



Univerzitet u Novom Sadu

Tehnološki fakultet Novi Sad

Hemijsko inženjerstvo

Eko-energetska analiza i simulacija kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima

Doktorska disertacija

Mentori:

prof. dr Oskar Bera

prof. dr Dragan Govedarica

Kandidat: Vuk Rajović

Novi Sad, 2021. godina

UNIVERZITET U NOVOM SADU**TEHNOLOŠKI FAKULTET NOVI SAD****KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj: RBR	
Identifikacioni broj: IBR	
Tip dokumentacije: TD	Monografska dokumentacija
Tip zapisa: TZ	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada (dipl., mag., dokt.): VR	Doktorska disertacija
Ime i prezime autora: AU	Vuk Rajović
Mentor (titula, ime, prezime, zvanje): MN	dr Oskar Bera, vanredni profesor dr Dragan Govedarica, vanredni profesor
Naslov rada: NR	Eko-energetska analiza i simulacija kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima
Jezik publikacije: JP	Srpski, latinica
Jezik izvoda: JI	srp. / eng.
Zemlja publikovanja: ZP	Republika Srbija
Uže geografsko područje: UGP	Vojvodina
Godina: GO	2021.
Izdavač: IZ	autorski reprint
Mesto i adresa: MA	21000 Novi Sad, Srbija, Bul. cara Lazara 1

Fizički opis rada: FO	109 strana, 6 poglavlja, 20 tabela, 35 slika, 117 referenci
Naučna oblast: NO	Tehnološko inženjerstvo
Naučna disciplina: ND	Hemijsko inženjerstvo, Eko-energetsko inženjerstvo
Predmetna odrednica, ključne reči: PO	kogeneracija, rastvoreni naftni gas, naftna polja, globalno zagrevanje, simulacija, energetska efikasnost
UDK	
Čuva se: ČU	Biblioteka Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu, 21000 Novi Sad, Serbia, Bul. cara Lazara 1
Važna napomena: VN	Nema
Izvod: IZ	<p>Prvi deo doktorske disertacije sadrži uvid u procenu ekološkog uticaja proizvodnje električne i toplotne energije u Srbiji. Kao najčešći energent koristi se lignit, pa su poređeni eko-energetski uticaji lignita i rastvorenog naftniog gasa. Rastvoreni naftni gas je razmatran kao potencijalni energent u tri scenarija:</p> <ul style="list-style-type: none"> • na bakljama, • u kotlovima na naftnim poljima, • u kogenerativnim postrojenjima na naftnim poljima. <p>Ispitana je ekološka isplativost tri pomenuta scenarija kroz analizu materijalnih tokova i procene uticaja na životnu sredinu pomoću LCA (life cycle assessment) metodologije i podacima koji su prikupljeni na osnovu merenja na naftnim poljima. Koristiće se parametri koji ukazuju na uticaj globalnog zagrevanja, GWP (global warming potential) i iscrpljivanje energetske resursa, CED (cumulative energy demand) uz osvrt na osetljivost sistema na iskorišćenje toplotne energije.</p> <p>Detaljna ekonomska analiza i gubici koji proističu od emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte su procenjeni Maihach-ovom metodom. Metoda omogućava određivanje troškova tj. uštede nastale smanjenjem emisije CO₂ i drugih</p>

	<p>gasova koji izazivaju efekat staklene bašte usled sagorevanja lignita i rastvorenog naftnog gasa u tri scenarija.</p> <p>Drugi deo disertacije bavi se uspostavljanjem simulacije kogenerativnih postrojenja u softveru ASPEN PLUS kako bi se stekao uvid u energetske i materijalne bilanse procesa što će omogućava precizniju procenu ukupne efikasnosti sistema. Ukupna efikasnost sistema isključivo zavisi od uspešnog iskorišćenja toplotne energije što je usko vezano za ekonomsku isplativost izgradnje postrojenja. Uspešna računarska simulacija kogenerativnih postrojenja pruža uvid u variranje procesnih parametara pomoću kojih je moguće izvršiti optimizaciju kogenerativnih postrojenja na naftnom polju u odnosu na sastav gasa. Rezultati ove doktorske disertacije daju detaljan uvid u rad kogenerativnih postrojenja, što doprinosi daljem razvoju tehnologije kogeneracije na naftnim poljima.</p>
Datum prihvatanja teme od strane Senata: DP	17.6.2019.
Datum odbrane: DO	
<p>Članovi komisije:</p> <p>(ime i prezime / titula / zvanje / naziv organizacije / status)</p> <p>KO</p>	<p>predsednik: dr Bojana Ikonić, vanredni profesor, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>mentor: dr Oskar Bera, vanredni profesor, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>mentor: dr Dragan Govedarica, vanredni profesor, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>član: dr Jelena Pavličević, vanredni profesor, Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu</p> <p>član: dr Damir Đaković, vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu</p>

UNIVERSITY OF NOVI SAD**FACULTY OF TECHNOLOGY NOVI SAD****KEY WORD DOCUMENTATION**

Accession number: ANO	
Identification number: INO	
Document type: DT	Monograph documentation
Type of record: TR	Textual printed material
Contents code: CC	PhD Thesis
Author: AU	Vuk Rajović
Mentor: MN	dr Oskar Bera, associate professor dr Dragan Govedarica, associate professor
Title: TI	Eco-energetic analysis and simulation of cogeneration plants at oil fields
Language of text: LT	Serbian
Language of abstract: LA	Serbian/English
Country of publication: CP	Republic of Serbia
Locality of publication: LP	Vojvodina
Publication year: PY	2021
Publisher: PU	Author reprint
Publication place: PP	21000, Novi Sad, Serbia, Bul. Cara Lazara 1

Physical description: PD	109 pages, 6 chapters, 20 tables, 35 figures, 117 references
Scientific field SF	Technological engineering
Scientific discipline SD	Chemical engineering, Eco-energetic engineering
Subject, Key words SKW	cogeneration, associated petroleum gas, oil fields, global warming, simulation, energy efficiency
UC	
Holding data: HD	Library of Faculty of Technology Novi Sad
Note: N	None
Abstract: AB	<p>The first part of the doctoral dissertation contains an insight into the assessment of the environmental impact of electricity and heat production in Serbia. Lignite is used as the most common energy source, so the eco-energy effects of lignite and dissolved petroleum gas are compared. Dissolved petroleum gas was considered as a potential energy source in three scenarios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • on torches, • in boilers in oil fields, • in cogeneration plants in oil fields. <p>The ecological viability of the three mentioned scenarios was examined through the analysis of material flows and environmental impact assessment using LCA (life cycle assessment) methodology and data collected on the basis of measurements in oil fields. Parameters indicating the impact of global warming, GWP (global warming potential) and depletion of energy resources, CED (cumulative energy demand) will be used, with reference to the sensitivity of the system to the use of thermal energy.</p> <p>Detailed economic analysis and losses resulting from greenhouse gas emissions were estimated by the Maihach method. The method enables the determination of costs, ie. savings resulting from reduced emissions of CO₂ and other greenhouse</p>

	<p>gases due to the combustion of lignite and dissolved petroleum gas in three scenarios.</p> <p>The second part of the dissertation deals with the establishment of simulation of cogeneration plants in the software ASPEN PLUS in order to gain insight into the energy and material balances of the process, which allows a more accurate assessment of the overall efficiency of the system. The overall efficiency of the system depends exclusively on the successful use of thermal energy, which is closely related to the economic profitability of plant construction. Successful computer simulation of cogeneration plants provides insight into the variation of process parameters by which it is possible to optimize cogeneration plants in the oil field in relation to the gas composition. The results of this doctoral dissertation provide a detailed insight into the work of cogeneration plants, which contributes to the further development of cogeneration technology in oil fields.</p>
Accepted on Senate on: AS	17.6.2019.
Defended: DE	
<p>Thesis Defend Board:</p> <p>DB</p>	<p>president: dr Bojana Ikonić, associate professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad</p> <p>mentor: dr Oskar Bera, associate professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad</p> <p>mentor: dr Dragan Govedarica, associate professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad</p> <p>member: dr Jelena Pavličević, associate professor, Faculty of Technology Novi Sad, University of Novi Sad</p> <p>member: dr Damir Đaković, associate professor, Faculty of technical sciences, Novi Sad, University of Novi Sad</p>

Rezime

Spaljivanje rastvorenog gasa, izdvojenog u procesu proizvodnje nafte, je izvor značajnih emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. Rastvoreni naftni gas javlja se kao sporedni proizvod u procesu eksploatacije sirove nafte iz ležišta. Dosadašnja praksa u svetskim naftnim kompanijama je spaljivanje ovog gasa na bakljama. Procena Nacionalne administracije za okeane i atmosferu (NOAA) je da se preko 150 milijardi m³ rastvorenog naftnog gasa spali ili ispusti u atmosferu u toku jedne godine u svetu. Ova količina rastvorenog naftnog gasa dovoljna je za pokrivanje 30% godišnje potrošnje prirodnog gasa u Evropskoj uniji.

Nove regulative koje se tiču upravljanja zaštitom životne sredine, porast potrošnje energije i povećana zabrinutost od uticaja gasova koji izazivaju efekat staklene bašte na klimatske promene primorava industriju da pronađe alternativne održive metode proizvodnje. Naftno-petrohemijske kompanije i industrija za proizvodnju i distribuciju toplotne energije prepoznate su kao glavne mete u industrijskom restrukturiranju u cilju postizanja globalnih strategija razvoja i standarda za prilagođavanja energetske potrošnje i proizvodnje.

Na naftnim poljima u Srbiji osim spaljivanja na baklji, rastvoreni naftni gas se koristi i kao pogonsko gorivo za kotlove, čime se dobija toplotna energija za potrebe naftnog polja.

Kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije – kogeneracija ima za cilj povećanje energetske efikasnosti, smanjenje troškova proizvodnje i uticaja na životnu sredinu. Korišćenjem rastvorenog naftnog gasa u ovim pogonima može se izbeći spaljivanje na baklji uz dobijanje električne i toplotne energije, što je trend na naftnim poljima u Srbiji u poslednjih nekoliko godina. Problem predstavlja česta promena sastava rastvorenog naftnog gasa iz sirove nafte i što zadaje velike probleme u predviđanju optimalnog režima rada motora i prateće opreme. Isporučena oprema na naftnim poljima predviđena je za sisteme konstantnog sastava gasa i ta oprema mora biti sposobna da u potpunosti ispuni tražene zahteve proizvodnje i distribucije energije.

Prvi deo doktorske disertacije sadržaće uvid u procenu ekološkog uticaja proizvodnje električne i toplotne energije u Srbiji. Kao najčešći energent koristi se lignit, pa će biti poređeni eko-energetski uticaji lignita u odnosu na rastvoreni naftni gas. Rastvoreni naftni gas će biti posmatran kao potencijalni energent u tri scenarija:

- na bakljama,
- u kotlovima na naftnim poljima,
- u kogenerativnim postrojenjima na naftnim poljima.

Ispitaće se ekološka isplativost tri pomenuta scenarija kroz analizu materijalnih tokova i procene uticaja na životnu sredinu pomoću LCA (life cycle assessment) metodologije i podacima koji su prikupljeni na osnovu merenja na naftnim poljima. Koristiće se radni parametri i procesni uslovi koji ukazuju na uticaj globalnog zagrevanja, GWE (global warming potential) i iscrpljivanje energetske resursa, CED (cumulative energy demand) uz osvrt na osetljivost sistema na iskorišćenje toplotne energije.

Detaljna procena novčane štete koja proističe od emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte biće procenjena Maihach-ovom metodom. Metoda daje uvid u izbegnuti trošak koji se vezuje za emisije CO₂ i drugih gasova koji izazivaju efekat staklene bašte usled sagorevanja lignita i rastvorenog naftnog gasa u tri scenarija.

Usled varijabilnog sastava rastvorenog naftnog gasa na naftnim poljima, može doći do kondenzacije dela gasne faze nakon sagorevanja u motoru. U ovoj doktorskoj disertaciji će biti obrađen problem kondenzacije sumporne kiseline koja se javlja kao uzročnik korozije razmenjivača toplote.

