ₂ e i indikatori eko-efikasnosti za acidifikaciju u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)	93
Tabela 5.5 Proizvodnja i potrošnja sirovina i energije pre i posle uvođenja nove generacije katalizatora	100
Tabela 5.6 Potrošnja propilena i indikatori eko-efikasnosti za potrošnju sirovine (monomera) u pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa	102
Tabela 5.7 Potrošnja katalizatora i indikatori eko-efikasnosti za potrošnju sirovine (katalizatora) pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa	103
Tabela 5.8 Potrošnja mazuta i indikatori eko-efikasnosti za potrošnju energije pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa	105
Tabela 5.9 Količine otpadnog polipropilena i indikatori eko-efikasnosti za generisanje otpada pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa	106

Tabela 5.10 Emisije gasova sa efektom staklene bašte i indikatori eko-efikasnosti za klimatske promene pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa..... 107

Tabela 5.11 Emisije C₂H₄e i indikatori eko-efikasnosti za stvaranje fotohemijskog smoga pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa..... 108

1. UVOD

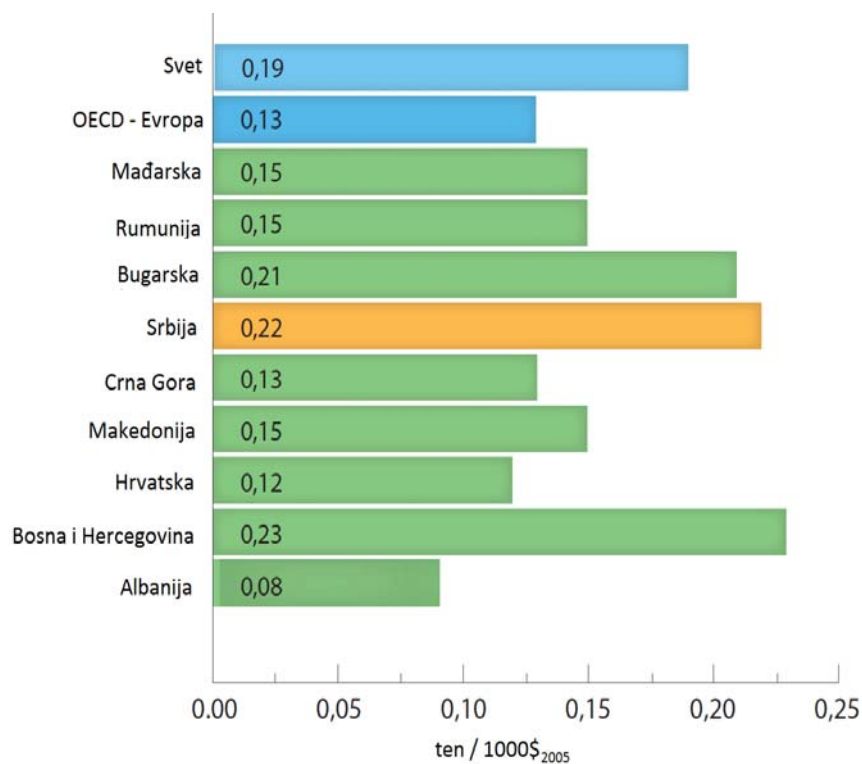
Veliki broj radova, knjiga i priručnika o sirovinski efikasnoj i čistijoj proizvodnji (eng. *resource efficient and cleaner production (RECP)*) ukazuje na značaj i potrebu za istraživanjima u ovoj oblasti (Fresner i Yacooub, 2006; Mattsson i saradnici, 2010). Neka od tih istraživanja usmerena su na bolje upravljanje hemikalijama (Lozano i saradnici, 2013), dok druga analiziraju mogućnosti za smanjenje potrošnje vode (Willers i saradnici, 2014), ili primenu RECP metoda uopšteno (Lozano, 2012; Price i saradnici, 2002). Međutim, potrošnja energije, kada je reč o industriji, i dalje ostaje jedan od primarnih problema. Povećana potražnja za energijom, rast cena energenata, emisije gasova staklene bašte, potreba za smanjenjem potrošnje energije i obaveze smanjenja emisija od strane industrije, su samo neki od razloga za dalja istraživanja u ovoj oblasti. I pored svih napora na unapređenju energetske efikasnosti, još uvek postoji trend povećanja potrošnje energije, naročito u zemljama u razvoju. Na osnovu pojedinih projekcija potrošnja energije će u svetu porasti za 33% u periodu od 2010. do 2030. (Abdelaziz i saradnici, 2011).

Gledajući globalno, industrija je potrošač gotovo jedne trećine ukupno proizvedne energije, i odgovorna je za skoro 40% emisija ugljen-dioksida koje su u vezi sa energijom. Prema podacima Međunarodne agencije za energetiku (eng. *International Energy Agency - IEA*) (IEA, 2007), svetska industrija će morati da smanji direktne emisije za oko 24% u odnosu na emisije iz 2007. godine, kako bi se globalne emisije iz 2005. prepolovile do 2050. godine (UNIDO, 2011a). Jedan od načina za smanjenje emisija je svakako primena mera energetske efikasnosti. Procenjuje se da potencijal za smanjenje potrošnje primarne energije u industriji usvajanjem najbolje tehnološke prakse (eng. *Best Practice Technologies (BPT)*) iznosi 18-26% ukupne potrošnje energije u industriji, i 5,4 - 8,0% ukupne potrošnje energije u svim sektorima (Tanaka, 2011). Zbog toga dalja istraživanja i širenje informacija o rezultatima implementiranih mera je potrebno vršiti u oba pravca: povećanje efikasnosti u potrošnji energije i smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte (eng. *greenhouse gases (GHG)*).

Posmatrajući različite grane industrije sa aspekta potrošnje energije, hemijska industrija se izdvaja kao energetske intenzivna industrija, a naročito petrohemijska industrija koja

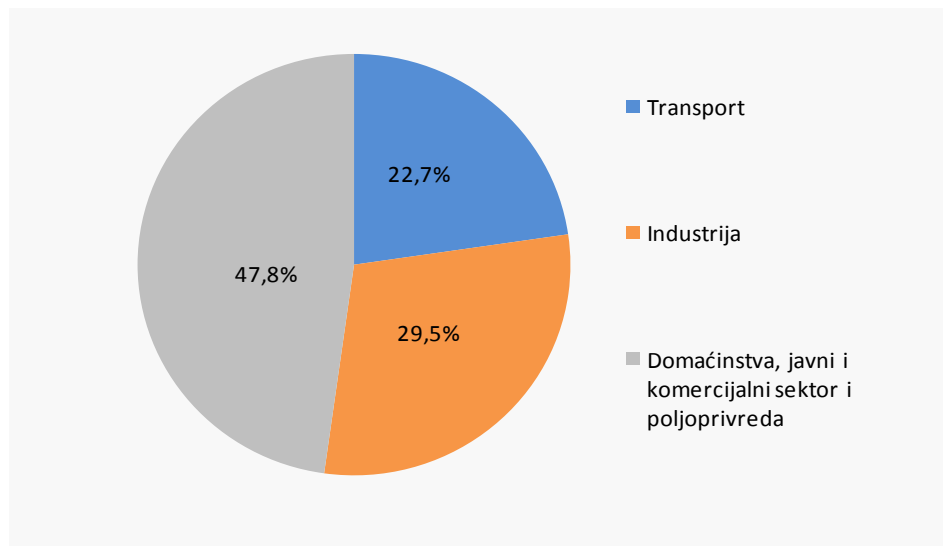
je energetska intenzivnija od ostalih podsektora hemijske industrije. Troškovi ovog podsektora za gorivo iznose čak 70% izdataka hemijske industrije, dok su troškovi električne energije 40% (EPA, 2008). Zbog toga je sirovinaska i energetska efikasnost jedan od prioriteta u radu petrohemijskih postrojenja. Pored finansijskih ušteda ostvarenih smanjenjem potrošnje energije i povećanjem produktivnosti, energetska efikasnost je prepoznata kao efektivan način za smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte.

Kada je reč o potrošnji energenata na nivou države i emisija GHG, Republika Srbija je među 20 energetski najintenzivnijih zemalja u svetu, gledano po potrošnji energije u odnosu na bruto društveni proizvod (SuDES, 2012). Kao što se može videti i na slici 1.1, potrošnja primarne energije u tonama ekvivalenta nafte (ten) po jedinici domaćeg proizvoda (svedeno na paritet kupovne moći) je u 2010. godini bila veća za 15% od svetskog proseka i skoro dva puta veća u odnosu na prosečnu potrošnju u evropskim državama članicama OECD (Strategija razvoja energetike, 2015).



Slika 1.1 Potrošnja primarne energije (ten) po jedinici BDP (svedeno na paritet kupovne moći) u Republici Srbiji u 2010. godini (Strategija razvoja energetike, 2015)

Ukupna potrošnja finalne energije u Srbiji (uključujući industriju, poljoprivredu, saobraćaj, domaćinstva, javni i komercijalni sektor) je u 2013. godini iznosila 8,2 miliona tona ekvivalenta nafte (ten). Udeo privrede u ukupnoj potrošnji je iznosio 29%, dok je udeo saobraćaja iznosio 23% (slika 1.2). Najveća potrošnja je zabeležena u sektoru domaćinstva (35%), zatim u javnom i komercijalnom sektoru (10%), sektoru poljoprivrede (2%) i građevinarstva (1%) (APPE, 2016).



Slika 1.2 Ukupna finalna potrošnja energije u 2013. godini (APPE, 2016)

Potrošnja primarne energije u istoj godini je iznosila 14,9 miliona tona ekvivalenta nafte (ten) pri čemu najveći udeo zauzima potrošnja uglja (53%), što je u direktnoj vezi sa proizvodnjom električne energije i potrošnjom uglja u termoelektanama. Pored uglja u potrošnji primarne energije udeo imaju i nafta (23%), prirodni gas (12%), biomasa (7%) i hidroenergija (6%) (APPE, 2016).

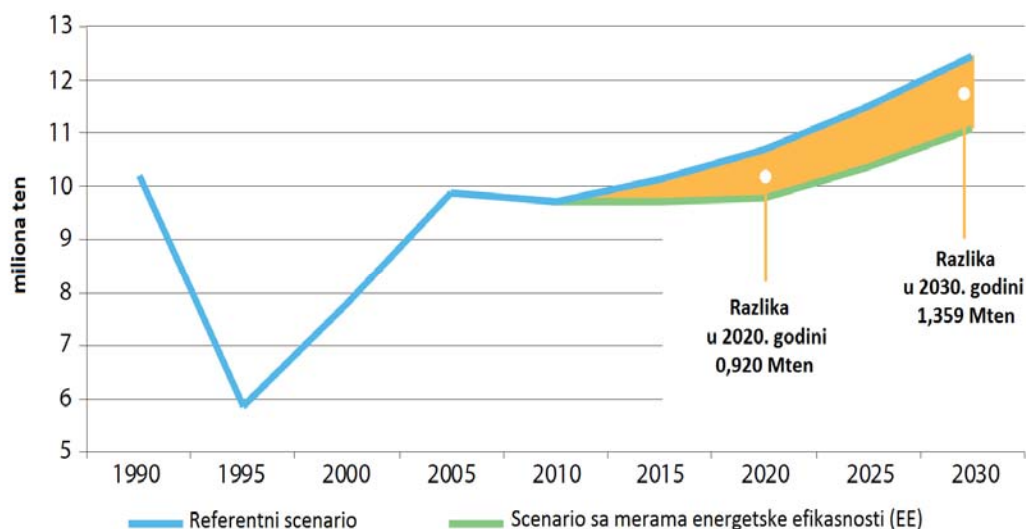
Prethodne studije su pokazale veliki potencijal za smanjenje potrošnje energije u petrohemijskoj industriji, ali i u energetske sektoru. Takođe, Srbija emituje relativno velike količine emisija GHG iz procesa sagorevanja, mereno po jedinici bruto društvenog proizvoda prema kupovnoj moći (MŽSPP, 2010). Proizvodnja električne energije svakako predstavlja jedan od najvećih uticaja na životnu sredinu, imajući u vidu količinu i kvalitet uglja koji se koristi kao sirovina za proizvodnju električne energije u termoelektanama (Jovančić i saradnici, 2011). Još jedno pitanje koje se

postavlja kada su u pitanju termoelektrane je njihova efikasnost. Takve stare elektrane imaju prosečnu neto efikasnost postrojenja nešto veću od 30%, što je posledica dizajna opreme, ali i gubitaka i neispravnosti starih kotlova koji nisu optimizovani za korišćenje različitih vrsta goriva (npr. biomase) (Abb, 2009). U hemijskoj industriji analiza upotrebe energije može da bude prilično zahtevna zbog složenosti procesa i količine potrebnih podataka.

Energetska efikasnost u industriji je snažno i na različite načine povezana sa konkurentnošću u zemljama u tranziciji, zemljama u razvoju i razvijenim zemljama. Ove veze postoje na mikro nivou, na nivou kompanija, kao i na nivou privrede u celini. Energetska efikasnost doprinosi smanjenju opštih troškova u kompaniji, povećava produktivnost, ima uticaja na konkurentnost i trgovinski bilans na nivou privrede, dok se stvaranjem domaćeg tržišta za energetske efikasne tehnologije podstiče razvoj uspešnog snabdevanja industrije tehnologijom u toj oblasti. Ključni pokretač energetske efikasne razvoja industrije jeste uvođenje koncepta čistije proizvodnje i smanjenje troškova (UNIDO, 2011b).

Primena i razvoj energetske efikasnosti u industriji, kao i u drugim oblastima u Republici Srbiji, je najvećim delom regulisana Zakonom o efikasnom korišćenju energije (Službeni glasnik RS, broj 25/13) i njegovim podzakonskim aktima (Zakon o EKE, 2013). Takođe je jedan od glavnih ciljeva pojedinih relevantnih nacionalnih strategija obezbeđivanje sigurnog snabdevanja energijom kroz povećanje efikasnosti energetske kompanija i privrede (Nacionalna strategija održivog razvoja, 2008; Strategija i politika razvoja industrije Republike Srbije, 2011).

Procene koje su rađene u okviru Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine pokazuju da bi, uzimajući u obzir predviđeni privredni rast, došlo do povećanja potrošnje finalne energije za 10,1% do 2020. godine, odnosno za 18% do 2025. godine u odnosu na 2010. godinu. U drugom slučaju koji podrazumeva primenu mera energetske efikasnosti u svim sektorima, ovo povećanje bi iznosilo 1% do 2020. odnosno 6,8% do 2025. godine. To znači da bi se primenom mera energetske efikasnosti ostvarile uštede u potrošnji finalne energije od 920 hiljada ten, odnosno 1,359 miliona ten (slika 1.3).



Slika 1.3 Projekcija finalne potrošnje energije u Republici Srbiji bez i nakon uvođenja mera energetske efikasnosti (Strategija razvoja energetike, 2015)

Cilj doktorske disertacije

Cilj ove doktorske disertacije je analiza postojećih metoda za smanjenje potrošnje energije u polimernoj industriji, ali i razvoj novih metoda kroz uvođenje tehnoloških inovacija, kao što je uvođenje novih katalizatora, optimizacija energetskeg sistema i primena novih rešenja za praćenje i unapređenje energetske efikasnosti.

Ispitivanja su obuhvatila domaću polimernu industriju, odnosno procesne sisteme polimerne industrije (pre svega sintezu monomera i polimera, gde je potrošnja energije najveća). Da bi se ispitaio ceo energetski bilans ovih sistema, u analizu su uključeni interni sistemi za proizvodnju energije, ali i eksterni sistemi koji služe sa snabdevanje energijom, pre svega termoenergetska postrojenja u okviru JP Elektroprivrede Srbije, kao bazne industrije.

Podaci sakupljeni u pojedinim kompanijama i dobijeni na osnovu planiranih industrijskih eksperimenata su bili osnov za razvoj metoda za unapređenje energetske efikasnosti.

Predmet naučnog istraživanja je i uspostavljanje novih modela za unapređenje sirovinske i energetske efikasnosti u polimernoj industriji koja spada u grupu velikih potrošača toplotne i električne energije.

Cilj istraživanja je poboljšanje proizvodnog procesa i energetske stanja primenom navedenih metoda istraživanja u posmatranim industrijskim kompleksima. Implementacijom predloženih rešenja očekuje se poboljšanje kvaliteta finalnog proizvoda i ostvarenje značajnih ušteda kroz smanjenje potrošnje sirovina i energenata i smanjenje emisija u životnu sredinu. Primenom metodologije uspostavljene u ovom radu, ispitivani procesni sistemi bi trebalo da ostvare smanjenu specifičnu potrošnju energije, smanjenje emisija i količine nastalog otpada i samim tim smanjenje uticaja na životnu sredinu.

Prvi deo ove doktorske disertacije je vezan za ispitivanje mogućnosti primene koncepta čistije proizvodnje i dobijenih rezultata na optimizaciju proizvoda i procesa u polimernoj industriji. Imajući u vidu da su u pitanju energetske veoma zahtevni procesi, drugi deo ove doktorske disertacije se odnosi na primenu postojećih modela, ali i razvijanje nove metodologije za optimizaciju rada energetskih postrojenja, takođe bazirane na konceptu čistije proizvodnje. Još jedan pravac koji je razmatran u okviru disertacije je i potpuna promena tehnologije čime se ostvaruje pozitivan uticaj na životnu sredinu, uz povećanje proizvodnje, poboljšanje kvaliteta proizvoda i uštedu resursa.

Metode istraživanja obuhvataju izvođenje precizno koncipiranih industrijskih eksperimenata u cilju utvrđivanja stanja materijalnog i energetske bilansa u pojedinim industrijskim postrojenjima vezanim za procese u polimernoj industriji (Hipol, Petrohemija, itd), kao i uticaj promene operativnih uslova na optimalno bilansiranje ispitivanih sistema.

Pregled prethodnih istraživanja

U implementaciji mera energetske efikasnosti analizirani su različiti pristupi (Abdelaziz i saradnici, 2011), sa aspekta uvođenja energetske menadžmenta (Lozano, 2012; Olanrewaju i Jimoh, 2014), ušteda koje se ostvaruju unapređenjem tehnologije (Napp i

saradnici, 2014), i sa aspekta uvođenja instrumenata programske politike (Henry Chen i saradnici, 2013; Napp i saradnici, 2014).

Kada je reč o hemijskoj industriji, analiza upotrebe energije može da bude prilično zahtevna zbog složenosti procesa i količine potrebnih podataka. Neka istraživanja (Saygin i saradnici, 2012) ukazala su na nedostatak pouzdanih podataka i vrednosti specifične potrošnje energije u hemijskim postrojenjima. Saygin i saradnici (2011a) izvršili su analizu potencijala energetske efikasnosti u hemijskom i petrohemijskom sektoru primenom dva pristupa, *Top down* i *Bottom up*. Prema njihovim rezultatima, globalni potencijal za energetska efikasnost iznosi 16%, bez ušteda električne energije i povećanjem stepena integracije procesa, kombinovanjem toplotne i električne energije i tretmanom otpadne plastike. Neelis i saradnici (2007) su pokazali da bi potencijalne uštede energije u petrohemijskim kompanijama implementacijom najboljih dostupnih tehnika (eng. *best available techniques* (BAT)) mogle da budu između 10 i 50% sadašnje finalne potrošnje energije. Oni su takođe konstatovali da neki procesi sa većim stepenom gubitaka energije (kao što je proizvodnja etilena) zahtevaju dublja istraživanja na nivou jediničnih operacija, kako bi se identifikovali potencijali za tehničke i ekonomske uštede, uzevši u obzir druge termodinamičke, ekonomske i praktične aspekte. Pored moguće optimizacije u samom proizvodnom procesu, postoji i veliki potencijal za uštede energije u delovima sistema povezanim sa procesom proizvodnje, na primer kod sistema proizvodnje i distribucije pare (Saygin i saradnici, 2011b).

Što se tiče potencijala energetske efikasnosti i aspekta zagađenja životne sredine, petrohemijski sektor predstavlja veoma atraktivnu oblast za istraživanje. U literaturi se mogu naći istraživanja (Abbaszadeh i Hassim, 2014; Al-Sharrah i saradnici, 2010; Charmondusit i Keartpakpraek, 2011; Gielen i Yagita, 2002; Gielen i saradnici, 2002; Lee, 2013; Lee i Lin, 2001; Mohammadi i saradnici, 2013; Ren, 2009; Ren i saradnici, 2009) koja se odnose na analizu učinka petrohemijskih kompleksa, kao i na uvođenje novih tehnika i tehnologija.

Pretraživanjem literature takođe se došlo do zaključka da se većina istraživanja o energetske efikasnosti bave proizvodnim procesima, naročito potencijalima za efikasnosti u energetski zahtevnim industrijskim granama. Neka istraživanja, međutim,

pokazala su (Tzolakis i saradnici, 2012; Wang i saradnici, 2013) da veliki potencijal za smanjenje potrošnje energije ustvari postoji kod samih proizvođača energije, u postrojenjima za proizvodnju električne energije, a naročito u termoelektranama.

Sirovinski efikasnija i čistija proizvodnja (eng. *Resource Efficient and Cleaner Production (RECP)*) uspešno se primenjuje širom sveta u različitim industrijskim sektorima (Fresner i Yacooub, 2006; Henriksson i Söderholm, 2009; Mattsson i saradnici, 2010). U literaturi se mogu naći slučajevi iz više industrijskih grana, i to iz različitih sektora, kao što su: primena čistije proizvodnje (eng. *Cleaner Production (CP)*) u postrojenjima za proizvodnju keramičkih pločica (Huang i saradnici, 2013), gde su identifikovane 31 različite mere; inicijative čistije proizvodnje u mlekarama u Brazilu (Willers i saradnici, 2014), sa posebnim fokusom na smanjenje potrošnje vode; metodologija za procenu čistije proizvodnje u postrojenju za galvanizaciju cinkom u Turskoj (Daylan et al., 2013), uključujući i CP audit u kompaniji i analizu masenog bilansa, ili studije slučaja o čistijoj proizvodnji u mesnoprerađivačkoj industriji, na farmama živine (Kist i saradnici, 2009) i svinja (Kupusovic i saradnici, 2007).

Međutim, implementacija čistije proizvodnje i dalje nailazi na probleme i prepreke. Silva i saradnici (2013) su predstavili neke od njih, između ostalih, nedostatak detaljnih informacija, alata i tehnika koji se mogu iskoristiti za postizanje rezultata u različitim segmentima proizvodnje. Analiza čistije proizvodnje i drugih inicijativa, koju je izvršio Posch i saradnici (2015) pokazala je da primena samo jedne metodologije može da dovede do ograničenog i uskog doprinosa održivosti, a naročito u slučaju celokupnog sistema kompanije. Zbog toga je istraživanje u oblasti sirovinski efikasne i čistije proizvodnje sada usmereno na kombinovanje više metodologija i na razvijanje novih modela (Dobes, 2013; Fresner i saradnici, 2010a; Laforest, 2013; Petek i saradnici, 2014).

Na osnovu literaturnog pregleda zaključeno je da su precizne analize, koje dovoljno detaljno sagledavaju i opisuju ponašanje industrijskih procesnih sistema veoma retke. Ovim se otvara prostor za uvođenje nove metodologije bazirane na kombinaciji do sada prisutnih pristupa u materijalnoj i energetske analizi procesa i opreme, ali i za uvođenjem integralnog pristupa, kroz modele formulisane korišćenjem podataka

dobijenih iz industrijskih eksperimenata. Sa druge strane, imajući u vidu značaj koji ovakvi modeli imaju u optimizaciji rada postrojenja, i podizanju njegove energetske efikasnosti, neophodno je precizno određivanje parametara procesa, ali i izrada novih i unapređenje postojećih modela koji će omogućiti njihovu primenu u savremenim softverskim paketima za modelovanje i simulaciju procesa.

2. KONCEPT ČISTIJE PROIZVODNJE I ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Princip energetske efikasnosti je široko prihvaćen na različitim nivoima: generalno kao jedna od važnih i efikasnih metoda za smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu, na nivou država kao jedna od strategija kojom se obezbeđuje sigurnost snabdevanja energijom i ispunjenje međunarodnih obaveza u pogledu očuvanja i zaštite životne sredine, dok na nivou industrije predstavlja alat kojim se mogu ostvariti značajne uštede, povećati profit i konkurentnost na tržištu (Stamenić i saradnici, 2017).

Direktiva o proizvodima koji koriste energiju (*Energy Using Products Directive 2005/32/EC*) definiše energetska efikasnost kao odnos između izlaza ili proizvoda nekog procesa, usluge, dobra ili energije i uložene energije (EUPD, 2005).

Unapređenje energetske efikasnosti podrazumeva smanjenje potrošnje energije za proizvodnju određenog proizvoda, izvršenu uslugu ili obavljenju aktivnost kao rezultat tehnoloških modifikacija i unapređenja, bolje organizacije rada i drugo. To svakako ne podrazumeva smanjenu potrošnju energije usled nedostatka iste za obavljanje određenih aktivnosti ili usled previsoke cene energenata. Naprotiv, tada najčešće dolazi do smanjenja obima proizvodnje, do smanjenja kvaliteta usluge ili određene aktivnosti što može imati negativne uticaje i na kraju ne donosi finansijske uštede (Jankes i saradnici, 2009).

Prilikom analize industrijskih postrojenja teško je razdvojiti energetska efikasnost od sirovinske efikasnosti. Smanjenje potrošnje pojedinih sirovina često dovodi do efikasnijeg korišćenja energije (ali u nekim slučajevima i do povećanja kada je potrebno uzeti u obzir i druge faktore) i obrnuto. Zbog toga je najbolje posmatrati proces kao celinu i analizirati sve tokove ulaza i izlaza. Jedna od metodologija koja se zasniva na ovakvom sveobuhvatnom pristupu je i metodologija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje.

2.1 Razvoj koncepta čistije proizvodnje

2.1.1 Kontrola zagađivanja životne sredine

U daljoj prošlosti industrija je zagađenje životne sredine uglavnom rešavala po principu "razblaženje je rešenje", odnosno, ispuštanje zagađujućih materija na manje štetan ili manje očigledan način (UNEP i UNIDO, 2004). Pod uticajem strožijih propisa u oblasti zaštite životne sredine, problemi zagađivanja se uglavnom rešavaju pokušajima da se kontroliše i smanji količina emisija koja se ispušta u životnu sredinu primenom različitih mera tretmana.

Kontrola zagađivanja odlikuje se primenom tehnoloških mera koje deluju kao dodatni i manje važni delovi postojećih proizvodnih procesa i nalaze u finalnoj fazi tih procesa. Zbog toga se ove tehnologije često nazivaju tehnologijama ili rešenjima "na kraju procesa" (tzv. *end-of-pipe tehnologije*), kao što je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1 Kontrola zagađivanja životne sredine i tretman otpada na kraju proizvodnog procesa (OECD, 2009)

Primenom *end-of-pipe* rešenja se smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu jer se smanjuju ili uklanjaju zagađujuće materije koje se ispuštaju u vazduh, zemljište ili vode. Kako kontrola zagađivanja ne menja postojeće proizvodne sisteme na neki značajniji način, jedina korist je bolje stanje životne sredine. Zbog toga za kompanije ulaganja u te mere predstavljaju veliki trošak. Stvara se utisak da industrijska konkurentnost trpi usled troškova zaštite životne sredine i da se stanje životne sredine poboljšava na uštrb ekonomskog rasta (OECD, 2009).

U nekim slučajevima tretman otpada i kontrola zagađenja su i dalje od ključnog značaja kada je u pitanju zaštita životne sredine. Ipak, principom prevencije i smanjenjem emisija na izvoru proizvodnog procesa, smanjuju se troškovi ulaganja u postrojenja za tretman i smanjuju se njihovi operativni troškovi.

2.1.2 Rad na primeni preventivnih rešenja – koncept čistije proizvodnje

U nastojanju da upravljanje zaštitom životne sredine sa konvencionalne kontrole zagađenja pređe na proaktivniji pristup, Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu (UNEP) je 1989. godine uveo program čistije proizvodnje. Čistija proizvodnja (ČP) predstavlja preventivnu strategiju zaštite životne sredine, koja se može primenjivati na procese, proizvode i usluge, kako bi se sprečilo stvaranje otpada i emisije, samim tim smanjili rizici po ljudsko zdravlje i životnu sredinu, i istovremeno unapredila efikasnost korišćenja resursa (Petek i Glavič, 2000; Robert i saradnici, 2002; UNIDO, 2002). Koncept čistije proizvodnje je prvi put predstavljen na Prvom međunarodnom savetodavnom seminaru o preventivnim strategijama upravljanja zaštitom životne sredine, koji je u organizaciji UNEP-a održan 1990. godine. Otada su pokrenute mnogobrojne nacionalne, regionalne i međunarodne inicijative (Mattsson i saradnici, 2010; Van Berkel, 2007), uključujući i osnivanje Nacionalnih programa čistije proizvodnje pod vođstvom UNIDO-UNEP-a.

Ključni faktor koji odvaja čistiju proizvodnju od kontrole zagađenja i tretmana otpada i emisija je činjenica da se čistija proizvodnja usredsređuje na ranije faze industrijskog procesa, odnosno na izvor zagađenja. Prelazak na čistiju proizvodnju podrazumeva istraživanje svih aspekata proizvodnog procesa i njegovog organizacionog uređenja kako bi se identifikovale oblasti u kojima bi se uticaj na životnu sredinu mogao smanjiti ili potpuno otkloniti.

Poboljšanje stanja životne sredine zasnovano na smanjenju zagađenja na mestu nastanka zahteva promene u postojećim proizvodnim procesima, proizvodima/uslugama, odnosno u organizacionoj strukturi i procedurama (slika 2.2).



Slika 2.2 Koncept čistije proizvodnje (OECD, 2009)

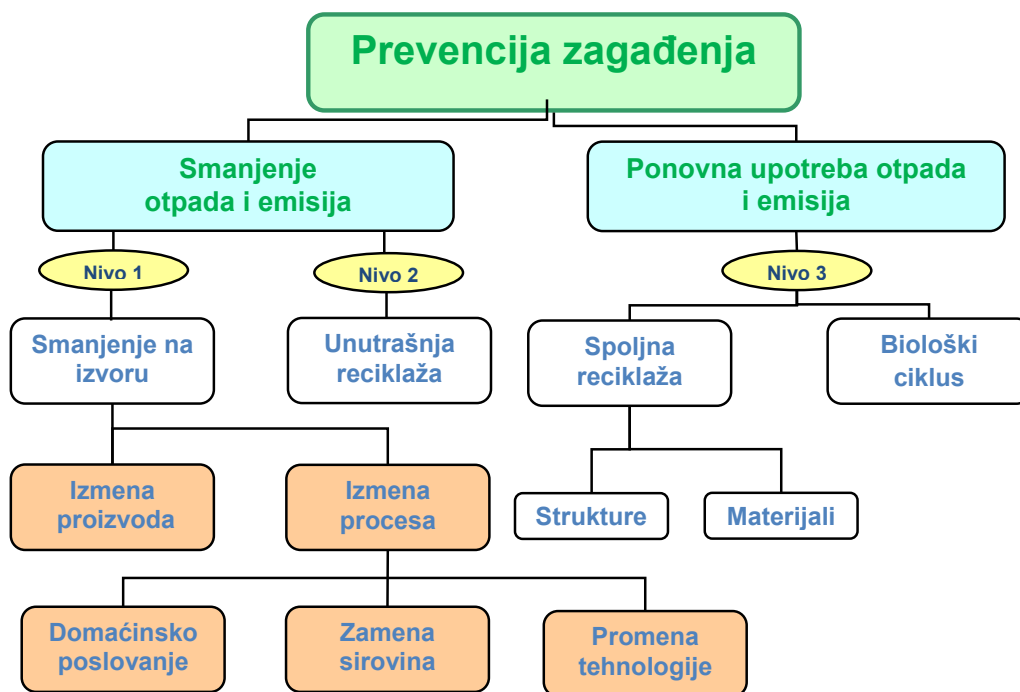
Promene se postižu primenom tehnika čistije proizvodnje kao što su domaćinsko poslovanje, optimizacija procesa, zamena sirovina, uvođenje nove tehnologije i izmene postojećeg/razvoj novog proizvoda.

Zamena sirovina podrazumeva prestanak korišćenja opasnih i toksičnih materija i njihovu zamenu sirovinama koje su povoljnije po zdravlje ljudi i životnu sredinu. Izmene proizvoda ili razvoj novog proizvoda podrazumeva produžavanje životnog veka proizvoda, zamenu materijala, preoblikovanje proizvoda, upotrebu recikliranih materijala i ograničenu upotrebu kritičnih komponenata. Češće primenjivane opcije su tehnološke izmene koje podrazumevaju izmene u proizvodnom procesu (optimizacija u cilju ostvarivanja ušteda u sirovinama i energiji), izmene na samim uređajima, automatizacija i izmena radnih uslova.

Najčešće primenjena opcija koja se pokazala kao vrlo efikasna, a zahteva mala ulaganja i omogućuje brz povratak investicija je domaćinsko poslovanje (Vukadinović, 2008a). Domaćinsko poslovanje je niz operativnih postupaka za sve zaposlene koji podstiče smanjenje otpada i emisija, kao i racionalnije korišćenje sirovina i energenata kao što su:

- organizacione mere
- savremena politika nabavke i skladištenja
- razdvajanje tokova otpada
- poboljšanje logistike i drugo.

Iz opisanih tehnika se može zaključiti da se čistija proizvodnja zasniva na efikasnoj upotrebi sirovina uz istovremeno izbegavanje nepotrebnog stvaranja otpada. Ovaj pristup u kome se uvek prvo teži opcijama koje podrazumevaju sprečavanje nastajanja otpada i emisija je prikazan dijagramom na slici 2.3.



Slika 2.3 Princip prevencije zagađenja i tehnike čistije proizvodnje (Vukadinović i saradnici, 2008b)

Još jedna važna razlika između kontrole zagađenja i čistije proizvodnje je i oblast primene, tj. dok tretman otpada ima samo jedno područje aktivnosti, čistija proizvodnja ih ima više, kao što su: smanjenje količine otpada, proizvodnja bez zagađenja, energetska efikasna proizvodnja, bezbednost pri radu, proizvodi i ambalaža u skladu sa životnom sredinom i drugi (Strategija uvođenja ČP, 2009).

Iako je implementacija čistije proizvodnje odgovornost kompanije, kao što je slučaj sa kontrolom zagađenja, ona ipak vodi ka sveobuhvatnijem pristupu zaštite životne sredine i smatra se ključnom za kretanje ka eko-efikasnoj proizvodnji (OECD, 2009). Preduzeća koja primenjuju čistiju proizvodnju mogu da ostvare ekonomsku dobit kroz smanjenje troškova rada, smanjen obim tretmana otpada, smanjenje troškova odlaganja otpada,

smanjenje zagađivanja životne sredine i drugo. Sa druge strane, implementacija čistije proizvodnje predstavlja i širi i izazovniji zadatak, kojeg mogu da uspore prepreke u okviru samih kompanija, a koje su posledica problema u organizacionoj koordinaciji, kao i nedovoljne podrške rukovodstva. Pored ovih, prepreke mogu da budu i na državnom nivou, kao što je regulativa koja nameće određene tehnološke standarde ili favorizuje primenu mera tretmana na kraju procesa u odnosu na mere čistije proizvodnje (Frondele i saradnici, 2007).

2.1.3 Uvođenje koncepta sirovinski efikasne i čistije proizvodnje

Čistija proizvodnja je usmerena na procese i usluge, odnosno operacije i proizvodnju u okviru sistema. Mada je koncept u međuvremenu proširen, dobivši orijentaciju održivog razvoja (Glavič i Lukman, 2007), čistija proizvodnja je uglavnom usredsređena na dimenziju zaštite životne sredine, uz istovremeno pozitivna poboljšanja ekonomske dimenzije (npr. smanjenje troškova ili povećanje produktivnosti). Lozano (2012) ističe da čistija proizvodnja ne bi trebalo isključivo da se odnosi na promenu sirovina, procesa i proizvoda, već i na promenu organizacionih sistema, korporativne kulture i stavova, primenu savremenih stručnih znanja i prevazilaženje netehničkih prepreka (Baumgartner i Zielowski, 2007).

Organizacija Ujedinjenih nacija za industrijski razvoj (UNIDO) i Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu (UNEP) od 1994. godine aktivno podržavaju prelazak na održive industrijske sisteme osnivanjem Nacionalnih centara za čistiju proizvodnju (UNIDO i UNEP, 2010a). Centri se uglavnom osnivaju u okviru nacionalnih industrijskih asocijacija, istraživačkih instituta ili univerziteta. Od 2009. godine, UNIDO i UNEP su proširili sadržaj svog zajedničkog programa usvajanjem programa o sirovinski efikasnoj i čistijoj proizvodnji (eng. *Resource Efficient and Cleaner Production - RECP*) kako bi čistiju proizvodnju još jače povezali sa najvećim izazovima današnjice i sutrašnjice kada je reč o zaštiti životne sredine i korišćenju resursa na lokalnoj, nacionalnoj i regionalnoj skali. Koncept sirovinski efikasne i čistije proizvodnje (RECP) zasniva se na principima primene preventivnih strategija u životnoj sredini, ali on osim toga širi svoj sadržaj i opseg (Vukadinović i saradnici, 2014a). U

kontekstu zajedničkog programa o RECP, UNIDO i UNEP definišu RECP na sledeći način (UNIDO i UNEP, 2010a):

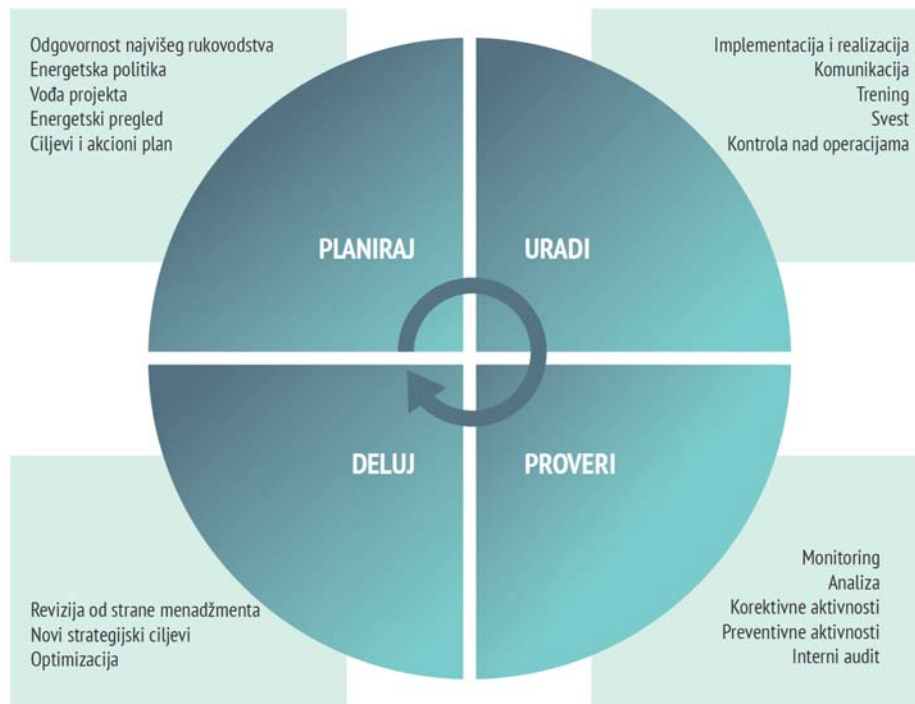
"Sirovinski efikasna i čistija proizvodnja predstavlja neprestanu primenu integrisane preventivne strategije zaštite životne sredine na procese, proizvode i usluge u cilju povećanja efikasnosti i smanjenja rizika po zdravlje ljudi i životnu sredinu. Ona naročito ide u prilog unapređenju tri dimenzije održivog razvoja na integrisan način, katalizacijom:

- proizvodne efikasnosti kroz optimizaciju produktivnog korišćenja prirodnih resursa (materijala, energije i vode) u preduzećima i drugim organizacijama;
- upravljanja zaštitom životne sredine kroz smanjenje uticaja na životnu sredinu i prirodu, sprečavanje stvaranja otpada i emisija, i poboljšanje prakse upotrebe hemikalija u preduzećima i drugim organizacijama;
- ljudskog razvoja kroz smanjenje rizika za ljude i društva od strane preduzeća i drugih organizacija, i podršku njihovog razvoja."