Drugi deo disertacije baviće se uspostavljanjem simulacije kogenerativnih postrojenja u programskom paketu ASPEN PLUS kako bi se stekao uvid u energetske i materijalne bilanse procesa što će omogućiti precizniju procenu ukupne efikasnosti sistema. Ukupna efikasnost sistema isključivo zavisi od uspešnog iskorišćenja toplotne energije što je usko vezano za ekonomsku isplativost izgradnje postrojenja.

Uspešna kompjuterska simulacija kogenerativnih postrojenja pružiće mogućnost variranja svih parametara pomoću kojih je moguće izvršiti optimizaciju kogenerativnih postrojenja na naftnom polju u odnosu na sastav gasa. Simulacija postrojenja sa osvrtom na efikasnost rada i uticaj na životnu sredinu predstavlja potrebu industrije kako bi se uvideli svi značajni faktori za optimalni režim rada postrojenja. Objedinjeni dobijeni rezultati daće detaljan uvid u rad postrojenja, čime će se dati doprinos daljem razvoju tehnologije kogenerativnih sistema na naftnim poljima.

Summary

Incineration of dissolved gas, extracted in the process of oil production, is a source of waste that causes significant emissions of gases that cause the greenhouse effect. Dissolved petroleum gas occurs as a by-product in the process of exploitation of crude oil from the reservoir. The current practice in the world's oil companies is to burn this gas on torches. The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) estimates that over 150 billion m³ of dissolved petroleum gas will be burned or discharged in one year worldwide. This amount of gas is sufficient to cover 30% of the annual consumption of natural gas in the European Union. New environmental regulations, rising energy consumption and increased concern about the impact of greenhouse gases on climate change are forcing industry to find alternative sustainable production methods. Process oil companies and heat production and distribution industries have been identified as major targets in industrial restructuring in order to achieve globally developed strategies and standards for adjusting energy consumption and production. In the oil fields in Serbia, in addition to burning on torches, dissolved petroleum gas is also used as a fuel for boilers, which provides thermal energy for the needs of the oil field. Combined heat and power generation - cogeneration aims to increase energy efficiency, reduce production costs and environmental impact. By using dissolved petroleum gas in these plants, burning on torches can be avoided while obtaining electricity and heat, which is a trend in the oil fields in Serbia in the last few years. The problem is the frequent change in the composition of dissolved petroleum gas from crude oil and poses major problems in predicting the optimal mode of operation of engines and associated equipment. The delivered equipment in the oil fields is intended for systems of constant gas composition and that equipment must be able to fully meet the required requirements of energy production and distribution.

The first part of the doctoral dissertation will contain an insight into the assessment of the ecological impact of electricity and heat production in Serbia. Lignite is used as the most common energy source, so the eco-energy effects of lignite in relation to dissolved petroleum gas will be compared. Dissolved petroleum gas will be considered as a potential energy source for the following scenarios:

- flares,

- boilers in oil fields,
- cogeneration plants in oil fields.

The ecological viability of the three mentioned scenarios will be examined through analysis of material stream flows and environmental impact assessment using LCA (life cycle assessment) methodology and data collected on the basis of measurements in oil fields. Process conditions indicating the impact of global warming, GWE (global warming potential) and depletion of energy resources, CED (cumulative energy demand) will be used, with reference to the sensitivity of the system to the use of thermal energy.

A detailed estimate of the monetary damage resulting from greenhouse gas emissions will be estimated by the Maihach method. The method provides insight into the avoided cost associated with emissions of CO₂ and other greenhouse gases due to the combustion of lignite and dissolved petroleum gas in three scenarios. Due to the variable composition of the dissolved petroleum gas in the oil fields, part of the gas phase may condense after combustion in the engine. The dissertation will deal with the problem of condensation of sulfuric acid, which occurs as a cause of corrosion of heat exchangers.

The second part of the dissertation will deal with the establishment of simulation of cogeneration plants in the software ASPEN PLUS in order to gain insight into the energy and material balances of the process, which will allow a more accurate assessment of the overall efficiency of the system. The overall efficiency of the system depends exclusively on the successful use of thermal energy, which is closely related to the economic profitability of plant construction

Successful computer simulation of cogeneration plants will provide the possibility of varying all parameters by which it is possible to optimize cogeneration plants in the oil field in relation to the composition of gas. Simulation of the plant with reference to the efficiency of operations and the impact on the environment represents the need of the industry to see all the significant factors for the optimal mode of operation of the plant. The combined obtained results will give a detailed insight into the operation of the plant, which will contribute to the further development of technology of cogeneration systems in oil fields.

Sadržaj

1. Uvod	17
1.1. Hipoteze.....	19
1.2. Cilj disertacije.....	19
1.3. Značaj disertacije.....	19
1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja.....	20
1.5. Struktura rada.....	22
2. Energija	24
2.1. Potrošnja energije u Evropi.....	25
2.2. Potrošnja energije u Srbiji.....	26
2.3. Konvencionalni i alternativni postupci proizvodnje toplotne i električne energije....	26
2.3.1. Konvencionalni postupci proizvodnje energije.....	26
2.3.2. Alternativni postupci proizvodnje energije.....	31
2.4. Ekonomski aspekti proizvodnje energije.....	33
2.5. Indikatori održivog razvoja u proizvodnji energije.....	35
2.6. Kogeneracije na naftnim poljima.....	39
2.7. Rastvoreni naftni gas – RNG.....	56
3. Materijali i metode	70
3.1. Određivanje sastava RNG-a.....	70
3.2. Određivanje emisija nakon sagorevanja kaptažnog gasa.....	70
3.3. Analiza životnog ciklusa RNG-a.....	72
3.4. Procena eksternih troškova emisija sagorevanjem kaptažnog gasa.....	76
3.5. Simulacija kogenerativnog postrojenja s RNG-om kao pogonskim gorivom pomoću ASPEN Plus programskog paketa.....	77
4. Rezultati i diskusija	83
Rezultati i diskusija – I deo (LCA analiza iskorišćenja RNG-a).....	83
4.1. Hemijski sastav RNG-a sa naftnim polja u Srbiji.....	83
4.2. Popis životnog ciklusa tri scenarija korišćenja RNG-a.....	84
4.3. Procena uticaja životnog ciklusa za opcije korišćenja rastvorenog gasa.....	86
4.4. Ograničenja i nesigurnosti.....	91
4.5. Eksterni troškovi emisija.....	92

Rezultati i diskusija – II deo (ASPEN simulacija kogenerativnog postrojenja na naftnom polju).....	96
4.6. Podaci sa kogenerativnog postrojenja.....	96
4.7. Uspostavljanje ASPEN simulacije kogenerativnog postrojenja.....	97
4.8. Analiza energetske efikasnosti sistema	112
4.9. Ograničenja i nesigurnosti	113
5. Zaključak	115
6. Literatura.....	117

Slike

Slika 1. Ukupna proizvodnja primarne energije i ukupna krajnja potrošnja energije u EU za 2017. godinu	25
Slika 2. Ukupna primana energija i ukupna krajnja potrošnja energije u Srbiji za 2017. godini.....	26
Slika 3. Odnos efikasnosti odvojenih sistema i sistema kombinovane proizvodnje.....	29
Slika 4. Nagli porast gasova koji izazivaju efekat staklene bašte sa početkom industrijske revolucije.....	36
Slika 5. Emisije CO ₂ iz različitih izvora	37
Slika 6. Kogeneraciono postrojenje na naftnom polju.....	43
Slika 7. Blok šema rada sabirno otpremne stanice u eksploataciji sirove nafte.....	44
Slika 8. Uvođenje, komprimovanje, sagorevanje i izlaz gasa u cilindru	48
Slika 9. Sistem distribucije smeše glikol-voda u/iz motora.....	50
Slika 10. Razmenjivač toplote dimnih gasova, drugi deo primarnog kruga razmene toplote	50
Slika 11. Uprošćena tehnološka šema kogenerativnog postrojenja sa obeleženim primarnim (plava i žuta linija) i sekundarnim toplotnim krugom (crvena linija).....	51
Slika 12. Proces separacije sirove nafte od vode i RNG-a i unutrašnjost uređaja na polju....	56
Slika 13. Trofazni separator na naftnom polju.....	57
Slika 14. Aminsko postrojenje u Elemiru za uklanjanje CO ₂ iz gasa.....	59
Slika 15. Razmenjivač toplote sa snopom cevi nakon 3 meseca rada (levo) i izgled novog razmenjivača toplote sa snopom cevi.....	61
Slika 16. Spaljivanje rastvorenog naftnog gasa na baklji	64
Slika 17. Delimično korišćenje rastvorenog naftnog gasa za grejanje naftnih rezervoara	66
Slika 18. Korišćenje rastvorenog naftnog gasa u kombinovanom postrojenju.....	68
Slika 19. Tehnološka šema proizvodnje toplotne i električne energije u kogenerativnom pogonu na naftnom polju u Srbiji.....	79
Slika 20. Potreba za kumulativnom energijom iz fosilnih izvora za tri alternativna scenarija korišćenja rastvorenog naftnog gasa (po 1 Sm ³ rastvorenog gasa).....	87
Slika 21. Uticaji na globalno zagrevanje tri alternativna scenarija korišćenja rastvorenog gasa (po 1 Sm ³ rastvorenog gasa).....	87

Slika 22. Ekološki uticaji korišćenja rastvorenog naftnog gasa u (a) kotlovima za zagrevanje ili (b) kombinovanim postrojenjima u zavisnosti od stope iskorišćenja toplotne energije (MJ·Sm ⁻³ ili 10 kg CO ₂ eq·Sm ⁻³)	89
Slika 23. CED (a) i potencijal globalnog zagrevanja (b) scenario kombinovanih postrojenja u zavisnosti od pretpostavke o stopi iskorišćenja zamenjene električne i toplotne energije..	91
Slika 24. Bruto i neto eksterni troškovi povezani sa tri alternativna scenarija iskorišćenja RNG (u evrima, na 1000 Sm ³ RNG)	95
Slika 25. Neto eksterni troškovi iskorišćenja RNG u zavisnosti od stope iskorišćenja toplotne energije (u evrima, na 1000 Sm ³ RNG).....	95
Slika 26. Fazni dijagram za tečnu fazu glikol-voda.....	98
Slika 27. ASPEN simulacija kogenerativnog postrojenja na naftnom polju.....	99
Slika 28. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T1 i T2.....	101
Slika 29. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T5.....	102
Slika 30. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T3.....	103
Slika 31. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T4.....	104
Slika 32. Eksperimentalne i simulirane vrednosti toplotnih energija.....	105
Slika 33. Godišnja varijacija u sastavu RNG-a na naftnom polju A.	108
Slika 34. Moguća odstupanja generisane toplotne energije u zavisnosti od gubitaka	111
Slika 35. Analiza energetske efikasnosti prikazana kroz „feed-in“ tarifu.	112

Tabele

Tabela 1. Otkupne cene po kWh u zavisnosti od energetskog izvora	35
Tabela 2. Osnovne tehničke karakteristike kogeneratorske jedinice, instalisane snage 950 kW.	45
Tabela 3. Osnovne karakteristike motora sa unutrašnjim sagorevanjem.....	48
Tabela 4. Karakteristike sinhronog generatora kod kogeneracione jedinice.....	49
Tabela 5. Karakteristike primarnog kruga	52
Tabela 6. Karakteristike sekundarnog kruga	53
Tabela 7. Karakteristike tehnološkog kruga.....	53
Tabela 8. Prosečni sastavi RNG-a na naftnim poljima u svetu.	58
Tabela 9. Sastav RNG-a na naftnom polju A	62
Tabela 10. Toplote sagorevanja ugljovodonika	62
Tabela 11. Produkti sagorevanja po 1 kg Cx jedinjenja.....	71
Tabela 12. Tip i LCI podaci za zamenjene procese	75
Tabela 13. Sastav i karakteristike rastvorenog naftnog gasa na četiri naftna polja u Srbiji...83	
Tabela 14. Popis životnog ciklusa različitih scenarija korišćenja RNG-a (po 1 Sm ³ rastvorenog gasa).....	84
Tabela 15. Eksperimentalne vrednosti temperaturnih parametara za različite električne snage.....	96
Tabela 16. Upoređene vrednosti temperatura iz eksperimenta i ASPEN simulacije.....	100
Tabela 17. Razlike i odstupanja toplotnih energija	106
Tabela 18. Različiti sastavi RNG-a dobijeni pomoću Matchada za istu toplotnu moć.....	109
Tabela 19. Različite generisane toplotne energije za istu toplotnu moć od 36 MJ i različite električne snage.....	110
Tabela 20. Najveće i najmanje razlike u generisanim toplotnim energijama za istu toplotnu moć od 36 MJ.....	110

1. Uvod

Prilagođavanje čoveka prirodi predstavlja glavni zadatak svakog društva. Porastom kvaliteta života, a samim tim povećanjem potrošnje materijalnih dobara, čovečanstvo povećava pritisak na Zemlju i njene resurse, čime ugrožava sopstvenu egzistenciju. Neprekidan porast broja stanovnika, remećenje klimatske ravnoteže, porast cene energije i količine otpada čine da život na našoj planeti zahteva crpljenje svih dostupnih resursa u ogromnim količinama. Ovo dovodi do sve većih potreba za sanacijom ljudskog delovanja na prirodu.