Princip sirovinski efikasne i čistije proizvodnje se zasniva na modifikaciji, razvoju i primeni RECP metoda, tehnika, praksi i zakonodavstva. Osnovni cilj RECP programa koji sprovodi UNIDO i UNEP je šira primena koncepta sirovinski efikasne i čistije proizvodnje odnosno da ovaj koncept postane uobičajena praksa, a ne inicijative od strane pojedinih preduzeća i organizacija.

2.2 Osnovni principi metodologije sirovinski efikasne i čistije proizvodnje

Metodologija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje predstavlja proces kontinuiranog unapređenja radi postizanja ciljeva koji su u vezi sa korišćenjem sirovina i energenata, kao i sa količinom nastalih emisija. Proces se bazira na pristupu: ***planiraj – uradi – proveri – deluj*** koji je poznat kao Demingov PDCA ciklus (eng. *Plan-Do-Check-Act*) i koji je prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4 Demingov (PDCA) krug (Stamenić i saradnici, 2017)

2.2.1 Izrada bilansa i planiranje

Planiranje podrazumeva preduzimanje sledećih aktivnosti u okviru kompanije:

- odluku i podršku rukovodstva o primeni RECP metodologije;
- formiranje tima;
- planiranje rada na uvođenju RECP metodologije.

Prvi korak u procesu uvođenja programa sirovinske i energetske efikasnosti je odluka rukovodstva i njegova podrška i posvećenost. Mogućnost finansijske uštede smanjenjem količine otpada, potrošnje energije, hemikalija i vode, manja ulaganja u tretman otpadnih voda, smanjeni rizici i ostalo su samo neki od razloga da se najviše rukovodstvo posveti programu sirovinske i energetske efikasnosti. Takođe važan korak u planiranju je i formiranje tima koji će raditi na uvođenju i primeni metodologije. Zavisno od veličine i strukture privrednog društva mogući su različiti načini formiranja timova. Ukoliko se radi o velikim privrednim društvima poželjno je osnovati tim koji bi se bavio životnom sredinom ili uključiti aktivnosti u postojeće organizacione strukture

kao što su na primer, timovi za bezbednost i zdravlje na radu ili kvalitet (Fresner i saradnici, 2010b).

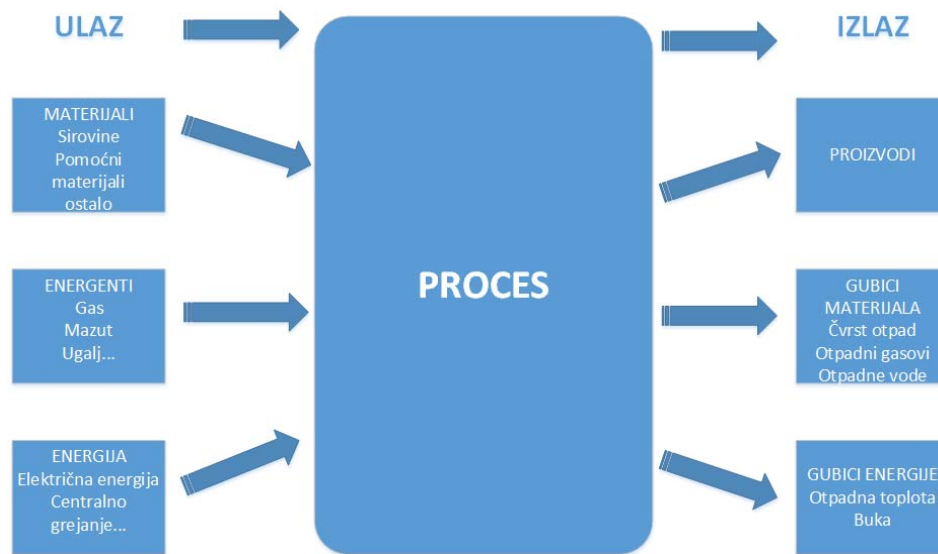
Uvođenje RECP metodologije uključuje sledeće korake:

- sakupljanje prvih ideja obilaskom lokacije;
- prethodnu procenu da bi se odredili prioriteti: izrada blok dijagrama koji prikazuje ulaze i izlaze iz procesa, kvantifikovanje svih ulaza i izlaza, postavljanje prioriteta u skladu sa obimom, troškovima i rizicima;
- detaljnu procenu i definisanje opcija čistije proizvodnje;
- evaluaciju opcija i donošenje RECP programa;
- implementaciju predloženih mera;
- izveštavanje i sastanke.

Blok dijagram pomaže u praćenju mesta nastanka gubitaka (otpada, emisija, otpadne toplote) nakon čega je moguće definisati mesta na kojima je potrebno preduzeti mere za efikasnije korišćenje resursa. U skladu sa principima o održanju mase i energije, svaka sirovina koja ulazi u neki proces mora i da ga napusti u istom ili drugom obliku. U proizvodnom procesu svi materijali i energija se mogu posmatrati u tri faze (Fresner i Yacooub, 2006):

- 1) na ulazu u proces; npr. pri nabavci;
- 2) kada se koriste u skladu sa proizvodnim specifikacijama, npr. na nekoj opremi, pogonu;
- 3) kada izlaze iz procesa, npr. kao proizvod, emisija, otpad ili otpadna toplota.

Količine materijala i energije moraju biti iste na ulazu i izlazu. Ukoliko se vrednosti ne poklapaju, to može biti pokazatelj gubitaka i mogućnost za optimizaciju (slika 2.5).



Slika 2.5 Princip analize ulaz – izlaz

Pri izradi bilansa potrebno je odrediti sve relevantne informacije kao što su materijali i njihove količine, njihova ekonomska vrednost, izvori podataka, uticaj na životnu sredinu i drugo. Sirovine se mogu podeliti prema tipu otpada ili emisijama koje nastaju u toku procesa. Zavisno od tipa mogu se razviti i primeniti različite strategije za eliminaciju ili smanjenje količine otpada i emisija. Cilj je napraviti jasnu mapu tokova u okviru kompanije kako bi razumeli gde se sve materijali nalaze i kako se koriste, npr. koliko se troši sirovina, pomoćnih materijala i energije, iz kog procesa potiču emisije i/ili otpad, koji otpad je opasan i zbog čega je opasan, koliki deo sirovina ili pomoćnog materijala postaje otpad ili se gubi isparavanjem, koliki su troškovi odlaganja otpada i slično (Fresner i Yacooub, 2006).

Da bi se odredili prioriteti neophodno je ustanoviti najznačajnije tokove. Značajni tokovi su oni koji:

- podležu zakonskim propisima,
- se koriste u velikim količinama,
- proizvode visoke troškove ili
- imaju osobine koje negativno utiču na zdravlje ljudi ili životnu sredinu u procesu proizvodnje ili upotrebe.

2.2.2 Određivanje indikatora

Postoji više tipova indikatora koji se mogu koristiti za merenje i praćenje promena. Izdvajaju se dva tipa indikatora koji su od primarnog značaja: apsolutni i relativni indikator.

Apsolutni indikator mere osnovne podatke u datom vremenu, tipično u roku od godinu dana, na primer:

- tone ugljen-dioksida (CO₂) koje se emituju na godišnjem nivou;
- tone otpada koje se stvore na godišnjem nivou;
- godišnja proizvodnja.

Relativni indikator predstavlja merenje apsolutne potrošnje ili emisije u odnosu na referentne podatke. U smislu stanja životne sredine, produktivnost i uticaj predstavljaju centralne relativne indikatore. Indikator produktivnosti predstavlja količinu proizvoda po jedinici potrošene sirovine, npr. tonu proizvoda po toni upotrebljene sirovine, ili obim isporučenih usluga po kubnom metru potrošene vode. Sa aspekta sirovinski efikasne i čistije proizvodnje, zahteva se rast indikatora produktivnosti vremenom, čime se ide ka većoj proizvodnji po jedinici potrošenog resursa. Indikator uticaja kvantifikuje količine upotrebljene sirovine ili količine emisija po jedinici proizvoda, na primer emisije CO₂ po jedinici proizvoda ili tona generisanog otpada po jedinici proizvoda. U ovom slučaju se zahteva pad vrednosti indikatora vremenom, čime se ostvaruje manje zagađenje po jedinici nastalog proizvoda. Relativni indikator takođe se mogu koristiti za uvezivanje fizičkih i monetarnih podataka, na primer, troškova prečišćavanja otpadnih voda po jedinici korisničke usluge (UNIDO i UNEP, 2010b).

Prvi korak pri izračunavanju indikatora radi praćenja opcija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje jeste uspostavljanje granica sistema. Granice mogu da uključe lokaciju kompanije, pojedinačne procese ili pogone na lokaciji, lokaciju kompanije i transport dobara zajedno, ili čak celokupan proizvodni lanac.

Na nivou kompanije apsolutni indikator koji se odnose na upotrebu resursa su:

- potrošnja energije: upotreba finalne energije u kompaniji, merena u MJ ili KWh, uključujući i energetska vrednost goriva koja se koriste (gas, nafta, biomasa, itd.) i potrošnju energije;

- potrošnja materijala: ukupna masa materijala koji se koriste u kompaniji, merena u tonama, uključujući i sirovine, ambalažu, pomoćne materijale i slično, ali bez količine/mase goriva;
- potrošnja vode: ukupna potrošnja vode u kompaniji, merena u kubnim metrima, uključujući sve izvore (podzemne vode, komunalnu vodu/vodu za piće, površinske vode) i sve primene (procesna voda, voda za hlađenje, sanitarna voda, itd).

Apsolutni indikatori koji se odnose na zagađenje životne sredine uključuju:

- emisije u vazduh: odnose se na sve izvore u postrojenju, ali se ograničavaju na emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG), merene u ekvivalent tonama emisije primarnog GHG, odnosno CO₂. One uključuju GHG emisije koje su u vezi sa potrošnjom energije (potrošnja goriva, gasa, i slično) na lokaciji, zatim sa potrošnjom energije izvan lokacije (naročito vezano za proizvodnju i distribuciju energije) i GHG emisije u vezi sa procesima (CO₂ i drugi gasovi, naročito CH₄ i N₂O);
- otpadne vode: ukupna količina kontaminirane vode koja izlazi izvan lokacije kompanije, merena u kubnim metrima, bez obzira na način konačnog zbrinjavanja (kanalizacija, površinske vode), osim tokova vode koji se ispuštaju i koji nemaju nikakvo hemijsko ili biološko opterećenje (npr. bez vode za hlađenje);
- otpad: ukupna količina otpada (čvrstog ili tečnog) koji se kamionima ili na drugi način odvozi sa lokacije ili odlaže i skladišti na lokaciji, meren u tonama, bez obzira na način zbrinjavanja (npr. insineracija, odlaganje na deponiju, reciklaža, itd).

Indikator apsolutne proizvodnje ili referentni indikator se odnosi na proizvode ili stvorenu vrednost u kompaniji. Najpoželjnije ga je meriti u relevantnim fizičkim jedinicama (tonama, kubnim metrima, ili jedinicama) proizvodnje ili usluga kompanije. Međutim, kada se stvaraju različiti proizvodi, odnosno usluge, prihvatljiva je primena ekonomske vrednosti (prodajna vrednost) kao približne vrednosti.

Ovi apsolutni indikatori koriste se za proračun šest relativnih indikatora za primenu

RECP metodologije - tri indikatora koji uključuju produktivnost resursa, i tri koji uključuju intenzitet zagađenja (uticaj na životnu sredinu):

Produktivnost resursa

- energetska produktivnost (proizvod po jedinici utrošene energije);
- materijalna produktivnost (proizvod po jedinici utrošenog materijala);
- vodna produktivnost (proizvod po jedinici utrošene vode);

Intenzitet zagađenja

- uticaj emisija u vazduh (emisije gasova sa efektom staklene bašte po jedinici proizvoda);
- uticaj otpada (količine nastalog otpada po jedinici proizvoda);
- uticaj otpadnih voda (količine nastalih otpadnih voda po jedinici proizvoda).

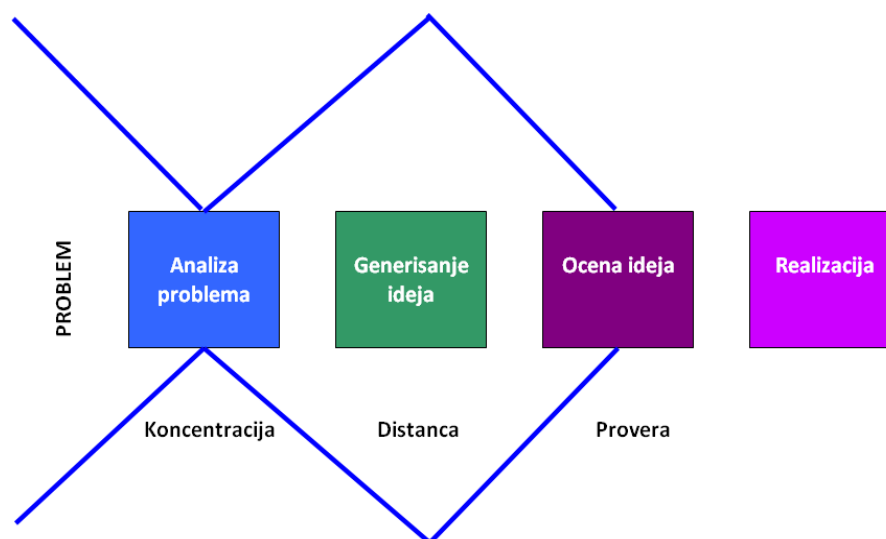
Povećanje bilo kojeg od tri relativna indikatora produktivnosti resursa i smanjenje bilo kojeg relativnog indikatora uticaja na životnu sredinu vremenom znači poboljšanje sa aspekta zaštite životne sredine i održive primene RECP tehnologija (UNIDO i UNEP, 2010b).

Sastavni deo RECP metodologije je identifikacija potencijalnih finansijskih koristi od poboljšanja stanja životne sredine. Poboljšanja efikasnosti u potrošnji energije, vode i materijala, ne samo da su povoljna za životnu sredinu (smanjena upotreba resursa, smanjene količine otpada i emisija), već predstavljaju i mogućnost finansijskih ušteda, budući da troškovi nabavke materijala i tretmana otpada shodno tim uštedama opadaju. U pojedinim situacijama (na primer pri odlučivanju primene neke opcije ili prezentovanju rezultata RECP programa rukovodstvu), može biti poželjno da se poboljšanja u upotrebi resursa i smanjenja emisija izraze u monetarnim, a ne u fizičkim pojmovima. Međutim, promene u troškovima ne odražavaju uvek godišnja unapređenja stanja životne sredine ili potrošnje resursa. Na primer, ukupni troškovi za zbrinjavanje otpada ili tretman otpadnih voda mogu da rastu iako je došlo do smanjenja količina otpada ili otpadnih voda, kao rezultat povećanja naknada za ispuštanje otpadnih voda ili za odlaganje otpada.

2.2.3 Analiza problema i definisanje opcija

Tumačenjem materijalnog i energetskog toka se mogu uočiti gubici i definisati opcije za efikasnije upravljanje sirovinama i energijom. Slabe tačke se mogu odrediti i poređenjem informacija o stvarnoj efikasnosti procesa u odnosu na referentne vrednosti.

Definisanje opcija čistije proizvodnje se može vršiti tako što se ovaj proces podeli u četiri faze (Fresner i saradnici, 2010b), kao što je prikazano na slici 2.6.

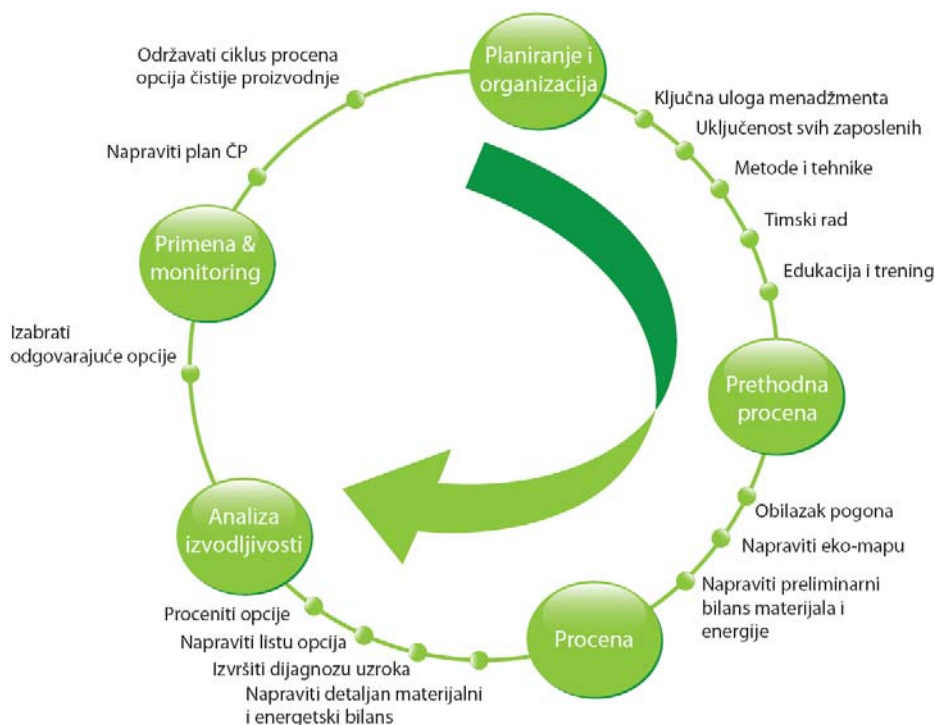


Slika 2.6 Koraci u definisanju opcija čistije proizvodnje (Fresner i saradnici, 2010b)

Analiza podrazumeva jasno definisanje problema kako bi se utvrdio izvor nastanka otpada i/ili emisije. Generisanje ideja za eliminaciju ili smanjenje otpada i emisija ima za cilj formiranje što više predloga na bazi dostupnih informacija. U sledećim fazama se ove ideje ocenjuju na osnovu tehničke izvodljivosti, perioda povraćaja uloženi sredstava i uticaja na životnu sredinu i zdravlje ljudi i biraju se opcije za realizaciju. Pri definisanju opcija čistije proizvodnje i izradi plana realizacije uvek se prvo teži opcijama koje podrazumevaju sprečavanje nastajanja otpada i/ili emisija, a tek onda, ukoliko ne postoje druge mogućnosti, primenjuju se ostale opcije koje se odnose na smanjenje ili iskorišćenje nastalog otpada.

Nakon implementacije opcija čistije proizvodnje, važno je praćenje i ocenjivanje rezultata preduzetih aktivnosti čime se omogućava bolja procena poboljšanja

performansi. Metodologija uvođenja i primene sirovinski efikasne i čistije proizvodnje podrazumeva kontinualno unapređenje i rad na nalaženju novih opcija (slika 2.7).



Slika 2.7 Struktura uvođenja i primene sirovinski efikasne i čistije proizvodnje (Vukadinović i saradnici, 2010)

2.3 Uvođenje novih modela za proširenje primenu i evaluaciju opcija čistije proizvodnje

Metodologija čistije proizvodnje je prihvaćena od strane velikog broja kompanija širom sveta. Organizacija Ujedinjenih nacija za industrijski razvoj (UNIDO) i Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu (UNEP) aktivno podržavaju prelazak na održive industrijske sisteme osnivanjem Nacionalnih centara za čistiju proizvodnju (UNIDO i UNEP, 2010a). Ovi centri obično rade u okviru relevantnih institucija kao što su nacionalne industrijske asocijacije, tehnički istraživački instituti ili univerziteti.

U Srbiji je Centar za čistiju proizvodnju osnovan 2007. godine kao deo Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Od osnivanja Centra pa do danas u projektima čistije proizvodnje je učestvovalo preko 100 preduzeća različitih veličina i delatnosti pri čemu su primenjivani drugačiji pristupi u uvođenju metodologije čistije proizvodnje: pristup zasnovan na obukama i rešavanju problema od strane tima unutar kompanije, rešavanje problema i definisanje opcija od strane spoljnog ekspertskeg tima ili projekti u saradnji sa lokalnom samoupravom u cilju zajedničkog rešavanja problema u kompanijama na teritoriji jednog grada tj. opštine.

Tokom rada sa kompanijama u Srbiji kao i u drugim zemljama, uočeni su nedostaci i pojedini problemi u primeni postojeće metodologije sirovinski efikasne i čistije proizvodnje. Na osnovu prethodnih rezultata javila se potreba za multikriterijalnim pristupom, koji uključuje, s jedne strane, znanje i iskustvo stečeno u radu sa velikim brojem kompanija, a, sa druge strane, nove trendove u optimizaciji i energetske integraciji procesa.

Jedan od ključnih problema jeste uspostavljanje univerzalne metodologije, koja nije uvek primenljiva na svako postrojenje ili granu industrije. Potreba za prilagođavanjem metodologije tipu postrojenja se posebno javila u delu koji se odnosi na sakupljanje podataka i izradu bilansa. Ovaj korak u uvođenju čistije proizvodnje je veoma značajan za dalji rad na optimizaciji procesa. Do sada identifikovani problemi su tačnost i pouzdanost sakupljenih podataka o potrošnji sirovina, energije i količinama otpada i emisija, kao i nemogućnost definisanja relevantnih opcija na nivou pojedinačnih procesa ili sektora (proizvodnja, energetika), dok se ne sagledaju i međusobni uticaji različitih delova kompanije i mogućnost optimizacije postrojenja u celini. Ovo je uočeno na primeru HIP Petrohemije u okviru koje radi nekoliko različitih pogona (fabrika). Takođe, kod energetski intenzivnih postrojenja u cilju optimizacije njihovog rada, primećena je potreba za dodatnim pristupima i analizama, kada je u pitanju potrošnja energije, kao što su detaljan energetski audit, Pinch analiza itd. Veliku pažnju treba posvetiti i problemu evaluacije opcija čistije proizvodnje kada je u pitanju uticaj na životnu sredinu. Postojeće metodologije čistije proizvodnje ne definišu jasno način analize i prikaza uticaja na životnu sredinu predloženih ili primenjenih opcija. Obično se uticaj prikazuje kroz smanjenje ukupne ili specifične potrošnje (po jedinici

proizvoda) sirovina ili energenata ili količina nastalog otpada, bez detaljnije analize uticaja kao što su klimatske promene, acidifikacija i slično. U postojećoj metodologiji je primećen nedostatak indikatora eko-efikasnosti preko kojih bi se odredili i kasnije pratili uticaji pojedinih mera na životnu sredinu i generalno na održivost sistema.

Još jedan od problema u postojećoj metodologiji i uobičajenom načinu rada u kompanijama je nedostatak monitoringa. Nakon implementacije opcija čistije proizvodnje ne vrši se praćenje rezultata pojedinih mera – proračun stvarnih ušteda u odnosu na procenjene, uticaj na poboljšanje performansi procesa i na životnu sredinu. Teško je naći primere koji su zasnovani na realnim podacima i u kojima je vršeno praćenje rezultata i nakon realizovanih mera i pomoću relevantnih indikatora.

Gore navedeni razlozi su bili ključni u definisanju nove, unapređene metodologije čistije proizvodnje, koja je pre svega prilagođena specifičnim uslovima posmatranih postrojenja. Rezultati primene nove metodologije su ispitivani u slučaju tri kompanije – Termoelektrane Nikola Tesla, HIP Petrohemije i Hipola i predstavljaju realne vrednosti dobijene merenjem, proračunima i u uskoj saradnji sa kompanijama.

Za posmatrane kompanije je predložena metodologija čistije proizvodnje koja uključuje sledeće korake:

- primenu sistematičnog pristupa sakupljanju podataka potrebnih za izradu materijalnih i energetskih bilansa, koji su prilagođeni postrojenju i uzimaju u obzir sve specifičnosti postrojenja kada je u pitanju potrošnja resursa, energije i uticaj na životnu sredinu,
- izrada materijalnog i energetskog bilansa i proračun relevantnih indikatora koji u potpunosti prikazuju trenutno stanje postrojenja kada je u pitanju sirovinska i energetska efikasnost; u slučaju da ne postoje pouzdani podaci za dobijanje kvalitetnih materijalnih i energetskih bilansa, potrebno je koristiti pouzdane softverske pakete koji se koriste za simulaciju rada opreme i procesa,
- definisanje opcija čistije proizvodnje,
- izrada materijalnog i energetskog bilansa nakon identifikovanih mera čistije proizvodnje,
- detaljnija energetska analiza primenom različitih optimizacionih tehnika:

- Pinch analize
- razmatranje uticaja pojedinih delova postrojenja u cilju optimizacije celokupnog postrojenja – *Total Site Integration*
- izračunavanje indikatora eko-efikasnosti
- plan monitoringa rezultata primenjenih mera čistije proizvodnje
- prikaz rezultata preko zavisnosti proizvodnog rasta od potrošnje resursa i zagađenja životne sredine (*decoupling*).

U slučaju termoelektrana primena nove metodologije je bila ključna u izradi materijalnih i energetske bilansa. Postojeću metodologiju za sakupljanje podataka nije bilo moguće primeniti, pa su primenjeni novi pristupi, prilagođeni proizvodnji električne energije. Ovi pristupi su, na primer, uključili podatke o električnoj energiji na generatoru, sopstvenoj potrošnji blokova i električnoj energiji koja je preuzeta iz mreže (detajnije objašnjenje je dato u nastavku u delu 3.2.1). Uopšten pristup predložen u ovom radu uključuje korišćenje metoda za sintezu mreža razmenjivača toplote, odnosno Pinč analizu. Primenom ove analize moguće je definisati minimalne zahteve za pomoćnim medijumima u sistemu (zahteve za grejenjem i hlađenjem), a na osnovu kapitalnih i operativnih troškova sistema, minimizovati i zahtevanu površinu za razmenu toplote. Takođe je posebno značajno bilo i definisanje indikatora za prikaz postojećeg stanja jer je na taj način bilo moguće poređenje performansi između termoelektrana. Indikatori eko-efikasnosti su urađeni za različite kategorije, ali su najveći značaj imali indikatori vezani za emisije u vazduh i njihovo poređenje sa rastom proizvodnje električne energije.

U slučaju HIP Petrohemije najveći doprinos nove metodologije je bio u uvođenju dodatnog koraka koji se odnosi na integraciju celokupnog sistema, koja je zasnovana na principima Pinč tehnologije, preimenjene na pojedine delove, a zatim integrisane u celinu.

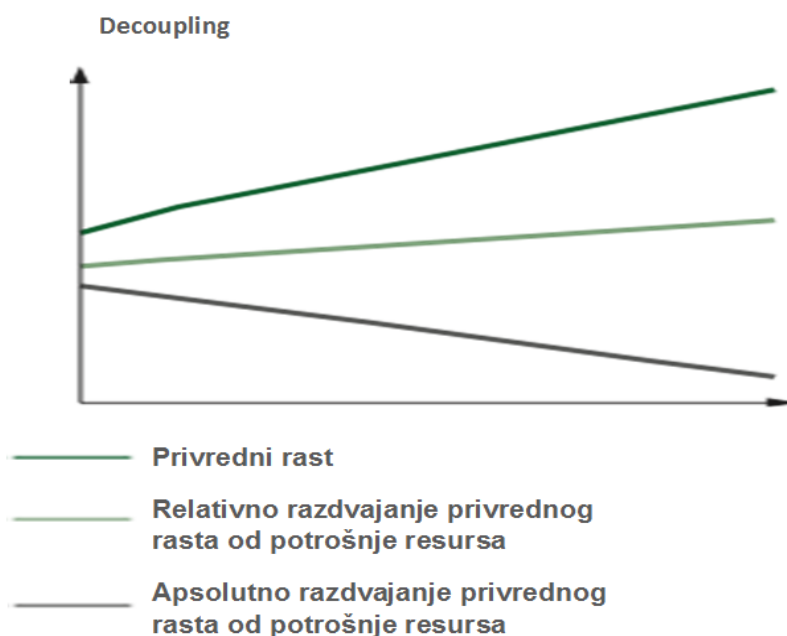
Primer Hipola je veoma značajan sa aspekta uticaja na životnu sredinu usled zamene tehnologije odnosno uvođenjem nove generacije katalitičkog sistema. Osnov za uvođenje novog katalizatora je bio ispitivanje mogućnosti dobijanja proizvoda boljeg kvaliteta, ostvarenja većeg prinosa i postizanja finansijskih ušteda. U ovom slučaju,

specifičnost primenjene metodologije je da ona uključuje uvođenje indikatora eko-efikasnosti za različite uticaje (potrošnja monomera, katalizatora, drugih sirovina, nastajanje otpadnog polimera, klimatske promene, nastajanje fotohemijskog smoga) itd.

2.4 Razdvajanje privrednog rasta od potrošnje resursa i zagađenja

Povećana svest o uticaju na životnu sredinu uzrokovanu tradicionalnim načinima industrijske proizvodnje podstakla je značajnije promene u pravcu održivog razvoja, zelene ekonomije i prelazak na zelenu industriju. Ipak, nameće se opšte prihvaćeno mišljenje da je jedini način za obezbeđivanje privrednog rasta na održiv način, odvajanje rasta od potrošnje resursa i zagađenja (Stamm i saradnici, 2009). Ovo razdvajanje zavisnosti privrednog rasta i društvenog razvoja od potrošnje prirodnih resursa i energije i degradacije životne sredine je poznato pod nazivom *decoupling*. Sirovinski efikasna i čistija proizvodnja je prepoznata kao jedna od ključnih strategija za ostvarivanje ciljeva koje nameće *decoupling*.

Postoje dva načina za razdvajanje privrednog rasta od potrošnje resursa, i to: relativan način (*relative decoupling*), kada proizvodnja raste, ali korišćenje resursa i zagađenje rastu manjom brzinom; i apsolutan način (*absolute decoupling*), kada proizvodnja raste, dok s druge strane potrošnja resursa i zagađenje opadaju (UNIDO, 2011a). Relativno i apsolutno razdvajanje privrednog rasta od potrošnje resursa je prikazano na slici 2.8.



Slika 2.8 Relativno i apsolutno razdvajanje privrednog rasta od potrošnje resursa (*relative and absolute decoupling*) (UNIDO, 2011a)

Takođe, važno je napraviti razliku između razdvajanja potrošnje resursa i uticaja na životnu sredinu, jer je moguće razdvojiti zagađenje od proizvodnje, ali ne i od potrošnje resursa (*impact decoupling*); ili razdvajanje upotrebe resursa od proizvodnje, ali ne i od zagađenja (*resource decoupling*).

Postoje različita mišljenja o tome da li i kako se može postići razdvajanje proizvodnog rasta od potrošnje resursa i degradacije životne sredine (Smith i saradnici, 2010; Stamm i saradnici, 2009; Van der Voet i saradnici, 2005). Mada je relativno razdvajanje (*relative decoupling*) već dostižno kroz postepeno povećanje efikasnosti korišćenja resursa i prelazak na manje sirovinski zahtevne privredne aktivnosti, apsolutno razdvajanje (*absolute decoupling*) moglo bi da iziskuje radikalne promene u tehnološkim, proizvodnim i sistemima potrošnje, kao i u samoj kulturi. Apsolutno razdvajanje je očigledno i najpoželjnije, jer omogućava smanjenje zagađenja i korišćenja sirovina uz rast proizvodnje. Međutim, uprkos određenim pomacima u toj oblasti, na nivou država je ovo jako teško dostići. Mada se neprestano realizuju znatna povećanja efikasnosti u tehnološkom smislu, ta dostignuća jednostavno ne uspevaju da budu prevedena u apsolutno razdvajanje privrednog rasta od potrošnje resursa jer

konstantno zaostaju za rastom privredne proizvodnje i stanovništva. Očekuje se i dalje rast broja stanovnika u doglednoj budućnosti, tako da je na proizvodu i na efikasnosti da omoguće apsolutno razdvajanje.

Pored tehnoloških inovacija, apsolutno razdvajanje zahteva fundamentalnu promenu prirode privrednog rasta u odnosu na današnji i sveobuhvatnu promenu obrazaca proizvodnje i potrošnje. Zelena industrija tome doprinosi ozelenjavanjem postojećih industrija, stimulisanjem stvaranja usluga u životnoj sredini i obezbeđivanjem tehnologija u životnoj sredini. Za sada postoje mnogobrojni inovativni i uspešni primeri kompanija koje su postigle razdvajanje proizvodnog rasta od potrošnje resursa primenom inicijativa zelene industrije (UNIDO, 2011a).

3. PRIMENA METODOLOGIJE ČISTIJE PROIZVODNJE U POLIMERNOJ INDUSTRIJI I ENERGETSKOM SEKTORU U REPUBLICI SRBIJI

3.1 Mogućnosti primene RECP metodologije u sektoru energetike

Većina postrojenja za proizvodnju električne energije u Srbiji su u vlasništvu Javnog preduzeća Elektroprivreda Srbije (JP EPS), čiji ukupan kapacitet za proizvodnju električne energije iznosi 7.304 MW. JP EPS obuhvata šest termoelektrana na ugalj (57% ukupnog instaliranog kapaciteta), jedanaest hidroelektrana (38%) i elektrane na gas za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije (5%). U elektranama JP EPSa je tokom 2015. godine proizvedeno 35.661 GWh električne energije, od čega 70,2% u termoelektranama (EPS, 2016).

Od 2000. godine, JP EPS, Vlada Srbije i međunarodne finansijske institucije (prvenstveno institucije Evropske unije) zajednički su uložili velike napore na poboljšanju zaštite životne sredine. Veliki deo sredstava uložen je u modernizaciju postojećih postrojenja, koja su ostvarila ukupne uštede uglja u količini od 4,2 miliona tona godišnje, dok su u isto vreme podigla proizvodnju električne energije u novom bloku od 400 MW i energetske efikasnost na 12% (EPS, 2009). Projekti, kao što je izgradnja postrojenja za tretman otpadnih voda i ugradnja opreme za odsumporavanje, sprovedeni su s namerom da se smanje emisije i dovedu u granice propisane Direktivom o industrijskim emisijama 2010/75/EU (EPS, 2011; IED; LCP BREF).

Inicijative čistije proizvodnje u JP EPS počele su 2011. godine u četiri termoelektrane na ugalj u okviru ogranka „Termoelektrane Nikola Tesla” (TENT), koje posluju u sklopu JP Elektroprivrede Srbije. Tom prilikom je primenjena RECP metodologija (UNEP i UNIDO, 2010), koja je prilagođena uslovima u termoelektranama. Ovako razvijena metodologija je kasnije primenjena i u drugih šest elektrana u sklopu JP EPSa. Ovaj pristup i uključenje svih elektrana omogućio je intenzivnu razmenu podataka i iskustava između članova tima u postrojenjima (Vukadinović i saradnici, 2014b).

3.2 Implementacija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje u termoelektranama

Nikola Tesla

Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije“, Ogranak „Termoelektrane Nikola Tesla“ Beograd – Obrenovac (TENT) je najveći proizvođač električne energije u Jugoistočnoj Evropi. Ogranak „Termoelektrane Nikola Tesla“ se sastoji iz 14 blokova čija je ukupna instalisana snaga 3.286 MW električne energije, što predstavlja jednu trećinu instalisanih kapaciteta „JP Elektroprivrede Srbije“. U okviru ogranka TENT godišnje se proizvede više od 50% električne energije na nivou cele Srbije. Ogranak TENT čini 5 organizacionih delova: TENT A u Obrenovcu (6 blokova ukupne snage 1.650 MW električne energije), TENT B u Obrenovcu (dva bloka od po 620 MW električne energije), TE „Kolubara“ u Velikim Crljenima (5 blokova ukupne snage 271 MW električne energije), TE „Morava“ u Svilajncu (jedan blok od 125 MW električne energije) i Železnički transport za prevoz uglja sa površinskih kopova basena „Kolubara“ (TENT, 2017).

Istraživanje sprovedeno u termoelektranama Nikola Tesla bilo je usmereno na iznalaženje rešenja za modernizaciju postojećih jedinica povećanjem njihovih kapaciteta i smanjenjem specifične potrošnje energije, uz istovremeno smanjenje emisija u vazduh i vodu, i smanjenje količine nastalog otpada. Primena RECP metodologije zasnovana je na analizi bilansa materijala i energije, proceni najboljih dostupnih tehnika, modeliranju, simulaciji i optimizaciji postojećih procesa i opreme, izboru odgovarajućih opcija u smislu uticaja na životnu sredinu i sagledavanje tehničkih i ekonomskih aspekata (Vukadinović i saradnici, 2016).

3.2.1 Maseni i energetski bilans

Za sve četiri termoelektrane u okviru ogranka TENT su sakupljeni podaci za potrebe izrade masenih bilansa. Podaci su sakupljeni za period od tri godine, i to za proizvedenu električnu energiju (MWh), masu utrošenog uglja (u tonama, kao i donju toplotnu moć uglja u kJ i MWh) i masu mazuta, zatim podaci u vezi sa potrošnjom hemikalija, ulja i maziva, kao i za masu nastalog otpada i za emisije. Za proračun energetskog bilansa korišćeni su podaci o električnoj energiji na generatoru, sopstvenoj potrošnji blokova i električnoj energiji koja je preuzeta iz mreže. Kao dodatak materijalnom i energetskom

bilansu, posebno je urađen i bilans vode koji je obuhvatio različite vrste vode - demineralizovanu, dekarbonizovanu, vodu za hlađenje i sanitarnu vodu.