Uz potrošnju materijalnih dobara, pojavljuje se intenzivno zagađenje vazduha, vode i zemljišta, što otvara rizike ka pogoršanju sveopštih životnih uslova. Javlja se potreba za smanjenjem uzroka koji dovode do ovih posledica kroz održive tehnologije. Globalno posmatrano, čovečanstvo mora da preuzme ulogu u eliminisanju progresivnog fizičkog degradiranja i uništavanja prirode i prirodnih procesa jer sve je povezano sa ekosistemima u kojima živimo.

Održive tehnologije baziraju se na zaštiti životne sredine, uz smanjenje emisija u vodu, vazduh i zemljište na najmanju moguću meru. U tehničko-tehnološkom smislu one su povezane i mogu da uključuju neke ili sve od navedenih aspekata:

- obnovljivi izvori energije,
- zaštita životne sredine,
- energetska efikasnost,
- štednja energije,

Primena savremenih održivih ekoloških tehnologija u industriji dovodi do značajnog smanjenja emisija. Ove tehnologije mogu biti značajno skuplje od postojećih komercijalnih tehnologija i stoga je potrebno dobro poznavati materijalne i energetske tokove kako bi se sistem optimizovao. Većini zemalja u razvoju potrebne su dodatne podsticajne mere u finansijskom smislu, kako bi mogle da primene ove tehnologije.

Korišćenje fosilnih goriva i prirodnih resursa potrebno je svesti na minimum, jer njihovom povećanom eksploatacijom povećavamo poremećaj tokova materije i energije u prirodi. Stoga treba težiti smanjenju potrošnje energenata, uz povećanje energetske efikasnosti. Održive tehnologije bi trebalo da ispunjavaju ljudske potrebe, jer su prilagođene potrebama

ljudi, ali u cilju optimalnog odnosa prema prirodi, dok zanemarivanje ograničenosti materijala i potrošnje energije sprečava smanjenje uticaja na okolinu.

Nov pristup zaštiti životne sredine, porast potrošnje energije i povećana zabrinutost od uticaja gasova koji izazivaju efekat staklene bašte na klimatske promene primorava industriju da pronade alternativne održive metode proizvodnje [1]. Naftne kompanije i industrija za proizvodnju i distribuciju toplotne energije prepoznate su kao glavne mete u optimizacije industrijskih postrojenja u cilju postizanja globalno razvijenih strategija i standarda za prilagođavanja energetske potrošnje i proizvodnje [2].

Republika Srbija prepoznaje proizvodnju električne i toplotne energije iz jednog energetskog izvora – kogeneracije kao održivu tehnologiju za povećanje ukupne energetske efikasnosti. Kogeneracije su svrstane u „Nacionalni akcioni plan za korišćenje obnovljivih izvora energije Republike Srbije“ koja je usklađena sa direktivama Evropske Unije i Evropskom organizacijom za promovisanje kogeneracija – EDUCOGEN [3]. Član 13. Uredbe o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije daju detaljniji uvid u cene u odnosu na instalisanu snagu pogona [4].

Kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije ima za cilj povećanje energetske efikasnosti, smanjenje troškova proizvodnje i uticaja na životnu sredinu. Cilj ove doktorske disertacije bio je da se izvrši eko-energetska analiza kogeneracijskih postrojenja na naftnim poljima u Srbiji. Opisana postrojenja, instalisane snage od po 1000 kW, imaju za cilj proizvodnju i distribuciju električne i toplotne energije koristeći rastvoreni naftni gas (RNG) kao pogonsko gorivo. Gas se dobija razdvajanjem sirove nafte prikupljene na različitim bušotinama od primesa na sabirno-otpremnim stanicama.

Dobijeni rezultati daju detaljan uvid u rad kogeneracionih postrojenja čime je dat doprinos poboljšanju efikasnosti pogona. Uspešna kompjuterska simulacija kogenerativnih postrojenja pruža mogućnost variranja brojnih radnih parametara pomoću kojih je moguće izvršiti poboljšanja i predviđanja rada kogeneracionog postrojenja. Česta promena sastava rastvorenog naftnog gasa dobijenog iz sirove nafte na naftnom polju zadaje velike probleme u predviđanju radnih karakteristika motora i prateće opreme. Isporučena oprema na naftnim poljima predviđena je za rad pri konstantnom sastavu gasa i ta oprema mora biti sposobna da u potpunosti ispuni tražene zahteve proizvodnje i distribucije energije.

Simulacija postrojenja sa osvrtom na efikasnost rada i uticaj na životnu sredinu predstavlja potrebu industrije kako bi se uvideli svi značajni faktori uticaja za optimalni režim rada postrojenja.

1.1. Hipoteze

Da li izgradnjom kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima može da se utiče na smanjenje uticaja CO₂ i globalno zagrevanje u Srbiji?

Da li se korišćenjem rastvorenog naftnog gasa kao pogonskog goriva kogenerativnih postrojenja smanjuje kumulativna potreba za energijom u Srbiji?

Da li se izgradnjom kogeneracionih postrojenja mogu smanjiti eksterni troškovi zaštite životne sredine republike Srbije?

Uspostavljanje simulacije kogenerativnog postrojenja na naftnom polju u cilju daljih analiza tehnološkog procesa u programskom paketu ASPEN Plus.

Da li i u kojoj meri varijacije u sastavu rastvorenog naftnog gasa utiču na proizvodnju i isporuku toplotne energije ka potrošaču?

1.2. Cilj disertacije

Rad kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima nije dovoljno istražen i naučno obrađen. Nedostatak istraživanja u ovom polju nameće eksperimentalna istraživanja koja su potvrdila simulirani model. Cilj istraživanja bio je utvrđivanje značajnih faktora na optimizaciju kogenerativnih postrojenja, kao i detaljna eko-energetska analiza kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima.

1.3. Značaj disertacije

Izgradnja kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima predstavlja poslednji trend energetske industrije u cilju povećanja operativne efikasnosti. Disertacija je nastala kao potreba industrije i nedostatak naučnih istraživanja na temu kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima. Objavljeno je nekoliko naučnih radova na temu kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima, čiji su rezultati i pregled istraživanja izloženi u ovoj disertaciji. Rezultate

ove doktorske disertacije moguće je primeniti na svako kogenerativno postrojenje koje radi na rastvoreni naftni gas na naftnim poljima, bilo gde u svetu.

1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja

Izgradnjom kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima koja koriste RNG, došlo se do saznanja o određenim ograničenjima i praktičnim problemima koje zahtevaju promene u regulaciji rada i drugačijim pristupom eksploatacije. Simulacije postrojenja kroz literaturu obrađuju isključivo postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije koja koriste prirodni gas kao pogonsko gorivo, dok kogeneracije na naftnim poljima koja koriste RNG nisu detaljno istraživana [5]–[7].

Današnja tehnologija omogućava analiziranje velikog broja tehnoloških operacija pomoću matematičkih simulacija, čime se štede velika količine vremena i novca. Simulacije pogona i postrojenja u industriji postaju osnovni alat inženjerskih eko-energetskih i drugih analiza.

Po navodima *Ismaila*, godišnje se u svetu spali preko 150 milijardi Sm^3 rastvorenog naftnog gasa na naftnim poljima, što predstavlja velike količine odbačenog potencijalnog energenta [8].

Simulaciju kogenerativnih postrojenja koje koriste kao pogonsko gorivo prirodni gas istražio je *Zheng* [6]. Opisani stvarni proces uspešno je simuliran i pokazao je odlična slaganja sa stanjem stvarnog postrojenja. Rezultati su predvideli procesne uslove koji nisu dostupni na samim uređajima (temperature, pritisci, protok vazduha, itd.) jer ne postoji fizička mogućnost praćenja ovih promenljivih (cilindri motora, cevi razmenjivača toplote, protok izduvnog gasa nakon motora, itd.). Rezultati istraživanja doveli su do pripreme operativne strategije raznih kogenerativnih pogona, dok su predviđani parametri znatno uticali na optimizaciju tehnoloških procesa, kao i na prevenciju neželjenih događaja i rizika.

Analizu kogenerativnih postrojenja koja kao pogonsko gorivo koriste biogas prikazao je *Damartzis* [7]. Simulacije su pokazale odlična slaganja sa poluindustrijskim (pilot) postrojenjem, dok su rezultati doprineli optimizaciji rada postrojenja kroz podešavanje sagorevanja i prečišćavanja gasa.

Modeli su uspešno predviđali energetski prinos u odnosu na sastav biogasa pomoću analize osetljivosti. Ispitan je uticaj temperature na energetski prinos, uticaj temperature gasifikacije

biomase na energetska efikasnost sistema i efekat karakteristika biomase na ukupnu efikasnost sagorevanja.

Termo-ekonomsku analizu kogenerativnih postrojenja na biogas analizirao je *Borello* [9]. Pomoću ASPENTech-a, sistem je segmentiran na blokove: odvajanje vode i taloga nakon presovanja maslina, izduvni gasovi turbine, sagorevanje i sušnica. Ovim razdvajanjem olakšano je praćenje simulacije glavnih delova postrojenja. Izveden je kompletni energetski i materijalni bilans, nakon čega je izvršena termo-ekonomska analiza koja je pokazala da je postizanje „feed-in“ tarife moguće ukoliko se dobijena toplotna energija uveća za dobijenu električnu energiju za 21%. *Feed-in* tarifa predstavlja sistem podsticajnih cena za otkup energenata ukoliko se postigne odgovarajuća efikasnost energetskog sistema.

Eksploataciju nisko-temperaturnih tokova iz kogenerativnih motora istražio je *Caf* [10]. Istraživanje je obuhvatilo konvencionalne kogenerativne module sa svojim standardnim operativnim parametrima sa visoko-temperaturnim toplotnim pumpama, kao i otpadnu toplotu izduvnih gasova kogeneracionih postrojenja. Zaključeno je da bi se korišćenjem nisko-temperaturnog toplotnog toka pomoću toplotnih pumpi, iskorišćenje toplotne energije povećalo sa 86,8% na 103,3%. Ukupna efikasnost kogenerativnog sistema može da se uveća do 5%.

Procenu eksternih troškova i emisiju biogasa u kogeneratorima opisao je *Patrizio* [11]. Istraživanjem se iznose uticaji na okolinu ukupnih eksternih troškova i dokazuje se da podsticajna sredstava države, kao i iskorišćenje toplotne energije kogeneracionog postrojenja znatno utiču na ukupnu isplativost investicije. Rezultati ukazuju da ublažavanje klimatskih promena, samo po sebi nije zadovoljavajuća mera u pogledu održivog razvoja. Razlog ovome je izostavljanje ekoloških uticaja u proračunima za eksterne troškove.