Na osnovu analize prikupljenih podataka, utvrđeni su indikatori učinka (UNIDO i UNEP, 2010b) koji su ocenjeni kao najznačajniji za sve termoelektrane. Za sve četiri termoelektrane ogranka TENT izračunati su isti indikatori, kao što su: (kg uglja)/(proizvedenom kWh električne energije), (kg nastalog pepela)/proizvedenom kWh električne energije, (kJ uglja)/(proizvedenom kWh električne energije), % sopstvene potrošnje električne energije, (m³ demineralizovane vode)/(proizvedenom GWh električne energije), kg HCl/m³ demineralizovane vode i kg NaOH/m³ demineralizovane vode. Vrednosti indikatora su prikazane u tabeli 3.1 u nastavku. Značaj indikatora iz tabele 3.1 ogleda se u mogućnosti poređenja podataka između blokova u okviru iste termoelektrane, i još važnije, između svih termoelektrana JP Elektroprivrede Srbije.

Tabela 3.1 Izabrani indikatori učinka za termoelektrane koje koriste ugalj u okviru ogranka TENT (Vukadinović i saradnici, 2016)

	kg uglja/kWh	kg pepela/kWh	kJ uglja/kWh	% sopstvene potrošnje električne energije	m ³ demi vode/GWh	kg HCl/m ³ demi vode	kg NaOH/m ³ demi vode
2008.							
Termoelektrana TENT A							
Blok A1 ¹	1,45	0,32	11.648	/	91,0	1,74	0,99
Blok A2 ¹	1,45	0,32	11.642	/			
Blok A3 ²	1,48	0,33	11.628	/			
Blok A4 ²	1,45	0,32	11.623	/			
Blok A5 ²	1,45	0,32	11.626	/			
Blok A6 ³	1,45	0,32	11.659	/			
Termoelektrana TENT B							
Blok B1 ⁴	1,40	0,21	10.681	5,35	26,8		
Blok B2 ⁴	1,40		10.771	5,50			
Termoelektrana KOLUBARA							
Blok TEK1 ⁵	2,00	0,30	15.409	13,40	350,0	0,75	0,20
Blok TEK2 ⁵	1,99	0,30	15.378	13,40			
Blok TEK3 ⁵	0	/	0	/			
Blok TEK4 ⁵	2,01	0,30	15.574	13,61			
Blok TEK5 ⁶	1,63	0,24	12.214	10,13	80,5	0,75	0,83
Termoelektrana MORAVA							
Blok M ⁷	1,26	0,17	10.734	8,75	52,1	4,39	4,56
2009.							

	kg uglja/kWh	kg pepela/ kWh	kJ uglja/kW h	% sopstvene potrošnje električne energije	m ³ demi vode/GWh	kg HCl/m ³ demi vode	kg NaOH/m ³ demi vode
Termoelektrana TENT A							
Blok A1 ¹	1,46	0,32	11.590	/	76,5	1,95	1,33
Blok A2 ¹	1,46	0,32	11.580	/			
Blok A3 ²	1,46	0,32	11.545	/			
Blok A4 ²	1,46	0,32	11.556	/			
Blok A5 ²	1,46	0,32	11.563	/			
Blok A6 ³	1,46	0,32	11.568	/			
Termoelektrana TENT B							
Blok B1 ⁴	1,42	0,23	10.893	4,85	32,0	1,40	0,92
Blok B2 ⁴	1,42		10.920	5,41			
Termoelektrana KOLUBARA							
Blok TEK1 ⁵	2,41	0,36	16.511	12,81	316,9	0,77	0,22
Blok TEK2 ⁵	2,40	0,36	16.474	13,57			
Blok TEK3 ⁵	2,02	0,30	14.031	11,73			
Blok TEK4 ⁵	2,28	0,34	15.809	13,29			
Blok TEK5 ⁶	1,92	0,29	12.851	11,74	102,4	0,75	0,72
Termoelektrana MORAVA							
Blok M ⁷	1,29	0,17	11.098	8,47	53,3	3,33	4,21
2010.							
Termoelektrana TENT A							
Blok A1 ¹	1,52	0,33	11.324	/	80,7	1,73	1,06
Blok A2 ¹	1,52	0,33	11.319	/			
Blok A3 ²	1,52	0,33	11.318	/			
Blok A4 ²	1,52	0,33	11.308	/			
Blok A5 ²	1,52	0,33	11.315	/			
Blok A6 ³	1,53	0,34	11.420	/			
Termoelektrana TENT B							
Blok B1 ⁴	1,44	0,25	10.698	5,43	33,1	1,46	1,11
Blok B2 ⁴	1,45		10.750	5,60			
Termoelektrana KOLUBARA							
Blok TEK1 ⁵	2,29	0,34	15.224	13,54	353,3	0,70	0,16
Blok TEK2 ⁵	2,24	0,34	14.740	13,63			
Blok TEK3 ⁵	2,30	0,34	15.306	12,80			
Blok TEK4 ⁵	0	0	0	/			
Blok TEK5 ⁶	1,75	0,26	11.532	10,77	80,7	0,75	0,64
Termoelektrana MORAVA							
Blok M ⁷	1,35	0,18	11.348	8,52	56,5	3,66	4,03

¹ Ključne tehničke karakteristike blokova A1 i A2 (snaga: 210 MW svaki; vrsta uglja: kolubarski lignit; pritisak i temperatura pare: 136 bar i 540 °C; tip kotla: SES; tip turbine: LMZ; godina izgradnje: 1970; postoji sistem daljinskog grejanja)

² Ključne tehničke karakteristike blokova A3, A4 i A5 (snaga bloka A3: 305 MW i snaga blokova A4 i A5: 308.5 MW svaki; vrsta uglja: kolubarski lignit; pritisak i temperatura pare: 182 bar i 543 °C; tip kotla: SES; tip turbine: Alstom; godina izgradnje: 1976, 1978. i 1979; bez daljinskog grejanja)

³ Ključne tehničke karakteristike bloka A6 (snaga: 308 MW; vrsta uglja: kolubarski lignit; pritisak i temperatura pare: 182 bar i 543 °C; tip kotla: RAFAKO; tip turbine: Alstom; godina izgradnje: 1979; bez daljinskog grejanja)

⁴ Ključne tehničke karakteristike blokova B1 i B2 (snaga: 620 MW svaki; vrsta uglja: kolubarski lignit; pritisak i temperatura pare: 186 bar i 545 °C; tip kotla: RAFAKO; tip turbine: Alstom; godina izgradnje: 1983. i 1985; bez daljinskog grejanja)

⁵ Ključne tehničke karakteristike blokova TEK1, TEK2, TEK3 i TEK4 (snaga blokova TEK1, TEK2 i TEK3: 35 MW svaki i bloka TEK4: 55 MW; vrsta uglja: kolubarski lignit; pritisak i temperatura pare: 72 bar i 530 °C; tip kotla: SES; tip turbine: Siemens; godina izgradnje: 1956, 1956, 1960. i 1961; bez daljinskog grejanja)

⁶ Ključne tehničke karakteristike bloka TEK5 (snaga: 110 MW; vrsta uglja: kolubarski lignit; pritisak i temperatura pare: 130 bar i 540 °C; tip kotla: SES; tip turbine: Skoda; godina izgradnje: 1979; bez daljinskog grejanja)

⁷ Ključne tehničke karakteristike bloka M (snaga: 110 MW; vrsta uglja: kolubarski lignit; pritisak i temperatura pare: 127 bar i 540 °C; tip kotla: RAFAKO; tip turbine: Zamech; godina izgradnje: 1969; bez daljinskog grejanja)

Poređenje indikatora učinka pokazalo je odstupanje u nekim vrednostima unutar samih termoelektrana, kao i različite vrednosti između posmatranih termoelektrana u okviru ogranka TENT. Jedan od razloga bilo je unapređenje određenih delova procesa u pojedinim termoelektranama (Stevanović, 2014), ali su u nekim slučajevima gubici uzrokovani neadekvatnim monitoringom parametara i nedostatkom kontrole u postrojenju.

3.2.2 Emisioni faktori

Za isti razmatrani period od tri godine je izvršena i analiza kvaliteta uglja koji je korišćen u termoelektranama u cilju izračunavanja emisionih faktora u vezi sa zagađenjem vazduha. Određivane su sledeće osobine uglja: nasipna gustina, sadržaj vlage, pepela, isparljivih materija u uzorku za analizu, vezani ugljenik, gornja i donja toplotna moć (metodom kalorimetrijske bombe) i sadržaj ukupnog sumpora po standardu SRPS ISO 334:2016 Čvrsta mineralna goriva (Metoda po Eški). Analizirani uzorci uglja su sakupljeni za različite blokove termoelektrana ogranka TENT kako bi se osigurala simulacija širokog spektra očekivanog kvaliteta uglja dopremljenog u termoelektrane. Donja toplotna moć se kretala od 5.500 kJ/kg do 9.000 kJ/kg, a sadržaj vlage 40–50% (Vukadinović i saradnici, 2016). Ove analize su pokazale da ugalj ima znatno nižu donju toplotnu moć i više vrednosti emisionih faktora u odnosu na vrednosti preporučene međunarodnom metodom za procenu emisija GHG (MŽSPP, 2010). Na osnovu dobijenih podataka o sastavu uglja, izračunati su emisioni faktori za različite blokove svake termoelektrane, a zatim su predstavljani kao prosečne godišnje vrednosti. Kao primer su u tabeli 3.2 prikazani emisioni faktori za termoelektranu TENT A.

Tabela 3.2 Emisioni faktori zasnovani na analizi kvaliteta uglja za termoelektranu TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

Blok	2008.		2009.		2010.	
	gCO ₂ /MWh	gSO ₂ /MWh	gCO ₂ /MWh	gSO ₂ /MWh	gCO ₂ /MWh	gSO ₂ /MWh
Blok A1	1.326.225	11.074	1.257.041	18.676	1.116.658	23.407
Blok A2	1.269.319	3.186	1.224.538	12.352	1.270.406	12.184
Blok A3	1.262.305	7.221	1.247.656	15.776	1.016.797	16.745
Blok A4	1.221.766	10.930	1.285.460	22.141	1.334.817	12.713
Blok A5	1.252.885	10.698	1.352.532	20.875	1.069.774	14.784
Blok A6			1.245.653	34.094		

3.2.3 Analiza podataka i identifikacija opcija

Uporedna analiza u sve četiri elektrane ogranka TENT je omogućila međusobno poređenje specifične potrošnje pojedinih parametara, definisanje problema u pojedinim termoelektranama i predlaganje opcija čistije proizvodnje. Takođe su identifikovani zajednički problemi u svim termoelektrana što je uticalo na početak njihovog rešavanja.

Kako je najveći uočeni problem u životnoj sredini bilo zagađenje vazduha, izazvano sagorevanjem uglja lošeg kvaliteta u termoelektranama, fokus analize bio je na iznalaženju opcija za smanjenje emisija u vazduh. Najbrži, najefektivniji i najisplativiji način za smanjenje uticaja potrošnje energije na životnu sredinu jeste povećanje efikasnosti u korišćenju energije (BREF za energetska efikasnost, 2009).

Kako bi se izvršila procena analiziranih opcija, primenjene su sledeće strategije (Vukadinović i saradnici, 2016):

- Promena sirovine (korišćenje lignita više neto kalorijske vrednosti i nižeg emisionog faktora; mešavine različitih vrsta uglja; mešavine uglja i nekog alternativnog goriva, kao što je biomasa)
- Ponovno iskorišćenje energije
- Povećanje energetske efikasnosti
- Efikasnija upotreba sirovina i pomoćnih materijala (hemikalija i vode)
- Smanjenje otpada i mogućnosti za ponovno iskorišćenje otpadnih materijala.

Opcije sirovinski efikasne i čistije proizvodnje su analizirane sa tehničkog, ekonomskog (potrebna ulaganja i period otplate) i sa stanovišta zaštite životne sredine.

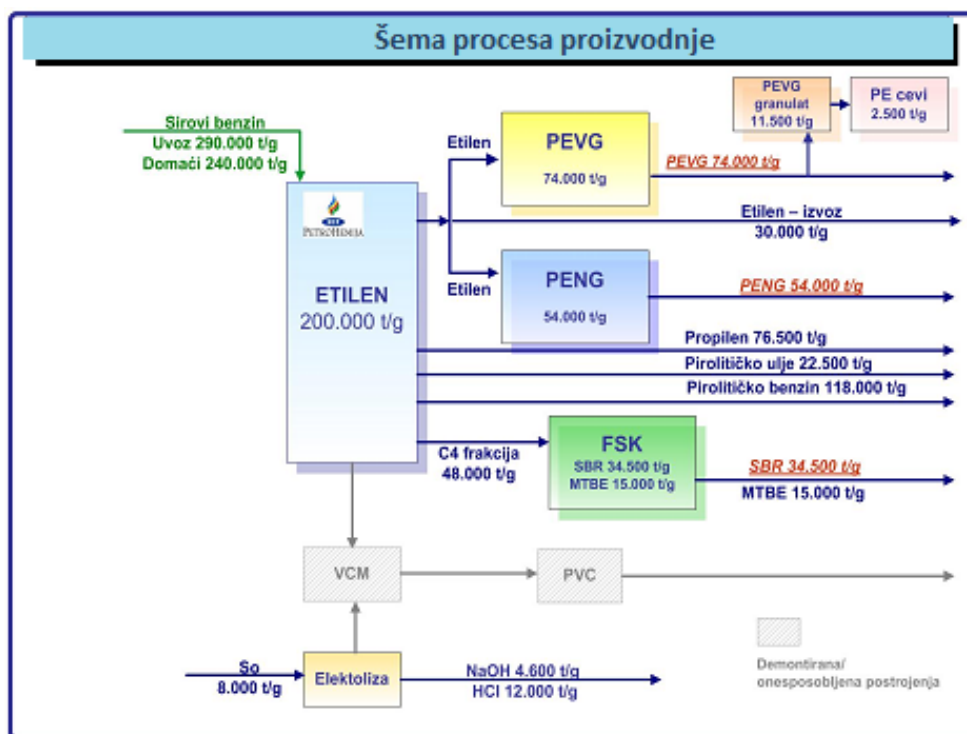
3.3 Mogućnosti primene RECP metodologije u polimernoj industriji

Mogućnosti primene RECP metodologije u polimernoj industriji su razmatrane u dva slučaja i primenom dva pristupa – ispitivanje mogućnosti unapređenja i optimizacije proizvodnje bez većih tehnoloških izmena samog procesa, i optimizacija rada postrojenja i povećanje njegove efikasnosti uvođenjem novijih/savremenijih tehnologija. Oba pristupa su imala cilj povećanje sirovinske i energetske efikasnosti i smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu. Na osnovu preliminarno prikupljenih podataka, odlučeno je da se optimizacija procesa primenom metodologije sirovinski efikasne i čistije proizvodnje analizira na primeru HIP Petrohemije. Tokom primene ovog pristupa, metodologija je prilagođena uslovima i potrebama postrojenja. Rezultati uvođenja nove tehnologije su razmatrani na primeru kompanije Hipol Odžaci.

3.3.1 Osnovni podaci o kompaniji HIP Petrohemija

HIP Petrohemija a.d. Pančevo jedna je od najvećih proizvođača petrohemijskih proizvoda u Jugoistočnoj Evropi. Osnovana je 1972. godine u industrijskoj zoni Pančevo, gde se još nalaze i HIP Azotara, Rafinerija nafte NIS i Messer-Tehnogas.

HIP Petrohemija proizvodi oko 700.000 t različitih petrohemijskih proizvoda godišnje. Sastoji se od sledećih proizvodnih jedinica: fabrike za proizvodnju etilena, fabrike za proizvodnju polietilena visoke gustine (PEVG), fabrike za proizvodnju polietilena niske gustine (PENG), fabrike za obradu otpadnih voda (FOV) i pogona za proizvodnju i distribuciju energetskih fluida. Glavni proizvodi su polietilen visoke gustine (PEVG), polietilen niske gustine (PENG), i stiren-butadien kaučuk (SBR); kao i bazni proizvodi – etilen, propilen, frakcija C4, pirolitičko ulje, pirolitički benzin, metil-tercijarni-butiletar (MTBE) i 1,3-butadien (HIP, 2017). Blok šema zastupljenih procesa je prikazana na slici 3.1.



Slika 3.1 Blok šema procesa proizvodnje u sistemu HIP Petrohemija (Izveštaj čistije proizvodnje, 2010)

Težište istraživanja sprovedenog u HIP Petrohemiji bilo je na sledećim proizvodnim jedinicama: fabrici za proizvodnju etilena, proizvodnji polietilena visoke gustine (PEVG), pogonu za proizvodnju i distribuciju energetskih fluida i pogonu za tretman otpadnih voda.

Polazna sirovina u procesu dobijanja etilena je primarni (sirovi) benzin, koji je jedan od produkata atmosferske destilacije sirove nafte. Projektovani godišnji kapacitet fabrike Etilen je 200.000 tona etilena. Pored etilena proizvodi fabrike su još i propilen čistoće 93%, C₄ frakcija sastavljena uglavnom od 1,3-butadiena (43-60 mas%), tretirani pirobenzin (pirolitički benzin) i lož ulje (pirolitičko ulje). Godišnja potrošnja sirove nafte je oko 530.000 tona, dok je godišnja proizvodnja etilena oko 170.000 tona.

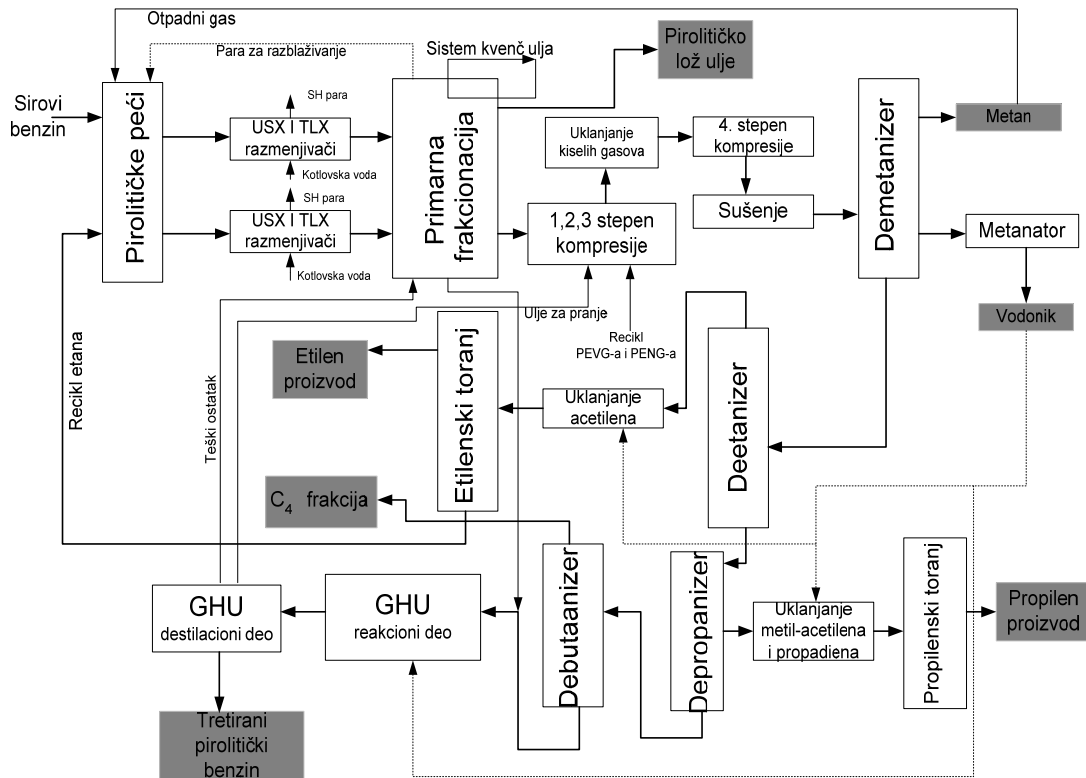
Proces dobijanja etilena sastoji se iz sledećih sekcija (slika 3.2):

- Sekcije pirolitičkog krekinga
- Sekcije primarne frakcionacije
- Sekcije krek-gas kompresije

- Sekcije hladne frakcionacije
- Sekcije tople frakcionacije
- Sekcije hidrogenacije benzina, GHU.

Pored navedenih postoje i pomoćni sistemi:

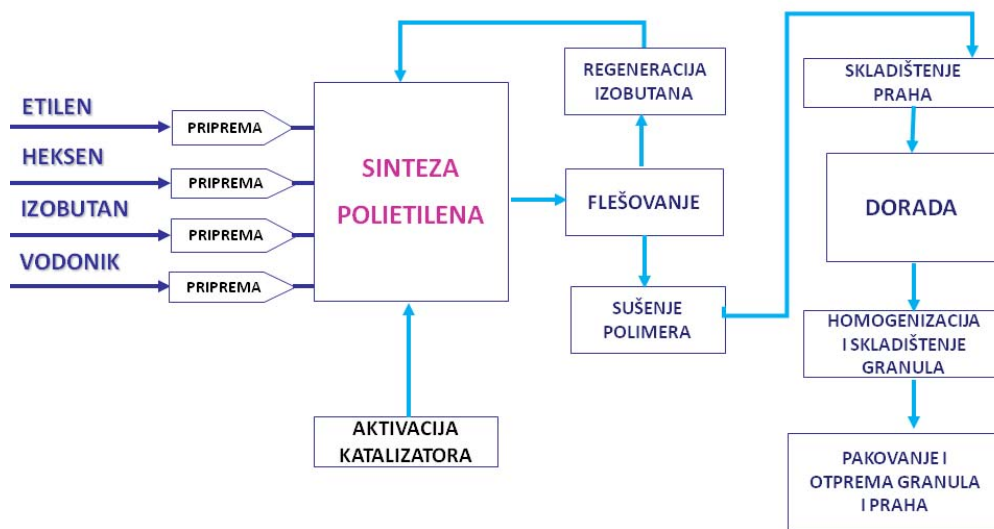
- Energetski deo pogona koji čine sistem za proizvodnju pare (kotlovi i pregrejači) i sistem kondenzata
- Rashladni propilenski i etilenski system
- Sistemi pomoćnih fluida: azota, instrumentalnog vazduha, procesnog vazduha, rashladne vode, kotlovske vode, metanola, servisne vode i sistem za doziranje hemikalija.



Slika 3.2 Proces proizvodnje etilena (Izveštaj čistije proizvodnje, 2010)

Proizvedeni etilen se dalje koristi u pogonima za proizvodnju polietilena niske i visoke gustine kao glavna sirovina u procesu polimerizacije.

Proces proizvodnje polietilena visoke gustine (PEVG) predstavlja kontinualnu operaciju u kojoj monomer etilen polimerizuje u prisustvu katalizatora (slika 3.3). Izobutan se koristi kao medijum sa ciljem održavanja polimera i katalizatora u reaktoru u formi suspenzije. Za proizvodnju kopolimera u reaktor se dodaju i male količine komonomera 1-heksena. Reakcija polimerizacije je egzotermna. Formirani polimer se razdvaja od ugljovodonika smanjenjem pritiska (flešovanjem) suspenzije i grejanjem, pri čemu ugljovodonici (izobutan, nepromenjeni etilen i 1-heksen) isparavaju i razdvajaju se od polimernog praha. Po razdvajanju od praha, ugljovodonici se vraćaju u reaktor. Prah se transportuje na dalju preradu. U preradi polimernom prahu se dodaju male količine aditiva, a potom se topi i ekstrudira kroz granulacionu ploču pri čemu se dobijaju granule.



Slika 3.3 Proces proizvodnje polietilena visoke gustine

Ukupna proizvodnja polietilena je u proseku oko 133.000 t (od toga 77.000 t je PEVG, dok je oko 56.000 t PENG).

Pogon energetike čine tri parna kotla od kojih svaki ima instalisani kapacitet proizvodnje pare od 80 t/h na pritisku 38 bar. Deo proizvedene pare se koristi za turbinski pogon kompresora i pumpi, dok se pritisak drugog dela pare redukuje do 14,5

bar. Potrošači pare koriste paru pritiska 38 / 14,5 / 3,5 bar. U proseku, ukupna količina sveže vode koja se koristi za kotlove je 410.000 m³. Pored pare koja se proizvodi u kotlovima u pogonu Energetika, fabrika etilena takođe proizvodi paru visokog pritiska od 105 bar u svojim kotlovima. Zasićena para u ovim kotlovima se pregreva na 442 °C u pregrejačima.

Količina rashladne vode u proseku iznosi oko 122.000.000 m³ u zatvorenom sistemu. Voda koja isparava tokom procesa hlađenja se nadoknađuje vodom iz pogona Energetika. Potrošnja gasa u proseku iznosi oko 70.000.000 m³N godišnje (66% od ukupne potrošnje gasa odlazi na fabriku za proizvodnju etilena; 33 % ukupne potrošnje je u pogonu Energetika). Drugi energenti koji se koriste u fabrici etilena su ostaci pirolitičkog gasa (donje toplotne moći 52,8 MJ/t) u količini od 86.432 t, primarni benzin (donje toplotne moći=39,8 MJ/kg) 25.794 t i mazut (donje toplotne moći 39,8 MJ/kg) u količini od 23.739 t.

Ukupna potrošnja energije u celokupnom sistemu proizvodnje iznosi oko 8,14 miliona GJ. U cilju što jasnijeg prikaza rezultata, analiza mogućih ušteda je računata za sistem koji koristi samo prirodni gas kao energent (donje toplotne moći od 33 MJ/Nm³). Ukupna potrošnja energije, preračunata na količinu prirodnog gasa, je 243 miliona m³.

3.3.2 Osnovni podaci o kompaniji Hipol Odžaci

HIPOL A.D. je hemijska industrija čija je osnovna delatnost proizvodnja polipropilenskog granulata iz tečnog propilena. Kompanija je osnovana pre 30 godina i izgrađena po licenci Mitsubishi Petrochemical Company. Radi sa 100% kapaciteta sa godišnjom proizvodnjom izotaktnog polipropilenskog granulata od oko 35.000 tona.

Proizvodnja polipropilenskog granulata se vrši klasičnim suspenzionim postupkom polimerizacije u heptanu kao rastvaraču. Ova tehnologija obezbeđuje visoku čistoću proizvoda, koji se može koristiti i za najosetljivije namene. Kao osnovna sirovina tj.monomer se koristi propilen koji se doprema železnicom iz Petrohemije Pančevo. Potrošnja propilena na godišnjem nivou iznosi oko 37.000 tona.

U pogonu proizvodnje polipropilena postoji ukupno 5 odvojenih sekcija:

- sekcija pripreme propilena (monomera) (sekcija U-000)

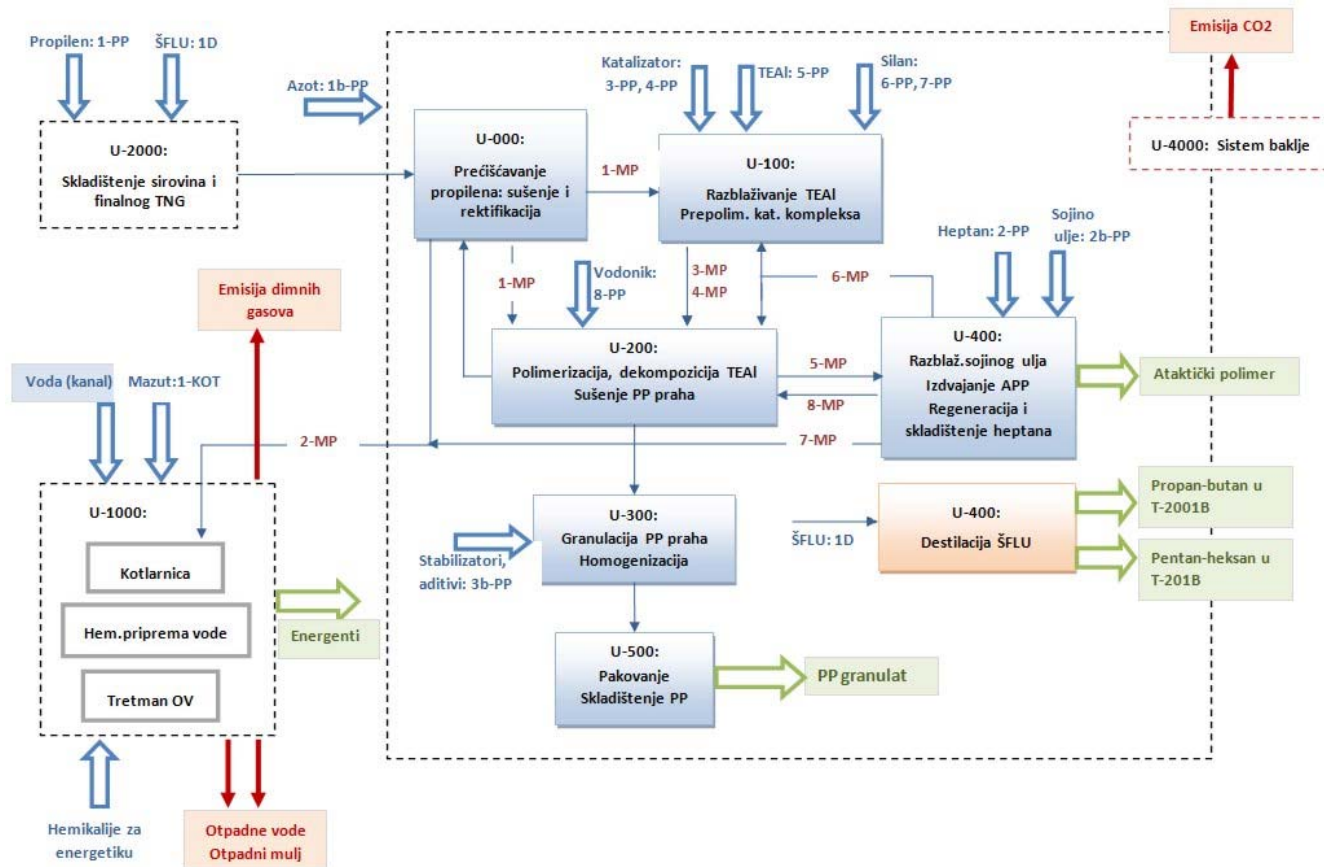
- sekcija pripreme katalitičkog kompleksa (sekcija U-100)
- sekcija polimerizacije (sekcija U-200)
- sekcija za granulaciju PP praha (sekcija U-300)
- sekcija za prečišćavanje rastvarača (heptana) (sekcija U-400).

U sekciji U-000 sirovi propilen se oslobađa suvišne vlage i rektifikacijom prečišćava do stepena koji je pogodan za polimerizaciju. U sekciji U-100 se priprema katalitički kompleks, koji se zajedno sa monomerom odvodi u posudu za pretpolimerizaciju, gde na česticama katalizatora započinje polimerizacija. Nakon toga pretpolimerizovane čestice katalizatora se odvođe u sekciju U-200 odnosno prvi reaktor. U prvi reaktor se dodaju još i rastvarač (heptan), monomer (propilen) i vodonik koji služi za terminaciju procesa polimerizacije. Tokom polimerizacije cela masa u rektoru se intenzivno meša. Iz prvog reaktora, smeša se prebacuje u drugi reaktor, u kome vlada niži pritisak nego u prvom i u koji se ne dodaje katalizator već se u njemu dovršava polimerizacija. Nakon toga dobijena suspenzija polimera se oslobađa neproreagovanih gasova, pretežno monomera i to u degazatoru gde dolazi do značajnog obaranja pritiska. Odatle se suspenzija odvodi u centrifugu, gde dolazi do odvajanja većeg dela rastvarača od nastalog izotaktnog polipropilena. Posle centrifugiranja, izotaktni polipropilenski prah se suši u struji vrućeg azota, da bi se odvojio od ostataka rastvarača. Potom se prah polimera u struji azota transportuje u sekciju U-300 na doradu i stabilizaciju i to najpre u silose za prah, a zatim na dalje namešavanje stabilizatora i granulaciju. Nakon toga se granulat strujom vazduha transportuje na pakovanje u vreće i skladišti.

Nus proizvod polimerizacije – ataktni polipropilen dobija se procesom odvajanja iz heptana. Proces odvajanja se odvija postupkom filmskog isparavanja gde dolazi do odvajanja sloja ataktika od ostatka rastvora. Ataktni polimer se ispušta i na otvorenom prostoru hladi i reže u blokove (Izveštaj čistije proizvodnje, 2008).

U pogonu proizvodnje polipropilena u Hipolu postoji i sekcija za prečišćavanje rastvarača tj. heptana u kojoj se rastvarač prečišćava do stepena kada se može ponovo koristiti za polimerizaciju. Prečišćavanje se vrši u za to specijalno predviđenim kolonama.

Šema procesa proizvodnje je prikazana na slici 3.4.



Slika 3.4 Šema procesa proizvodnje u kompaniji Hipol (Izveštaj čistije proizvodnje, 2008)

Toplotna energija se proizvodi u kotlarnici ukupne instalisane snage 35,22 MW. Kotlarnica sadrži tri parna kotla za proizvodnju suvozasićene pare pritiska 12 bara. Potrošačima se distribuira para pritiska 12, 6 i 3 bara. Pojedinačni kapacitet svakog kotla je 18 t/h pare.

Električnom energijom, Hipol se snabdeva iz distributivne mreže sa tri voda od po 20 kV do razvodnog postrojenja. Ukupna instalisana snaga potrošača električne energije je 7,5 MW.

Snabdevanje Hipola vodom za industrijske potrebe vrši se iz kanala Dunav-Tisa-Dunav (DTD). Distribucija vode iz kanala DTD vrši se u dva sistema: u protivpožarni sistem i sistem sirove vode. Hemijska priprema vode (HPV), projektovanog kapaciteta 115 m³/h, snabdeva se sirovom kanalskom vodom, a zatim se vrši fizičko-hemijski tretman sirove vode. U HPV se proizvode tri vrste voda različitog kvaliteta. Distribucija vode iz HPV vrši se za potrebe: rashladnog tornja, kotlarnice i pogona za proizvodnju polipropilena.

Hipol ima postrojenje za tretman otpadnih voda projektovanog kapaciteta 40 m³/h. Na celoj površini Hipola postoji kanalizaciona mreža koja je sastavljena iz tri zasebne celine:

- sanitarna kanalizacija – otpadna voda iz sanitarnih čvorova i kuhinje restorana
- kišna kanalizacija – otpadna voda od odmuljivanja rashladnog tornja, pranja peščanih filtera i kišnica
- zauljena kanalizacija – otpadna voda sa svih površina gde postoji mogućnost prosipanja ulja (bazni pogon, pretakalište mazuta, kotlarnica, radionica mašinskog održavanja itd).

Postrojenje za tretman otpadnih voda se sastoji iz četiri tehnološke celine:

- biološki tretman otpadne vode iz sanitarne kanalizacije
- tretman zauljenih otpadnih voda iz kanalizacije u koju se sliva voda sa zauljenih površina
- završni tretman otpadnih voda iz kišne kanalizacije, prečišćenih voda sa biološkog tretmana i prečišćenih voda sa tretmana zauljenih voda
- tretman mulja – sav mulj koji se izdvaja na postrojenju, distribuira se na

filtraciona polja.

3.4 Implementacija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje optimizacijom procesa u polimernoj industriji - na primeru HIP Petrohemija

3.4.1 Izrada bilansa

Za potrebe analize sistema i pripreme detaljnog materijalnog i energetskog bilansa u HIP Petrohemija, izvršeno je prikupljanje podataka za period od tri godine, i to u periodu od 2011. do 2013. godine. Podaci su uključili količinu glavnih i sporednih proizvoda, količinu proizvedene pare, potrošnju gasa i električne energije, potrošnju hemikalija, kao i količine nastalog otpada i emisija. U analizi su korišćeni specifični indikatori životne sredine, a parametri sistema potrebni za analizu procesa (temperatura i pritisak pare, pritisak kondenzacije, protok vode, protok napojne vode, snaga turbina, potencijali za povećanje snage, itd) dobijeni su ili merenjima *in-situ*, ili modelovanjem, optimizacijom i simulacijom razmatranih sistema korišćenjem procesnih softvera.

Proces proizvodnje etilena i polietilena je generalno veoma energetski intenzivan, i ima veliki uticaj na životnu sredinu, a naročito kroz emisije u vazduh. Zbog toga je dalje istraživanje i identifikovanje potencijalnih mera čistije proizvodnje usmereno na ovu oblast.

Kao polazna osnova za određivanje potencijala za uštede u energiji, primenjen je indikator korišćenja energije (eng. *The Energy Use Indicator (EUI)*). Ovaj indikator se izračunava kao odnos utrošene energije u sektoru ako su svi procesi obavezno usvojili najbolje tehnološke prakse (BPT), i realne utrošene energije sektora u određenoj kompaniji (Saygin i saradnici, 2011a). Posebna pažnja posvećena je merama koje nisu direktno vezane za sam tehnološki proces, kao što je integracija procesa ili optimizacija sistema, na primer, sistema za snabdevanje parom.

3.4.2 Preliminarna procena

Na osnovu prikupljenih podataka izvršena je preliminarna analiza kako bi se utvrdile oblasti sa najvećim potencijalom za optimizaciju u kojima bi se nastavilo dalje istraživanje i definisanje opcija za unapređenje.

Sa aspekta tehnološkog procesa, predviđene su određene promene u fabrici za proizvodnju polietilena visoke gustine, pre svega rekonstrukcija i unapređenje pogona za polimerizaciju i aktivaciju. Te promene uključuju i različita ulaganja, kao što je instalacija unutrašnjeg filtera, ali i velika ulaganja koja se odnose na potpunu rekonstrukciju pogona za polimerizaciju.

Potrošnja sirovina u proizvodnom procesu HIP Petrohemije veoma je visoka. Iz tog razloga, velika pažnja posvećena je istraživanju mogućnosti za delimičnu zamenu sirovina, koja bi dovela do povećanja produktivnosti, ili mogućnosti boljeg upravljanja sirovinama (na primer postupak skladištenja), koje bi doprinelo smanjenju emisija.

Što se tiče emisija u vazduh, najčešće emisije iz petrohemijskih postrojenja su emisije ispraljivih organskih jedinjenja (eng. *Volatile Organic Compounds (VOC)*). Glavni izvori emisija zagađujućih materija u vazduh u HIP Petrohemiji bili su rezervoari za skladištenje derivata. Smanjenje emisija u vazduh iz rezervoara se uglavnom zasniva na zameni plivajućih krovova fiksnim na rezervoarima, i na boljem zaptivanju rezervoara (Vukadinović i saradnici, 2017). Ovom izmenom smanjuju se emisije zagađujućih materija u vazduh (smanjenje isparavanja aromatičnih jedinjenja iz pirolitičkog benzina, naročito u periodima punjenja i isumpavanja rezervoara).