Zyryanova [12] je predstavila probleme eksploatacije rastvorenog naftnog gasa u kogeneratoru na naftnom polju, ali i nekoliko predloga za rešavanje dela problema. Najčešći problemi u eksploataciji ovog gasa na naftnom polju u motoru sa unutrašnjim sagorevanjem su:

- iznenadni prekid rada klipa motora sa unutrašnjim sagorevanjem
- taloženje nečistoća na površini klipa
- razaranje potisnih ventila
- deformacija glave cilindra
- formiranje koksa na spoljašnjoj površini klipa

Ova oštećenja nastaju usled promenjivog sastava gasa koji se dobija separacijom od sirove nafte, ali i usled različitih supstanci koje se nalaze u njemu, kao što je vodonik-sulfid (H_2S) koji može ozbiljno da ošteti metalne konstrukcione elemente opreme usled formiranja sumporne kiseline (H_2SO_4) nakon sagorevanja gasa u motoru.

Chang i saradnici [13] su izveli tehno-ekonomsku analizu kogenerativnog postrojenja koje za pogonsko gorivo koristi sintezni gas dobijen iz rižine komine u motoru s unutrašnjim sagorevanjem. Urađena je analiza sa stanovišta termodinamike, eksergije i ekonomije. Ekonomski pokazatelji ukazuju da ovaj način proizvodnje nije prihvatljiv usled previsoke cene investicije.

1.5. Struktura rada

Doktorska disertacija sastoji se od sedam poglavlja. Prvo poglavlje, uvodni deo definiše hipoteze, cilj i značaj disertacije, kao i pregled dosadašnjih istraživanja. Osim navedenog, u uvodu je opisano trenutno stanje održive tehnologije i dat je osvrt na kogenerativna postrojenja na naftnim poljima, koja su u daljim poglavljima detaljno opisana.

Druga celina je Teorijski deo disertacije. U ovom delu predstavljeno je trenutno stanje potrošnje i proizvodnje energije u Evropi i u Srbiji. Opisani su konvencionalni (gasni motori, gasne i parne turbine) i alternativni načini proizvodnje toplotne i električne energije (energija sunca, vetra i geotermalna energija). Ekonomski aspekti proizvodnje energije dati su u posebnom poglavlju Teorijskog dela gde je opisan način dobijanja statusa povlašćenog proizvođača energije u Srbiji. Indikatori održivog razvoja u proizvodnji energije bave se problemom globalnog zagrevanja, trendovima porasta koncentracije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte u svetu, ali i njihovim eksternim troškovima.

Teorijski deo se nastavlja se kogeneracijama, gde su prvo prikazane šeme funkcionisanja industrijskih eko-parkova koji otpad jedne proizvodne linije usmeravaju kao sirovinu u proizvodni proces druge linije, čime se optimizuje upotreba resursa. Upravljanje otpadnim materijalnim tokovima obrađeno je u posebnom poglavlju ove celine, gde je dat pregled dosadašnjih praksi u naftnoj industriji. Dobijanje sumpora i vodonika iz kiselih gasova,

iskorišćenje naftnog koksa i iskorišćenje procesne otpadne toplote glavni su segmenti ovog poglavlja.

Kogeneracije na naftnim poljima sa svom pratećom opremom i procesnim parametrima dati su u posebnom poglavlju. Rastvoreni naftni gas, njegovo dobijanje, načini eksploatacije i scenariji upravljanja ovim tokom dati su u poslednjem poglavlju Teorijskog dela.

Materijali i metode korišćeni prilikom izrade disertacije opisani su u poglavlju 3. Određivanje sastava RNG-a na odabranom naftnom polju (A) izvršeno je u skladu sa standardom SRPS EN ISO 6974-4:2008 metodom i pomoću tog standarda određena su fizičko-hemijska svojstva RNG-a za sagorevanje i dalje upravljanje u kogeneratorskim sistemima. Određivanje emisija nakon sagorevanja rađeno je pomoću relacije Ismail i Umukoroa-a [8]. Pomoću emisija nakon sagorevanja korišćene su metode ekološke procene iskorišćenja RNG-a i procena eksternih troškova emisija sagorevanjem RNG-a. Da bi eko-energetska analiza bila potpunija, pristupilo se izradi ASPEN simulacije kogenerativnog postrojenja. Ovaj programski paket je korišćen prilikom postavljanja simulacije i variranja procesnih parametara.

Rezultati i diskusija predstavljeni su u poglavlju 4. Za proračune su korišćena tri različita scenarija (spaljivanje RNG-a na baklji, sagorevanje u kotlu i u kogeneracionom postrojenju). Rezultati hemijskog sastava RNG-a koji se koristi u disertaciji prikazani su tabelarno. Pomoću njih su izračunati uticaji na životnu sredinu i prikazani kroz kumulativnu potrebu za energijom i uticajem na globalno zagrevanje.

Dalje, prikazani su rezultati eksternih troškova emisija nastalih sagorevanjem RNG-a na naftnim poljima. Pre izvođenja ASPEN simulacije urađen je eksperimentalni deo na naftnom polju (A) i svi relevantni podaci za razvijanje simulacije su prikupljeni tokom 2018. godine. Simulacija je sprovedena nakon uspešno postavljenog termodinamičkog modela, nakon čega su dobijeni rezultati bili diskutovani u skladu s hipotezama disertacije.

Literaturni pregled naučnih radova i udžbenika koji su korišćeni prilikom izrade ove doktorske disertacije nalazi se u poglavlju 6.

Teorijski deo

2. Energija

Bez upotrebe energije nije moguće zamisliti moderno društvo. Ona predstavlja središte svih ljudskih delatnosti. Korišćenje uglja uvelo je svet u nagli industrijski razvoj proizvodnjom toplotne i električne energije, dok je sirova nafta uvela pravu revoluciju u sektoru transporta. Predstavljajući krovni tok modernog sveta, energija diktira svaki korak industrijske proizvodnje. Tehnološki procesi zahtevaju upotrebu primarnog ili sekundarnog izvora energije. Ova energija može da se definiše i kao struktura ukupno raspoložive energije za potrošnju, bilo za energetske transformacije, bilo za direktnu potrošnju.

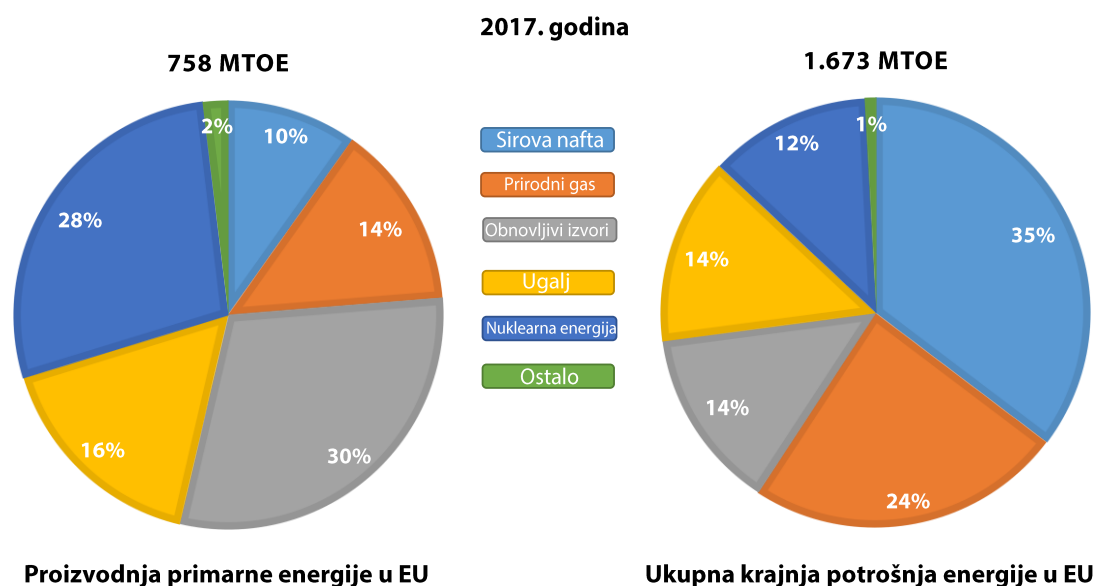
Primarni energetske izvori su dobijeni direktno iz prirodnog toka, kao što su sirova nafta, ugalj ili prirodni gas. Svi izvori energije koji nisu primarni, već su proizvedeni iz primarnih izvora, nazivaju se sekundarni izvori energije. Generisanje električne energije (sekundarni izvor) sagorevanjem gasa (primarni izvor) je jedan od primera.

Fosilna goriva (ugalj, sirova nafta i prirodni gas) obuhvataju 80% potrošnje primarnih energenata od čega se 58% koristi za transport [14]. Ova tri energenta predstavljaju glavne zagađujuće materije životne sredine. Najviše emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte dolazi sagorevanjem uglja (lignita), dok prirodni gas važi za energent koji emituje najmanje zagađujućih supstanci uz najveću toplotnu moć. Iz sirove nafte, pored goriva za industriju i transport, dobijaju se najrazličitiji proizvodi (plastika, hemikalije, itd.), čime se zavisnost celog čovečanstva čvrsto zasniva na fosilnim gorivima.

Energija se smatra glavnim posrednikom u stvaranju materijalnih dobara i čini najbitniji faktor u ekonomskom razvoju. Dostupnost energenata je usko povezana sa ekonomskim razvojem društva i zajednice. Početkom 1970-ih godina i prve velike nafte krize, javila se briga za cenu energije, dok u poslednjih dvadeset godina veću pažnju privlači rizik od zagađenja životne sredine. Ovo je posledica naglog porasta broja stanovnika, potrošnje energije i industrijske aktivnosti. Potreba za dugoročnim rešenjem, ubrzala je komercijalni razvoj obnovljivih izvora energije, programa energetske efikasnosti i održivih tehnologija.

2.1. Potrošnja energije u Evropi

Primarna energija predstavlja ukupnu raspoloživu energiju za direktnu potrošnju ili energetske transformacije u energetske objekte čime se zadovoljavaju energetske potrebe industrije, stanovništva, transporta, poljoprivrede, itd. Količina primarne energije koja prolazi kroz transformaciju u druge vidove energije, može se predstaviti kao ukupna krajnja potrošnja energije. Ukupna krajnja potrošnja energije pokriva isporučenu energiju krajnjim potrošačima za sve energetske i neenergetske potrebe, a dobija se sabiranjem krajnjih potrošnja svih sektora koji troše energiju (industrija, transport, domaćinstva, servisi i poljoprivreda). Na Slici 1 prikazan je udeo proizvodnje primarne energije i ukupne krajnje potrošnje energije u EU za 2017. godinu [15].



Slika 1. Ukupna proizvodnja primarne energije i ukupna krajnja potrošnja energije u EU za 2017. godinu [15]

Primećuje se znatna razlika između proizvodnje primarne i ukupne krajnje potrošnje energije, što ukazuje na potrebu EU za znatnim uvozom primarnih energenata, u najvećoj meri prirodnog gasa. Takođe, razlike između proizvodnje primarne i ukupne krajnje potrošnje energije može se pripisati energetske gubicima koji se dešavaju usled:

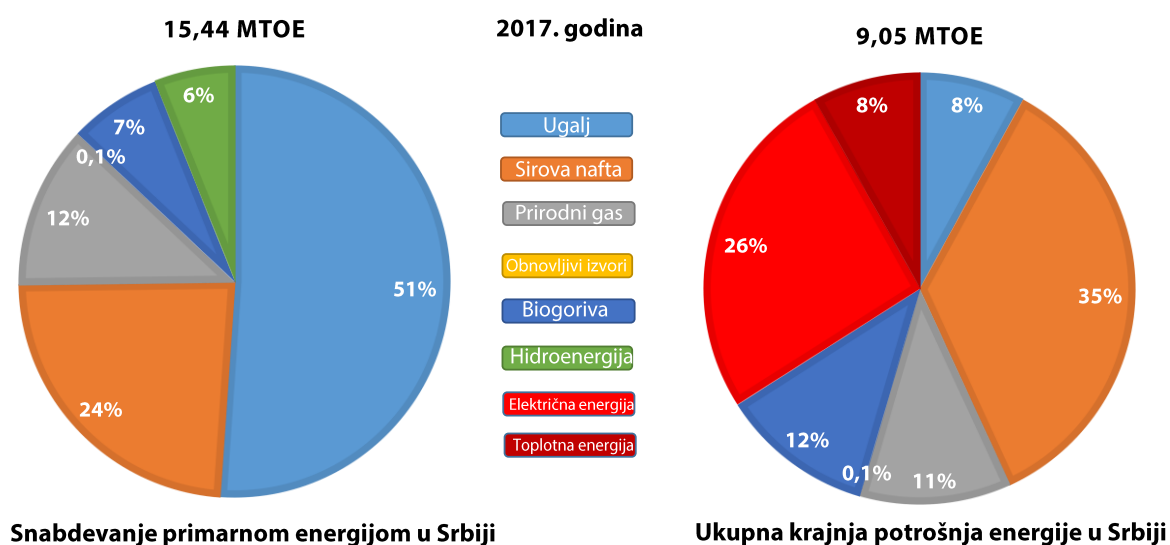
- prevođenje jednog oblika energije u drugi
- sopstvenu potrošnju
- termodinamička ograničenja
- zastarelost tehnologije

- lošu izolovanost sistema za prevođenje energije
- gubitke u sistemima za prenos energije

U razlici između primarne energije i ukupne krajnje potrošnje krije se potencijal za povećanje energetske efikasnosti. Da bi se ovo jasnije videlo potrebno je prikazati ukupnu proizvodnju primarne energije i ukupnu krajnju potrošnju energije u svetu, jer se na taj način anulira promenjiva odnosa uvoz/izvoz. Proizvodnja primarne energije u svetu u 2017. godini iznosila je 13.972 Mtoe, dok je ukupna krajnja potrošnja energije iznosila 9.717 Mtoe.

2.2. Potrošnja energije u Srbiji

Prema podacima Međunarodne energetske agencije [16], Srbija je 2017. godine imala u opticaju 15,44 Mtoe primarne energije (proizvodnja + uvoz), dok je ukupna krajnja potrošnja energije iznosila 9,05 Mtoe, što se može videti na Slici 2.



Slika 2. Ukupna primana energija i ukupna krajnja potrošnja energije u Srbiji za 2017. godini [16]

2.3. Konvencionalni i alternativni postupci proizvodnje toplotne i električne energije

2.3.1. Konvencionalni postupci proizvodnje energije

Konvencionalni postupci za proizvodnju energije zahtevaju neobnovljiva goriva kao energetski izvor, u najvećoj meri ugalj i prirodni gas. Ova dva fosilna goriva su 2017. godine

imala udeo od preko 60% u proizvodnji električne energije u svetu. Toplotna energija se javlja prilikom sagorevanja fosilnih goriva i može se koristiti na različite načine, od zadovoljavanja potrebe za grejanjem do proizvodnje vodene pare u tehnološkim procesima.

Početak dvadesetog veka, vodena para je bila glavni izvor mehaničke energije. U tom periodu električna energija nije bila prilagođena velikim industrijskim sistemima proizvodnje i distribucije, te nije bila dovoljno infrastrukturno rasprostranjena. Razvojem naizmennične struje, električna energija je postala mnogo pogodnija za rad i kontrolu. Kako je proizvodnja i distribucija električne energije značajno olakšana, mnoge male energane koje su do tada proizvodile samo vodenu paru, prilagodile su svoje proizvodne sisteme i time je započeta kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije iz istog energetskog izvora – kogeneracija.

Interesovanje za tehnologiju kombinovane proizvodnje toplotne i električne energije poraslo u poslednjih dvadeset godina usled potrebe za smanjenjem energetskih troškova uz poboljšanje pouzdanosti energetskih sistema. Kogeneracija je specifična forma distribuirane generacije (DG), koja se odnosi na strateško postavljanje postrojenja na samu lokaciju gde je potrošač blizu proizvođača kako bi se energija isporučivala lokalno uz što manje gubitaka usled transporta.

U ranim počecima razvoja energetske industrije, energija se prevodila iz jednog oblika u drugi na samoj lokaciji upotrebe (fabrika, mlinovi ili rudnici). Dobijanje električne energije, pratilo je neminovno dobijanje toplotne energije, usled oslobađanja hemijske energije goriva. Toplota se koristila za potrebe tehnološkog procesa ili za zagrevanje postrojenja samih fabrika. To je bio prvi vid kogeneracije, iako se u tom periodu nije koristio taj naziv.

Parne mašine su se prvi koristile u dobijanju mehaničke snage još u 18. veku. Prve elektrane izgrađene su 1882. godine u Londonu i Njujorku. Nakon razvoja parne turbine 1884. godine nove elektrane su koristile ulazno gorivo mnogo efikasnije, a same elektrane su mogle da prevedu mnogo više energije. 1905. godine parne turbine potpuno zamenjuju parne motore u centralizovanim elektranama [17].

U tradicionalnim centralizovanim elektranama toplotnu energiju vrela pare ili gasa, koja se koristi za pokretanje turbina koje generišu električnu energiju, nije lako iskoristiti

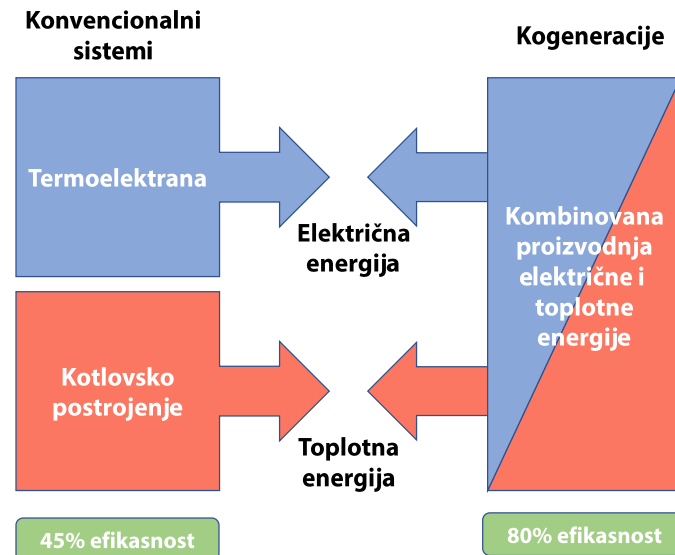
nakon izlaza iz turbine. U većini slučajeva, ona se jednostavno odbacivala kao višak u proizvodnji energije. Elektrane na kombinovani gasni ciklus koriste toplotu izduvnih gasova iz gasne turbine za zagrevanje vode kako bi generisali vodenu paru koja može da pokreće parnu turbinu i proizvede dodatne količine električne energije. Ovaj proces omogućava da se deo toplotne energije sačuva i iskoristi.

Konvencionalne termoelektrane koje proizvode samo električnu energiju sagorevaju gorivo prevodeći vodu u vodenu paru visokog pritiska koja pokreće parnu turbinu ili sagorevaju gas čiji produkti sagorevanja pokreću gasnu turbinu. Termoelektrane sa parnom turbinom imaju koeficijent efikasnosti oko 35-40%, dok termoelektrane sa gasnom turbinom imaju koeficijent efikasnosti od oko 40-55%. U ovakvim postrojenjima više energije je odbačeno nego što je potencijal potrošenog goriva [18].

Poređenja radi, kogeneracije rade sa ukupnom efikasnošću (toplotna + električna energija) od 75 do 95%, što znači da je potencijal ulaznog energenta značajno iskorišćen u izlaznim tokovima. Izlazna toplota dobijena generisanjem električne energije je iskorišćena kao toplotna energija, što smanjuje odbačenu energiju i zahteva manje ulaznog energenta za dobijanje iste količine korisnog rada, što nije slučaj u centralizovanim termoelektranama, gde se električna energija i toplotna energija posebno proizvode, parnom ili gasnom turbinom i kotlovima. Manjom upotrebom ulaznog energenta, dobija se više prednosti, kao što su:

- smanjenje troškova nabavke,
- smanjenje troškova u transportu i skladištenju,
- smanjenje ukupnih emisija,
- manje zagađujućih materija prolazi kroz motor ili turbinu, što produžava vek trajanja opreme.

Kogeneracija zadržava toplotnu energiju koja bi inače bila odbačena, direktnim korišćenjem tako da bude malo gubitaka prilikom prevođenja iz jednog oblika u drugi. Kao rezultat, ukupna efikasnost ovog integrisanog procesa je mnogo veća nego u sistemima sa odvojenom proizvodnjom energije. Na Slici 3 prikazan je odnos efikasnosti konvencionalnih sistema za prevođenje energije i kogeneracija.



Slika 3. Efikasnost odvojenih sistema i sistema kombinovane proizvodnje

Kogeneracija ne predstavlja određenu tehnologiju, već primenu različitih postojećih tehnologija kako bi se zadovoljila kombinacija energetskeg snabdevanja. U okviru postojećih tehnologija koje se primenjuju u kogeneracijama, dolazilo je do razvoja u smeru efikasnijeg iskorišćenja energenata. Tako se razvila tehnologija povećanja temperature sagorevanja gasa u gasnim turbinama što je omogućilo veću količinu dostupne toplotne energije za kogeneraciju, zatim poboljšanje u mogućnosti ekstrahovanja energije iz odbačene toplote, bolji materijali koji su smanjili gabarite postrojenja, kao i razvoj novih izvora goriva kao što su gorivne ćelije.

Sve oštrije regulative i pritisak javnosti za smanjenje, kako emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte, tako i kapitalnih i operativnih troškova samih elektrana, primorava vlasnike i operatere industrijskih pogona da i dalje pronalaze načine i tehnologije za efikasnije upravljanje. Metode koje se razvijaju uključuju:

- povećanje efikasnosti sistema generacije,
- povećanje energetske gustine goriva,
- smanjenje gubitaka u prenosu energije.

Konvencionalna proizvodnja električne energije sama po sebi je neefikasna, prevodeći svega trećinu potencijalne hemijske energije goriva u korisnu energiju. Povećanje energetske efikasnosti dovodi do smanjene potrošnje goriva i time do smanjenja gasova koji izazivaju efekat staklene bašte i operativnih troškova.

Kogeneracioni sistemi proizvode najčešće dva ili više korisnih izlaznih tokova, kao što su električna energija, prostorno zagrevanje, vrela voda/para ili napajanje rashladnih sistema. Najčešće kombinacije su električna energija i prostorno zagrevanje ili električna energija i proizvodnja vrela vode/pare. Ovaj vid kogeneracije poznatiji je pod nazivom kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije, na engleskom *Combined Heat and Power* (CHP).

Najefikasniji kogeneracioni sistemi (oni koji premašuju 80% ukupne efikasnosti) su sistemi koji pokrivaju velike količine za potrebnom toplotnom energijom, dok proizvode relativno manje električne energije. Smanjena proizvodnja električne energije je važan deo ekonomije kogeneracije jer sa tehničke strane, lakše je isporučiti višak električne energije u mrežu nego višak toplotne energije.

Tipična kogeneracija sastoji se od osnovnih elemenata, kao što su:

- turbina za namešavanje smeše gorivo/vazduh
- glavni pokretač (gasni motor, gasna turbina, parna turbina ili gorivne ćelije) pomoću kojeg se generiše električna energija,
- električni generator koji stvara električnu energiju,
- sistem za povrat otpadne toplote (sakupljanje toplotne energije iz izduvnih gasova glavnog pokretača, koja se usmerava na razmenjivač toplote koji otpadnu toplotu isporučuje u direktnu upotrebu).

Kogeneracije se mogu razvrstati po instalisanoj snazi u 4 osnovne kategorije [19]:

- mikro kogeneracije (1 do 5 kW),
- male kogeneracije (5 kW do 5 MW),
- srednje kogeneracije (5 MW do 50 MW),
- velike kogeneracije (50 MW do 150 MW).

Kogeneracije koje koriste prirodni gas kao pogonsko gorivo u gasnim motorima ili turbinama sve više zamenjuju termoelektrane koje koriste uglj kao energent. Najčešće, kogenerativni sistemi koriste goriva kao što su:

- prirodni gas,
- mazut,

- otpadni gas,
- biogas,
- ugalj.

Kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije iz istog energetskog izvora predstavlja efikasan primer održive tehnologije. Električna energija dobija se pomoću generatora, dok se hlađenjem sistema dobija toplotna energija, čineći ukupnu efikasnost veoma visokom. Ukoliko se za kogenerator koristi gorivo koje potiče iz otpadnog toka tehnoloških procesa, ova tehnologija ima snažnu ekonomsku opravdanost.