Kako je HIP Petrohemija veliki potrošač energije (električne i toplotne), očekivalo se da postoji znatan potencijal za optimizaciju u ovoj oblasti. Veliki deo analize je bio posvećen nalaženju načina za smanjenje potrošnje energije, kao i na analizi uticaja na životnu sredinu u vezi sa potrošnjom energije.

3.5 Mogućnosti za unapređenje efikasnosti i smanjenje uticaja na životnu sredinu uvođenjem novih tehnologija u polimernoj industriji - na primeru Hipol A.D.

3.5.1 Potencijal za primenu opcija čistije proizvodnje

Posmatrana kompanija za proizvodnju polipropilena radi sa 100% kapaciteta, ali u odnosu na fabrike ovog tipa u Evropi proizvodni kapaciteti su mali. Zbog toga su materijalne i energetske uštede, kao i briga o životnoj sredini tj. poštovanje principa održivog razvoja osnovni uslov za opstanak na tržištu.

Fabrika spada u grupu velikih potrošača toplotne i električne energije i tokom realizacije programa čistije proizvodnje je upravo najveća pažnja posvećena energetici, kao oblasti sa najvećim potencijalom za uštede (Vukadinović i saradnici, 2009). Od predloženih opcija više od 60% se odnose na energetske uštede:

- smanjenje potrošnje električne energije na rashladnom tornju
- smanjenje pritiska produkcije pare sa 12 na 6 bara
- dodatno prečišćavanje napojne kotlovske vode
- vraćanje kondenzata iz podstanice za grejanje prostorija
- smanjenje potrošnje pare u kotlarnici
- regulacija viška vazduha za sagorevanje mazuta.

Među merama koje se odnose na smanjenje potrošnje vode, izdvajaju se sistem za ponovno iskorišćenje vode u procesu (vraćanje otpadne vode u pripremu i njeno korišćenje), kao i niz organizacionih mera vezanih za bolje upravljanje i iskorišćenje vode. Ove mere, kao i mere energetske efikasnosti su rezultat primene tehnika čistije proizvodnje kao što su optimizacija sistema i domaćinsko poslovanje.

Mera koja je posebno značajna sa aspekta uticaja na životnu sredinu i primene metodologije sirovinski efikasne i čistije proizvodnje je zamena katalizatora. Ova mera predstavlja kombinaciju više tehnika čistije proizvodnje kao što su promena tehnologije, zamena sirovina i izmene proizvoda. Nakon njene implementacije je ostvareno povećanje proizvodnje i poboljšan je kvalitet proizvoda, ali su isto tako značajne uštede u energiji, hemikalijama, smanjenju količina nastalog otpada i otpadnih voda koje su detaljnije analizirane.

3.5.2 Prednosti uvođenja novog katalitičkog sistema

Kataliza je veoma važna oblast u industriji polimera i od otkrića izotaktnog polipropilena 1954. godine, katalitički sistemi za polimerizaciju polipropilena i olefina generalno su neprekidno razvijani.

Katalitičko dejstvo izabranog katalizatora postiže se u prisustvu dietilaluminijum hlorida $AlEt_2Cl$, tzv. kokatalizatora, koji omogućava aktivaciju (alkilaciju) aktivnih centara i inicijaciju rasta polimernog lanca. Katalitički sistem 1. generacije čine $TiCl_3$ i $AlEt_2Cl$ i za ovaj sistem su karakteristična niska aktivnost i selektivnost. Dalja istraživanja su pokazala da se sa povećavanjem površine mikro-čestica $TiCl_3$ usitnjavanjem povećava i broj nepravilnih mesta, što direktno doprinosi rastu broja aktivnih centara i aktivnosti katalizatora. Na taj način je povećana aktivnost 2. generacije katalizatora i uvođenjem elektron donora, najčešće jedinjenja etra, poboljšana je selektivnost katalizatora (Dingova, 2006).

Dalji razvoj katalizatora je bio usmeren u sledećem pravcu:

- smanjenje zahteva za čistoćom monomera;
- povećanje aktivnosti katalizatora;
- povećanje selektivnosti katalizatora;
- priprema katalizatora sa kontrolisanom morfologijom;
- priprema katalizatora sa novim internim elektron donorima.

Prisustvo nečistoća u monomeru može uticati na aktivnost i selektivnost katalizatora. U slučaju propilena to mogu biti nečistoće koje utiču na kinetiku reakcije polimerizacije (kao što su propan, metan, etan, butan, azot, vodonik i sl), nečistoće koje utiču na kvalitet polimera (etilen, buten, penteni i sl) ili katalitički otrovi koji u veoma malim koncentracijama uzrokuju deaktivaciju katalizatora (kiseonik, voda, sumporna jedinjenja, ugljen monoksid, ugljen dioksid, amonijak, fosfor, alkoholi, derivati acetilena, propadien, butadien, i sl).

Korišćenje katalitičkih sistema 1. i 2. generacije u postupku dobijanja polipropilena zahteva visok stepen čistoće monomera tj. propilena. Katalitički otrovi, kao i druge nečistoće utiču na koncentraciju propilena u reakcionoj sredini i smanjuju prinos nastalog polipropilena. Primena ovih katalitičkih sistema u industrijskim uslovima

podrazumeva složen postupak pripreme i prečišćavanja monomera kako bi se dobio propilen minimalne čistoće 99,8%. Postupak podrazumeva uklanjanje katalitičkih otrova sa odgovarajućim adsorbentima, kao i dodatno uklanjanje nečistoća destilacijom u rektifikacionim kolonama. Uvođenjem visokoaktivnih Ziegler-Natta katalitičkih sistema (Z-N katalitičkih sistema), kao što je katalizator 4. generacije, omogućeno je korišćenje komercijalnog monomera sa sadržajem propilena min. 95%, što je znatno smanjilo troškove industrijske proizvodnje. I u slučaju visokoaktivnih katalizatora je neophodno odgovarajuće prečišćavanja monomera adsorpcijom uz izbor odgovarajućeg sistema adsorbentata s obzirom na njihovu osetljivost na katalitičke otrove (Moore, 1996).

Povećanje aktivnosti 4. generacije Z-N katalizatora je omogućilo znatno pojednostavljenje procesa proizvodnje s obzirom da se na taj način smanjuje koncentracija katalitičkih ostataka u polimeru i time eliminišu operacije vezane za ispiranje katalitičkih ostataka iz polimernog praha. Povećanjem aktivnosti kod 4. generacije katalizatora se obezbeđuje smanjenje koncentracije titanijuma (koncentracija manja od 5 ppm), čime se eliminiše žutoća polimera i poboljšava njegova stabilnost. Takođe se smanjuje koncentracija hlora (manja od 30 ppm), što omogućava neutralizaciju korozivnih ostataka dodavanjem odgovarajućeg aditiva u polimer.

Povećanjem selektivnosti katalitičkog sistema se smanjuje proizvodnja ataktnog polimera i ostvaruje veći prinos izotaktnog polipropilena. Na taj način je moguće dodatno pojednostavljenje procesa jer se eliminiše tehnološka operacija izdvajanja ataktičkog polimera, osim u slučaju polimerizacije propilena u suspenzionim procesima, kada rastvoren ataktički polimer mora biti izdvajan iz rastvarača. I u tom slučaju povećanje selektivnosti dovodi do značajnih ušteda – smanjuje se količina sporednog proizvoda (ataktičkog polipropilena), dobija se polimer sa visokim stepenom kristalnosti i poboljšanim vrednostima modula elastičnosti i tvrdoće.

Kontrolisana morfologija (veličina, oblik, poroznost) čestica nosača (kao što je $MgCl_2$) omogućava prilagođavanje katalizatora tehnološkom postupku polimerizacije, čime se utiče i na morfologiju samog proizvoda odnosno polimera.

Unapređenje katalitičkih sistema korišćenjem dietra kao internog elektron donora omogućava dodatno povećanje aktivnosti katalizatora i razvoj pete generacije katalitičkih sistema. U tom slučaju katalizator je osetljiviji na vodonik i koristi se za proizvodnju polimera sa visokim indeksom tečljivosti.

Pregled Z-N katalitičkih sistema za polimerizaciju propilena i njihov uticaj na svojstva polipropilena i unapređenje procesa proizvodnje je prikazan u tabeli 3.3.

Tabela 3.3 Razvoj Z-N katalitičkih sistema za polimerizaciju polipropilena (Moore, 1996)

Generacija katalizatora	Sastav katalizatora	Aktivnost (kg PP/g kat)	Izotaktni indeks (mas %)	Kontrola morfologije polimera	Zahtevi proizvodnog procesa
1. generacija Z-N katalizatora	$TiCl_3AlCl_3 + AlEt_2Cl$	0,8 – 1,2	90 - 94	nije moguća	ispiranje katalitičkih ostataka i izdvajanje ataktnog PP
2. generacija Z-N katalizatora	$TiCl_3 + AlEt_2Cl$	3 – 5	94 - 97	moguća	ispiranje katalitičkih ostataka
3. generacija Z-N katalizatora	$TiCl_4/MgCl_2 + AlEt_3$ interni/ekster ni donori	5 - 10	90 - 95	moguća	izdvajanje ataktnog PP
4. generacija Z-N katalizatora	$TiCl_4/Dietar/MgCl_2 + AlEt_3$ silan donori	10 - 25	95 - 99	moguća	
5. generacija Z-N katalizatora	$TiCl_4/Dietar/MgCl_2 + AlEt_3$	25 - 35	95 - 99	moguća	

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 3.3, može se videti da je aktivnost katalizatora u odnosu na prvu generaciju povećana čak 30 puta, dok je izotaktni indeks smanjen za oko 5%. Omogućena je kontrolisana morfologija čime je poboljšan kvalitet proizvoda, dok je sam tehnološki proces znatno pojednostavljen eliminacijom operacija koje se odnose na ispiranje katalitičkih ostataka i izdvajanje izotaktnog polipropilena.

Sva ova unapređenja i razvoj Z-N katalizatora 4. i 5. generacije su omogućila jednostavniji i ekonomičniji tehnološki proces proizvodnje polipropilena, uštede u energiji i drugim resursima i time i manji uticaj na životnu sredinu (Karian, 1999).

Pored Z-N katalizatora razvijeni su i metalocenski katalizatori (organska jedinjenja prelaznih metala koji se rastvaraju u reakcionom medijuju) čime je omogućeno dobijanje specifičnih svojstava polimera, kao što je uska distribucija molekulskih masa i visoki prinos izotaktnog polipropilena (Moore, 1996).

4. ANALIZA PRIMENJENIH OPCIJA SIROVINSKE I ENERGETSKE EFIKASNOSTI

4.1 Analiza primene RECP metodologije i opcija u termoelektrani TENT A

Za dalju analizu primene RECP metodologije i rezultata identifikovanih mera u termoelektranama u okviru JP EPSa, izabran je slučaj termoelektrane "Nikola Tesla A" (TENT A), koja se sastoji od šest blokova, A1 – A6, ukupne instalirane snage od 1.650 MW. TENT A se nalazi na desnoj obali Save, u blizini Obrenovca. Godišnje se u njoj proizvede u proseku više od 8 milijardi kilovat časova. Pored električne energije, ova elektrana isporučuje i toplotnu energiju za sistem grejanja u Obrenovcu. Električna i toplotna energija i tehnološka para se proizvede sagorevanjem uglja iz rudnika "Kolubara".

Svi potrebni podaci za detaljnu i opštu analizu proizvodnog sistema u termoelektrani TENT A (npr. o pritisku i temperaturi vode, temperaturi i pritisku pare, pritisku kondenzata, protoku vode, protoku napojne vode, protoku pare, sastavu uglja, snazi turbine, potencijalima za povećanje snage, itd.) prikupljeni su i analizirani pomoću merenja, laboratorijskog ispitivanja, kao i modelovanja, optimizacije i simulacije, koja je izvršena primenom procesnih softvera, kao što su Design II i ChamCad (Vukadinović i saradnici, 2016).

4.1.1 Potencijali za unapređenje efikasnosti i povećanje snage

Za analizu potencijala za unapređenje efikasnosti blokova korišćeni su modeli, na osnovu kojih se vrši analiza i diskusija o mogućnostima za optimizaciju procesnih parametara, primenu novih tehnoloških rešenja i unapređenje delova blokova i pomoćne opreme.

Povećanje snage blokova može se postići (Rajaković – Ognjanović i saradnici, 2011):

- povećanjem stepena korisnosti termodinamičkog ciklusa po kojem određeni blok radi,
- povećanjem masenog protoka pare,
- unapređenjem radnih karakteristika pojedinih komponenti,
- kombinovanjem navedenih mera.

Za potrebe procene mogućnosti povećanja snage blokova, izvršena su eksperimentalna industrijska merenja, koja su uključivala povećanje pritiska i/ili temperature sveže pare, povećanje temperature dogrejane pare, smanjenje pritiska kondenzata, kao i promene protoka sveže pare i poboljšanja radnih tačaka ključnih delova blokova.

Imajući u vidu projektovane parametre ispitivane opreme, zaključeno je da bi dalja prilagođavanja ovih procesnih parametara mogla da izazovu oštećenja na opremi, te samim tim istraživane mere nisu bile pogodne u ovoj termoelektrani. Uzevši sve u obzir, samo su eksperimenti sa promenama stepena protoka sveže pare pokazali potencijal za povećanje efikasnosti, pa su oni kao takvi i izabrani za dalju analizu.

Rezultati povećanja snage na bloku A5 - retrofit turbine na bloku A5

Rezultati opcije koja se odnosi na retrofit turbine sa povećanjem snage su pokazali da je najbolja efikasnost postignuta u slučaju povećanja bruto električne snage bloka na 344,5 MW (sa projektovanih 308,5 MW) tj. za 11,6% i povećanjem masenog protoka pare za 8,8%. Ova analiza, koja je sprovedena za blok A5, pokazala je da parni kotao može da poveća proizvodnju pare, a da generator i transformatori mogu da izvrše prenos povećane električne snage bez dodatnih ulaganja. Analiza procesa i proračun razmene toplote u kondenzatoru pokazali su da povećanje protoka pare (pri konstantnom protoku temperaturi rashladne vode) izaziva i povećanje pritiska kondenzacije sa 0,049 bar na 0,054 bar. U cilju postizanja bolje efikasnosti, zamenjene su cevi kondenzatora, i povećana je površina izmenjivača kako bi se održao isti pritisak kondenzata.

Za ocenu efikasnosti bloka, izvršena je procena bruto specifične potrošnje energije (q_{TP}) i ukupne bruto procesne efikasnosti (η_{TP}), primenom jednačina (1) i (2):

- bruto specifična potrošnja energije:

$$q_{TP} = \frac{\dot{m}_{LS} \cdot h_{LS} - \dot{m}_{FW} \cdot h_{FW} + \dot{m}_{PH} \cdot (h_{TSP1} - h_{TSP2}) + \dot{m}_{inPH} \cdot (h_{TSP1} - h_{inPH})}{P_G + P_P} \quad (1)$$

- bruto efikasnost (ukupna):

$$\eta_{TP} = \frac{1}{q_{TP}} = \frac{P_G + P_P}{\dot{m}_{LS} \cdot h_{LS} - \dot{m}_{FW} \cdot h_{FW} + \dot{m}_{PH} \cdot (h_{TSP1} - h_{TSP2}) + \dot{m}_{inPH} \cdot (h_{TSP1} - h_{inPH})} \quad (2)$$

gde je:

q_{TP} - bruto specifična potrošnja energije,

η_{TP} - ukupna bruto efikasnost,

\dot{m}_{LS} - stepen protoka sveže pare,

\dot{m}_{FW} - stepen protoka sveže vode (*feed water flowrate*),

\dot{m}_{PH} - stepen protoka vode za predgrejač,

\dot{m}_{mPH} - stepen protoka napojne vode (*make-up water flowrate*),

h_{LS} - entalpija sveže pare,

h_{FW} - entalpija sveže vode,

h_{TSP1} - entalpija pare na ulazu u turbinu srednjeg pritiska (TSP),

h_{TSP2} - entalpija pare na ulazu u predgrejač,

h_{mPH} - entalpija napojne vode na ulazu u predgrejač,

P_G - snaga generatora,

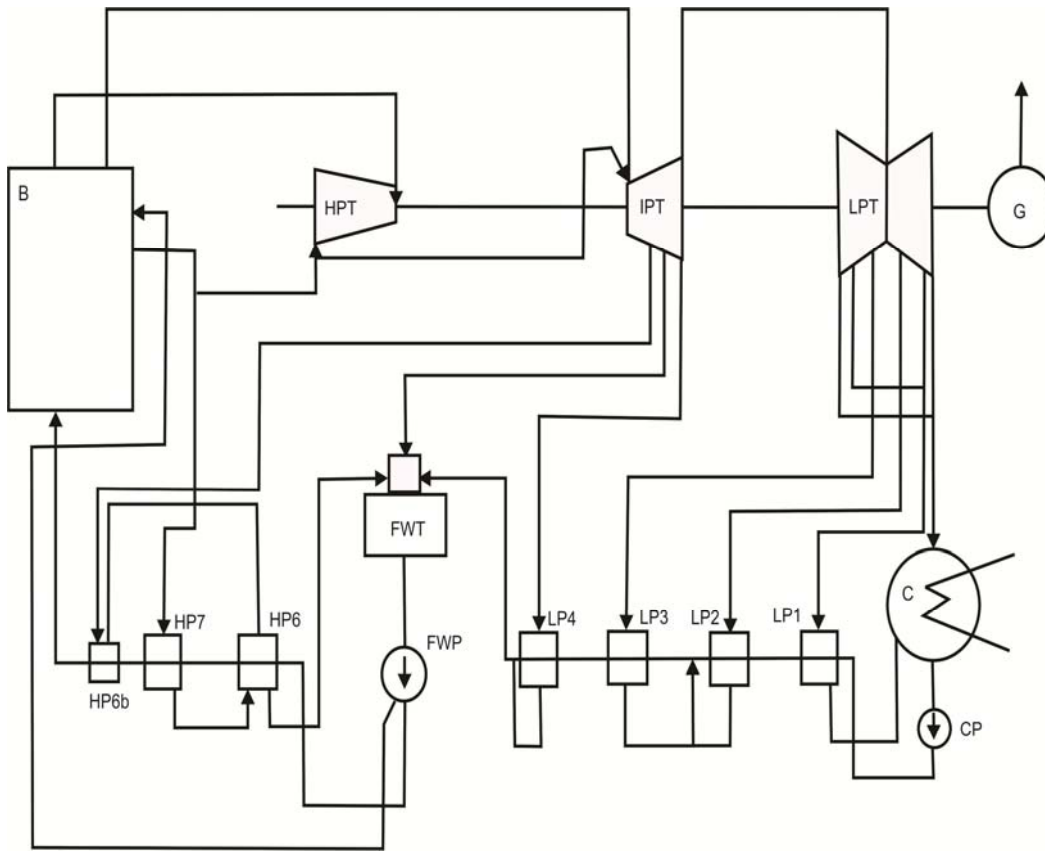
P_P - snaga pumpe.

Rezultati predloženog istraživanja su prikazani u tabeli 4.1 i pokazuju da je ukupna snaga bloka znatno povećana (za 11,6%).

Tabela 4.1 Rezultati retrofita turbine na bloku A5 (Vukadinović i saradnici, 2016)

Parametri	Pre retrofita turbine	Posle retrofita turbine	Promena
Nominalna snaga, MWel	308,5	344,5	36
Protok sveže vode, kg/s	245,897	278,78	32,883
Bruto efikasnost, %	46	46,64	0,64
Specifična potrošnja toplote na turbinskom postrojenju, bruto, kJ/kWh	7.825	7.888	63

Prikaz procesa sa ključnom opremom u ciklusu para/voda na bloku A5 predstavljen je na slici 4.1.



Slika 4.1 Prikaz procesa u bloku A5 (B – kotao sa predgrejačima i dogrejačima (*superheaters* i *reheaters*), HPT – turbina visokog pritiska, IPT – turbina srednjeg pritiska, LPT – turbina niskog pritiska, G – generator, FWT – tank sveže vode, FWP – pumpa za svežu vodu, C – kondenzator, CP – pumpa kondenzatora, LP – razmenjivač toplote niskog pritiska, HP – razmenjivač toplote visokog pritiska) (Vukadinović i saradnici, 2016)

Nakon tehničke analize je izvršena i procena ukupne investicije potrebne za remont turbopostrojenja i ona iznosi oko 20,23 miliona EUR. Detaljna analiza je pokazala da bi bilo opravdano uložiti dodatnih 3,434 miliona EUR u retrofit turbine čime bi se postiglo povećanje snage od 36 MW bruto, uz neznatno povećanje specifične potrošnje toplote. Pored toga, analiza je pokazala da bi godišnji prihod od prodaje dodatno proizvedene električne energije iznosio oko 8,6 miliona EUR, dok bi troškovi za gorivo, rad i održavanje iznosili oko 4,9 miliona EUR. Imajući to u vidu, ostvareni godišnji profit kretao bi se oko 3,7 miliona EUR, što daje dalju indicaciju da bi prost period otplate investicije u retrofit turbine bio kraći od godinu dana.

Rezultati povećanja snage na bloku A3 - retrofit turbine na bloku A3

Cilj primenjenih mera energetske efikasnosti u ovom slučaju su smanjenje specifične potrošnje turbopostrojenja, produžetak perioda između dva remonta i rekonstrukcija turbine za kogeneraciju.

Korišćenjem eksperimentalnih merenja i rezultata simulacije dobijenih u ovom slučaju, predviđeno je produženje radnog veka i povećanje nominalne snage bloka, kao i promena regulacije turbine – prelaz sa mlazičnog regulisanja na klizni pritisak.

U slučaju bloka 5 dobijeni su sledeći rezultati: povećanje nominalne snage bloka sa 305 MW na 328,4 MW usled povećanja masenog protoka pare za 5,6% (sa 872 t/h na 920 t/h) i povraćaja efikasnosti kotla na projektovanu vrednost (sa aktuelnim vrednostima 86,3 do 87,7%) pri nepromenjenim parametrima za svežu paru i pri retrofitu turbine. Retrofit turbine podrazumeva ugradnju nove turbine sa izmenjenom geometrijom protočnog dela.

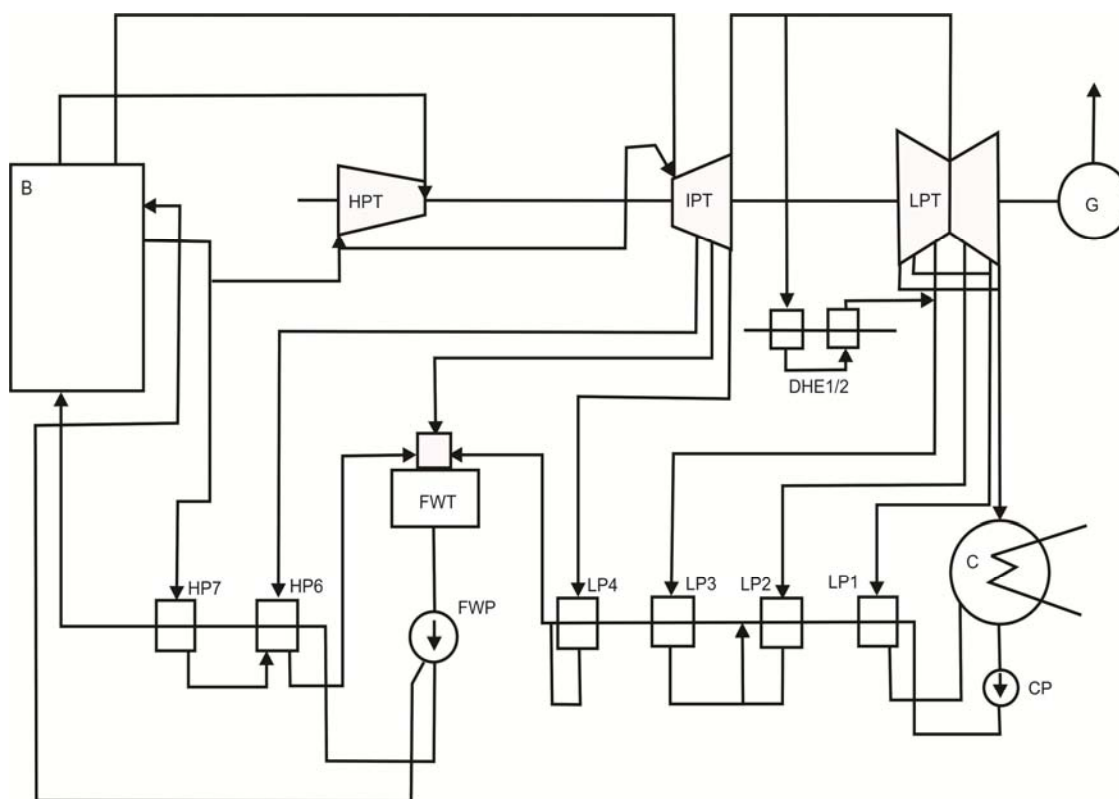
Pored povećanja snage bloka za 22 MW, retrofitom turbine trebalo bi da se ostvare i sledeći efekti:

- smanjenje specifične potrošnje na turbinskom postrojenju za oko 110 kJ/kWh (sa 7.899 na 7.789,5 kJ/kWh),
- smanjenje specifične potrošnje bloka za oko 4% (sa 9.500 kJ/kWh u odnosu na projektovanu vrednost od 9.150 kJ/kWh),
- smanjenje emisije NO_x na nivo manji od 200 mg/m³,
- smanjenje specifične emisije CO₂ (sa 1.073 kg/kWh na 971 kg/kWh),
- smanjenje vremena u kojem je blok van pogona,
- mogućnost iskorišćenja režima kombinovane proizvodnje toplote i električne energije (CHP), pri čemu bi se toplota mogla koristiti za grejanje u okviru gradske mreže.

Rezultati istraživanja su prikazani i u tabeli 4.2. dok je proces sa ključnom opremom u ciklusu para/voda na bloku A3 predstavljen na slici 4.2.

Tabela 4.2 Rezultati retrofita turbine na bloku A3 (Vukadinović i saradnici, 2016)

Parametri	Pre retrofita turbine	Posle retrofita turbine	Promena
Nominalna snaga, MWe	305,0	328,9	23,9
Protok sveže vode, kg/s	242,3	255,9	13,6
Bruto efikasnost, %	45,57	46,35	0,78
Specifična potrošnja toplote na turbinskom postrojenju, bruto, kJ/kWh	7.899	7.767	-132



Slika 4.2 Prikaz procesa u bloku A3 (B – kotao sa pregrejačima i dogrejačima (*superheaters* i *reheaters*), HPT – turbina visokog pritiska, IPT – turbina srednjeg pritiska, LPT – turbina niskog pritiska, G – generator, FWT – tank sveže vode, FWP – pumpa za svežu vodu, C – kondenzator, CP – pumpa kondenzatora, LP – razmenjivač toplote niskog pritiska, HP – razmenjivač toplote visokog pritiska, DHE – razmenjivač toplote daljinskog grejanja) (Vukadinović i saradnici, 2016)

Investiciona ulaganja u remont turbinskog postrojenja kod ovog rešenja i za specifičan obim radova procenjena su na 83,171 miliona EUR pri čemu je period otplate šest godina.

4.1.2. Dodatni potencijal za smanjenje potrošnje vode i energije

Povećanje snage blokova pokazalo se kao značajna mera energetske efikasnosti, za koju su takođe potrebna velika ulaganja. Postoji i niz drugih mera koje su analizirane, a koje su dovele do smanjenje potrošnje sirovina i vode, kao i do smanjenja emisija i potrošnje energije.

Efikasnije korišćenje vode

Ugrađeni su novi merači protoka rashladne vode u svakom bloku u cilju optimizacije rada rashladnih pumpi. Pored toga, uvedeno je i daljinsko očitavanje podataka, što je omogućilo praćenje potrošnje rashladne vode u svakom trenutku. Redovno praćenje potrošnje i analiza podataka su omogućili optimizaciju potrošnje vode, čime su pored ušteda u vodi, ostvarene i uštede u električnoj energiji potrebnoj za rad pumpi. Takođe je obezbeđeno i bolje održavanje opreme (povećanje potrošnje rashladne vode ukazuje na zaprljanje kondenzatora). Investicija od 50.000 EUR otplatila se u roku od 6 meseci.

Primenom različitih mera smanjenja je količina vode koja se dodaje u sistem grejanja Obrenovca. Jedna od mera bila je i promena kvaliteta vode koja se koristi u sistemu grejanja (umesto demineralizovane, koja je izazivala koroziju, korišćena je dekarbonizovana voda, čime su se gubici smanjili sa 1.200 t/d na 200 t/d i troškovi za pripremu vode su smanjeni na trećinu prvobitnih troškova.

Uštede u potrošnji energije

Predloženo je nekoliko mera u cilju ostvarivanja dodatnih ušteda u potrošnji energije, pri čemu predložene mere imaju period povraćaja investicija manji od 2 godine:

- poboljšanje zaptivanja Luva (Ljungstremovog zagrejača vazduha), da bi se sprečili gubici toplote, uz procenjene uštede potrošnje uglja od oko 80.000 t/god, kao i smanjenje generisanja pepela od oko 15.000 t/god. (za 4 bloka)
- popravka izolacije cevovoda i armature, uz uštede u potrošnji uglja od oko 31.000 t/god.
- poboljšanje zaptivenosti kotla i kondenzatora može smanjiti potrošnju uglja za 32.000 t/godišnje, dok se ukupna količina nastalog pepela može smanjiti za 21.800 t/god.

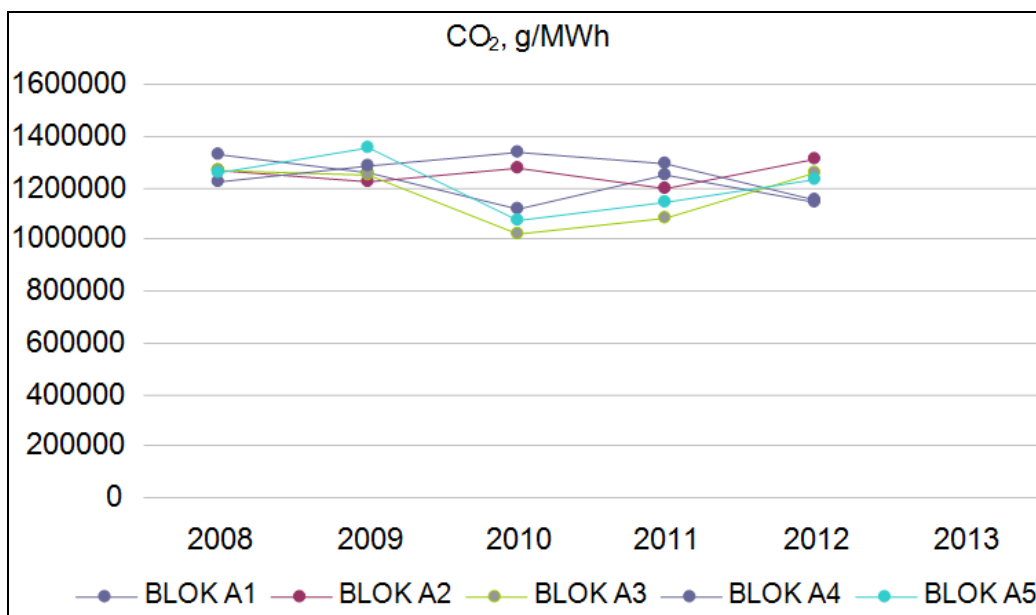
- optimizacija postojećih duvača gara i ugradnja na blokovima A4 i A6, sa potencijalnim uštedama u potrošnji uglja od 160.000 t/god. i potencijalnom smanjenju u količini nastalog pepela od 28.800 t/god.

4.1.3 Problem odlaganja pepela

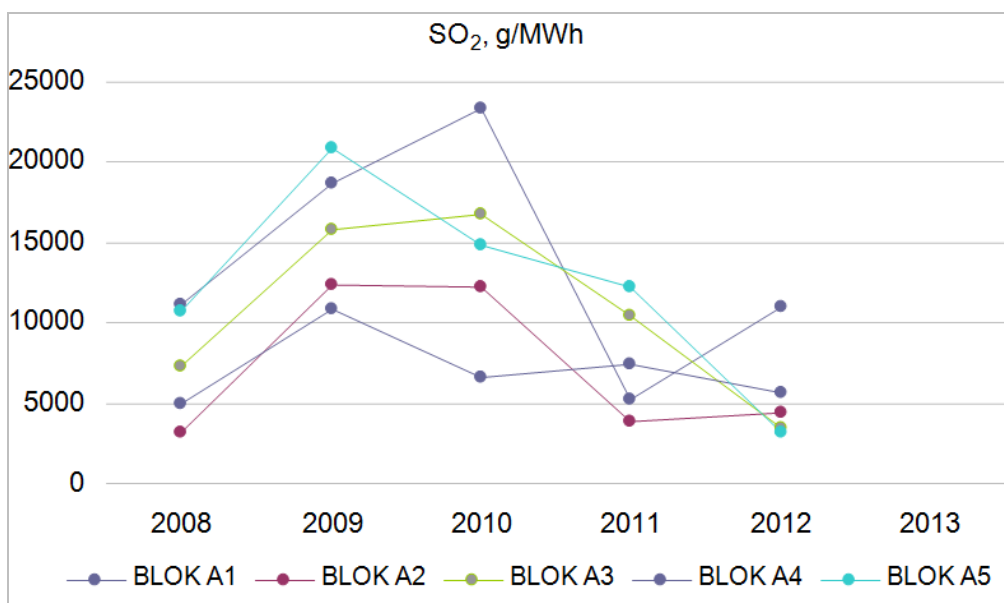
Istovremena analiza termoelektrana omogućila je identifikaciju zajedničkih problema unutar JP EPS, od čega je najveći stvaranje velikih količina pepela kao posljedica sagorevanja uglja. Trenutno se najveći deo generisanog pepela odlaže na deponije pepela u okviru termoelektrana. Pri transportu pepela se troše i velike količine vode, što se može smanjiti prelaskom na ugušćeni transport pepela. Ipak, problem odlaganja i dalje postoji i kako bi se rešio trajno potrebno je obezbediti pravni okvir za dalje korišćenje pepela u građevinskoj industriji (Kurama i Kaya, 2008; Mulder, 1996). Prodajom pepela smanjile bi se količine pepela koji se odlaže na deponiju za oko 1 Mt/god, dok bi ostvarene uštede samo od smanjenja naknada za odlaganje iznosile i do 1,88 miliona EUR godišnje.

4.1.4 Homogenizacija uglja

Za potrebe određivanja karakteristika sirovog uglja, pre svega njegove neto kalorijske vrednosti, izvršen je niz eksperimentalnih analiza sadržaja ugljenika i izvršena je korelacija sa emisionim faktorom za različite klase uglja. Na slikama 4.3 i 4.4 prikazane su znatne varijacije emisija CO₂ i SO₂, izračunate prema karakteristikama korišćenog uglja. Dobijeni podaci poslužili su kao osnova za analizu opcije vezano za uvođenje sistema kontinuiranog praćenja i homogenizacije kvaliteta uglja koji se koji se doprema do termoelektrana. Prema prvim procenama, homogenizacija kvaliteta uglja mogla bi da dovede do smanjenja postrošnje uglja za 55.000 t/god. Takođe ovom opcijom bi se ostvarilo i smanjenje količine nastalog otpada u vidu pepela koji se odlaže na deponiju za 38.000 t/god.



Slika 4.3 Promene emisije CO₂ u zavisnosti od analiza kvaliteta uglja (Vukadinović i saradnici, 2016)



Slika 4.4 Promene emisije SO₂ u zavisnosti od analiza kvaliteta uglja (Vukadinović i saradnici, 2016)

4.1.5 Sistem monitoringa emisija i mere kontrole zagađenja

Pojedinačni analizatori za kontinuirano merenje praškastih materija i gasova uspešno su instalirani 2003. godine. U novembru 2011, instalirana je oprema u svim blokovima u TENT A, u okviru projekta *Sistem za kontinuirani monitoring emisija*. Ovaj sistem prati koncentracije sumpornih i azotnih oksida i praškastih materija, kao i koncentracije ugljen-monoksida, zapreminski udeo ugljen-dioksida i kiseonika, kao i druge značajne parametre dimnih gasova (vlažnost, pritisak, temperaturu, protok).

Termoelektrana "Nikola Tesla A" koristi ugalj iz rudarskog basena "Kolubara", kojeg, kao je u poglavlju 3 navedeno, katarakteriše niska donja toplotna moć (prosečna je oko 6.700 kJ/kg), relativno visok sadržaj vlage (48%) i pepela (22%), dok se sadržaj ukupnog sumpora kreće u opsegu od 0,42 do 0,47%. Koncentracija SO₂ u dimnim gasovima kreće se od 2.800 do 3.200 mg/m³, a specifična emisija sumpora kreće se od 9 do 13 kg/MWh.

Uvođenjem tehnologije odsumporavanja u blokovima A3-A6 u TENT A, očekuje se da emisije SO₂ budu svedene na nivo od 200 mg/m³. Ukupne investicije potrebne za izgradnju postrojenja za odsumporavanje dimnih gasova iznose preko 250 miliona EUR (Ogranak TENT, 2017).

Druga mera koja je u planu za realizaciju je rekonstrukcija elektrofiltera kako bi se dostigla vrednost emisije praškastih materija od 30 mg/Nm³ (svedeno na suv gas i referentnu vrednost O₂ od 6 %). Ukupne investicije potrebne za rekonstrukciju elektrofilterskog postrojenja kreću se oko 12 miliona EUR.

4.2 Analiza primene RECP tehnika optimizacije procesa u proizvodnji polimera

Tokom procene identifikovanih opcija primenjena je metodologija sirovinski efikasne i čistije proizvodnje koja je prilagođena uslovima proizvodnje u HIP Petrohemiji. Analiza je zasnovana na optimizaciji procesa, pre svega unapređenju energetske efikasnosti i smanjenju emisija, i obuhvatila je više tehnika čistije proizvodnje:

- promena sirovina (uvođenje manje toksičnih sirovina i sirovina sa nižim vrednostima emisionog faktora),

- povećanje efikasnosti iskorišćenja materijala,
- ponovna upotreba materijala i reciklaža,
- optimizacija procesa
- ponovna upotreba energije,
- povećanje energetske efikasnosti.

4.2.1 Optimizacija procesnih parametara pare za produvanje na pirolitičkim pećima u fabrici Etilen

Izvršeno je eksperimentalno određivanje brzina reakcije u benzinskim pećima (merenjima reakcionih uslova i simulacijom dela postrojenja i praćenjem parcijalnih pritisaka reaktanata). U cilju ostvarivanja energetske ušteda, analizirani su efekti smanjenja odnosa pare za razblaživanje (DS pare) i benzina (CH), kao i smanjenja pritiska DS pare. Imajući u vidu da smanjenje odnosa DS/CH dovodi do brzih reakcija kondenzacije, odnosno veće proizvodnje piro-ulja i koksa i niže proizvodnje etilena, izvršeno je smanjenje pritiska DS pare do granice kondenzacije pre ulaska u peći.