Kogeneracije postoje u raznim izvedbama, a razlikuje ih pogonska mašina, pa tako imamo kogeneracije sa:

- gasnom turbinom
- gasnim motorom
- motorom na biogoriva (najčešće dizel motori)
- motorom kombinovanog ciklusa
- parnom turbinom

2.3.2. Alternativni postupci proizvodnje energije

Obnovljivi izvori energije predstavljaju prirodne tokove energije koji su u stalnom i nepredvidivom kruženju, ali se iznova i iznova vraćaju sa potencijalnom. Čovek je izgradio mašine tako da što efikasnije prirodni tok prevede u energiju okoline i različite oblike korisne energije. Za razliku od obnovljivih izvora, koji se mogu regenerisati, neobnovljivi izvori energije čekaju u dubinama Zemlje da budu eksploatisani i zauvek potrošeni.

Usled sve intenzivnije potrošnje neobnovljivih resursa, kao što su sirova nafta, ugalj i prirodni gas, pokrenute su brojne inicijative širom sveta u cilju efikasnog iskorišćenja resursa ili njihove zamene za alternativne. Nekoliko obnovljivih izvora energije su predlagani kao alternativa tradicionalnim izvorima radi zaštite okoline i poboljšanja upravljanja zaštitom životne sredine. Usled povećane brige oko emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte, obnovljivi izvori energije postaju sve atraktivnija opcija za generisanje energije širom sveta [20]. U cilju kontrole globalnog zagrevanja i smanjenja emisija gasova koji izazivaju

efekat staklene bašte, potrebno je uvećati udeo obnovljivih izvora energije u proizvodnji primarne energije [21].

Svet razvija obnovljive izvore energije velikim ulaganjima, podsticajnim merama i istraživanjem. Ovaj trend je pokrenut kao rezultat sve nepovoljnijih izveštaja svetskih organizacija za zaštitu okoline. Poslednjih godina, postojeći obnovljivi izvori podvrgavaju se različitim prilagođavanjima i ukrštanjima sa drugim obnovljivim izvorima, čime se uvećava sveukupna efikasnost procesa [22].

Osnovni oblici obnovljivih izvora energije su:

- energija sunca,
- energija vetra,
- energija vode,
- energija zemlje.

Sunce emituje količinu energije od $3,8 \times 10^{23}$ kW/s, dok solarna radijacija koja stiže do zemljine površine iznosi godišnje oko 3.400.000 EJ, što je 7.500 više od potreba čovečanstva za primarnim energetske izvorima od 450 EJ [23].

Energija vetra je posledica neravnomernog zagrevanja zemljine površine, te različite temperature pomažu u formiranju vazdušnih struja u pokušaju da se izjednače. Čovečanstvo je koristilo energiju vetra za različite potrebe pre više od 5.000 godina, dok je proizvodnja električne energije korišćenjem energije vetra poslednji trend. Pre više od 20 godina, procenjeno je da je svetski potencijal za prevođenje mehaničke energije vetra u električnu oko 53.000 TWh godišnje, uzimajući u obzir stanje okoline i iskorišćenje zemljišta [24]. Od ove studije, potencijal je porastao za 5-10% usled povećanja vetrenjača u visinu i samim tim porasla je njihova mogućnost za većom snagom generatora, što omogućava veća brzina vetra. Biomasa, kao izvor energije, dostupna je u velikim količinama i raznim oblicima, od piljevine do otpadnih ulja. Ukupna potrošnja biomase kao primarne energije 2013. godine iznosila je oko 57 EJ, što je oko 10% svetske potrošnje primarne energije [25].

Geotermalna energija odnosi se na toplotu iz dubine zemlje, koja se najčešće sama javlja u postojećim vulkanskim predelima. Postoje dve forme iskorišćenja geotermalne energije, a to su: geotermalno grejanje i geotermalna proizvodnja električne energije.

Poslednjih godina, sve više se u svetu razvijaju pogoni za proizvodnju električne energije pomoću geotermalne energije [25].

2.4. Ekonomski aspekti proizvodnje energije

Tehnologije za visoko efikasnu potrošnju energije mogu značajno smanjiti potrošnju energije sa malo ili nimalo uticaja na životni standard. Zemlje u razvoju imaju mogućnost da iskoriste prednosti postojećih tehnologija za izgradnju energetski efikasnih sistema koji su manje štetni po životnu sredinu. Jednostavnim korišćenjem najefikasnijih poznatih tehnologija, potrošnja energije u zemljama u razvoju, mogla bi se smanjiti za 50%, a da se pri tome ne smanji životni standard. Time bi globalna potražnja energije ostala nepromenjena do 2020. godine. Udeo globalne potrošnje energije koji se pripisuje razvijenim zemljama, opao bi sa 70% na 35%, dok bi zemlje u razvoju mogle da povećaju potrošnju energije sa 30% na 65% globalne potrošnje. Države sa ograničenim domaćim izvorima energije imale bi koristi od veće samodovoljnosti i manje zavisnosti od uvoza energenata, a životni vek ograničenih resursa, sirove nafte i drugih fosilnih goriva, značajno bi se produžio.

Centralno ekonomsko pitanje je trenutno niska cena energije. Iako povećanje energetske efikasnosti za faktor 2 ili više, može biti tehnički izvodljivo, nije nužno ekonomski isplativo, tj. profitabilno. Značajni troškovi prate razvoj i uvođenje energetski efikasnih tehnologija. Ako su troškovi energije niski, verovatnije je da će pažnju i ekonomske investicije privući druge sfere života i poslova. Određivanje cene energije je takođe centralno pitanje za razvoj izvora energije koja se dobija od nefosilnih goriva. Na primer troškovi izvora solarne energije i ostalih obnovljivih izvora rapidno opadaju od 1980. godine. Osim cene, druga institucionalna pitanja su značajna za sprečavanje toga da alternativni izvori energije dobiju značajan udeo na tržištu [26].

Sa ekonomskog stanovišta, subvencionisanje eksploatacije fosilnih goriva je loša politika, jer fosilna goriva obezbeđuju malo eksternih koristi, a stvaraju mnoge eksterne troškove. Emisije nastale sagorevanjem fosilnih goriva izazivaju značajne efekte na životnu sredinu, od ljudi, flore, faune, pa sve do građevinskih materijala. Ovakve štete nameću troškove koji nisu direktan uzrok proizvođača, zbog čega ih nazivamo eksterni troškovi.

Niske cene fosilnih goriva mogu se adekvatno posmatrati kao neuspeh tržišta, jer izostavljaju eksterne troškove po zdravlje i negativan uticaj na životnu sredinu [27].

Energija je u samom vrhu državnih subvencija (SAD, Evropa), pored putnog transporta i poljoprivrede. Vlade često posmatraju jeftinu energiju kao ključni faktor ekonomskog razvoja. U SAD, godišnje energetske subvencije 90-tih godina iznosile su 25 milijardi dolara, od čega je na subvencije za fosilna goriva i nuklearnu energiju odlazilo 21 milijarda dolara. Subvencije za energiju u zapadnoj Evropi iznosile su 16 milijardi dolara, od čega je više od 10 milijardi odlazilo na fosilna goriva, a 4,6 milijardi na nuklearnu energiju. Ekonomska teorija ukazuje na to da porezi mogu da internalizuju mnoge negativne eksterne uticaje koje proizilaze iz upotrebe fosilnih goriva, ali subvencije imaju suprotan efekat jer ohrabruju veću potrošnju i okretanje ka "prljavim" energentima, kao što su ugalj i sirova nafta. Do izvesne mere vlasti su počele da preusmeravaju subvencije ka alternativnim izvorima energije. Koristi koje se dobijaju ukidanjem ili preusmeravanjem subvencija obuhvataju dobit od ekonomske efikasnosti, smanjenje sveukupne potrošnje energije, smanjenje emisije CO₂ i smanjenje lokalnog i regionalnog zagađenja, uključujući pojavu kiselih kiša i smoga. Šteta po poljoprivrednu proizvodnju, zdravstveni troškovi i izgubljeni životi usled oboljenja uzrokovanih zagađenjem mogu da se smanje, kao i da se olakša pritisak na državne budžete [26].

U Srbiji je od 2009. godine na snazi odredba o „Statusu povlašćenog proizvođača električne energije“. Ispunjavanjem kriterijuma stiče se status na osnovu kojeg se proizvedena energija otkupljuje od strane države po posebnim cenama u korist proizvođača. Status povlašćenog proizvođača mogu da steknu oni koji [4]:

- koriste obnovljive izvore energije ili komunalni otpad u procesu proizvodnje energije,
- proizvode energiju u malim energanama (do 10 MW snage) ili
- proizvode električnu i toplotnu energiju iz istog energetskog izvora.

Odredba jasno definiše finansijske mere podrške za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i energetski efikasnih izvora energije. Najvažniji aspekt je „*feed-in*“ tarifa koja definiše otkupnu cenu po kWh. U zavisnosti od izvora energije, otkupna cena po kWh se razlikuje, što je prikazano u Tabeli 1.

Tabela 1. Otkupne cene po kWh u zavisnosti od energetskog izvora

Redni broj	Vrsta izvora električne energije	Instalisana snaga P [MW]	Podsticajna otkupna cena [c€/kWh]
1.	Hidroelektrana	do 0,2	12,40
1.1	Hidroelektrana	od 0,2 do 0,5	13,727-6,633* P
1.2	Hidroelektrana	od 0,5 do 1	10,41
1.3	Hidroelektrana	od 1 do 10	10,747-0,337* P
1.4	Hidroelektrana	od 10 do 30	7,38
1.5	na postojećoj infrastrukturi	do 30	5,9
2.	Elektrane na biomasu	do 1	13,26
2.1	Elektrane na biomasu	od 1 do 10	13,82 – 0,56*P
2.2	Elektrane na biomasu	preko 10	8,22
3.	Elektrane na biogas	do 0,2	15,66
3.1	Elektrane na biogas	od 0,2 do 1	16,498 – 4,188*P
3.2	Elektrane na biogas	preko 1	12,31
4.	Elektrane na vetar	bilo koja	9,2
5.	Solarne elektrane	na objektu do 0,03	20,66
5.1	Solarne elektrane	na objektu 0,03 do 0,5	20,941 – 9,383*P
5.2	Solarne elektrane	bilo koja	16,25
6.	Geotermalne elektrane	do 1	9,67
6.1	Geotermalne elektrane	od 1 do 5	10,358-0,688*P
6.2	Geotermalne elektrane	preko 5	8,57
7.	Kombinovane elektrane	do 10	8,89

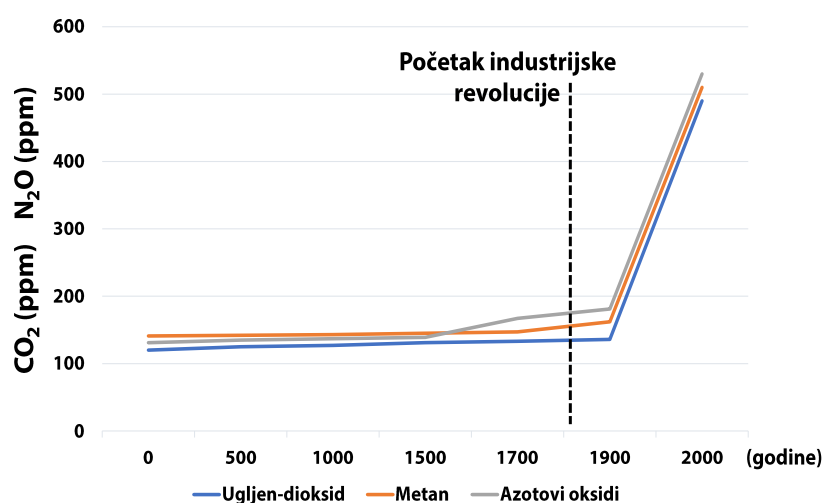
2.5. Indikatori održivog razvoja u proizvodnji energije

Održivi razvoj je način korišćenja energije na način da se podmiere trenutne energetske potrebe bez ugrožavanja potreba budućih generacija [28]. Postoji nekoliko indikatora održivog razvoja u proizvodnji energije koje je potrebno pratiti, a to su parametri globalnog zagrevanja, eksterni troškovi emisija od sagorevanja energenata i energetska efikasnost.