Analizom eksperimentalno dobijenih podataka došlo se do zaključka da bi odnos DS/CH trebalo smanjiti sa 0.60 na 0.50 (što nije značajno uticalo na stepen konverzije proizvoda, kao ni na postizanje temperature krekovanja), dok je pritisak u sistemu DS pare postepeno spušan sa 11.2 bar na 9.8 bar (Vukadinović i saradnici, 2017).

Analiza uticaja predložene mere na potrošnju energenata, izvršena je poređenjem podataka za šest benzinskih peći, i dobijeni su značajni rezultati uštede energije koji su prikazani u tabeli 4.3.

Tabela 4.3 Rezultati optimizacije procesnih parametara pare za produvanje na pirolitičkim pećima u fabrici Etilen

Period	Potrošnja prirodnog gasa, Nm ³ /h	Potrošnja tečnog goriva, t/h	Potrošnja pregrejane pare visokog pritiska, t/h	Potrošnja eksterne energije, GJ/h
05.-17.10.2013.	3555,9	3,85	3,96	289,2
08.-17.12.2013.	2494,2	4,05	5,36	263,8

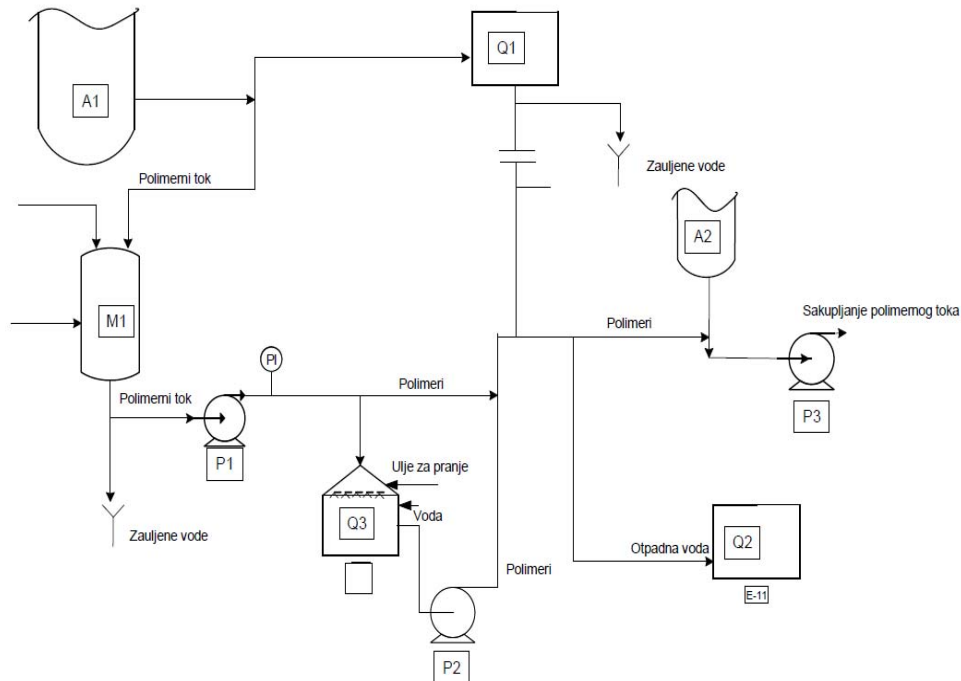
Optimizacijom procesnih parametara je postignuto smanjenje potrošnje energije za 30%, tj. računato u odnosu na ukupnu potrošnju energije, uštede iznose 2.7%. Takođe je smanjena i potrošnja demineralizovane vode za 20%.

4.2.2 Iskorišćenje otpadnih komponenti iz toka zauljenih voda

Imajući u vidu značaj ponovnog iskorišćenja sirovina koje se javljaju u otpadnim vodama, kako sa ekonomskog aspekta, tako i sa aspekta uticaja na životnu sredinu, izvršena je analiza mogućnosti eliminacije polimera iz zauljenog toka fabrike Etilen primenom raznih separacionih tehnika. Na ovaj način bi se i značajno smanjila količina ugljovodonika u zauljenom toku koji se tretira u postrojenju za tretman otpadnih voda (FOVu).

Polimerni tok nastaje kao nusproizvod u kaustičnoj koloni, skruberu – iz hemijskih reakcija polimerizacije i aldolne kondenzacije. Iz kolone se polimeri izdvajaju u proseku 10 do 15 puta na dan, zavisno od kapaciteta i drugih procesnih faktora, nakon čega se odvođe u separator gas-tečnost. Nakon separacije gasna faza, koja se sastoji od rastvorenih gasova, odlazi u sistem baklje, a tečna faza se drenira u sistem procesnih voda. Na ovaj način se dobija diskontinualni tok od 0.5 do 1 t/dan koji u sebi sadrži neproreagovali NaOH, potpuno ili delimično izreagovali Na₂S, NaHS, NaHCO₃, Na₂CO₃, polimere (uglavnom C4-C8 dieni i ciklodieni, sa nešto stirena i indana i kondenzovani polimeri nastali od acet-aldehida i diena) kao i delimično rastvorenih gasova i drugih komponenti. Taj tok se ispušta u zajednički tok procesnih voda fabrike.

Analizirana je mogućnost primene raznih separacionih tehnika, i izabrano je najprihvatljivije rešenje za odvajanje i pranje polimera (slika 4.5). Kvalitet separacije se prati određivanjem pH vrednosti vode za pranje.



Slika 4.5 Šema sistema za odvajanje, pranje i sakupljanje toka polimera sa piro-uljem (A1 - kaustična kolona, M1 - separator gas-tečnost, Q3 – tank za pranje polimera vodom i uljem za pranje, P2 – pumpa za transport polimera do pumpe P3 za sakupljanje, A2 – dodatnu korak u separaciji u uljnom striperu, Q1 i Q2 – tankovi za sakupljanje otpadne vode nakon izdvajanja polimernog toka)

4.2.3 Integracija celokupnog sistema („Total site integration“)

Kako je to prikazano i u drugim industrijskim kompleksima (Chew i saradnici, 2013; Feng i saradnici, 2011; Liew i saradnici, 2014), integracija dva parna sistema dovodi do značajnih ekonomskih ušteda. U slučaju HIP Petrohemije je izvršena detaljna analiza i optimizacija sistema proizvodnje pare koja je pokazala da je najbolje rešenje (zasnovana na zahtevima procesa i energetske uštedama) povezivanje i slanje viška pare srednjeg pritiska fabrike Etilen u sistem pare srednjeg pritiska HIP Petrohemije. Pored ušteda vezanih za energiju, ova opcija dovodi i do porasta bezbednosti rada (u slučaju ispada kotla u pogonu Energetika, hitne potrebe za parom srednjeg pritiska za fabrike PENG i PEVG bi se nadoknadile iz fabrike Etilen).

Imajući u vidu da u parnom sistemu HIP Petrohemije već postoje veze između fabrika Etilen i Energetika (između pregrejane pare visokog i srednjeg pritiska i sistema pare niskog pritiska), primenom ove mere bi se potpuno integrisao parni sistem HIP Petrohemije.

4.2.4 Poboljšanje rada sistema pare niskog pritiska

Analizom rada sistema kondenzata pare niskog pritiska utvrđeno je da u ovom sistemu vlada pritisak koji je viši od potrebnog za 1.5 - 1.6 bar, što izaziva otežan rad rebojlera i zahteva viši radni pritisak u sistemu pare niskog pritiska (min 5 bar). Takođe se u određenoj meri i narušava parni bilans celokupnog postrojenja fabrike Etilen. Usled promenjenog energetskog bilansa parnih turbina (viša vrednost izlazne entalpije od očekivane) dolazi do pada efikasnosti rada parnih turbina koje pokreće para srednjeg pritiska, a koje daju kao proizvod paru niskog pritiska. Da bi se dobio energetski efikasniji sistem kao rešenje je predložena ugradnja posude za sakupljanje kondenzata sa sekcija tople i hladne frakcionacije. Pritisak u posudi bi bio oko 1.1 - 1.2 bar čime bi se omogućio nesmetan put kondenzata do posude, eliminisali bi se gubici u atmosferu (pojava „otparka“), dok bi se efikasna površina za razmenu toplote u vertikalnim rebojlerima povećala. Tako bi se pojavila mogućnost snižavanja pritiska u sistemu pare niskog pritiska na 4 bar i niže, čime bi se na turbinama postiglo veće entalpijsko iskorišćenje pregrejane pare srednjeg pritiska (Vukadinović i saradnici, 2017).

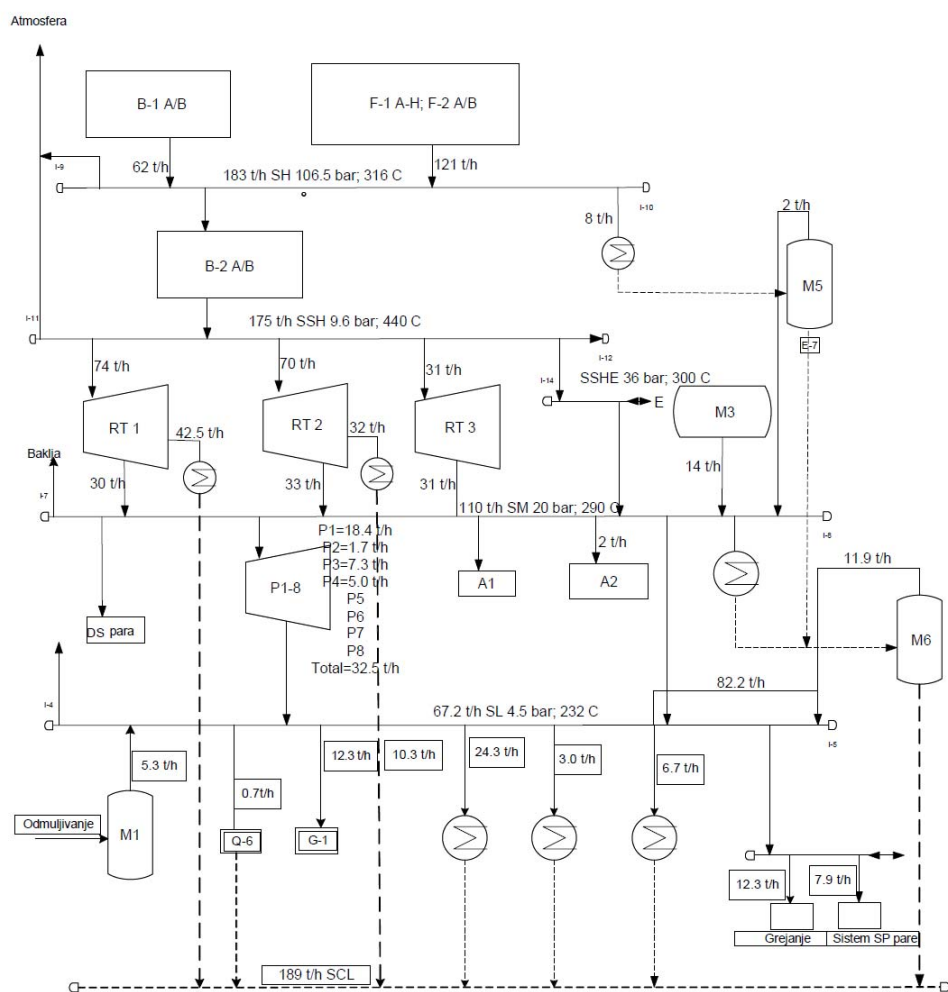
Ovim pristupom bi mogle da se dobiju sledeće uštede: manja potrošnja pare niskog pritiska za grejanje od 0.5 - 1 t/h (u zavisnosti od rada sistema), gubici pare niskog pritiska u atmosferu na fleš posudi smanjeni na vrednost do 0.5 t/h i gubici kondenzata u atmosferu u proseku (period leto/zima) do 0.5 t/h.

4.2.5 Optimizacija rada turbina

Visoki troškovi proizvodnje vodene pare visokog pritiska, potreba za rasterećenjem rada kotlova i pregrejača, su samo neki od razloga zbog kojih je analizirana mogućnost zamene turbinskog pogona pojedinih kompresora i pumpi elektromotorima. Takođe izvršena je optimizacija rada energetskog sistema, modelovanjem energetskih potreba kompleksa, utvrđivanjem mogućnosti zamene jedne vrste goriva drugim, optimizacije

rada turbina itd. Analiza procesnog sistema je izvršena korišćenjem in-house software dizajniranog za energetska analizu sistema za proizvodnju pare i/ili električne energije.

Analiziran je sistem pre izvršene optimizacije, kapaciteta za preradu 76.46 t/h primarnog benzina i parametri početnog procesa su prikazani na slici 4.6.

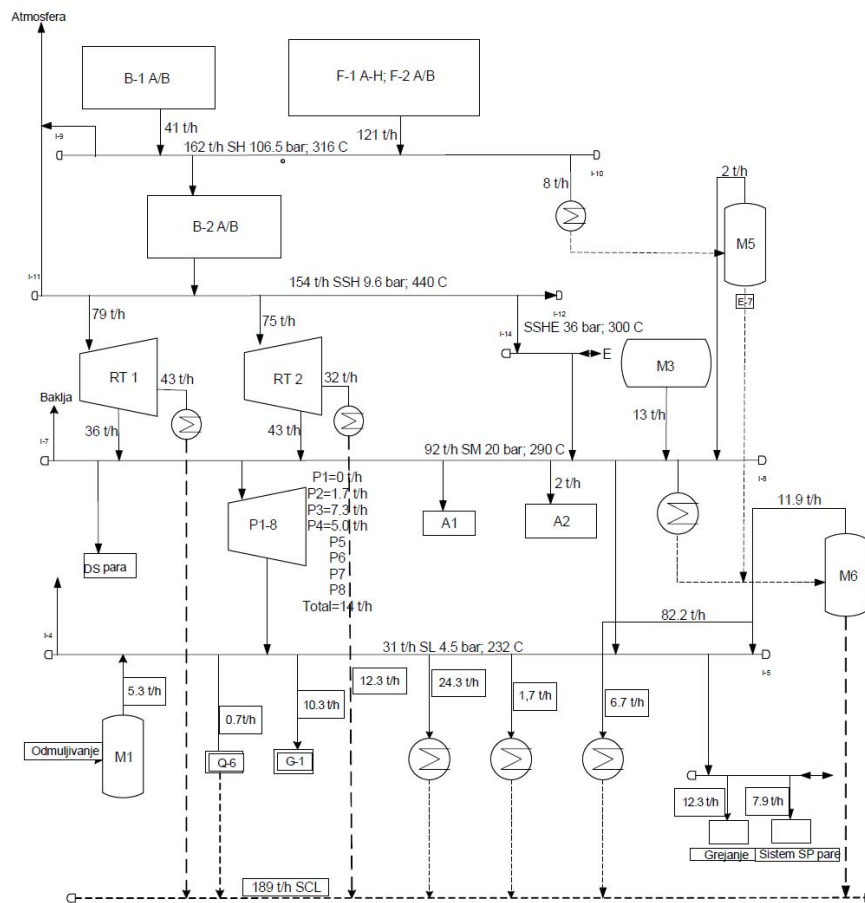


Slika 4.6 Šema analiziranog sistema pare pre rekonstrukcije (B-1 A/B – dva kotla za proizvodnju pare, F-1 A/H – pirolitičke peći, F-2 A/B – dve etanske peći, B-2 A/B – pregrejači, RT 1-3 – turbine, P 1-8 – pumpe za napojnu vodu totlova, M 1-6 – separatori) (Vukadinović i saradnici, 2017)

Imajući u vidu obim planiranih investicija, uštede su računane u odnosu na početni sistem koji koristi isključivo prirodni gas kao energent (donje toplotne moći od 33 MJ/Nm³) i koristeći sledeće vrednosti: potrošnja prirodnog gasa za proizvodnju pare

visokog pritiska u fabrici Etilen - 80 Nm³/t, potrošnja prirodnog gasa za pregrevanje pare visokog pritiska do pregrejane pare visokog pritiska (SSH) - 25 Nm³/t, potrošnja prirodnog gasa za proizvodnju pare visokog pritiska u fabrici Energetika - 78 Nm³/t, cena prirodnog gasa – 0,4 € / Nm³ i cena električne energije – 0,08 €/KWh .Dodatno smanjenje potrošnje pare srednjeg pritiska, kao rezultat smanjenja odnosa DS/CH na pirolitičkim pećima, nije uključeno u proračun.

Na osnovu optimizacije rada energetskog sistema, došlo se do optimalnog rešenja prikazanog na slici 4.7.



Slika 4.7 Šema optimizovanog sistema pare nakon rekonstrukcije (B-1 A/B – dva kotla za proizvodnju pare, F-1 A/H – pirolitičke peći, F-2 A/B – dve etanske peći, B-2 A/B – pregrejači, RT 1-2 – turbine, P 1-8 – pumpe za napojnu vodu totlova, M 1-6 – separatori) (Vukadinović i saradnici, 2017)

Implementacijom predloženih mera, odnosno zamenom turbo pogona na jednoj turbini i jednoj pumpi elektromotorima, postignuti su sledeći rezultati: potrebe za proizvodnjom pare visokog pritiska u kotlovima su smanjene za 21 t/h; smanjena je količina pare koja se pregreva na pregreačima za 21 t/h; isključivanjem jednog od kotlova dodatno bi uštedela električna energija (oko 955 MWh godišnje). Da bi se ostvarila zamena parnog elektro pogonom, potrošnja električne energije je povećana za 3.100 kWh/h. Na osnovu ranije navedenih podataka procenjeno je da bi uštede iznosile oko 5,15 miliona €/god (Vukadinović i saradnici, 2017).

Ova rekonstrukcija parnog sistema ne bi ometala dalje planove rekonstrukcije (ili zamene kompletnih peći) konvekcionijskih sekcija pirolitičkih peći i rekonstrukciju/zamenu kotlova, sa ciljem konačne eliminacije pregreača.

4.2.6 Rekonstrukcija pirolitičkih peći i/ili delimična zamena novim pećima

Cilj rekonstrukcije starih ili nabavke novih peći je isključivanje iz rada pregreača koji su veliki potrošači energije. Ukupna projektovana toplotna moć pregreača je 150.600 MJ/h od čega se 108.800 MJ/h troši na pregrevanje pare visokog pritiska, dok se 41.800 MJ/h troši za proizvodnju pare srednjeg pritiska u konvekcionijskoj zoni. Podizanjem energetske efikasnosti peći za 4.200 MJ/h smanjuje se potrebna potrošnja energije na pregreačima za oko 8.000 MJ/h.

Implementacija opcije rekonstrukcije ili zamene pirolitičkih peći, bi smanjila specifičnu potrošnju energije (SEC), pri punom kapacitetu, na oko 31.400 – 33.500 kJ/kg etilena. Analizirana su tri različita slučaja rekonstrukcije:

- Slučaj I – Rekonstrukcija postojećih pirolitičkih peći dodavanjem modula za pregrevanje pare iz parnog doma peći u konvekcionijskoj zoni peći. Bolje iskorišćenje energije dimnih gasova bi dovelo do povećanja energetske efikasnosti peći od 87% na 92% (odnosno prosečna ušteda je 4.000 – 4.200 MJ/h po peći). Iskorišćenje toplote dimnih gasova na pećima odnosno proizvodnjom pregrevane pare visokog pritiska smanjilo bi se i opterećenje pregreača pare. Zbog niske energetske efikasnosti pregreača, procenjeno je da bi se rekonstrukcijom svake peći smanjila ukupna potrošnja energije za 7.500 – 8.800 MJ/h po jednoj peći.

- Slučaj II - Sukcesivna ugradnja dve nove benzinske peći. Procenjena ušteda energije u ovom slučaju po jednoj novoj peći bila bi od 11.500 do 13.400 MJ/h. Procenjena toplotna snaga pojedinačne nove peći je oko 167.400 MJ/h, a proizvodnja pregrejane pare potrebnog kvaliteta oko 28 t/h. Zbog niske energetske efikasnosti pregrejača B, procenjeno je da bi se ugradnjom nove peći smanjila potrošnja energije za 21.000 – 24.300 MJ/h po jednoj novo ugrađenoj peći.
- Slučaj III - Ugradnja novih benzinskih peći tj. ugradnja dve pirolitičke peći, koje bi koristile isti dimnjak i ventilator dimnih gasova, takozvane peći blizanci („twins“). Procenjena ušteda enerije po jednoj novoj peći bila bi 11.500 MJ/h. Procenjena snaga pojedinačne peći je oko 167.400 MJ/h, a proizvodnja pregrejane pare potrebnog kvaliteta oko 28 t/h. Procenjeno je da bi se ugradnjom nove peći smanjila potrošnja energije za 42.000 – 48.000 MJ/h za par novih ugrađenih peći.

Za dalju analizu i izbor konačnog rešenja uzete su u obzir i planirane investicije kompanije. To znači u prvom slučaju troškove rekonstrukcije deset pirolitičkih peći (osam benzinskih i dve etanske), u drugom slučaju troškove nabavke i ugradnje za dve nove benzinske peći i u trećem slučaju troškove nabavke i ugradnje novog para benzinskih peći. Uzimajući u obzir potrebne investicije, uštede, period otplate, stanje postojeće opreme, ostala neophodna ulaganja u kompaniji i druge faktore, izabran je prvi slučaj. Realizacijom ove mere bi se ostvarile smanjenje potrošnje gasa na godišnjem nivou za 10% u odnosu na ukupnu potrošnju gasa.

4.2.7 Izmene na aktivatoru katalizatora u procesu proizvodnje polietilena visoke gustine

Osnovu postojeće jedinice za aktivaciju katalizatora predstavlja aktivator - fluidizaciona peć za aktivaciju u kojoj se šarža katalizatora zagreva suvim vazduhom do potrebne temperature i pod tim uslovima održava određeno vreme. Veličina šarže, vreme aktivacije i temperatura na kojoj se aktivacija odrigrava, zavise od vrste katalizatora.

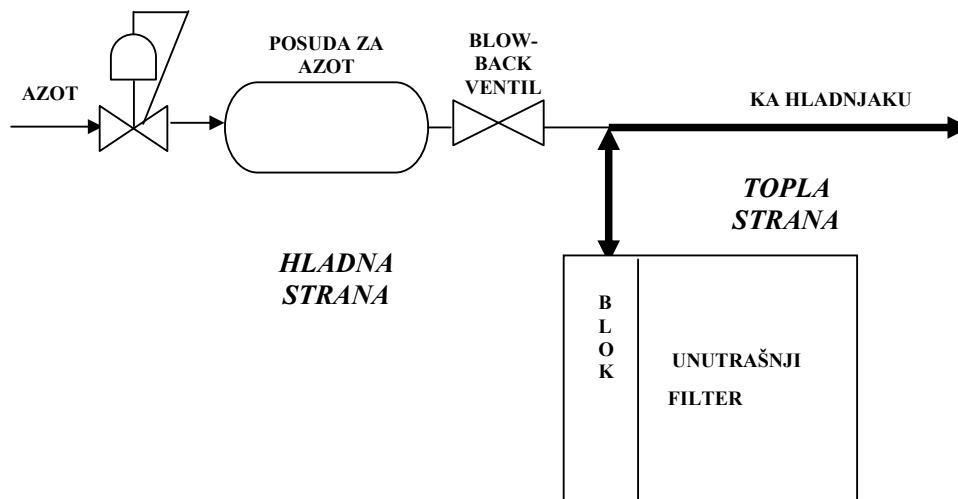
Aktivator čine:

- unutrašnja posuda aktivatora,

- unutrašnji ciklon aktivatora i
- spoljna posuda aktivatora.

U cilju povećanja iskorišćenosti katalizatora i smanjenja količine generisanog otpadnog katalizatora koji ima karakter opasnog otpada, analizirana je modifikacija aktivatora. Modifikacija se sastoji u zameni unutrašnjeg ciklona u aktivatoru, sa novim internal filterom - unutrašnjim filterom aktivatora. Ovaj novi, unutrašnji filter je projektovan da bude efikasniji od postojećeg ciklona, tako da je smanjen gubitak katalizatora na bazi hroma i stvaranje opasnog otpada na bazi hrom oksida.

Opcija čistije proizvodnje podrazumeva postavljanje novog unutrašnjeg filtera na vrhu unutrašnje posude aktivatora (slika 4.8), koji služi za uklanjanje sitnog praha katalizatora iz struje gasa za fluidizaciju. Unutrašnji filter je projektovan za efikasno uklanjanje čestica katalizatora iz gasova koji napuštaju aktivator. Efikasnost filtera iznosi 98% za čestice veličine 1,3 mikrona. Projektni pritisak unutrašnjeg filtera je 1,35 bar, a projektna temperatura 982 °C.



Slika 4.8 Postavljanje unutrašnjeg filtera u cilju poboljšanja rada aktivatora

4.2.8 Mogućnosti za smanjenje emisije isparljivih organiskih jedinjenja (VOC) – analiza emisija iz rezervoara

Jedan od najvećih izvora emisija zagađujućih materija u vazduh u petrohemijskoj industriji su rezervoari za skladištenje derivata koji sadrže VOC, na primer derivata sirove nafte: benzina, rastvarača i intermedijara koji se koriste u naftnoj i petrohemijskoj industriji (Jovanović i saradnici, 2010).

To je bio razlog za detaljnu analizu i rekonstrukciju spoljašnjeg plivajućeg krova rezervoara Tk-1101B (kapaciteta 13.540 m³), u kojem se skladišti pirolitički benzin.

Za proračun emisija iz rezervoara korišćen je softver Agencije za zaštitu životne sredine TANKS. Ovaj softver koristi podatke za specifikaciju rezervoara i podatke koji se odnose na funkciju rezervoara, detaljne osobine uskladištenog goriva, i meteorološke podatke o lokaciji na kojoj se nalaze rezervoari. Na osnovu prikupljenih podataka, izračunate su ukupne emisije i emisije benzena za dva različita slučaja: pre i posle rekonstrukcije rezervoara.

Ukupne emisije iz rezervoara sa plivajućim krovom Tk-1101B, pre rekonstrukcije bile su 12.896 kg/god, od čega su emisije benzena bile 2.077,9 kg/god. Posle rekonstrukcije, emisije iz rezervoara sa kupolom sa unutrašnjom plivajućom membranom smanjene su na 877,6 kg/god, od čega su emisije benzena 91,1 kg/god.

4.3 Analiza primene RECP tehnika zasnovanih na izmeni tehnologije u slučaju proizvodnje polipropilena

4.3.1 Izvorna tehnologija i katalizatori I generacije

Projektovana tehnologija proizvodnje polipropilena u kompaniji Hipol se zasnivala na suspenzionom postupku polimerizacije polipropilena pri čemu je korišćen Ziegler-Natta katalizator I generacije na bazi titanijum trihlorida (TiCl₃). Kao inicijator polimerizacije, kokatalizator, koristio se dietil aluminijum hlorid u vidu razblaženog rastvora (20%) u heptanu.

Takođe, u rastvarač je dodavan eksterni donor elektrona, toluol, u cilju povećanja selektivnosti katalizatora, ali i da bi se smanjila količina amorfnog polimera, odnosno ataktičkog polipropilena koji ostaje rastvoren u rastvaraču i kasnije se izdvaja kao nus-proizvod. Čestice polipropilena nastaju na česticama katalizatora koji imaju nepravilan oblik. Posledično, čestice polimera takođe su nepravilnog oblika, veličine od nekoliko mikrona do oko 2 mm, sa značajnom poroznom strukturom, što uzrokuje nisku nasipnu gustinu PP praha, do $0,40 \text{ g/cm}^3$.

Industrijski postupak proizvodnje polipropilena suspenzionim procesom u heptanu kao rastvaraču se odvija u dva stepena (u dva redno vezana reaktora). Uslovi u prvom reaktoru su: pritisak 0,9 MPa i temperatura 70°C , a u drugom reaktoru: pritisak 0,45 MPa i temperatura 70°C . Terminacija polimerizacije se vrši vodonikom, koji se uvodi u reaktor u kontrolisanim količinama, u skladu sa ciljanom molekulskom masom polimera, odnosno tipom proizvoda koji se proizvodi.

Polimerna suspenzija se uvodi u degaser, gde se nepolimerizovan propilen izdvaja na temperaturi 80°C . Propilenski tok koji nastaje degazacijom reaktora, utečnjava se kompresijom, a zatim se vraća se u proces prečišćavanja. Degazirana polimerna suspenzija se vodi dalje u proces dekompozicije katalizatora. Ovaj proces se odvija reakcijom sa butanolom koji se dovodi u obliku azeotropne smeše, na temperaturi od 80°C .

Polimerna suspenzija se posle dekompozicije uvodi na ekstrakciju katalitičkih ostataka u vodeni sloj koji se stvara uvođenjem demineralizovane vode u ekstraktor. Neutralizacija hlornih jedinjenja nastalih iz katalizatora i dietil aluminijum hlorida se vrši natrijum hidroksidom. Temperatura u ekstraktoru se održava na 80°C i neutralizacija se vrši u vodenom sloju do vrednosti pH između 10 i 12.

U separatoru se vrši odvajanje gornjeg organskog sloja polimerne suspenzije (suspenzija PP čestica u heptanu) i donjeg vodenog sloja sa neutralizovanim katalitičkim ostacima i butanolom. Organski sloj sa PP česticama se dalje obrađuje u centrifugi, dok se vodeni sloj odvodi u kolonu za odvajanje butanola.

4.3.2 Proces proizvodnje polipropilena korišćenjem katalizatora II generacije

Odmah nakon startovanja postrojenja sa katalizatorom I generacije u skladu sa licencnom tehnologijom, pojavili su se novi katalizatori II generacije, tzv. mikrosferični katalizatori. Ovi katalizatori su takođe na osnovi titanijum trihlorida, ali sa poboljšanim, sferičnim oblikom čestica i poboljšanim sistemom interni/eksterni donor.

Nakon izvršenih proba, izabran je odgovarajući mikrosferični katalizator II generacije. Prelaz na rad sa mikrosferičnim katalizatorima znatno je doprineo poboljšanjima i uštedama neka od njih su prikazana u nastavku:

1. Kontrolisana morfologija i sferični oblik čestica katalizatora sa malim volumenom pora preslikava se i na oblik čestica polimera (replikacioni fenomen), što je doprinelo značajnom povećanju nasipne gustine praha polipropilena (PP praha), do oko $0,50 \text{ g/cm}^3$. Ovo povećanje nasipne gustine PP praha je omogućilo povećanje kapaciteta postrojenja za 20%, sa 30.000 t/god. na 36.000 t/god, sa nepromenjenim utrošcima sirovina i energije.
2. Aktivnost katalizatora je povećana tri puta, sa oko 1,6 t PP/kg kat. na oko 5 t PP/kg kat.
3. I ako su operacije dekompozicije i izdvajanja katalitičkih ostataka ekstrakcijom ostale nepromenjene, smanjen je sadržaj katalitičkih ostataka u polimeru i na taj način je omogućena proizvodnja specijalnih tipova polipropilena.

Da bi se zadržao oblik čestica katalizatora i da ne bi došlo do raspada čestica usled velike početne brzine polimerizacije, neophodno je bilo da se uvede operacija prepolimerizacije katalizatora sa malim količinama propilena. Instaliran je reaktor sa mešalicom za prepolimerizaciju.

Upotrebom mikrosferičnog katalizatora u Hipolu je postignuta višestruko veća aktivnost i poboljšana je selektivnost u odnosu na katalizator I generacije. Međutim, ovo povećanje aktivnosti, i tome odgovarajuće povećanje prinosa polimera na česticama katalizatora, još uvek nije obezbedilo dovoljno nisku koncentraciju katalitičkih ostataka u polimeru, što bi omogućilo isključivanje operacija dekompozicije i ekstrakcije katalitičkih ostataka iz polimera (Stamenković i Markuš, 2004).

4.3.3 Uvođenje visokoaktivnog katalizatora prilagođenog uslovima proizvodnje u Hipol-u

Nakon uvođenja II generacije katalizatora, postupak izdvajanja katalitičkih ostataka iz polimera je još uvek bio neophodan deo procesa proizvodnje, što je uticalo kako na kvalitet proizvoda, tako i na povećanu potrošnju energije i pojedinih sirovina. Zbog toga je dalji cilj bio razvijanje visokoaktivnog katalizatora (IV generacije) na nosaču sa aktivnošću koja omogućava postizanje niskih koncentracija katalitičkih ostataka u polimeru.

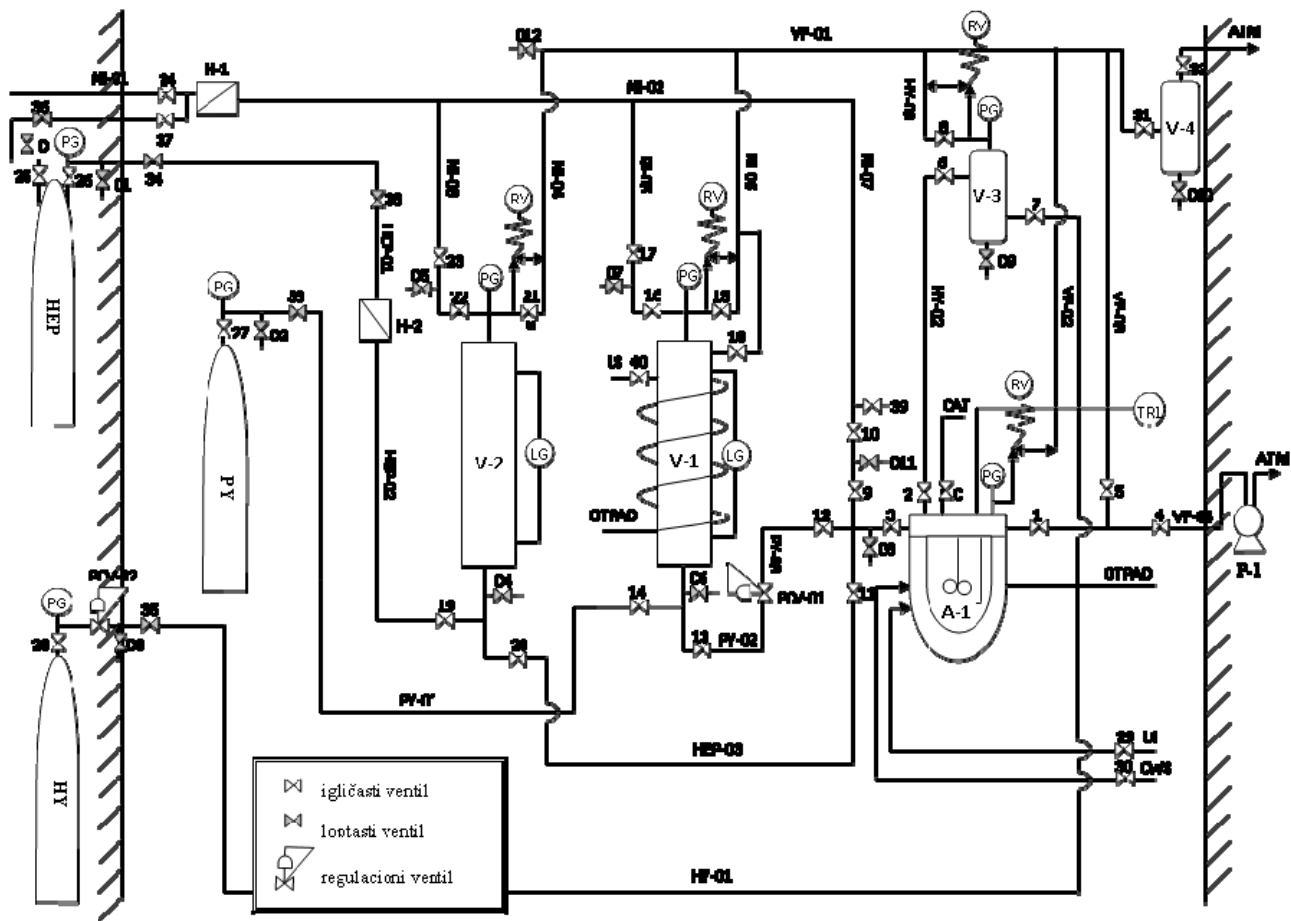
Visokoaktivni katalizator se sastoji od titanijum tetrahlorida koji se nanosi na nosač, aktiviran magnezijum hlorid. Katalitički kompleks sadrži kokatalizator - trietil aluminijum, koji predstavlja interni elektron donor i ima ulogu kontrole selektivnosti. Tokom pripreme katalitičkog kompleksa dodaje se i eksterni elektron donor, obično alkil alkoksilan.

Prvi korak pripreme katalitičke smeše je prepolimerizacija katalizatora. Katalizator se pre uvođenja u polimerizacioni reaktor mora prepolimerizovati na veoma blagim reakcionim uslovima, da bi se čestice katalizatora zaštitile od destrukcije do koje bi došlo usled velikih inicijalnih brzina polimerizacije, koje se ostvaruju u industrijskom reaktoru. Prepolimerizovani katalizator se uvodi u posudu za pripremu katalitičke smeše u koju se dodaje kokatalizator i eksterni elektron donor. U zavisnosti od potrebe, ove komponente se mogu dodavati i direktno u reaktor. Tako pripremljena katalitička smeša se u obliku suspenzije u rastvaraču koristi u polimerizaciji (Stamenković i Markuš, 2004).

Pre uvođenja visokoaktivnog katalizatora bilo je neophodno izvršiti ispitivanja sa različitim tipovima katalizatora kako bi se izabrao katalitički kompleks koji odgovara procesu proizvodnje u Hipolu i donosi određena unapređena. Šest različitih visokoaktivnih katalizatora je ispitivano kako bi se došlo do optimalnog rešenja, pri različitim uslovima polimerizacije (P, T, vreme). Posebno je bilo važno praćenje uticaja sastava katalizatora na reakciju polimerizacije.

Ispitivanja različitih tipova katalizatora su vršena u laboratorijskom reaktoru čija je šema data na slici 4.9.

Pre početka ispitivanja u laboratorijskom reaktoru bilo je potrebno inertizovati sve linije, merne posude i reaktor prodivavanjem azota. Inertizacija je neophodna kako bi se uklonili kiseonik i vlaga, koji predstavljaju katalitičke otrove i mogu značajno uticati na ispitivanja katalizatora. U mernu posudu V-2 uvodi se heptan, u V-1 propilen, a u V-3 vodonik. Reaktor se vakumira i ispira sa propilenom. U čist reaktor uvodi se prvo heptan, katalitička suspenzija i na kraju propilen. Prepolimerizacija se vrši pri malom pritisku i temperaturi, a zatim se (u periodu od sedam minuta) povećava pritisak i temperatura (pritisak do 1 MPa i temperatura do 70°C), uvodi se vodonik i vrši se polimerizacija propilena. U toku prvih pola sata polimerizacije parametri i potrošnja propilena se beleže na 10 minuta, a kasnije do kraja polimerizacije na pola sata. Dobija se polipropilen u obliku praha koji je suspendovan u rastvaraču heptanu. Nastala polimerna suspenzija se filtrira, prah polipropilena se suši i koristi se za određivanje aktivnosti katalizatora, za određivanje izotaktnog indeksa (I.I) i totalnog izotaktnog indeksa (T.I.I).