Globalno zagrevanje

Globalno zagrevanje je trenutno jedna od najšire diskutovanih tema, iz čega proizilaze veoma različita mišljenja. Neki istraživači tvrde da globalno zagrevanje dovodi do klimatske katastrofe podizanjem globalne temperature i otapanjem glečera, dok drugi opovrgavaju fenomen globalnog zagrevanja i odbacuju činjenicu da je ljudska aktivnost doprinela opterećenju atmosfere, već da su to prirodni ciklusi planete Zemlje. Različiti modeli su razvijeni kako bi se odredio antropološki uticaj na klimu [29].

Određena količina toplote dospe sa Sunca na Zemlju. Deo se apsorbuje na Zemljinu površinu, dok se drugi deo reflektuje nazad ka atmosferi (oko 6%). Zemlja prirodno odašilje toplotu radijacijom, koja zajedno sa reflektovanom Sunčevom toplotom dolazi do atmosfere. Usled povećane koncentracije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte, celokupna količina toplote ne može da prođe kroz atmosferu, već deo biva zadržan gasovima koji izazivaju efekat staklene bašte. U zavisnosti od toplotnog kapaciteta, gasovi mogu da prime veće ili manje količine toplote. Metan (CH_4) ima 34 puta veći potencijal globalnog zagrevanja (Global Warming Potential – GWP) od ugljen-dioksida (CO_2) u vremenskoj skali od 100 godina [30]. Industrijskom revolucijom (1760-1850. godine) čovečanstvo je prešlo sa ručne proizvodnje na mašinsku. Ova promena donela je povećanu proizvodnu efikasnost, korišćenje vodene pare, razvoj mašinskih alata i podizanje velikih fabrika i fabričkih sistema. Pored degradacije kvaliteta života velike većine ljudi u industrijskim zemljama, počelo je i zagađenje životne sredine.



Slika 4. Nagli porast gasova koji izazivaju efekat staklene bašte sa početkom industrijske revolucije

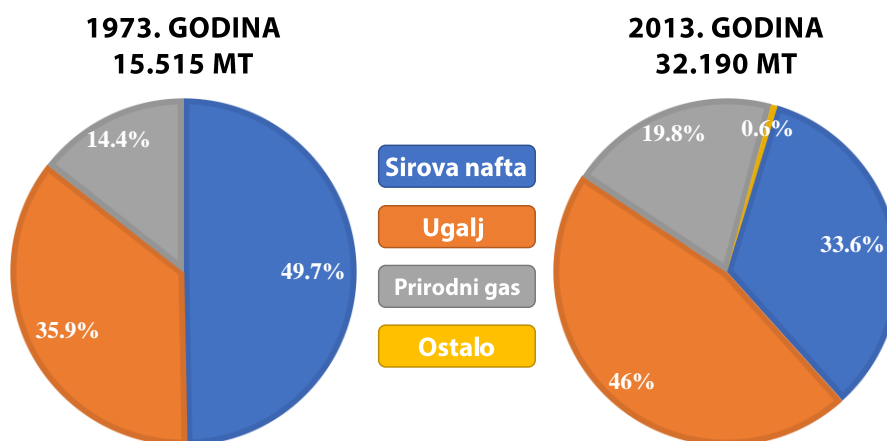
Kao glavni energent korišćen je uglj, čijim sagorevanjem dolazi do pojave smoga i kiselih kiša. U periodu industrijske revolucije počeo je nagli porast koncentracija CO₂ u atmosferi, kao što se može videti na Slici 4.

U poslednjih 20 godina termin globalno zagrevanje vezan je sve češće za doprinos CO₂ovom fenomenu. Od ukupnog efekta staklene bašte uzrokovanog aktivnostima čoveka, CO₂ doprinosi sa 50% (u najvećoj meri kroz saobraćaj i energetiku). Pored CO₂, gasovi koji izazivaju efekat staklene bašte koji doprinose povišenju Zemljine temperature su:

- CH₄
- CFC (hlorovani i fluorovani ugljovodonic)
- Vodena para
- N₂O
- O₃

Količine emitovanog CO₂ u poslednjih 40 godina povećale su se za 51%, sa 15.515 Mt 1973. godine, na 32.190 Mt 2013. godine, Slika 5. Različite tehnologije i materijali se razvijaju kako bi efikasno apsorbavali CO₂ iz dimnih gasova nakon procesa sagorevanja [31].

Eksterni troškovi emisija



Slika 5. Emisije CO₂ iz različitih izvora [31]

Sagorevanjem goriva emituju se gasovi koji izazivaju efekat staklene bašte, koji imaju štetan uticaj na:

- ljude
- floru
- faunu
- materijale

Ova naknadno nastala šteta, pored negativnog uticaja na globalno zagrevanje, stvara nove dodatne troškove korisnicima. Ovi troškovi ne ulaze u cenu proizvodnje i prodaje goriva, pa se nazivaju eksterni troškovi [27]. Cilj određivanja eksternih troškova je procena načinjene novčane štete za koju „niko“ nije odgovoran. Glavni uticaj proizilazi iz energetske aktivnosti (proizvodnja i potrošnja energije), kao što je životni ciklus goriva. Eksterni trošak se javlja kada društvene ili ekonomske aktivnosti jedne grupe imaju negativan uticaj na drugu grupu, a kada se taj negativan uticaj ne nadoknadi ili ne kompenzuje od strane prve grupe.

Jedan od primera eksternih troškova je sagorevanje goriva za transport. Zagađenje vazduha različitim emisijama ostavlja posledice po ljudsko zdravlje, a uklanjanje posledica npr. plućnih bolesti prouzrokovane ovim ne snose ni proizvođači goriva, kao ni potrošači, pa se ovaj trošak pripisuje zajednici.

Postoji mnogo načina za smanjenje eksternih troškova, od primene novih efikasnih tehnologija do postavljanja graničnih vrednosti emisija [32]. Specifična cena eksternih troškova predstavlja široko polje, što dovodi do visokog nivoa nesigurnosti i nepreciznosti u ovoj grani ekonomije i tehnologije. Najčešće uzimana cena za eksterne troškove nastale od CO₂ po Majbahu iznosi 25 EUR·Mg⁻¹ [33].

Energetska efikasnost

Energetska efikasnost znači korišćenje manje energije da bi se izvršila ista radnja, tj. da se smanji rasipanje energije na najmanju moguću meru. Postoje različiti načini da se podstakne energetska efikasnost. Smanjenje potrošnje energije smanjuje energetske troškove i rezultira u novčanim uštedama kod potrošača. Smanjenjem potrošnje energije smanjuje se koncentracija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. Po podacima Međunarodne energetske agencije (IEA), poboljšanje energetske efikasnosti u zgradama, industrijskim procesima i transportu može da smanji svetsku potrebu za primarnom energijom za 30% do 2050. godine [34].

Bez unapređenja energetske efikasnosti, povećanje ekonomske aktivnosti imalo bi veći uticaj na globalne energetske sisteme. Poboljšanja načinjena od 2000. godine u energetske efikasnosti smanjila su za 12% energetske potrebe u 2017. godini. Uvedene mere smanjile su emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte za 12%.

Usvajanje strategija energetske efikasnosti stavlja pod kontrolu načine proizvodnje i potrošnje energije, pa je u 2017. godini 34% svetske energije bilo pokriveno standardima, pravilnicima i zakonima o energetskej efikasnosti [34].

2.6. Kogeneracije na naftnim poljima

2.6.1. Održive tehnologije i industrijska ekologija

Održive tehnologije promovišu društvenu težnju ka održivom razvoju, te favorizuju praktična rešenja za postizanje ekonomskog razvoja. Ove tehnologije pomažu u smanjenju rizika, povećanju zarade ukoliko su državni podsticaji u skladu sa visinom investicije, povećavaju efikasnost procesa, proizvoda i usluga. Da bi se neka tehnologija klasifikovala kao održiva, rešenja bi trebalo da imaju sledeće karakteristike:

- minimalno korišćenje fosilnih goriva i prirodnih resursa uz maksimalnu iskorišćenost,
- održavanje ljudskih potreba uz uvažavanje prirodnog i kulturnog nasledstva,
- minimalan negativan uticaj na Zemljin ekosistem,
- iskorišćenje otpadnih tokova procesa kao sirovina za novi proces,
- ulaganje u obnovljive izvore energije.

Industrijska ekologija se bavi promenama industrijskih procesa na način da se materijalni tokovi iskoriste u punom obimu. Umesto odlaganja ili deponovanja, otpad se recirkuliše u sistem u kojem je potreban kao sirovina i na taj način se koristi u novim procesima. Ovakva istraživanja se usredsređuju na sledeća područja:

- Proučavanje tokova materijala i energije (industrijski metabolizam),
- Dematerijalizacija i dekarbonizacija,
- Tehnološke promene i promene okoline,
- Planiranje, konstrukcija i procena životnog veka (LCA analiza),
- Projektovanje u skladu sa okolinom,
- Dugotrajna odgovornost proizvođača,
- Politika zaštite životne sredine usmerena ka proizvodu,
- Energetska efikasnost.

Industrijska ekologija nastoji da razume način na koji industrijski sistemi (fabrika, globalna ekonomija, itd.) međusobno interaguju sa biosferom. Prirodni ekosistemi nude analogiju za bolje razumevanje kako različiti delovi industrijskog sistema međusobno deluju u ekosistemu. Inspiracija se pronalazi u ideji da prirodni sistemi nemaju otpadne tokove, već se sve može iskoristiti u nekom novom procesu.

Ekološko industrijski parkovi predstavljaju dobar primer saradnje proizvodnje koja teži poboljšanim ekološkim i ekonomskim pokazateljima što se postiže saradnjom u upravljanju okolinom i resursima, uključujući energiju, vodu i konstrukcione materijale. Ovakva postavka industrije ima veće dobiti nego suma dobiti kompanija, kada bi one radile zasebno [35].

Eko-parkovi su industrijski parkovi u kojima preduzeća saraduju međusobno, kao i sa lokalnom zajednicom, a sve u cilju da se smanji količina otpada i zagađenja, da se efikasnije troše resursi (voda, energija, infrastruktura, prirodni resursi i informacije) i da se dostigne nivo održivog razvoja sa povećanim ekonomskim prihodima, a ujedno i da se postigne poboljšanje životne sredine. Ekološki parkovi mogu se planirati i graditi tako da preduzeća lakše saraduju među sobom, što rezultira mnogo efikasnijim procesima koji postaju održivi i prikladni za okolinu.

Zasnovano na konceptima industrijske ekologije, kolaborativne strategije ne uključuju samo sinergiju sporednih produkata (razmena „od otpada do sirovine“), već može da bude i zajednička obrada otpadne vode, zajednička logistika i isporuka/doprema proizvoda, efikasni zeleni objekti, lokalni edukativni centri, itd. Ovo je sistemski pristup u kojem su procesi i aktivnosti projektovane tako da imaju višenamensku primenu. Eko-parkovi mogu da se razviju kao potpuno novi projekti, gde ekološka industrija prisustvuje kroz početno planiranje, uređenje i izgradnju samog parka ili kroz retroaktivno unapređenje i dodatnu izgradnju industrijskih kapaciteta [36].

Početak dvadeset i prvog veka počeo je razvoj održivih tehnologija koje su zasnovane na principima eko-parka, kao što su kogeneracije na naftnim poljima. Po principu da otpad može da postane korisna sirovina novog procesa u ovim sistemima simultano se proizvodi električna i toplotna energija iz jedinstvenog energetskeg izvora (rastvoreni naftni gas). Dobijena energija se isporučuje u elektrodistributivnu mrežu (električna), dok se

toplota energija koristi na samom naftnom polju. Pre nego što bude obrađena tematika kogeneracije na naftnim poljima, biće dat pregled određenih metoda upravljanja otpadnim materijalnim tokovima u naftnoj, ali i ostalim industrijama.