Slika 4.9 Šema laboratorijskog reaktora (RU Laboratorijski reaktor, 2014)

Prilikom ispitivanja različitih tipova visokoaktivnih katalizatora, veoma važno je bilo praćenje njihovog uticaja na postupak polimerizacije i utvrđivanje optimalnog sastava katalitičke smeše, i to:

- optimalne koncentracije kokatalizatora trietil aluminijuma prikazane pomoću molskih odnosa Al/Ti,
- optimalne koncentracije eksternog elektron donora izražene pomoću molskog odnosa Si/Ti i
- upoređivanje uticaja strukture dva eksterna elektron donora, alkil alkoksisilana - cikloheksil metil dimetoksisilan (silan C) i diciklopentil dimetoksisilan (silan D).

Uticaji sastava katalitičke smeše razmatrani su u odnosu na osnovne karakteristike polimerizacije:

- prinos proizvoda, izotaktnog polipropilena (PP) u t PP/g Ti
- relativni prinos sporednog proizvoda, ataktnog polipropilena (APP) u kg APP/t PP.

Ispitivanja su vršena u uslovima industrijske proizvodnje polipropilena u Hipolu i to sa većim (4×10^5 - $5,5 \times 10^5$ g/mol) i sa manjim (oko 3×10^5 g/mol) molekulskim masama polimera (Dingova, 2006).

Koncentracija kokatalizatora - trietil aluminijuma u katalitičkoj smeši je veoma važan faktor uzimajući u obzir njegovu ulogu u procesu polimerizacije. Naime, prva uloga trietil aluminijuma je aktivacija aktivnih centara na atomima titanijuma, pri čemu dolazi do redukcije 4-valentnog titanijuma u trovalentni oblik, koji se smatra oblikom najaktivnijim u polimerizaciji propilena. Trietil aluminijum učestvuje takođe u inicijaciji reakcije, tako što svojim etil grupama vrši alkilaciju potencijalnih aktivnih centara. Da bi se ostvarila uloga trietil aluminijuma u katalitičkom dejstvu, on se mora nalaziti u katalitičkoj smeši u odgovarajućoj koncentraciji. Ako je njegova koncentracija znatno veća od optimalne, odnosno potrebne koncentracije, dolazi do dalje redukcije titanijuma u dvovalentan oblik, koji se smatra skoro neaktivnim u polimerizaciji. Pored toga, pri većim koncentracijama trietil aluminijuma otežava se pristup monomera aktivnim centrima. Uloga trietil aluminijuma je i u prečišćavanju sirovina, reakcione smeše i reaktorskog okruženja od katalitičkih otrova, kao što su voda, kiseonik, ugljen dioksid.

Određivanje optimalne koncentracije kokatalizatora u Hipolu je bilo neophodno da bi se postigao što veći prinos polimera po gramu katalizatora. Postizanje što većih prinosa polimera je bilo važno ne samo zbog poboljšanja ekonomske efikasnosti procesa, već i zbog smanjenja sadržaja katalitičkih ostataka u proizvodu, koje imaju ključan efekat na kvalitet polimera. Pri ispitivanju visoko aktivnog katalizatora, u proizvodnji polipropilena sa većim molekulskim masama, sa silanom C vrednost optimalnog molskog odnosa Al/Ti iznosi 160, dok sa silanom D vrednost molskog odnosa iznosi oko 170. Zapaženo je da struktura silana D obezbeđuje povećanje prinosa polimera sa 1,5 na 1,75 t PP/g Ti.

U proizvodnji polipropilena sa manjim molekulskim masama određen je optimalni molski odnos Al/Ti u vrednosti od 190, sa silanom C. Iz ispitivanih zavisnosti se može zaključiti da je prinos polimera manjih molekulskih masa nešto veći (oko 1,75 u upoređenju sa prinosom od oko 1,5, za veće molekulske mase). Ovo povećanje se može objasniti većom brzinom nastajanja kraćih polimernih lanaca, odnosno, ako se uzme u obzir kinetička kriva polimerizacije i činjenica da u početnom vremenu rasta polimernog lanca je brzina reakcije značajno veća u upoređenju sa kasnijim stadijumima reakcije (Dingova, 2006).

Indeks izotaktnosti, tj. u posmatranom slučaju udeo izotaktnog polipropilena u ukupno nastalom polimeru, znatno opada sa vremenom. Ako bi se reakcija polimerizacije odvijala bez dodatka elektron donora, nastalo bi samo 30-50% izotaktnog polimera u zavisnosti od koncentracije trietil aluminijuma. Kada se na nosač katalizatora ugradi interni elektron donor, izotaktnost se povećava na oko 80%. Međutim, pri većim koncentracijama trietil aluminijuma, on istiskuje interni elektron donor iz katalizatora tako da efekat njegovog delovanja potpuno nestaje. Tek uvođenjem sledeće komponente, tzv. eksternog donora, koji se dodaje pre uvođenja katalitičke smeše u polimerizaciju, dobija se izotaktni polipropilen koji se može koristiti u komercijalne svrhe, a u kome sadržaj izotaktnog polimera mora biti minimalno 96%.

U literaturi postoje različita tumačenja uloge eksternog donora u povećanju indeksa izotaktnosti. Ono što se takođe navodi je i činjenica da dodatkom eksternog donora dolazi i do povećanja brzine polimerizacije i prinosa izotaktnog polipropilena, u nekim

slučajevima čak i za 50%. Ovaj efekat je zapažen i u slučaju Hipol-a, pri čemu se prinos izotaktnog polipropilena povećava samo do određenih koncentracija eksternog donora. U Hipolu su izvršena ispitivanja za dva tipa eksternog donora, silan C i silan D, kako bi se pronašao optimalan odnos koncentracije eksternog donora u odnosu na koncentraciju katalizatora i za odgovarajući prinos izotaktnog polipropilena. To su koncentracije u opsegu od 9 do 13 molova silana po molu Ti u proizvodnji polipropilena većih molekulskih masa i koncentracije u opsegu 10 do 14 u proizvodnji polipropilena manjih molekulskih masa.

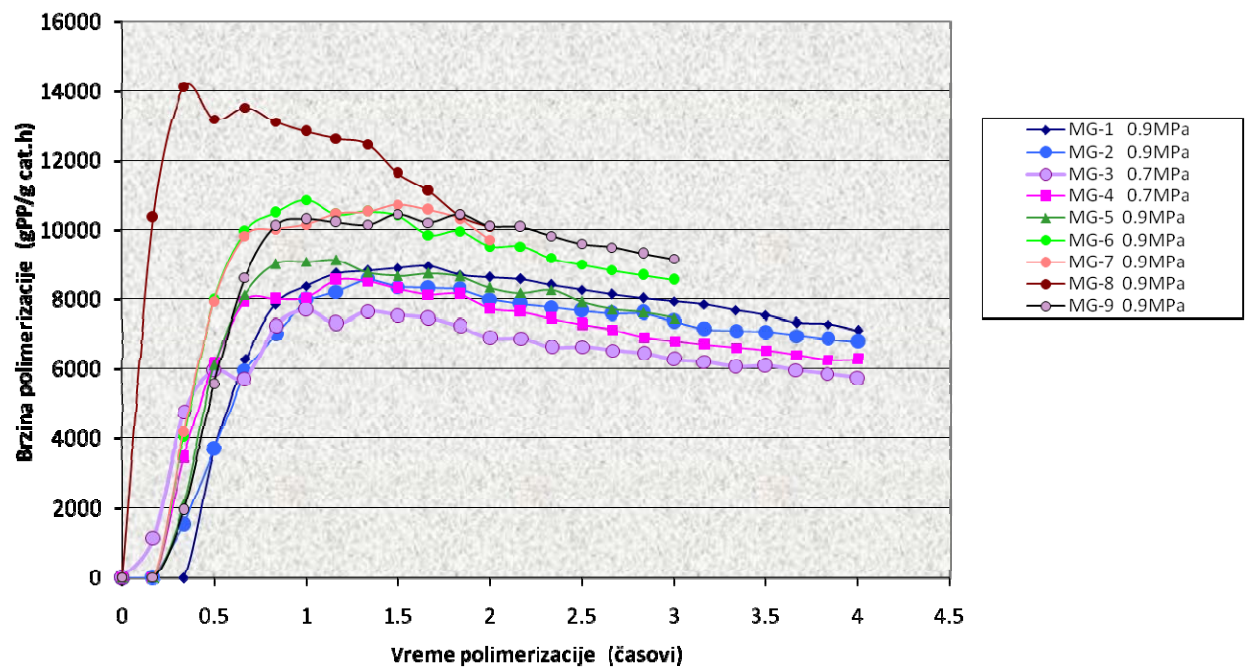
Pri konačnom izboru visoko aktivnog katalizatora u Hipolu uzeti su u obzir svi ispitivani parametri, prinos izotaktnog polipropilena pri različitim koncentracijama kokatalizatora i eksternog donora, uticaj različitog tipa eksternog donora, udeo ataktnog polipropilena. Jedan od zahteva je da pri optimalnim koncentracijama pojedinih komponenti u katalitičkoj smeši, na kojima se postižu najbolji prinosi izotaktnog polipropilena, prinos ataktnog polimera iznosi oko 1,5% za polimer većih molekulskih masa i oko 2% za polimer manjih molekulskih masa.

Rezultati ispitivanja za izabrani Z-N katalizator su prikazani u tabeli 4.4 i preko dijagrama na slikama 4.10 i 4.11.

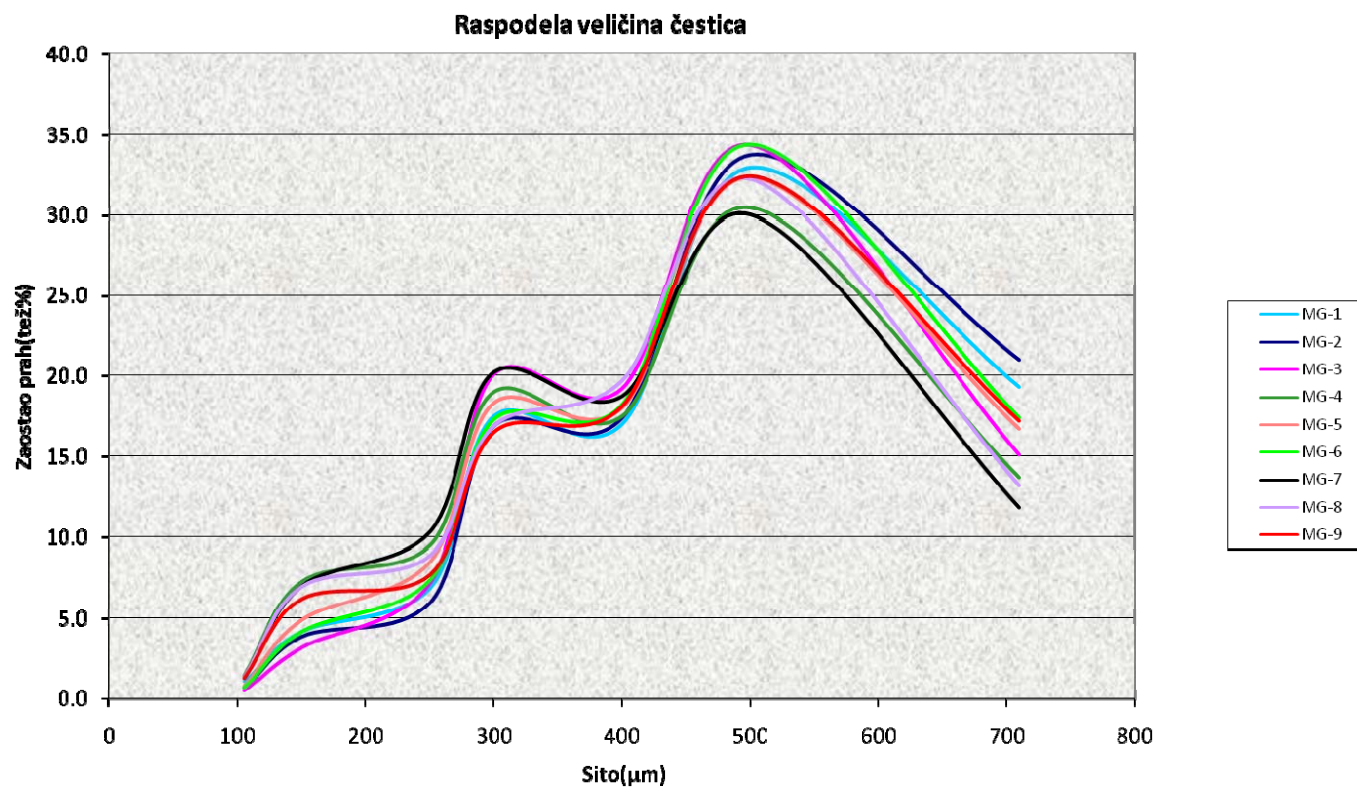
Tabela 4.4 Rezultati ispitivanja izabranog katalizatora u Hipolu

ZN 512-2VS, C- donor													
Oznaka testa	Katalizator [mg]	Al : Si : Ti [mol/mol]	Tem. [°C]	P [MPa]	Vreme [h]	H ₂ [MPa]	Konc. suspen. [mas%]	APP u hept. [g/l]	Heptan u vlaž. PP [mas%]	PP [g]	Prinos [g PP/g kat]	MFR [g/10 min]	I.I. [mas%]
MG-1	19,9	284 : 10 : 1	70	0.9	4	0,3	44	7,5	79	567	28.470	3,01	97,3
MG-2	19,5	299 : 10,2 : 1	70	0.9	4	0,3	43	6,7	77	530	27.170	4,15	97,7
MG-3	18,7	301 : 9,9 : 1	70	0.7	4	0,3	38	5,2	77	430	22.300	5,4	97,6
MG-4	18,9	303 : 9,8 : 1	70	0.7	4	0,3	40	5,6	76	474	25.090	6,3	97,5
MG-5	19,9	293 : 9,3 : 1	70	0.9	3	0,3	38	5,2	75	446	22.390	4,24	97,4
MG-6	19,7	301 : 10,1 : 1	70	0.9	3	0,3	41	5,1	76	505	25.620	4,12	97,5
MG-7	20,2	295 : 9,9 : 1	70	0.9	2	0,3	35	3,4	76	392	19.400	4,43	97,3
MG-8	19,2	305 : 10,4 : 1	70	0.9	2	0,3	35	3,5	75	387	20.140	6,6	97,4
MG-9	19,4	302 : 10,3 : 1	70	0.9	3	0,3	81	6,4	81	533	27.460	4,38	97,4

Polimerizacione krive za katalizator ZN 512-2VS



Slika 4.11 Polimerizacione krive izabranog katalizatora



Slika 4.12 Raspodela veličine čestica izabranog katalizatora

5. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA – UTICAJ NA ŽIVOTNU SREDINU

5.1 Rezultati RECP opcija u termoelektrani TENT A – indikatori eko-efikasnosti

Oko 60% identifikovanih RECP mera implementirane su u periodu od 2011. do 2013. godine. Za potrebe predstavljanja rezultata implementiranih mera, prikupljeni su podaci o potrošnji sirovina i pomoćnih materijala, proizvodnji, emisijama i kvalitetu uglja, itd. u pomenutom periodu. Kao referentna godina, izabrana je 2010, a dobijeni podaci i uštede upoređeni su sa podacima iz referentne godine.

Razvijeno je nekoliko metoda zasnovanih na indikatorima za izveštavanje i monitoring, kako bi se povezalostanje u životnoj sredini i učinak industrije (Al-Sharrah i saradnici, 2010; Park i Behera, 2014; UNCTAD, 2004). Međutim, Van Caneghem i saradnici (2010) ukazali su na nedostatak istraživanja u kojima su indikatori primenjivani na realne podatke o emisijama i na realnu proizvodnju ili finansijske podatke. Takođe, u literaturi su uvedeni indikatori eko-efikasnosti za različite kategorije uticaja u šest industrijskih sektora (ali ne i sektor energetike), tako što su uticaji podeljeni prema relevantnim ekonomskim indikatorima.

Sličan pristup primenjen je u TENT, odnosno, primenjeni su indikatori eko-efikasnosti posebno prilagođeni potrebama postrojenja. Razvijeni su indikatori eko-efikasnosti za sledeće kategorije: potrošnja energije, klimatske promene, acidifikacija i generisanje otpada. Podaci koji su prikupljeni tokom procene, kao i kasnije pomoću merenja, korišćeni su za proračun, a rezultati su prikazani u tabelama 5.1 – 5.4, dok je poređenje ukupnih emisija i potrošnje sa odgovarajućim indikatorima eko-efikasnosti prikazano na slikama 5.1 – 5.4. Uticaji na životnu sredinu, potrošnja sirovina i nastajanje otpada podešeni su na vrednost 100, za referentnu 2010. godinu (Van Kanegem i saradnici, 2010). Podaci dobijeni za period 2011 - 2013. prikazani su kao procenti u odnosu na 2010. godinu:

$$y = \text{vrednost } (y) * 100 / \text{vrednost } (\text{ref. godina})$$

gde je:

y – podaci prikazani na slikama 5.1, 5.2 i 5.3 (t uglja godišnje; t uglja/MWh; t CO₂e/g; tCO₂e/MWh; t SO₂e/g; tSO₂e/MWh),

vrednost (y) – realne vrednosti dobijenih podataka za 2011, 2012. i 2013. (t uglja godišnje; t uglja/MWh; t CO₂e/g; tCO₂e/MWh; t SO₂e/g; tSO₂e/MWh),

vrednost (ref. godina) – realne vrednosti za 2010. (t uglja godišnje; t uglja/MWh; t CO₂e/g; tCO₂e/MWh; t SO₂e/g; tSO₂e/MWh).

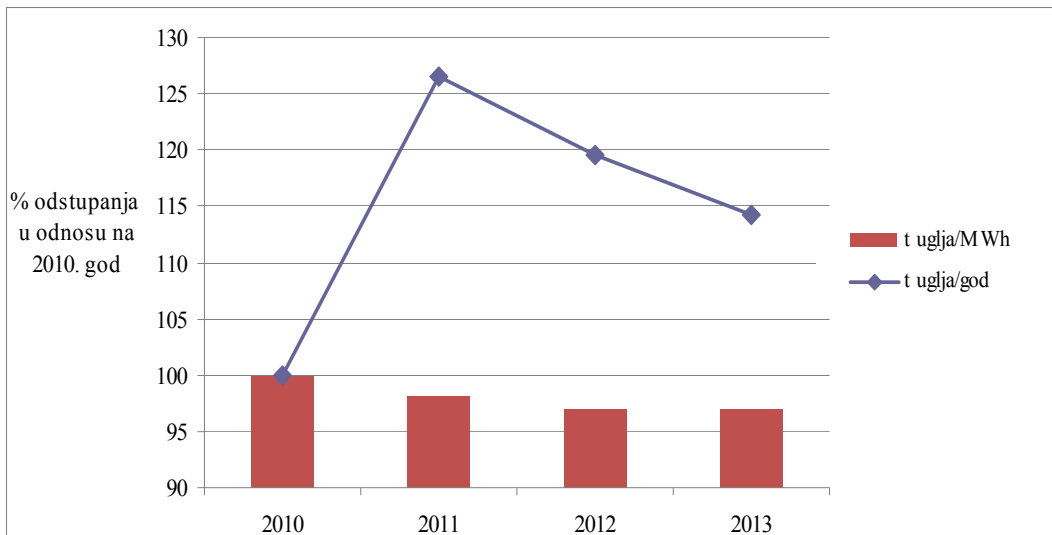
5.1.1 Potrošnja energenta

Uticaj kategorije potrošnje energije obično se odnosi na potrošnju toplotne i električne energije. U slučaju TENT A, izabrana je količina korišćenog uglja kao glavne sirovine. Indikator eko-efikasnosti za potrošnju energije izračunat je kao odnos godišnje količine utrošenog uglja prema godišnjoj proizvodnji električne energije.

Podaci za potrošnju uglja (tabela 5.1) dobijeni od kompanije, pokazuju povećanje za 20 – 30% u odnosu na 2010. godinu, kao rezultat povećane proizvodnje električne energije. U isto vreme, smanjenje vrednosti indikatora eko-efikasnosti za energiju, tone uglja po MWh proizvedene električne energije, ukazuje na poboljšanje energetske efikasnosti.

Tabela 5.1 Potrošnja uglja i indikatori eko-efikasnosti za energiju u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

Godina	t uglja godišnje	t uglja/MWh
2010.	13.053.667	1,52127
2011.	16.515.699	1,49352
2012.	15.609.092	1,47520
2013.	14.921.422	1,47443



Slika 5.1 Promene u % u potrošnji uglja i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za energiju u odnosu na referentnu godinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

Slika 5.1 pokazuje da iako postoji povećanje potrošnje uglja, indikator eko-efikasnosti za potrošnju energije je smanjen za 3% u periodu 2010 – 2013. Izračunate su uštede u poređenju sa referentnom godinom, i dobijene su sledeće vrednosti: 306.831 t uglja u 2011; 487.480 t uglja u 2012; 473.948 t uglja u 2013. Uštede su rezultat primenjenih mera sirovinski efikasne i čistije proizvodnje, pres svega mere koja se odnosi na povećanja snage jednog od blokova. Približno jedna trećina ušteda povezana je sa drugim implementiranim merama: poboljšanje zaptivanja Luva u 4 bloka, poboljšanje zaptivenosti kotla i kondenzatora i popravka izolacije cevovoda i armature. Implementacijom preostalih identifikovanih mera moglo bi se ostvariti smanjenje specifične potrošnje energije za 5%.

5.1.2 Generisanje otpada

Jedan od ključnih problema u životnoj sredini u TENT A povezan je sa velikom količinom pepela koji se generiše i sa načinom njegovog odlaganja. Kategorija uticaja generisanja otpada izražava se kao godišnja količina nastalog pepela, dok je indikator eko-efikasnosti prikazan kao količina nastalog otpada (pepela) po MWh proizvedene električne energije. Podaci za period 2010 - 2013. dati su u tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Količine nastalog pepela i indikatori eko-efikasnosti u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

Godina	t pepela godišnje	t pepela/MWh
2010.	2.349.660	0,27383
2011.	2.972.826	0,26883
2012.	2.809.637	0,26554
2013.	2.685.856	0,26540

Promene u količini nastalog otpada su u skladu sa promenama u količini uglja koji je korišćen za sagorevanje. U skladu sa tim, indikator eko-efikasnosti za generisanje otpada opao je za 3% kao rezultat primenjenih mera energetske efikasnosti. Dodatno smanjenje generisanog i odloženog pepela od 5% može se postići primenom mera koje su u vezi sa povećanjem energetske efikasnosti i softverskim praćenjem kvaliteta uglja. Naravno, najveći uticaj imala bi mera vezana za iskorišćenje pepela i smanjenje njegovog odlaganja na deponiju za 50%, kako je i prikazano u opisu ove mere.

5.1.3 Emisije u vazduh

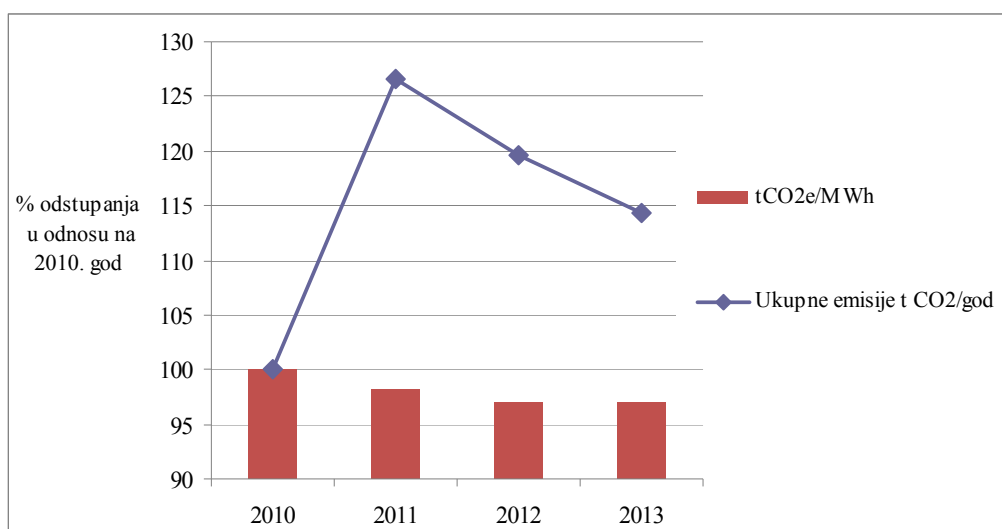
Uticaj emisija u vazduh na životnu sredinu i situacija nakon implementacije predloženih opcija prikazani su za kategoriju uticaja klimatske promene i acidifikacija. Korišćene su međunarodno predložene vrednosti za donju toplotnu moć i emisione faktore, osim za ugalj niske donje toplotne moći. Ugalj koji se dobija iz površinskih kopova u Srbiji usled svojih osobina ima znatno nižu donju toplotnu moć i više vrednosti emisionih faktora od međunarodno preporučenih vrednosti (MŽSPP, 2010).

Kategorija uticaja na klimatske promene izražena je kao ukupna emisija GHG u CO₂e, izračunata pomoću emisionih faktora za lignit iz Srbije (D'Appolonia, 2011; MŽSPP, 2010). Godišnje emisije GHG u tonama CO₂e prikazane su u tabeli 5.3.

Indikator eko-efikasnosti za klimatske promene izračunat je kao odnos godišnjih emisija i proizvedene električne energije, i dat je kao tCO₂e/MWh.

Tabela 5.3 Emisije gasova sa efektom staklene bašte i indikatori eko-efikasnosti za klimatske promene u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

Godina	t CO ₂ e/god.	tCO ₂ e/MWh
2010	10.912.866	1,272
2011	13.807.124	1,248
2012	13.049.201	1,233
2013	12.474.309	1,232



Slika 5.2 Promene u % u ukupnoj emisiji GHG i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za klimatske promene u odnosu na referentnu godinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

Na slici 5.2 se može videti da se indikator eko-efikasnosti smanjio za 3% u poređenju sa referentnom godinom, što je rezultat smanjenja specifične potrošnje uglja. Međutim, količine ukupnih emisija gasova sa efektom staklene bašte bile su veće zbog povećane proizvodnje električne energije i ukupne količine potrošenog uglja.

Indikator eko-efikasnosti za klimatske promene takođe je izračunat na osnovu laboratorijske analize kvaliteta upotrebljenog uglja. U ovom slučaju, indikator eko-efikasnosti blago je porastao u odnosu na vrednost iz 2010. godine. Razlika u

rezultatima posledica je velikih odstupanja u karakteristikama uglja koji je korišćen u analiziranom periodu (prikazano na slici 4.3).

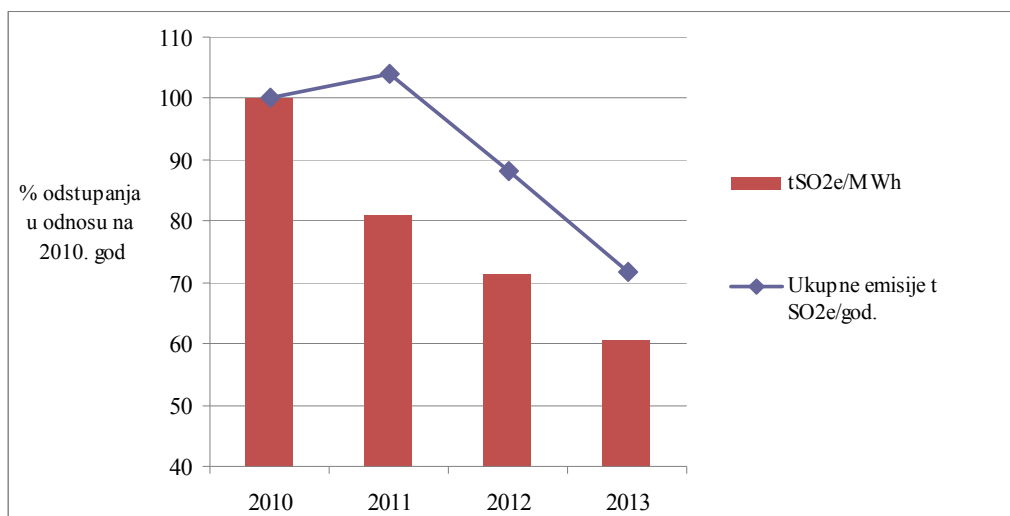
Za proračune u kategoriji uticaja na acidifikaciju, korišćeni su podaci dobijeni merenjem emisija SO₂ i NO_x. Emisije su praćene kontinuirano i za svaki blok u TENT A. Prikupljeni podaci u posmatranom periodu pomnoženi su njihovim potencijalom za acidifikaciju, kako bi se dobile ukupne emisije izražene kao SO₂e. Indikatori eko-efikasnosti izračunati su kao tSO₂e/MWh proizvedene električne energije i prikazani su u tabeli 5.4, a poređenje ukupnih emisija i indikatora eko-efikasnosti ilustrovano je na slici 5.3.

Tabela 5.4 Ukupne emisije SO₂e i indikatori eko-efikasnosti za acidifikaciju u periodu 2010 – 2013. u TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

Godina	t SO ₂ e ¹ /god.	tSO ₂ e/MWh
2010	135.572	0.0158
2011	141.200	0.0128
2012	119.597	0.0113
2013	97.065	0.0096

¹SO₂-ekvivalent emisije

Kao što je i prikazano na slici 5.3, ostvareno je smanjenje godišnjih količina emisija SO₂e i vrednosti indikatora eko-efikasnosti za acidifikaciju. Ukupne emisije SO₂e smanjenje su za 28% u periodu između 2010. i 2013. godine. U istom periodu smanjila se vrednost indikatora eko-efikasnosti za 39%. Smanjenje je uglavnom rezultat korišćenja uglja sa niskim sadržajem sumpora, što je i potvrđeno u laboratorijskim ispitivanjima uglja (slika 4.4), a u izvesnoj meri predstavlja i rezultat unapređene energetske efikasnosti. Mogu se očekivati dodatna smanjenja emisija nakon implementacije mera kao što je na primer odsumporavanje dimnih gasova.



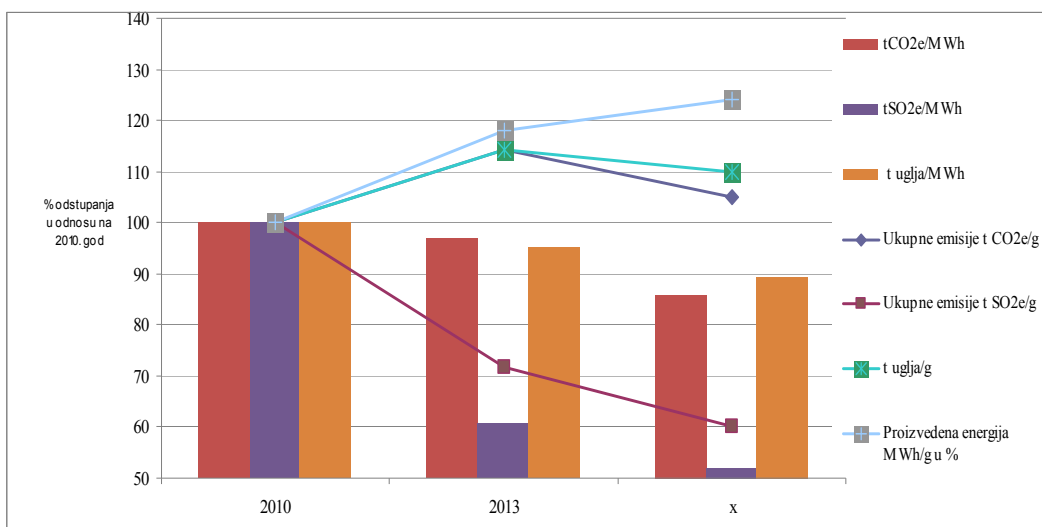
Slika 5.3 Promene u % u emisiji SO₂e i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za acidifikaciju u odnosu na referentnu godinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

5.1.4 Analiza principa *decoupling* u slučaju termoelektrane Nikola Tesla A

Princip *decoupling* je iskorišćen u ovom slučaju i prilagođen potrebama termoelektrane kako bi se prikazalo razdvajanje proizvodnje od uticaja na životnu sredinu. Korišćeni su indikatori eko-efikasnosti kojima se pokazuje razdvajanje kao rezultat implementiranih mera, kao i mogućnosti za dalja unapređenja.

Kako je i prikazano na slici 5.4, indikatori eko-efikasnosti se smanjuju za sve kategorije uticaja u 2013. godini u odnosu na referentnu godinu. U istom vremenskom periodu, proizvodnja električne energije povećala se za 18%. Razdvajanje je relativno za potrošnju energenata (*resource decoupling*) i generisanje otpada (*impact decoupling*). U slučaju kategorije uticaja na klimatske promene, *impact decoupling* je relativno zbog povećanja potrošnje uglja i ukupnih emisija CO₂ koje su u vezi s tim. Indikatori eko-efikasnosti izračunati na osnovu laboratorijskih ispitivanja bili su veći u 2011. i 2012. godini, što znači da nije bilo razdvajanja. Za kategoriju uticaja na acidifikaciju, ukupne emisije SO₂e smanjene su za 28%, a indikator eko-efikasnosti opao je za 39% u periodu između 2010. i 2013. Ove vrednosti ukazuju da je smanjenje stope uticaja na životnu

sredinu bilo veće od stope proizvodnog rasta, pa je efekat razdvajanja odnosa bio apsolutan. Nakon implementacije svih predloženih mera, proizvodnja električne energije bi porasla za 24% u poređenju sa 2010. godinom, a potrošnja uglja smanjena za 10%, ukupne emisije CO₂e za 5%, a ukupne emisije SO₂e za 40%, kako je i prikazano na slici 5.5.



Slika 5.4 Prikaz razdvajanja proizvodnje i uticaja na životnu sredinu na primeru TENT A (Vukadinović i saradnici, 2016)

5.2 Rezultati RECP opcija u Petrohemiji – uticaj primenjenih opcija na životnu sredinu

Implementacija opcija čistije proizvodnje opisanih u poglavlju 4.2 dovodi do velikih ekonomskih ušteda, ali u isto vreme predstavlja i znatne koristi za životnu sredinu. Analiza uticaja na životnu sredinu urađena je za različite kategorije u odnosu na smanjenje emisije zagađujućih materija u vazduh, smanjenje emisije u vode i iskorišćenje materijala, i smanjenje nastajanja otpada.

Posle ekstrakcije polimera iz uljnog toka u fabrici etilena, količina otpadnog polimera u otpadnoj vodi smanjena je za 270 t/god, što je dovelo ne samo do boljeg iskorišćenja

materijala, već i do smanjenja potrošnje hemikalija koje se koriste za tretman otpadnih voda, ali i do smanjenja količine otpadnih voda.

Promene aktivatora katalizatora u procesu proizvodnje polietilena visoke gustine imale su višestruke uticaje na životnu sredinu kroz smanjenje stvaranja otpadnog katalizatora (opasan otpad) za 1,500 kg godišnje i do smanjenja potrošnje gasa za aktivaciju peći za oko 30%.

Kako je i očekivano za energetske zahtevnu industriju kao što je HIP Petrohemija, većina analiziranih opcija predstavljaju tehničke mere za smanjenje potrošnje energije i poboljšanje energetske efikasnosti, uglavnom u fabrici etilena. Da bi se predstavio uticaj korišćenja energije na životnu sredinu, uvedena je i kategorija uticaja na klimatske promene kao ukupna emisija GHG izražena u CO₂e. Emisije se računaju za potrošnju toplotne energije kao direktnog, i potrošnju električne energije, kao indirektnog doprinosa uticajima na životnu sredinu. Za prirodni gas korišćen je standardni IPCC emisioni faktor (ETC, 2003) i faktor emisije ugljenika (eng. *carbon emission factor (CEF)*) za elektromrežu Srbije (D'Appolonia, 2011; MŽSPP, 2010), primenom alata za proračun, kojeg je odobrila UNFCCC.

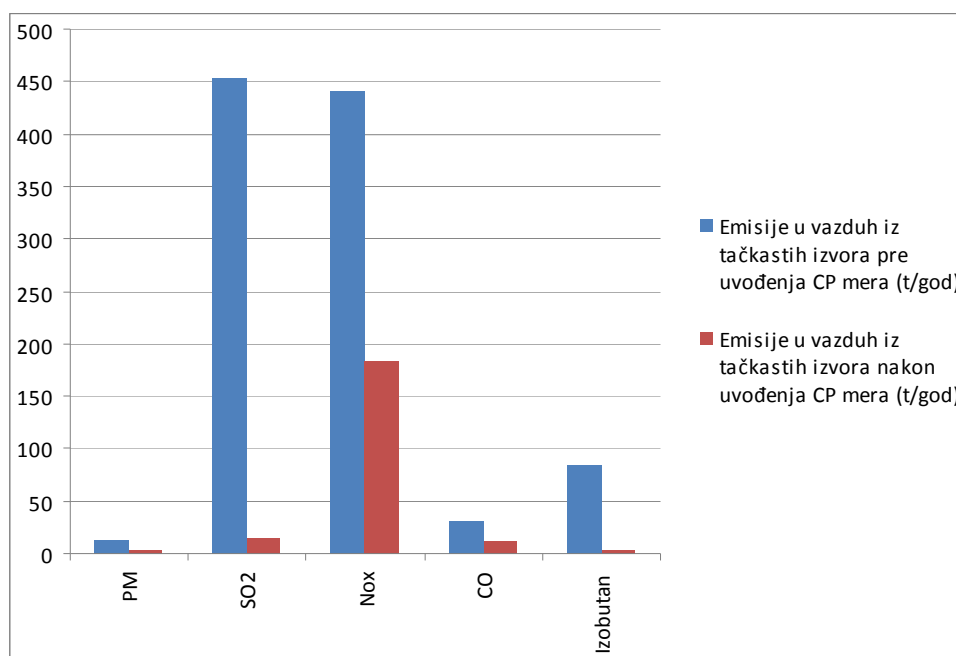
Opisane mere energetske efikasnosti dovele su do smanjenja potrošnje gasa za 17%, i industrijskih gasova sa efektom staklene bašte za 20,100 tona CO₂e.

Dodatno smanjenje potrošnje energije je postignuto redovnim praćenjem i održavanjem, odnosno primenom tzv. mera dobrog domaćinskog poslovanja, pre svega u fabrici za proizvodnju i distribuciju energetskih fluida. U periodu od godinu dana, instalirano je 200 m² izolacije na više od 50 mesta, uključujući ventile, cevi i prirubnice. Postignute su uštede od 1,250 t u proizvodnji pare, 100,000 Nm³ u potrošnji gasa i 90 t u potrošnji mazuta. Popravka i zamena neispravnih odvajača kondenzata dovela je do dodatnih ušteda i smanjenja potrošnje gasa za 192,000 Nm³. Povratni kondenzat iz razmenjivača toplote iskorišćen je za zagrevanje upravne zgrade i laboratorije, čime se smanjila potrošnja lož-ulja za 67.3 t. Izvršena je sanacija više od 1,000 mesta propuštanja vodene pare prečnika 1mm, što je smanjilo potrošnju gasa za 80,000 Nm³. Ukupna ulaganja u opcije dobrog domaćinskog poslovanja iznosile su 46,000 EUR, a ostvarene uštede iznosile su 180,000 EUR.

Pored ušteda u energiji, opisane opcije su dovele i do drugih rezultata, kao što je smanjenje demineralizovane vode za 99,200 m³ i hemikalija za 80 tona.

Dalja rekonstrukcija fabrike za PEVG, uglavnom zamena postojećeg ciklona, rezultirala je ponovnom upotrebom izobutena, za razliku od ranijih gubitaka u životnoj sredini, i time su emisije izobutana smanjenje za 80 t/god.

Izvršeno je poređenje rezultata merenja emisije zagađujućih materija u vazduh pre i posle implementacije svih mera sirovinске i energetske efikasnosti i smanjenje emisija u vazduh iz različitih tačkastih izvora (prašina, SO₂, NO_x, CO i izobutan) je prikazano su na slici 5.5.



Slika 5.5 Razlike u emisijama pre i posle implementiranih mera u slučaju HIP Petrohemija

Ipak, najvažniji rezultati kada su u pitanju emisije u vazduh se odnose se na smanjenje difuznog zagađenja i smanjenje emisija iz rezervoara. Posle rekonstrukcije rezervoara, ukupne emisije VOC smanjenje su za 92%, uključujući emisije benzena, koje su smanjenje za 1,987 kg, ili za 96%.

Za kategoriju uticaja na acidifikaciju, godišnje emisije SO₂ i NO_x u vazduh pomnožene su sa njihovim potencijalom acidifikacije, i rezultirale su ukupnim emisijama u SO₂e (Van Caneghem i saradnici, 2010). Ukupne emisije zagađujućih materija koje izazivaju acidifikaciju, izražene kao SO₂e, smanjene su za 81%. Godišnje emisije zagađujućih materija u vazduh koje doprinose stvaranju fotohemijskog smoga (npr. SO₂, NO_x, CH₄, isparljiva organska jedinjenja) su pomnožena sa respektivnim potencijalima stvaranja fotohemijskog ozona kako bi se dobile ukupne emisije izražene u etilen ekvivalentima. Imajući u vidu zagađujuće materije (ugljovodonici, benzen, toluen, ksilen-izomeri), emisije fotohemijskih zagađujućih materija i njihov uticaj smanjen je za 98%.

5.3 Rezultati RECP mera vezanih za promene tehnologije u proizvodnji polipropilena i uticaj na životnu sredinu

Nakon uspešno sprovedenih industrijskih probi i odabira odgovarajućeg visokoaktivnog katalizatora, ostvaren je visok prinos polipropilena (PP) u vrednosti od oko 30 t PP/kg katalizatora. Povećanje prinosa polimera je omogućilo isključivanje pojedinih operacija u tehnološkom procesu - operacije dekompozicije i ekstrakcije katalitičkih ostataka iz polimera.

Pored toga, uvođenje novog katalizatora je omogućilo zamenu inicijatora polimerizacije - umesto korišćenog dietilaluminijum hlorida sada se kao inicijator polimerizacije koristi trietilaluminijum. Ova zamena je omogućila sprečavanje nastanka hlornih jedinjenja, koja su zahtevala neutralizaciju sa NaOH i ekstrakciju u vodeni sloj (Stamenković i Markuš, 2004).

Poboljšanja i izmene koje su postignute zamenom katalizatora i uvođenjem visokoaktivnih katalizatora su sledeće:

1. Direktna dekompozicija katalitičkih ostataka butanolom neposredno nakon polimerizacije nije više potrebna usled povećane aktivnosti katalizatora. Umesto toga, vrši se naknadna dekompozicija katalitičkih ostataka zaostalih u rastvaraču (heptanu) dodavanjem sojinog ulja, i to nakon odvajanja rastvarača od polimera u centrifugi. Time se isključuje upotreba butanola, koristi se sojino ulje koje ima manji uticaj na životnu sredinu i postiže se ušteda energije kroz bajpas

dekompozera grejanih na 80°C.

2. Korišćenje inicijatora polimerizacije bez sadržaja hlora i niska koncentracija katalitičkih ostataka u polimeru omogućava bajpas ekstrakcije katalitičkih ostataka iz polimernog sloja u vodeni sloj. Shodno tome, nema potrebe za neutralizacijom hlornih jedinjenja sa NaOH. Time se iz upotrebe isključuje korišćenje demineralizovane vode i natrijum hidroksida i postiže ušteda energije kroz bajpas ekstraktora grejanog na 80°C.
3. Isključivanje operacija dekompozicije i ekstrakcije katalitičkih ostataka i eliminacija smeše demineralizovane vode, NaOH i butanola sa rastvaračem omogućilo je isključivanje (bajpas) iz rada destilacione kolone azeotropa i destilacione kolone za izdvajanje butanola. Ove kolone se sada koriste za proizvodnju smeše propan-butana koja se koristi za dobijanje tečnog naftnog gasa (TNG) destilacijom široke frakcije lakih ugljovodonika (ŠFLU).
4. Novi katalitički sistem je doprineo povećanju aktivnosti, ali je takođe i znatno poboljšana selektivnost katalizatora. U postupku polimerizacije nastaje manja količina ataktnog polimera, što dovodi do efikasnije potrošnje sirovina i do manjih troškova za izdvajanje ataktnog polimera iz rastvarača. Iz redovne upotrebe je isključen primarni striper, koji se koristi samo u slučajevima poremećaja.
5. Visokoaktivni katalizator je osetljiviji na prisutnost katalitičkih otrova u sirovinama. Zbog toga su instalirane posude sa odgovarajućim molekulskim sitima za prečišćavanje propilena od tragova sumpornih jedinjenja i za odvajanje tragova metanola.
6. Čestice praha polipropilena imaju pravilan sferični oblik i poroznu strukturu koja omogućava postizanje nasipne gustine od oko 0,44 g/cm³, što obezbeđuje postizanje kapaciteta postrojenja od oko 34.000 tona/god.

Pregled ostvarenih rezultata u vidu povećanja prinosa polimera i smanjenja potrošnje sirovina i energije i nastalog otpada pre i posle uvođenja nove generacije katalizatora je prikazan u tabeli 5.5.

Tabela 5.5 Proizvodnja i potrošnja sirovina i energije pre i posle uvođenja nove generacije katalizatora

Proizvodnja/utrošci	Pre uvođenja nove generacije katalizatora	Nakon uvođenja nove generacije katalizatora	Ostvareni rezultati
Broj radnih dana pogona	31	31	
Utrošak propilena hemijske čistoće (t)	2.921,38	3.114,96	Povećanje potrošnje za 193,58 t
Proizvedeni PP prah (t)	2.574,42	2.866,74	Povećanje proizvodnje PP praha za 292,32 t
Proizvedeni APP (t)	45,00	21,62	Smanjenje neželjenog proizvoda za 23,38 t
Proizvedeni vanklasni PP (t)	7,68	5,02	Smanjenje škarta za 2,66 t
Utrošak katalizatora (kg)	333,5	109,9	Smanjenje potrošnje katalizatora za 223,6 kg
Utrošak dietil aluminijum hlorida (kg)	1.618,0	-	Eliminacija dietil aluminijum hlorida
Utrošak trietil aluminijuma (kg)	-	1.065,2	Uvođenje kokatalizatora sa manjim uticajem na životnu sredinu
Ukupan utrošak donora (kg)	-	189,5	Uvođenje elektron donora
Utrošak heptana (t)	26,9	34,0	Povećanje potrošnje heptana za 7,1 t
Utrošak butanola (t)	3,1	-	Eliminacija butanola
Utrošak sojinog ulja (kg)	-	572,2	Uvođenje sirovine sa manjim uticajem na životnu sredinu
Utrošak vodonika (kg)	320.0	279.4	Smanjenje potrošnje vodonika za 40,6 kg
Utrošak azota (t)	237.5	259.0	Povećanje potrošnje azota za 21,5 t
Ukupan utrošak MS pare (pritiska 12 bar) (t)	901	670	Smanjenje potrošnje MS pare za 231 t
Ukupan utrošak LS pare (pritiska 7-8 bar) (t)	8.257	6.670	Smanjenje potrošnje LS pare za 1.587 t

Podaci koji su prikazani u tabeli 5.5 su prikupljeni i analizirani za isti mesec (avgust) i za period od 31 dan, i to u godini kada je rađeno sa drugom generacijom katalizatora i u godini kada je rađeno sa visokoaktivnim katalizatorom.

Kako bi se detaljno analizirao uticaj na životnu sredinu i svi benefiti nakon izmenjene tehnologije u slučaju Hipola, primenjeni su indikatori eko-efikasnosti. Indikatori su izračunati po istoj metodologiji koja je opisana za slučaj TENT-a u poglavlju 5.1, ali su prilagođeni proizvodnji polipropilena i potrebama postrojenja. Razvijeni su indikatori eko-efikasnosti za sledeće kategorije: potrošnja sirovina (monomera, katalizatora i drugih sirovina), potrošnja energije, klimatske promene, acidifikacija i generisanje otpadnog proizvoda. Podaci koji su korišćeni su za proračun indikatora eko-efikasnosti i vrednosti indikatora su prikazani u tabelama 5.6 – 5.11, dok je poređenje ukupnih emisija i potrošnje sa odgovarajućim indikatorima eko-efikasnosti prikazano na slikama 5.6 – 5.11. Uticaji na životnu sredinu, potrošnja sirovina, emisije i generisanje otpadnog proizvoda podešeni su na vrednost 100, za period pre uvođenja visokoaktivnog katalizatora (Van Kanegem i saradnici, 2010). Podaci dobijeni za period nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa prikazani su kao procenti u odnosu na period pre uvođenja novog katalizatora:

$$y = \text{vrednost } (y) * 100 / \text{vrednost } (\text{ref. period})$$

gde je:

y – podaci prikazani na slikama 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 i 5.11 (t propilena godišnje; t propilena/t PP; kg katalizatora godišnje; kg katalizatora/t PP; t mazuta godišnje; t mazuta/t PP; t otpadnog PP godišnje; t otpadnog PP/t PP; t CO₂e godišnje; kg CO₂e/t PP; t C₂H₄e godišnje; kg C₂H₄e/t PP),

vrednost (y) – realne vrednosti dobijenih podataka za period nakon uvođenja novog katalizatora (t propilena godišnje; t propilena/t PP; kg katalizatora godišnje; kg katalizatora/t PP; t mazuta godišnje; t mazuta/t PP; t otpadnog PP godišnje; t otpadnog PP/t PP; t CO₂e godišnje; kg CO₂e/t PP; t C₂H₄e godišnje; kg C₂H₄e/t PP),

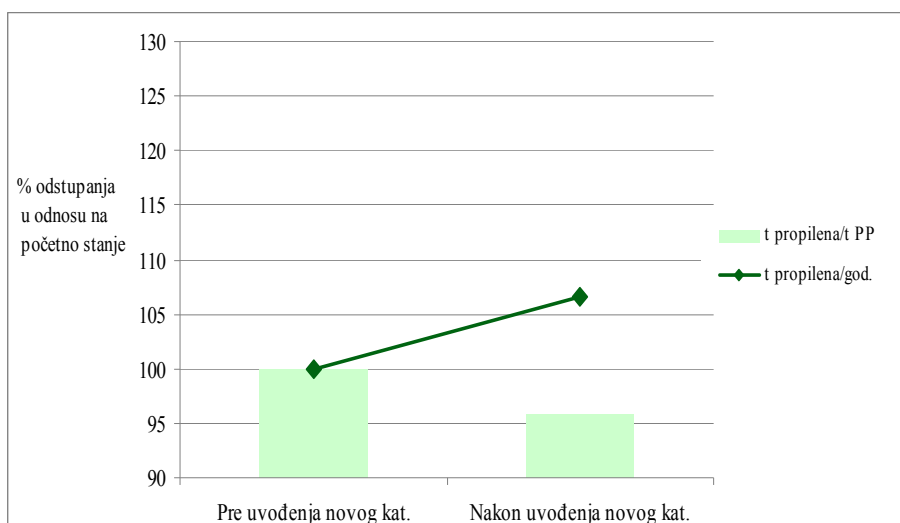
vrednost (ref. period) – realne vrednosti za period nakon uvođenja novog katalizatora (t propilena godišnje; t propilena/t PP; kg katalizatora godišnje; kg katalizatora/t PP; t mazuta godišnje; t mazuta/t PP; t otpadnog PP godišnje; t otpadnog PP/t PP; t CO₂e godišnje; kg CO₂e/t PP; t C₂H₄e godišnje; kg C₂H₄e/t PP).

5.3.1 Potrošnja sirovina

Iz tabele 5.5 se može videti da je potrošnja monomera, propilena, povećana nakon uvođenja novog katalitičkog sistema za 193,58 t u posmatranom mesecu, tj. oko 2.300 tona na godišnjem nivou. Međutim isto tako je povećan prinos polipropilena (PP) za 292,32 t u istom periodu, odnosno za oko 3.500 tona godišnje. Specifična potrošnja propilena je nakon uvođenja novog katalizatora smanjena sa 1,134 t propilena / t PP na 1,086 t propilena / t PP, kao što je prikazano u tabeli 5.6. Analogno tome je povećan i indikator proizvodnje tj. količina nastalog polipropilena po utrošenoj toni monomera. Smanjenje indikatora eko-efikasnosti za potrošnju sirovina (propilena) ukazuje na poboljšanje sirovinske efikasnosti nakon uvođenja novog katalitičkog sistema (slika 5.6).

Tabela 5.6 Potrošnja propilena i indikatori eko-efikasnosti za potrošnju sirovine (monomera) u pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa

Period	t polipropilena godišnje	t propilena/t PP
Pre uvođenja nove generacije katalizatora	35.000	1,134
Nakon uvođenja nove generacije katalizatora	37.300	1,086

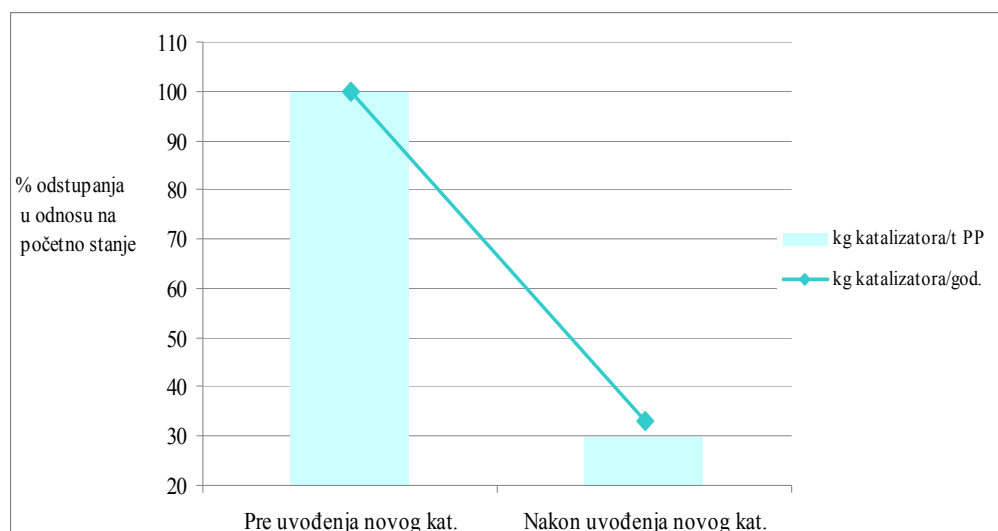


Slika 5.6 Promene u % u potrošnji monomera i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za potrošnju sirovina nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje

Kada je u pitanju potrošnja katalizatora za posmatrani period, količina utrošenog katalizatora je smanjena skoro tri puta tj. za 223,6 kg, kao što je prikazano u tabeli 5.5. Kako bi se prikazao uticaj na životnu sredinu kroz smanjenje potrošnje katalizatora, uveden je indikator eko-efikasnosti za potrošnju sirovina – katalizatora (utrošak katalizatora po jedinici nastalog polimera) i čije vrednosti su prikazane u tabeli 5.7. Takođe je na slici 5.7 prikazana promena potrošnje katalizatora i promena indikatora eko-efikasnosti gde je u oba slučaju očigledno smanjenje potrošnje i ostvaren pozitivan uticaj na životnu sredinu (specifična potrošnja katalizatora je smanjena 3,4 puta u odnosu na početnu vrednost).

Tabela 5.7 Potrošnja katalizatora i indikatori eko-efikasnosti za potrošnju sirovine (katalizatora) pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa

Period	kg katalizatora godišnje	kg katalizatora/t PP
Pre uvođenja nove generacije katalizatora	4.000	0,130
Nakon uvođenja nove generacije katalizatora	1.320	0,0384



Slika 5.7 Promene u % u potrošnji katalizatora i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za potrošnju sirovina nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje

U tabeli 5.5 je prikazana i promena u potrošnji pojedinih sirovina, kao i zamena pojedinih sirovina sirovinama koje su manje štetne po zdravlje ljudi i životnu sredinu. Najveći pozitivan uticaj na životnu sredinu, ali u isto vreme i ostvarivanje najvećih finansijskih ušteda, postignuto je zamenom kokatalizatora pri čemu se umesto dietil aluminijum hlorida koristi trietil aluminijum. Uticaj na životnu sredinu je višestruk: eliminisan je nastanak hlornih jedinjenja i time i postupak neutralizacije natrijum-hidroksidom, smanjena je potrošnja demineralizovane vode, smanjena je količina otpadnih voda i hemikalija za tretman i ostvarene su uštede u energiji usled eliminacije pojedinih operacija i manjeg rada postrojenja. Zahvaljujući povećanoj aktivnosti katalizatora nema potrebe za njegovim izdvajanjem iz polimera čime je eliminisano korišćenje butanola, dok se za izdvajanje katalizatora iz rastvarača koristi sojino ulje koje ima manji uticaj na životnu sredinu. Novi katalizator zahteva potrošnju eksternog donora (ukupan utrošak na godišnjem nivou je oko 2,2 tone), ali je uticaj daleko manji od uticaja butanola čija je potrošnja iznosila oko 37 tona godišnje. Eliminacija pojedinih sirovina je doprinela i smanjenju emisija u vazduh, što je uzeto u obzir prilikom proračuna indikatora eko-efikasnosti vezanih za emisije.

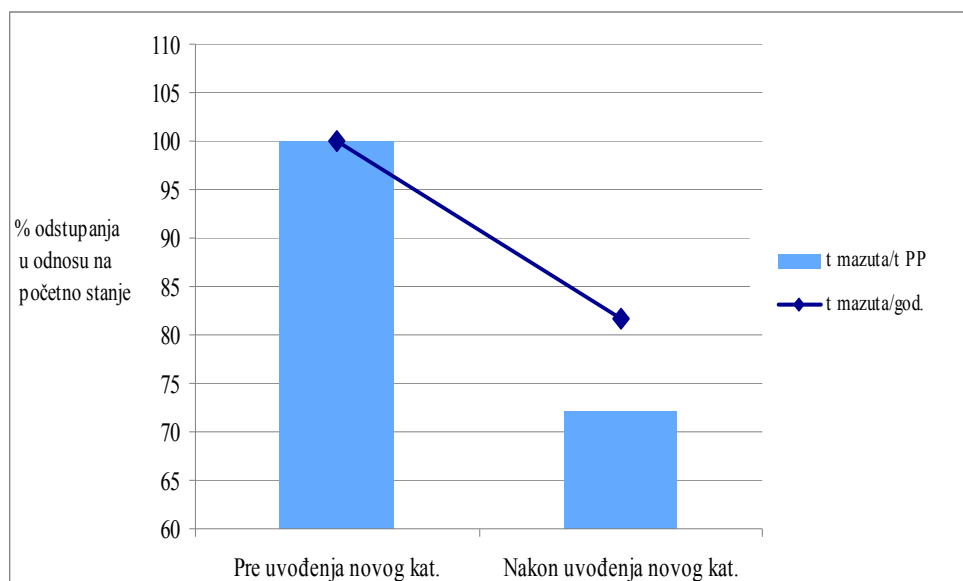
5.3.2 Potrošnja energije

Isključivanje pojedinih operacija u postupku proizvodnje polipropilena nakon uvođenja novog katalitičkog sistema je svakako imalo znatan uticaj na potrošnju energije. Vrednosti za potrošnju pare pritiska 12 bar i 7 bar u tabeli 5.5 jasno ukazuju na smanjenje potrošnje pare i samim tim i mazuta koji se koristi kao energent. Na osnovu ovih vrednosti je izračunata potrošnja mazuta i procenjene su vrednosti na godišnjem nivou. Indikator eko-efikasnosti potrošnje energije izračunat je kao odnos godišnje količine utrošenog mazuta prema godišnjoj proizvodnji polipropilena (tabela 5.8).

Na slici 5.8 je prikazano smanjenje potrošnje mazuta i smanjenje indikatora eko-efikasnosti energije u odnosu na stanje pre uvođenja novog katalizatora.

Tabela 5.8 Potrošnja mazuta i indikatori eko-efikasnosti za potrošnju energije pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa

Period	t mazuta godišnje	t mazuta/t PP
Pre uvođenja nove generacije katalizatora	7.600	0,247
Nakon uvođenja nove generacije katalizatora	6.200	0,180



Slika 5.8 Promene u % u potrošnji mazuta i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za potrošnju energije nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje

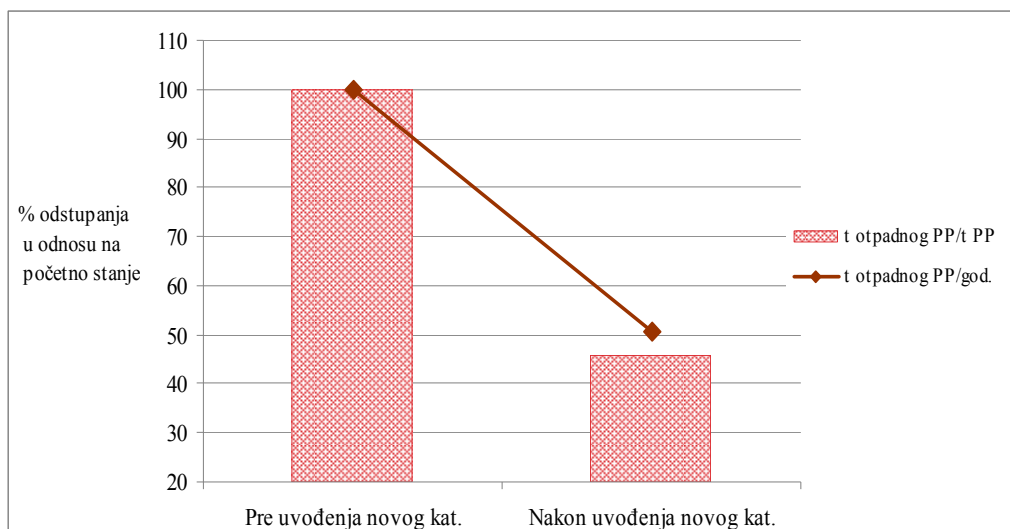
5.3.3 Generisanje otpadnog proizvoda

Promenom katalitičkog sistema je smanjen i udeo ataktnog polipropilena koji se javlja kao sporedni proizvod polimerizacije za 23,38 tona u posmatranom periodu (tabela 5.5). Pored povećanja udela željenog proizvoda tj. izotaktnog polipropilena, smanjena je količina škarta i smanjena je potrošnja sirovina i energije u procesu izdvajanja ataktnog propilena iz rastvarača. Pored ataktnog polipropilena, dodatno je smanjena količina škarta koji čini polipropilen neodgovarajućeg kvaliteta za 2,66 t u jednom mesecu, kao što je prikazano u tabeli 5.5. Ukupna količina škarta (ataktni polipropilen i polipropilen neodgovarajućeg kvaliteta) na godišnjem nivou pre i nakon promene katalizatora je data

u tabeli 5.9, kao i indikatori eko-efikasnosti koji se odnose na količine otpada iz procesa proizvodnje. Poređenje godišnjih količina otpadnog polimera sa odgovarajućim indikatorima eko-efikasnosti je dato na slici 5.9.

Tabela 5.9 Količine otpadnog polipropilena i indikatori eko-efikasnosti za generisanje otpada pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa

Period	t otpadnog polimera godišnje	t otpadnog polimera/t PP
Pre uvođenja nove generacije katalizatora	630	0,0204
Nakon uvođenja nove generacije katalizatora	320	0,0093



Slika 5.9 Promene u % u količini otpadnog polipropilena i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za generisanje otpada nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje

Sa slike 5.9 se vidi da je količina nastalog otpadnog polimera smanjena za 50% u odnosu na početno stanje, dok je vrednost eko-indikatora (količina otpadnog polipropilena po jedinici proizvoda), smanjena za čak 55%.

5.3.4 Emisije u vazduh

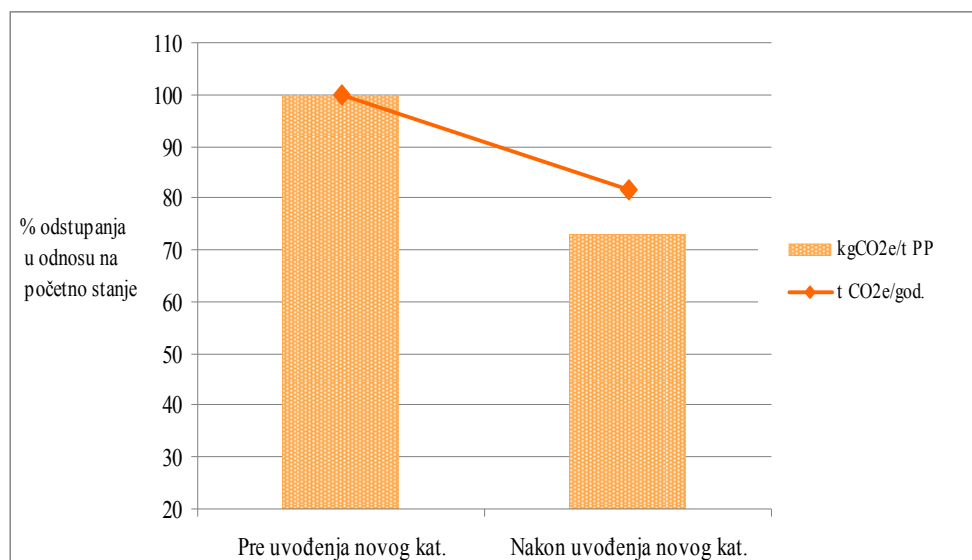
Promene vrednosti emisija u vazduh i njihov uticaj na životnu sredinu nakon promene katalitičkog sistema u Hipolu su prikazani za kategoriju uticaja klimatske promene i fotohemijskog smoga.

Kategorija uticaja na klimatske promene je direktno srazmerna potrošnji energije u kompaniji. Proračun je rađen na osnovu podataka o potrošnji mazuta, s obzirom da su promene u tehnološkom procesu imale najveći uticaj upravo na potrošnju mazuta. Emisije GHG koje potiču od korišćenja mazuta su izražene u CO₂e. Za mazut je korišćen standardni IPCC emisioni faktor (ETC, 2003), primenom alata za proračun, kojeg je odobrila UNFCCC.

Godišnje emisije GHG u tonama CO₂e pre i nakon promene katalitičkog sistema prikazane su u tabeli 5.10. Indikator eko-efikasnosti za klimatske promene izračunat je kao odnos godišnjih emisija i proizvedenog izotaktnog polipropilena, i dat je kao kgCO₂e/t PP (tabela 5.10).

Tabela 5.80 Emisije gasova sa efektom staklene bašte i indikatori eko-efikasnosti za klimatske promene pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa

Period	t CO ₂ e/god.	kgCO ₂ e/t PP
Pre uvođenja nove generacije katalizatora	24.300	789
Nakon uvođenja nove generacije katalizatora	19.800	576



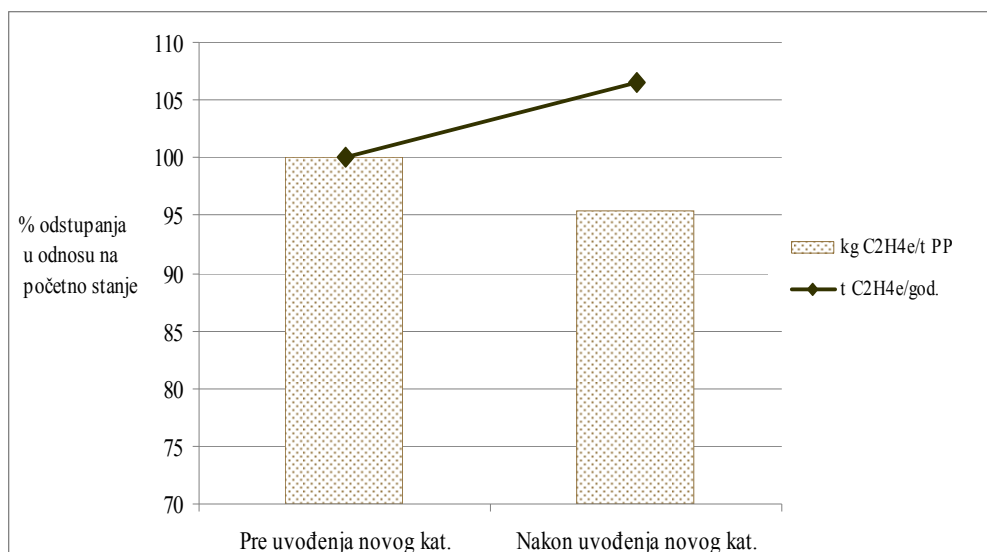
Slika 5.10 Promene u % u ukupnoj emisiji GHG i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za klimatske promene nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje

Na slici 5.10 je prikazano smanjenje ukupne godišnje emisije CO₂e koje predstavlja posledicu smanjenja potrošnje mazuta i može se videti da iznosi 20%. Takođe je još izraženije smanjenje eko-indikatora, kg CO₂e/t PP, za 27%.

Za proračune emisija u kategoriji uticaja na stvaranje fotohemijskog smoga, korišćeni su podaci prikazani u tabeli 5.5, kao i podaci dobijeni pojedinim merenjima. Kako bi se odredile ukupne godišnje emisije fotohemijskih oksidanata, količine pojedinih sirovina koje doprinose stvaranju fotohemijskog smoga (propilen, inicijatori polimerizacije, elektron donor polimerizacije, butanol) su pomnožene sa odgovarajućim konverzionim faktorima kako bi se emisije prikazale u etilen ekvivalentima (C₂H₄e). Ukupne godišnje emisije i vrednosti odgovarajućih indikatora eko-efikasnosti su dati u tabeli 5.11.

Tabela 5.11 Emisije C₂H₄e i indikatori eko-efikasnosti za stvaranje fotohemijskog smoga pre i nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa

Period	t C ₂ H ₄ e/god.	kg C ₂ H ₄ e /t PP
Pre uvođenja nove generacije katalizatora	36.065	1.170
Nakon uvođenja nove generacije katalizatora	38.425	1.117



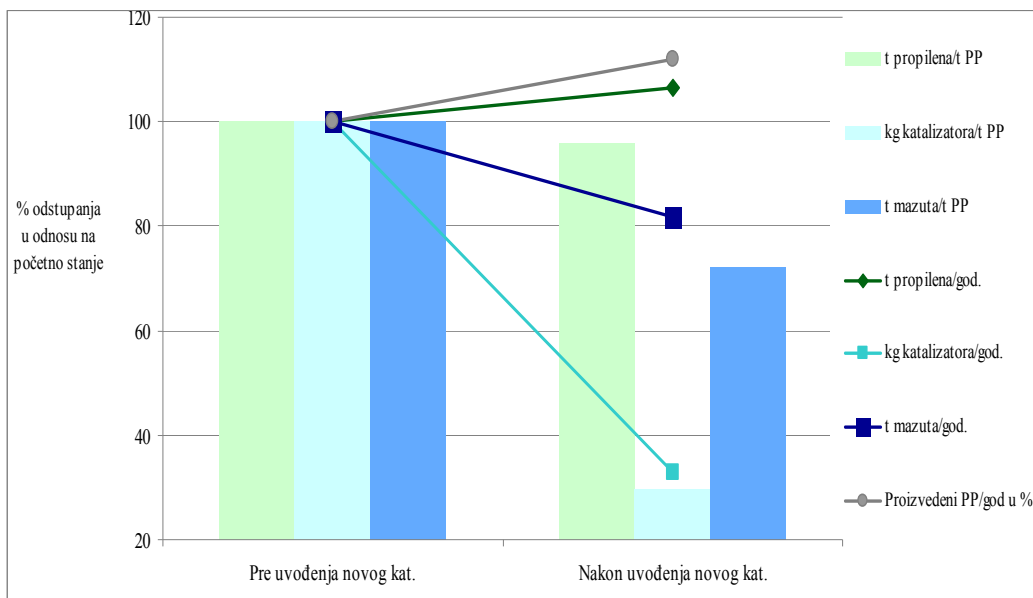
Slika 5.11 Promene u % u ukupnoj emisiji C₂H₄e i vrednostima indikatora eko-efikasnosti za stvaranje fotohemijskog smoga nakon uvođenja novog katalitičkog kompleksa u odnosu na početno stanje

Sa slike 5.11 se može primetiti povećanje ukupne količine emisija za 6% što je posledica pre svega povećanja potrošnje monomera koji, u odnosu na ostale sirovine koje su uključene u proračun emisija, je dominantan u količini. Takođe je konverzioni faktor za propilen u odnosu na ostale sirovine tri do četiri puta veći. Međutim, kada se posmatra vrednost indikatora eko-efikasnosti primećuje se smanjenje uticaja za oko 5% jer je u isto vreme povećan i prinos polimera i samim tim specifična vrednost emisije po jedinici proizvoda je manja.

5.3.5 Analiza principa *decoupling* u slučaju proizvodnje polipropilena

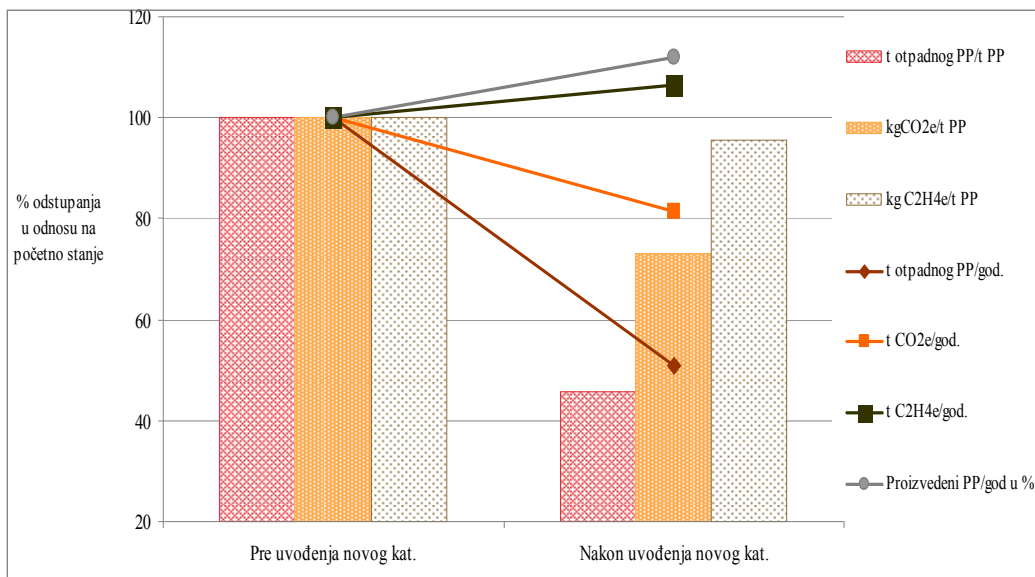
Kako bi se prikazao sveobuhvatan uticaj na životnu sredinu i razdvajanje proizvodnog rasta od potrošnje resursa i emisija, i u slučaju Hipola je primenjen princip *decoupling* koji je prilagođen potrebama proizvodnje polipropilena. Korišćeni su indikatori eko-efikasnosti kako bi se predstavilo razdvajanje kao rezultat opcije zamene katalitičkog sistema i RECP tehnike koja se odnosi na zamenu tehnologije.

Razdvajanje proizvodnje u odnosu na potrošnju sirovina (*resource decoupling*) je prikazano na slici 5.12, dok je razdvajanje proizvodnje u odnosu na generisanje otpada i emisije u vazduh (*impact decoupling*) prikazano na slici 5.13.



Slika 5.12 Prikaz razdvajanja proizvodnje i potrošnje sirovina u slučaju proizvodnje polipropilena nakon tehnoloških izmena

Kako je i prikazano na slici 5.12, indikatori eko-efikasnosti se smanjuju za sve kategorije uticaja u odnosu na početno stanje (specifična potrošnja monomera, specifična potrošnja katalizatora i specifična potrošnja energenta). U isto vreme je povećana proizvodnja izotaktnog polipropilena za 12%. Ukupna potrošnja katalizatora i ukupna potrošnja mazuta su takođe smanjene, što znači da u slučaju kategorije potrošnje sirovina – katalizatora i potrošnje energenta – mazuta je postignuto apsolutno razdvajanje. Potrošnja monomera tj. propilena se povećala nakon uvođenja novog katalizatora za 6,5% kao posledica povećanog obima proizvodnje, ali s obzirom da je indikator eko-efikasnosti smanjen (potrošnja propilena po jedinici proizvoda) za 4,3% i povećana proizvodnja za 12%, ostvareno je relativno razdvajanje.



Slika 5.13 Prikaz razdvajanja proizvodnje i uticaja na životnu sredinu u slučaju proizvodnje polipropilena nakon tehnoloških izmena

Na slici 5.13 su prikazani indikatori eko-efikasnosti koji imaju direktan uticaj na životnu sredinu – ukupni otpadni proizvod (ataktni polipropilen i polipropilen lošeg kvaliteta) i emisije u vazduh. Razdvajanje je relativno za kategoriju uticaja fotohemijskog smoga – ukupna godišnja količina emisija C_2H_4e se povećava nakon uvođenja novog katalizatora (povećanje od 6,5%), ali se povećava i proizvodnja polipropilena (za 12%) usled čega se i smanjuje vrednost indikatora eko-efikasnosti za stvaranje fotohemijskog smoga. Kod ostalih kategorija uticaja na životnu sredinu – generisanje otpadnog proizvoda i klimatske promene, imamo apsolutno razdvajanje: ukupne količine otpada odnosno emisija GHG gasova izražene kao CO_2e na godišnjem nivou, kao i odgovarajući indikatori (t otpadnog PP/t PP i kg CO_2e /t PP) se smanjuju, dok se u isto vreme povećava proizvodnja.

Kategorija uticaja fotohemijskog smoga je u direktnoj vezi sa potrošnjom propilena. To znači da bi dalja optimizacija procesa i mere sirovinske efikasnosti trebalo usmeriti ka smanjenju potrošnje monomera, a u cilju postizanja apsolutnog razdvajanja proizvodnog rasta od uticaja na životnu sredinu.

6. ZAKLJUČAK

Savremeni trend u industriji je uvođenje sve oštrijih zahteva za smanjenje/optimizaciju potrošnje energije i zaštite životne sredine. Ovo se ostvaruje, pre svega uspostavljanjem obaveza za uvođenjem novih tehnologija, kao i sveobuhvatnog pristupa pitanjima zaštite životne sredine. U isto vreme, proizvodne kompanije mogu da postanu pokretačka sila za stvaranje održivog društva kroz razvoj i implementaciju integrisanih održivih modela, kojima se eliminiše ili omogućava znatno smanjenje uticaja na životnu sredinu. To zahteva promenu u percepciji industrijske proizvodnje sa one u kojoj se proizvodnja smatra nezavisnim procesom do one u kojoj ona predstavlja jedinstveni deo jednog šireg sistema. Ovo zauzvrat iziskuje usvajanje holističkog poslovnog pristupa koji aspekte životne sredine i društva stavlja na isti nivo sa ekonomskim.

Kako je i pokazano u ovoj tezi, jedan od sveobuhvatnih pristupa zaštiti životne sredine kada je u pitanju industrijsko zagađenje je princip čistije proizvodnje. Čistija proizvodnja se zasniva na prevenciji zagađenja primenom različitih tehnika kojima se eliminiše, ili ukoliko nije moguće, smanjuje nastajanje otpada na mestu nastanka umesto klasičnog tretmana na kraju proizvodnog procesa.

U okviru ove disertacije analizirani su nedostaci postojeće metodologije implementacije koncepta čistije proizvodnje, kao i rezultati njene primene u industriji, a u cilju uspostavljanja nove, sveobuhvatnije metodologije. Ova nova metodologija je testirana na primeru termoelektrana i u polimernoj industriji. Izbor sektora na kome će se primeniti novi pristup je izvršen na osnovu njihove velike kompleksnosti. Odnosno, oba sektora su energetske veoma intenzivna i imaju značajan uticaj na životnu sredinu. Takođe, pregledom naučne i stručne literature je primećen nedostatak realnih podataka o ostvarenim rezultatima nakon primene opcija čistije proizvodnje, a naročito u sektoru energetike i polimerne industrije, što je još jedan od razloga za izbor ova dva sektora. S obzirom da je na primeru tri kompanije korišćena nova metodologija i da su u analizu uključeni realni podaci, a takođe uzimajući u obzir specifičnosti ovih postrojenja (proces proizvodnje, starost opreme i slično), nije bilo moguće vršiti poređenje sa rezultatima drugih analiza u ovoj oblasti. Poređenje je vršeno unutar samih kompanija za određeni period, odnosno pre i posle primene identifikovanih mera, dok je u slučaju

JP EPS poređenje vršeno i između termoelektrana.

Unapređenje metodologije sirovinski efikasne i čistije proizvodnje je bilo fokusirano na nove metode sakupljanja podataka neophodnih za izradu materijalnih i energetske bilansa, sagledavanje međusobnih uticaja različitih delova postrojenja i mogućnosti njegove optimizacije u celini, dodatne korake u analizi energetske bilansa i na evaluaciju opcija čistije proizvodnje sa aspekta zaštite životne sredine uvođenjem indikatora eko-efikasnosti.

Nov model za unapređenje sirovinske i energetske efikasnosti u polimernoj i srodnim industrijama sadrži sledeće elemente:

- novu proceduru sakupljanja podataka potrebnih za izradu materijalnih i energetske bilansa koji uzimaju u obzir sve specifičnosti postrojenja kada je u pitanju potrošnja resursa, energije i uticaj na životnu sredinu
- materijalni i energetski bilans, kao i relevantne indikatore koji u potpunosti prikazuju trenutno stanje postrojenja kada je u pitanju sirovinska i energetska efikasnost
- opcije čistije proizvodnje
- materijalni i energetski bilans nakon identifikovanih opcija čistije proizvodnje
- detaljnija energetska analiza primenom Pinch tehnologije, u slučajevima gde je to primenljivo
- razmatranje uticaja pojedinih delova postrojenja u cilju optimizacije celokupnog postrojenja – *Total Site Integration*
- izračunavanje indikatora eko-efikasnosti
- plan monitoringa rezultata primenjenih mera čistije proizvodnje
- prikaz rezultata preko zavisnosti proizvodnog rasta od potrošnje resursa i zagađenja životne sredine (*decoupling*).

Uspostavljeni modeli su primenjeni na sledećim industrijskim sistemima: energetskom sistemu (termoelektrane JP Elektroprivreda Srbije), petrohemijskim kompleksima sa proizvodnjom etilena i polietilena (HIP Petrohemija Pančevo), kao i proizvodnjom polipropilena (Hipol Odžaci).

Na osnovu primenjene analize dobijeni su sledeći rezultati:

- U slučaju implementacije metodologije u energetsom sektoru - na proces proizvodnje električne energije, model je primenjen na četiri termoelektrane u okviru ogranka „Termoelektrane Nikola Tesla“. Posebna pažnja je bila posvećena metodologiji sakupljanja podataka prilagođenoj termoelektranama, kao i definisanju indikatora za prikaz postojećeg stanja. Ovako detaljni bilansi i proračun specifične potrošnje različitih sirovina, vode i energije svakog bloka je omogućio poređenje performansi između blokova u okviru iste termoelektrane, kao i između termoelektrana. Dalje istraživanje je bilo usmereno na jednu od termoelektrana, TENT A, i obuhvatilo je utvrđivanje potencijala za povećanje kapaciteta blokova, unapređenje njihove efikasnosti i smanjenje specifične potrošnje energije pri proizvodnji struje, uz istovremeno smanjenje emisija u vazduh i vodu, kao i smanjenje količine stvorenog otpada u termoelektranama. Nadogradnja blokova predložena je kao jedna od primarnih mera, jer to može da bude najefikasniji način za povećanje ukupne snage i opšte efikasnosti, i za smanjenje specifičnih emisija. Analizom dva bloka pokazalo se da je moguće povećati nominalnu snagu za 60 MWe, zajedno sa povećanjem bruto efikasnosti bloka za 0,4%, uz smanjenje potrošnje uglja, vode i energije. Pored ove, predložen je još niz mera koje se odnose na smanjenje potrošnje uglja, vode i količina nastalog pepela. Podaci koji su sakupljeni i analizirani nakon implementacije predloženih mera su korišćeni za proračun indikatora eko-efikasnosti i to su: potrošnja energije, klimatske promene, acidifikacija i stvaranje otpada. Implementacija opisanih mera rezultira smanjenjem indikatora eko-efikasnosti za potrošnju energije za 3% u periodu od tri godine, smanjenjem količina nastalog otpada za 3%, i smanjenjem indikatora eko-efikasnosti za CO₂ od 3%, dok je indikator eko-efikasnosti za SO₂ smanjen za 39%. Prikazani rezultati su ukazali na to da je ukupni potencijal za unapređenje je još veći, jer u okviru preduzeća „ JP Elektroprivreda Srbije“, radi još pet termoelektrana na ugalj slične efikasnosti i sa sličnim problemima u životnoj sredini. Pored toga, model primenjen na termoelektranama i prikazani indikatori eko-efikasnosti pokazuju da se predložena metodologija može uspešno primenjivati u sektoru energetike i za poboljšanje termoelektrana.

- Predloženi pristup u istraživanju u slučaju HIP Petrohemije je fokusiran na ispitivanje sadašnjeg stanja u petrohemijском kompleksu, s ciljem da se izvrši analiza rada kompleksa i mogućnosti poboljšanja efikasnosti (energetske i sirovinske). Veliki doprinos nove metodologije se ogleda u proširenoj analizi, baziranoj na uvođenju dodatnog koraka koji se odnosi na integraciju celokupnog sistema. Ova vrsta analize je pokazala mogućnosti optimizacije procesnog i energetskeg sistema, pre svega da je moguća integracija dva nezavisna parna sistema (fabrike Etilen i pogona Energetika) čime su ostvarene znatne energetske i finansijske uštede. Takođe su prikazane i sve opcije koje dovode do unapređenja procesa i ostvarenja ekonomske koristi, što rezultira koristima i za životnu sredinu – koje se postižu kroz smanjenje emisija CO₂, smanjenje emisija u otpadne vode i količina stvorenog otpada. Za potrebe analize rezultata implementiranih mera razvijeni su specifični indikatori životne sredine, a parametri sistema potrebni za analizu procesa dobijeni su merenjima *in-situ*, u laboratorijskim ispitivanjima, i na kraju procesnim modeliranjem, optimizacijom i simulacijom. Sprovedene mere dovele su do smanjenja potrošnje energije za 17% i emisije gasova sa efektom staklene bašte za 21.000 tona CO₂e. Optimizacija procesa, tehničke modifikacije i organizacione mere dovele su do smanjenja emisija prašine za 74%, SO₂ za 97%, NO_x za 59%, CO za 66% i izobutena za 95%. Najznačajniji rezultati postignuti su smanjenjem emisija VOC za 93% posle rekonstrukcije rezervoara. Dodatno, neke od prikazanih opcija pokazale su i smanjenje potrošnje vode, iskorišćenje otpadnog polimera i smanjenje količine opasnog otpada u vidu otpadnog katalizatora.
- Primer Hipola je veoma značajan sa aspekta analize uticaja na životnu sredinu nastalog kao posledica uvođenja novih tehnologija, odnosno uvođenjem nove generacije katalitičkog sistema. Analiza je pokazala da pored poznatih benefita kao što je bolji kvalitet proizvoda, veći prinos i finansijske uštede, moguće je ostvariti znatan doprinos u smanjenju uticaja na životnu sredinu. Smanjenje potrošnje energije, hemikalija, eliminacija generisanja opasnog otpada i otpadnih voda su najvažniji rezultati analiziranih modifikacija. Uvođenjem indikatora eko-efikasnosti za različite uticaje (potrošnja monomera, katalizatora, drugih

sirovina, nastajanje otpadnog polimera, klimatske promene, nastajanje fotohemijškog smoga) je ova mera analizirana i sa ekološkog aspekta čime su njen uticaj, kao i ostvarene uštede, dobile još veći značaj. Indikatori eko-efikasnosti koji se odnose na potrošnju sirovina (specifična potrošnja monomera, specifična potrošnja katalizatora i specifična potrošnja energenta odnosno mazuta) se smanjuju za sve kategorije uticaja u odnosu na početno stanje. U isto vreme je povećana proizvodnja izotaktnog polipropilena za 12%. Ukupna potrošnja katalizatora i ukupna potrošnja mazuta su takođe smanjene, što znači da u slučaju kategorije potrošnje sirovina – katalizatora i potrošnje energenta – mazuta je postignuto apsolutno razdvajanje. Potrošnja monomera tj. propilena se povećala nakon uvođenja novog katalizatora za 6,5% kao posledica povećanog obima proizvodnje, ali s obzirom da je indikator eko-efikasnosti smanjen (potrošnja propilena po jedinici proizvoda) za 4,3% i povećana proizvodnja za 12%, ostvareno je relativno razdvajanje. Indikatori eko-efikasnosti koji imaju direktan uticaj na životnu sredinu su ukupni otpadni proizvod (ataktni polipropilen i polipropilen lošeg kvaliteta) i emisije u vazduh. Razdvajanje je relativno za kategoriju uticaja fotohemijškog smoga – ukupna godišnja količina emisija C_2H_4e se povećava nakon uvođenja novog katalizatora (povećanje od 6,5%), ali se povećava i proizvodnja polipropilena (za 12%) usled čega se i smanjuje vrednost indikatora eko-efikasnosti za stvaranje fotohemijškog smoga (za 5%). Kod ostalih kategorija uticaja na životnu sredinu – generisanje otpadnog proizvoda i klimatske promene, imamo apsolutno razdvajanje: ukupne količine otpada i ukupne količine emisija GHG gasova izražene kao CO_2e na godišnjem nivou, kao i odgovarajući indikatori (t otpadnog PP/t PP i $kg\ CO_2e/t\ PP$) se smanjuju, dok se u isto vreme povećava proizvodnja. Indikator eko-efikasnosti za klimatske promene izražen kao $kg\ CO_2e/t\ PP$ je smanjen za 27%, dok je vrednost indikatora koja se odnosi na količine generisanog otpada smanjena za 55%.

Ostvareni rezultati prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji imaju višestruku primenu. Primarni doprinos i primenljivost imaju na polju energetske efikasnosti i zaštite životne sredine. Smanjenje potrošnje energije, povećanje energetske efikasnosti, optimizacija

korišćenja resursa i smanjenje zagađenja životne sredine od izuzetnog su značaja za Republiku Srbiju, naročito u energetsom sektoru, kao i u energetski intenzivnim industrijama. Takođe emisije iz ovih sektora predstavljaju najznačajnije zagađujuće materije.

Imajući u vidu da su precizne analize, kao i pouzdani modeli formulisani korišćenjem podataka dobijenih iz analize industrijskih procesa, a koji opisuju ponašanje industrijskih procesnih sistema veoma retki, ova teza daje mogućnost dalje implementacije dobijenih rezultata na industrijski sektor Republike Srbije.

Značajan doprinos i primenljivost ostvarenih rezultata ove doktorske disertacije predstavlja razvijena metodologija sagledavanja stanja industrije, kao i sveobuhvatni pristup analizi različitih industrijskih postrojenja.

7. LITERATURA

[Abb] Abb Inc., 2009. Power Generation Energy Efficient Design of Auxiliary Systems in Fossil-Fuel Power Plants.

Available at: http://www.seeei.org.il/prdFiles/2702_desc3.pdf

Abbaszadeh, S., Hassim, M.H., 2014. Comparison of methods assessing environmental friendliness of petrochemical process design. *J. Clean. Prod.* 71, 110-117.

Abdelaziz, E.A., Saidur, R., Mekhilef, S., 2011. A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (1), 150 – 168.

Al-Sharrah, G., Elkamel, A., Almansoor, A., 2010. Sustainability indicators for decision-making and optimisation in the process industry: The case of the petrochemical industry. *Chem. Eng. Sci.* 65, 1452-1461.

APEE, 2016. Treći akcioni plan za energetske efikasnost Republike Srbije za period do 2018. godine. Službeni glasnik RS broj 1/17.

Baumgartner, R., Zielowski, C., 2007. Analyzing zero emission strategies regarding impact on organizational culture and contribution to sustainable development. *J. Clean. Prod.* 15 (13-14), 1321-1327.

BREF za energetske efikasnost, 2009. Reference Document on Best Available Techniques for Energy efficiency. European Commission, 2009.

Charmondusit, K., Keartpakpraek, K., 2011. Eco-efficiency evaluation of the petroleum and petrochemical group in the map Ta Phut Industrial Estate, Thailand. *J. Clean. Prod.* 19, 241-252.

Chew, K.H., Klemes, J.J., Wan Alwi, S.R., Manan, Z.A., 2013. Industrial implementation issues of Total Site Heat Integration. *Applied Thermal Engineering* 61, 17 – 25.

D'Appolonia, 2011. Calculation of the Carbon Emission Factor for the Serbian Power Grid. Technical Assistant for the Revision of PDDs No. 10 – 462 –H6.

Daylan, B., Ciliz, N., Mammodov, A., 2013. Hazardous process chemical and water consumption reduction through cleaner production application for a zinc electroplating industry in Istanbul. *Resources, Conservation and Recycling* 81, 1 – 7.

Dingova, E., 2006. Uticaj sastava katalizatora na polimerizaciju propilena. Kongres inženjera plastičara i gumara K-IPG 2006, 13. – 16. jun 2006, Vršac.

Dobes, V., 2013. New tool for promotion of energy management and cleaner production on no cure, no pay basis. J. Clean. Prod. 39, 255 – 264.

[EPA] U.S. Environmental Protection Agency. Neelis, M., Worrell, E., Masanet, E., 2008. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Petrochemical Industry.

[EPS] Electric Power Industry of Serbia, 2016. Annual report for the year 2015. Available at:
http://eps.rs/GodisnjiIzvestaji/Godisnji%20izvestaj%202015_%20srpski.pdf

[EPS] Electric Power Industry of Serbia, 2011. The Environment Protection Report. Available at: <http://www.eps.rs/Eng/Article.aspx?lista=Sitemap&id=10>

[EPS] Electric Power Industry of Serbia, 2009. The Green Book of the Electric Power Industry of Serbia. Available at:
<http://www.eps.rs/Eng/Documents/EPS%20-%20The%20Green%20Book.pdf>

[ETC] European Topic Centre on Air and Climate Change. Herold, A., 2003. Comparison of CO₂ emission factors for fuels used in Greenhouse Gas Inventories and consequences for monitoring and reporting under the EC emissions trading scheme.

EUPD, 2005. Energy Using Products Directive 2005/32/EC.

Feng, X., Pu, J., Yang, J., Chu, K.H., 2011. Energy recovery in petrochemical complexes through heat integration retrofit analysis. Applied Energy 88, 1965 – 1982.

Fresner, J., Jantschgi, J., Birkel, S., Barnthaler, J., Krenn, C., 2010a. The theory of inventive problem solving (TRIZ) as option generation tool within cleaner production projects. J. Clean. Prod. 18, 128–136.

Fresner, J., Dobes, V., Bürki, T., Angerbauer, C., Tiefenbrunner, K., 2010b. PRE-SME – Promoting Resource Efficiency in Small & Medium Sized Enterprises. United Nations Environment Programme.

Fresner, J., Yacooub, A., 2006. Half is Enough. ISBN 3-9501636-2-X, Graz.

Frondel, M., Horbach, J., Rennings, K., 2007. End-of-pipe or cleaner production?: An empirical comparison of environmental innovation decisions across OECD countries. N. Johnstone (ed.), *Environmental Policy and Corporate Behaviour*, Edward Elgar, Cheltenham.

Gielen, D.J., Moriguchi, Y., Yagita, H., 2002. CO₂ emission reduction for Japanese petrochemicals. *J. Clean. Prod.* 10, 589 – 604.

Gielen, D.J., Yagita, H., 2002. The long-term impact of GHG reduction policies on global trade: A case study for the petrochemical industry. *European Journal of Operational Research* 139, 665 – 681.

Glavic, P., Lukman, R., 2007. Review of sustainability terms and their definitions. *J. Clean. Prod.* 15, 1875-1885.

Henriksson, E., Söderholm, P., 2009. The cost-effectiveness of voluntary energy efficiency programs. *Energy Sustain. Dev.* 13 (4), 235–243.

Henry Chen, Y.-H., Timilsina, G.R., Laudis, F., 2013. Economic implications of reducing carbon emissions from energy use and industrial processes in Brazil. *Journal of Environmental Management* 130, 436 – 446.

[HIP] HIP Petrohemija a.d. Pančevo, 2017.
Available at: <http://www.hip-petrohemija.com>

Huang, Y., Luo, J., Xia, B., 2013. Application of cleaner production as an important sustainable strategy in the ceramic tile plant - a case study in Guangzhou, China. *J. Clean. Prod.* 43, 113 - 121.

[IEA] International Energy Agency, 2007. *Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions*. Paris, France: OECD/IEA.
Available at: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/tracking_emissions.pdf

[IED] Industrial Emissions Directive 2010/75/EU.
Available at: <http://ec.europa.eu/environment/industry/stationary/ied/legislation.htm>

Izveštaj čistije proizvodnje, 2010. UNIDO projekat uvođenja čistije proizvodnje u gradu Pančevu – izveštaj čistije proizvodnje za kompaniju HIP Petrohemija.

Izveštaj čistije proizvodnje, 2008. UNIDO projekat uvođenja čistije proizvodnje – izveštaj čistije proizvodnje za kompaniju Hipol AD Odžaci.

Jankes, G., Stamenić, M., Knežević, A., Husika, A., Prašović, S., Jeftenić, B., Bebić, M., Šešlija, D., Kosi, F., Stajić, Z., Burazer, J., Stanojević, M., Banjac, M., Gvozdenac-Urošević, B., Martinović, S., 2009. Priručnik za poboljšanje energetske efikasnosti i racionalnu upotrebu energije u industriji. ISBN 978-86-7083-680-8, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade.

Jovanovic, J., Jovanovic, M., Jovanovic, A., Marinovic, V., 2010. Introduction of cleaner production in the tank farm of the Pancevo Oil Refinery, Serbia. *Journal of Cleaner Production* 18, 791–798.

Jovančić, P., Tanasijević, M., Ivezić, D., 2011. Serbian energy development based on lignite production. *Energy Policy* 39, 1191–1199.

Karian, H.G., 1999. Handbook of polypropylene and polypropylene composites. ISBN: 0-8247-1949-2, Marcel Dekker, Inc, New York, USA.

Kist, L.T., El Moutaqi, S., Machado, E.L., 2009. Cleaner production in the management of water use at a poultry slaughterhouse of Vale do Taquari, Brazil: a case study. *J. Clean. Prod.* 17, 1200 - 1205.

Kupusovic, T., Midzic, S., Silajdzic, I., Bjelavac, J., 2007. Cleaner production measures in small-scale slaughterhouse industry - case study in Bosnia and Herzegovina. *J. Clean. Prod.* 15, 378 – 383.

Kurama, H., Kaya, M., 2008. Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Construction and Building Materials* 22, 1922–1928.

Laforest, V., Raymond, G., Piatyszek, É., 2013. Choosing cleaner and safer production practices through a multi-criteria approach. *J. Clean. Prod.* 47, 490–503.

[LCP BREF] European Commission, 2006. Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants.

Lee, C.F., Lin, S.J., 2001. Structural decomposition of CO₂ emissions from Taiwan's petrochemical industries. *Energy Policy* 29, 237 – 244.

Lee, S., 2013. Existing and anticipated technology strategies for reducing greenhouse gas emissions in Korea's petrochemical and steel industries. *J. Clean. Prod.* 40, 83-92.

Liew, P.Y., Lim, J.S., Wan Alwi, S.R., Manan, Z.A., Varbanov, P.S., Klemeš, J.J., 2014. A retrofit framework for Total Site heat recovery systems. *Applied Energy* 135, 778 – 790.

Lozano, R., Carpenter, A., Šatrić, V., 2013. Fostering green chemistry through a collaborative business model: A Chemical Leasing case study from Serbia. *Resources, Conservation and Recycling* 78, 136–144.

Lozano, R., 2012. Towards better embedding sustainability into companies' systems: an analysis of voluntary corporate initiatives. *J. Clean. Prod.* 25, 14-26.

Mattsson, L.T., Read, A.D., Phillips P.S., 2010. A critical review of the largest Resource Efficiency Club Programme in England (2005–2008): Key issues for designing and delivering cost effective policy instruments in the light of Defra's Delivery Landscape Review. *Resources, Conservation and Recycling* 55 (1), 1–10.

Mohammadi, A., Soltanieh, M., Abbaspour, M., Atabi, F., 2013. What is energy efficiency and emission reduction potential in the Iranian petrochemical industry? *International Journal of Greenhouse Gas Control* 12, 460 – 471.

Moore, E.P., 1996. *Polypropylene Handbook: polymerization, characterization, properties, applications*. ISBN 1-56990-208-9, Hanser Publisher, Munich.

Mulder, E., 1996. A mixture of fly ashes as road base construction material. *Waste Management* 16, 15–20.

[MŽSPP] Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja, 2010. Ministry of Environment and Spatial Planning, 2010. Initial National Communication of the Republic of Serbia under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Available at:

<http://unfccc.int/resource/docs/natc/srbnc1.pdf>

Nacionalna strategija održivog razvoja, 2008. Nacionalna strategija održivog razvoja. Službeni glasnik RS, broj 57/08.

Napp, T.A., Gambhir, A., Hills, T.P., Florin, N., Fennell, P.S., 2014. A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30, 616 – 640.

Neelis, M., Patela, M., Bloka, Haijeb, K.W., Bach, P., 2007. Approximation of theoretical energy-saving potentials for the petrochemical industry using energy balances for 68 key processes. *Energy* 32, 1104 – 1123.

Ogranak TENT, 2017. Ogranak TENT: Izgradnja postrojenja za odsumporavanje i redukcija NOx primarnim merama.

Available at: <http://www.tent.rs/odsumporavanje>

OECD, 2009. Eco-innovation in industry: enabling green growth. Chapter 1: Framing eco-innovation: the concept and the evolution of sustainable manufacturing.

Olanrewaju, O.A., Jimoh, A.A., 2014. Review of energy models to the development of an efficient industrial energy model. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30, 661 – 671.

Park, H., Behera, S.K., 2014. Methodological aspects of applying eco-efficiency indicators to industrial symbiosis networks. *J. Clean. Prod.* 64, 478–485.

Petek, J., Glavič, P., Kostevšek, A., 2014. Total site cleaner production – energy efficiency – optimisation approach based on in-depth analyses of versatile industrial practices. In: 17th European Roundtable on Sustainable Consumption and Production, October 14-16, 2014, Portorož, Slovenia, paper 177.

Petek, J., Glavič, P., 2000. Improving the sustainability of regional cleaner production programs. *Resources, Conservation and Recycling* 29, 19–31.

Posch, A., Brudermann, T., Braschel, N., Gabriel, M., 2015. Strategic energy management in energy-intensive enterprises: a quantitative analysis of relevant factors in the Austrian paper and pulp industry. *J. Clean. Prod.* 90, 291 - 299.

Price, R., Thomas, P., Suzuki, M., Hawken, P., Wackernagel, M., 2002. Strategic sustainable development — selection, design and synergies of applied tools. *J. Clean. Prod.* 10, 197-214.

Rajaković – Ognjanović, V.N., Živojinović, D.Z., Grgur, B.N., Rajaković, Lj.V., 2011. Improvement of chemical control in the water-steam cycle of thermal power plants. *Applied Thermal Engineering* 31, 119–128.

Ren, T., 2009. Barriers and drivers for process innovation in the petrochemical industry: A case study. *J. Eng. Technol. Manage.* 26, 285 – 304.

Ren, T., Daniels, B., Patel, M.K., Blok, K., 2009. Petrochemicals from oil, natural gas, coal and biomass: Production costs in 2030–2050. *Resources, Conservation and Recycling* 53, 653 – 663.

Robèrt, K.-H., Schmidt-Bleek, B., Aloisi de Larderel, J., Basile, G., Jansen, J.L., Kuehr, R., Price Thomas, P., Suzuki, M., Hawken, P., Wackernagel, M., 2002. Strategic sustainable development — selection, design and synergies of applied tools. *J. Clean. Prod.* 10, 197-214.

Riaz, A., Zahedi, G., Klemens, J.J., 2013. A review of cleaner production methods for the manufacture of methanol. *J. Clean. Prod.* 57, 19-37.

RU Laboratorijski reaktor, 2014. Radno uputstvo RU-153-34 Laboratorijski reaktor, Hemijska industrija Hipol AD Odžaci.

Saygin, D., Worrell, E., Tam, C., Trudeau, N., Gielen, D. J., Weiss, M., Patel, M. K., 2012. Long-term energy efficiency analysis requires solid energy statistics: The case of the German basic chemical industry. *Energy* 44, 1094-1106.

Saygin, D., Worrell, E., Patel, M.K., Gielen, D.J., 2011a. Potential of best practice technology to improve energy efficiency in the global chemical and petrochemical sector. *Energy* 36, 5779-5790.

Saygin, D., Patel, M.K., Worrell, E., Tam, C., Gielen, D.J., 2011b. Benchmarking the energy use of energy-intensive industries in industrialized and in developing countries. *Energy* 36, 6661-6673.

Silva, D.A.L., Delai, I., Soares de Castro, M.A., Ometto, A.R., 2013. Quality tools applied to Cleaner Production programs: a first approach toward a new methodology. *J. Clean. Prod.* 47, 174 -187.

Smith, M.H., Hargroves, K., Desha, C., 2010. *Cents and Sustainability: securing our common future by decoupling economic growth from environmental pressure*. ISBN: 978-1844075294, Routledge.

StameniĆ, M., Fresner, J., Krenn, C., Kijevćanin, M., Vukadinović, B., 2017. Priručnik za efikasno korišćenje energije na farmama za uzgoj živine i svinja. ISBN 978-86-7401-342-7, Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade.

Stamenković, P., Markuš, B., 2004. Tehno-ekonomski aspekti proizvodnje polipropilena na visokoaktivnom katalizatoru. III Kongres inženjera plastičara i gumara K-IPG 2004, Niška Banja, 18. – 21. maj 2004.

Stamm, A., Dantas, E., Fischer, D., Ganguly, S., Rennkamp, B., 2009. Sustainability-oriented innovation systems: towards decoupling economic growth from environmental pressures? DIE Research Project “Sustainable solutions through research”. ISBN 978-3-88985-470-4, DIE Bonn

Stevanović, V.D., Wala, T., Muszynski, S., Milić, M., Jovanović, M., 2014. Efficiency and power upgrade by an additional high pressure economizer installation at an aged 620 MWe lignite-fired power plant. *Energy* 66, 907–918.

Strategija i politika razvoja industrije Republike Srbije, 2011. Strategija i politika razvoja industrije Republike Srbije od 2011. do 2020. godine. Službeni glasnik RS, broj 55/11.

Strategija razvoja energetike, 2015. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine. Službeni glasnik RS, broj 101/15.

Strategija uvođenja čistije proizvodnje u Republici Srbiji, 2009. Službeni glasnik RS, broj 17/2009.

[SuDES] Sustainable Development in Energy Sector An EU funded Project, 2012. Aspects of Climate Change in the Development of the Energy Sector in Serbia, Final Report.

Tanaka, K., 2011. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. *Energy Policy* 39 (10), 6532 – 6550.

[TENT] Termoelektrane Nikola Tesla, 2017.
Available at: <http://www.tent.rs>

Tzolakis, G., Papanikolaou, P., Kolokotronis, D., Samaras, N., Tzourlidakis, A., Tomboulides, A., 2012. Simulation of a coal-fired power plant using mathematical programming algorithms in order to optimize its efficiency. *Applied Thermal Engineering* 48, 256–267.

UNCTAD, 2004. A Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators. ISBN 92-1-112620-7, New York and Geneva.

UNEP and UNIDO, 2010. Joint UNIDO-UNEP Programme on Resource Efficient and Cleaner Production in Developing and Transition Countries. Available at: https://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Environmental_Management/Contacts/Contacts/RECP%20Programme%20Flyer%20April%202010%20%282%29.pdf

UNEP and UNIDO, 2004. United Nations Environment Programme (UNEP) and United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Guidance Manual: How to establish and operate Cleaner Production Centres. UNIDO, Vienna. Available at: <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/WEBx0072xPA-CPcentre.pdf>

UNIDO, 2011a. UNIDO green industry initiative for sustainable industrial development. Available at: <http://www.greenindustryplatform.org/wp-content/uploads/2013/05/Green-Industry-Initiative-for-Sustainable-Industrial-Development.pdf>

UNIDO, 2011b. Industrial energy efficiency and competitiveness. Working paper 05/2011. Available at: https://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Research_and_Statistics/WP052011_Ebook.pdf

UNIDO and UNEP, 2010a. Taking Stock and Moving Forward. The UNIDO–UNEP National Cleaner Production Centres. Available at: https://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Environmental_Management/Contacts/Contacts/Taking%20stock%20and%20moving%20forward-November2010.pdf

UNIDO and UNEP, 2010b. A Primer for small and medium-sized enterprises: enterprise-level indicators for resource productivity and pollution intensity. Available at: <http://www.unido.org/en/resources/publications/energy-and-environment/industrial-energy-efficiency/resource-productivity-guide.html>

UNIDO, 2002. Manual on the development of cleaner production policies - approaches and instruments. UNIDO CP Programme, 2002. Available at: http://www.unido.org/fileadmin/import/9750_0256406e.pdf

Van Berkel, R., 2007. Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996–2004. *J. Clean. Prod.* 15 (8-9), 741–755.

Van Caneghem, J., Block, C., Van Hooste, H., Vandecasteele, C., 2010. Eco-efficiency trends of the Flemish industry: decoupling of environmental impact from economic growth. *J. Clean. Prod.* 18, 1349–1357.

Van der Voet, E., van Oers, L., Moll, S., Schütz, H., Bringezu, S., de Bruyn, S., Sevenster, M., Warringa, G., 2005. Policy review on decoupling: development of indicators to assess decoupling of economic development and environmental pressure in the EU-25 and AC-3 countries. European Commission, 2005.

Vukadinović, B., Popović, I., Subotin, A., Kijevčanin M., 2017. Cleaner production and environmental sustainability – analysis of the Serbian petrochemical plant. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Article in Press.

Vukadinović, B., Popović, I., Dunjić, B., Jovović, A., Vlajić, M., Stanković, D., Bajić, Z., Kijevčanin, M., 2016. Correlation between eco-efficiency measures and resource and impact decoupling for thermal power plants in Serbia. J. Clean. Prod. 138, 264 – 274.

Vukadinovic, B., Dunjic, B., Satric, V., Reike, D., Lozano, R., 2014a. Seven years of resource efficient and cleaner production in Serbia: lessons learned and the way forward. In: 17th European Roundtable on Sustainable Consumption and Production, October 14-16, 2014, Portorož, Slovenia, paper 95.

Vukadinović, B., Popović, I., Dunjić, B., Vlajić, M., Stanković, D., Bajić, Z., Kijevčanin, M., 2014b. Cleaner production assessment - improvement of energy and resource efficiency of thermal power plants in Serbia. In: 17th European Roundtable on Sustainable Consumption and Production, October 14-16, 2014, Portorož, Slovenia, paper 31.

Vukadinović, B., Dunjić, B., Zihelr. S., 2010. The principles of cleaner production with special emphasis on paper industry. In: 16th International Symposium in the Fields of Pulp, Paper, Packaging and Graphics, June 15th - 18th, 2010, Zlatibor, Serbia, lecture 30.

Vukadinović, B., Jovović, A., Mančić, Z., Nemeš, M., 2009. Implementacija sistema čistije proizvodnje u industriji Hipol AD. Časopis Društva inženjera plastičara i gumara Svet polimera, januar 2009, ISSN: 1450-6734.

Vukadinović, B., 2008a. Osnovi uvođenja čistije proizvodnje. Zbornik radova Konferencije o održivom razvoju i klimatskim promenama, jun 2008. Niš, Srbija, str. 103.-107.

Vukadinović, B., Dunjić, B., Vučinić, A., 2008b. Veza između čistije proizvodnje i zakona o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađenja. Konferencija Pravo i životna sredina u privredi i praksi, 09.-12. jun 2008, Kopaonik, Srbija, predavanje broj 31.

Wang, Y., Xie, B., Shang, L., Li, W., 2013. Measures to improve the performance of China's thermal power industry in view of cost efficiency. *Applied Energy* 112, 1078–1086.

Willers, C.D., Ferraz, S.P., Carvalho, L.S., Rodrigues, L.B., 2014. Determination of indirect water consumption and suggestions for cleaner production initiatives for the milk-producing sector in a Brazilian middle-sized dairy farming. *J. Clean. Prod.* 72, 146152.

Zakon o EKE, 2013. Zakon o efikasnom korišćenju energije. Službeni glasnik RS, broj 25/13.

PRILOZI

Biografija autora

Bojana Vukadinović je rođena 24.12.1980. godine u Nišu, Republika Srbija, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju. Tehnološko – metalurški fakultet u Beogradu je upisala 1999. godine, katedra za Organsku hemijsku tehnologiju i polimerno inženjerstvo. Titulu diplomiranog inženjera tehnologije stiče 2006. godine, uspešnom odbranom diplomskog rada pod mentorstvom profesora dr. Ivanke Popović. Postdiplomske studije je nastavila upisom doktorskih studija 2007. godine na Tehnološko – metalurškom fakultetu u Beogradu.

Od 2008. godine Bojana Vukadinović je zaposlena u Centru za čistiju proizvodnju Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Trenutno je na poziciji rukovodioca odeljenja za čistiju proizvodnju i bila je angažovana na brojnim projektima sirovinske i energetske efikasnosti i zaštite životne sredine u Srbiji i regionu, kao rukovodilac projekta ili kao ekspert. Radila je sa preko 100 kompanija različitih veličina i delatnosti na uvođenju principa čistije proizvodnje i učestvovala u obuci 60 nacionalnih eksperata. Takođe je rukovodila projektom čiji je cilj bio pružanje pomoći operaterima i nadležnim organima u oblasti integrisanog sprečavanja i kontrole zagađenja. Pre Centra za čistiju proizvodnju, radila je u Ministarstvu zaštite životne sredine, u Odeljenju za upravljanje otpadom, u 2007. godini.

Takođe je predsednik udruženja JICA (*Japan International Cooperation Agency*) Alumni Srbija i koautor edukativnih programa o reciklaži i zaštiti životne sredine za učenike osnovnih i srednjih škola u okviru Srpskog hemijskog društva. Učestvovala je i u izradi priručnika u oblasti integrisanog sprečavanja i kontrole zagađenja i energetske efikasnosti.

Bojana Vukadinović govori i služi se tečno engleskim jezikom. Sertifikovani je UNIDO ekspert za čistiju proizvodnju, a takođe je završila obuke o čistijoj proizvodnji u Japanu 2008. i Izraelu 2013. godine, kao i obuku o upravljanju otpadom u SAD 2009. godine.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора **Бојана Вукадиновић**

Број индекса 2/07

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

НОВИ МОДЕЛИ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ У ПОЛИМЕРНОЈ И СРОДНИМ ИНДУСТРИЈАМА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 15.06.2017.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора **Бојана Вукадиновић**

Број индекса **2/07**

Студијски програм **Инжењерство материјала**

Наслов рада **НОВИ МОДЕЛИ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ
У ПОЛИМЕРНОЈ И СРОДНИМ ИНДУСТРИЈАМА**

Ментор **др Иванка Поповић и др Мирјана Кијевчанин**

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 15.06.2017.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

НОВИ МОДЕЛИ ЗА УНАПРЕЂЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ У ПОЛИМЕРНОЈ И СРОДНИМ ИНДУСТРИЈАМА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 15.06.2017.

1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.