Upravljanje otpadnim materijalnim tokovima

Razvojem nauke i tehnologije, potražnja za energijom je sve intenzivnija, što rezultuje sve većom potrošnjom primarnih fosilnih goriva i porastom količina CO₂ i ostalih gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. U poslednjih nekoliko decenija, širom sveta javljaju se značajni napori za čistiju proizvodnju uz što manje otpada i štetnih emisija. Kontrola potrošnje energije u Evropi, povećanje iskorišćenja obnovljivih izvora energije i energetska efikasnost sa energetske uštedama glavni su deo važne uloge u ostvarenju zadatah mera Kjoto protokolom. Ovim dokumentom zadati su dugoročni ciljevi u postizanju održivog razvoja, čiji je cilj da do 2020. godine Evropa smanji količinu emisija za 20% u odnosu na 1990. godinu, povećanje energetske efikasnosti za 20%, kao i povećanje udela obnovljivih izvora energije za 20% u proizvodnji električne energije [10]. Različiti otpadni tokovi nekih industrijskih procesa imaju veliki potencijal da postanu primarni ili sekundarni izvor energije drugim industrijama, npr. otpadne gume mogu da postanu hemijski izvor energije za sagorevanje.

U naftno-petrohemijskoj industriji postoje različiti tehnološki procesi koji nakon svog upotrebnog ciklusa ostavljaju mogućnost iskorišćenja sopstvenih otpadnih tokova. Otpadni tokovi mogu da se koriste za zagrevanje novih tehnoloških procesa, za dobijanje novih proizvoda kombinacijom različitih otpadnih tokova, ali i za potpuno novu ulogu u proizvodnji energije.

Dobijanje sumpora (S) i vodonika (H₂) iz kiselih gasova

Desulfurizacija sirove nafte i prirodnog gasa i dalje predstavlja ozbiljan problem u hemijskoj industriji usled stalnog smanjenja dozvoljenih maksimalnih količina sadržaja sumpora u različitim gorivima. Očekuje se porast u količinama izdvojenog sumpora iz gasova kao što je vodonik sulfid (H₂S). Dobijanje elementarnog sumpora iz H₂S moguće je pomoću Klausovog postupka, ali dobijanje H₂ zahteva dodatne tehnološke operacije. Najčešći postupak za razdvajanje vodonika od sumpora je termalna dekompozicija (katalitička ili nekatalitička). Međutim, da bi se ovo postiglo potrebne su veoma visoke

temperature (preko 1000 °C), pa se otvara pitanje isplativosti i ekonomičnosti ovakvih procesa. Daljim istraživanjima, moguće je ovaj proces dovesti do komercijalne upotrebe [37].

Iskorišćenje naftnog koksa

Naftni koks nastaje kao čvrsti proizvod bogat ugljenikom iz procesa prerade sirove nafte. Sadrži preko 90% ugljenika i emituje 5-10% više CO₂ od uglja prilikom sagorevanja. Visoki sadržaj sumpora smanjuje njegovu tržišnu vrednost i dovodi u pitanje njegovo iskorišćenje usled sve strožih propisa vezanih za emisiju sumporovih oksida. Poslednja istraživanja favorizuju tehnološke procese gasifikacije naftnog koksa i proizvodnju vodonika, koji kasnije može da se koristi za hemijsku proizvodnju ili generisanje električne energije [38].

Iskorišćenje otpadne toplote

Procesna industrija je odgovorna za 27% svetske potrošnje energije, a godišnja potreba za toplotnom i električnom energijom ima tendenciju rasta za 1,9% i 2,4%, respektivno. Energetski intenzivni proizvodni procesi, kao što su železare, čeličane, cementare, pogoni hemijske industrije, industrije papira, trenutno troše 69% energije celokupne svetske industrije [39]. Ovim pogonima potrebne su velike količine goriva, čija toplotna moć je iskorišćena svega oko 60-70%, dok ostatak predstavlja gubitke, a ponajviše toplotne gubitke koji imaju potencijal upotrebe.

Izvori otpadne toplote se klasifikuju po temperaturnim nivoima, kao:

- niskotemperaturna toplota (<230 °C)
- srednjetemperaturna toplota (230-650 °C)
- visokotemperaturna toplota (>650 °C)

Srednjetemperaturna i visokotemperaturna otpadna toplota se praktično mogu regenerisati pomoću parnog Rankinovog ciklusa ili tehnologijama skladištenja toplote (topljene soli). Ipak, niskotemperaturne toplotne izvore, koji čine više od polovine otpadne toplote, teško je iskoristiti [40].

2.6.2. Kogeneracija na naftnim poljima

Potreba za kogenerativnim postrojenjima na naftnim poljima počela je da se javlja usled povećanja cene energenata i sve striktnijih zakonskih okvira koji se odnose na regulisanje emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. Jedan od sporednih proizvoda u procesu obrade sirove nafte na sabirno otpremnim stanicama jeste RNG. Dugi niz godina ovaj gas se tretirao kao otpadni tok i bivao je spaljivan na baklji. Najčešće se pristupalo ovom rešenju usled udaljenosti sabirno-otpremnih stanica od naselja kojem bi potencijalni energent bio isporučivan. Poslednjih godina u svetu RNG se počeo koristiti kao energent za kogeneraciona postrojenja, što za rezultat daje proizvodnju električne i toplotne energije. Električna energija se isporučuje u elektrodistributivnu mrežu, dok se toplotna energija koristi za potrebe naftnog polja.

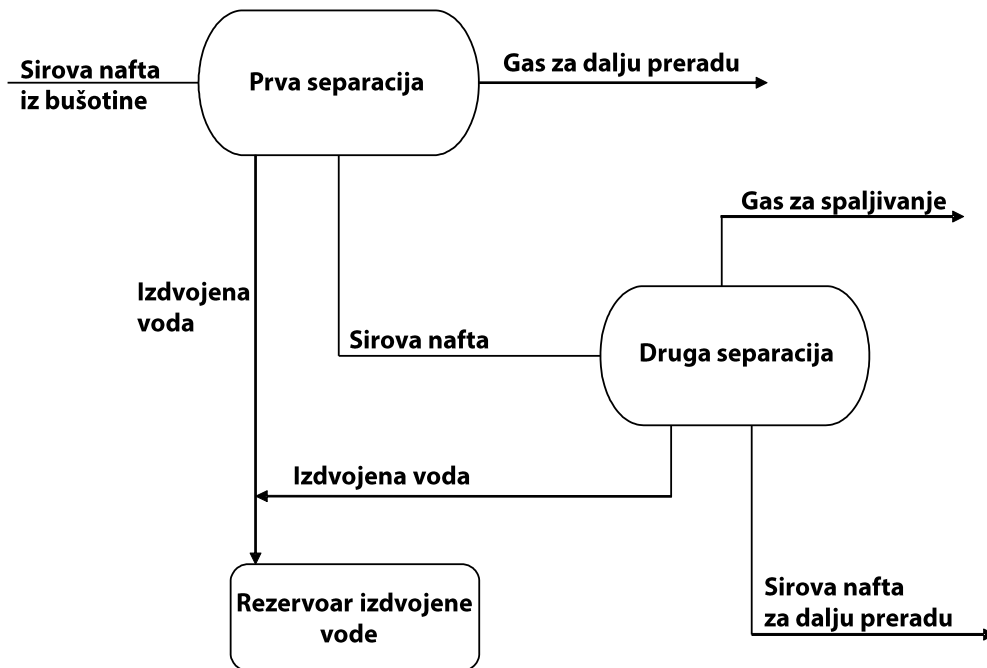
Postavljanje kogeneracionih postrojenja na naftnim poljima u Republici Srbiji, smanjena je količina spaljenog rastvorenog naftnog gasa na baklji, a dobijene su određene količine toplotne i električne energije za različite potrebe. Trenutno je pušteno u rad 18 postrojenja na naftno-gasnim poljima: Turija, Srbobran, Velebit, Sirakovo, Boka, Bradarac i Kikinda Gornje i Majdan. Svih 18 postrojenja isporučuje električnu energiju, dok 7 postrojenja kogeneracije isporučuje i toplotnu energiju. Ukupna instalisana električna snaga 18 postrojenja iznosi 14 MW, dok dobijena toplotna energije varira od toplotnih potreba polja. Na Slici 6 je prikazan izgled kogeneracionog postrojenja na jednom od naftnih polja u republici Srbiji.



Slika 6. Kogeneraciono postrojenje na naftnom polju

Organizacija rada sabirno otpremne stanice

Generalna šema rada sabirno otpremne stanice na naftnim poljima data je na Slici 7. Ukoliko se u sirovoj nafti nalazi kvalitetniji prirodni gas on se izdvaja nakon prve faze separacije i šalje se na dalju obradu, kompresiju i distribuciju. Nakon druge faze separacije sirove nafte, rastvoreni naftni gas koji je lošijeg kvaliteta šalje se na baklju na spaljivanje.



Slika 7. Blok šema rada sabirno otpremne stanice u eksploataciji sirove nafte

Ukoliko na naftnom polju postoji kogeneraciono postrojenje, RNG se šalje na pripremu za sagorevanje, nakon čega se usmerava u motor s unutrašnjim sagorevanjem. Kogeneraciono postrojenje na naftnim poljima sastoji se iz glavnih komponenata:

- postrojenje za pripremu rastvorenog naftnog gasa,
- motor sa unutrašnjim sagorevanjem
- generator
- sistem za distribuciju i prenos toplote
- trafostanica.

Kogeneracija na naftnom polju se nalazi u kompaktnoj jedinici sklopljenoj u kontejneru (Slika 6) radi zaštite od spoljašnjih uslova. U njemu se nalazi sklop motor-generator na osnovnom ramu u podu kontejnera. Pored sklopa nalazi se oprema za distribuciju i prenos toplotne energije, kao i predprostorija sa SCADA sistemom upravljanja i kontrole procesa.

Pored kontejnera nalazi se trafostanica koja služi za distribuciju električne energije u elektroenergetsku mrežu.

Osnovni tehnički parametri kogeneracione jedinice sa prosečnim vrednostima date su u Tabeli 2. Vrednosti koje su predstavljene u Tabeli 2. validne su za RNG koji ima udeo metana od 78%. Sastav RNG-a određen je pri standardnim uslovima, na 15 °C i 101,325 kPa.

Tabela 2. Osnovne tehničke karakteristike kogeneratorske jedinice, instalisane snage 950 kW

Karakteristika	Vrednost	Jedinica
Nominalna električna snaga	950	kW
Maksimalno ulazne toplote	1039	kW
Ulazna snaga goriva	2348	kW
Električna efikasnost	40,5	%
Toplotna efikasnost	44,3	%
Ukupna efikasnost	84,8	%
Ukupna potrošnja (100% izlaza)	185	Sm ³ /h
Ukupna potrošnja (75% izlaza)	144	Sm ³ /h
Ukupna potrošnja (50% izlaza)	103	Sm ³ /h

2.6.2.1. Priprema RNG-a za sagorevanje

RNG izdvojen iz sirove nafte u separacionom sistemu na naftnom polju sadrži različite primese (teži ugljovodonici, kiseli gasovi i vlaga), te nije pogodan za direktno sagorevanje u motoru sa unutrašnjim sagorevanjem. Iz RNG-a je prvo potrebno izdvojiti vlagu, a potom je potrebno regulisati zadate parametrima za proces sagorevanja (temperatura, pritisak i protok) u merno-regulacionoj stanici. Priprema RNG-a sastoji se iz dve etape:

- Izdvajanje vlage
- Regulacija parametara u merno-regulacionoj stanici

RNG sadrži određen udeo vlage, koja se zadržava u njemu prilikom separacije sirove nafte na naftnom polju. Termin sušenje gasa odnosi se na snižavanje njegove temperature dok se veći deo vlage ne izdvoji procesom kondenzacije. Gas, na pritisku 37-42 bara, pre ulaska u razmenjivač toplote, prolazi kroz filtarsku liniju gde se uklanjaju različite primese. U

razmenjivaču toplote, gas se hladi rashladnom smešom glikol-voda. RNG se uvodi u vertikalni separator u kojem se vrši izdvajanje i zadržavanje čestica vode i tečnih jedinjenja ugljovodonika postizanjem tačke rose prisutnih komponenata. Kondenzat se sliva u rezervoar kondenzata, dok se ohlađen gas šalje u merno-regulacionu stanicu.

U merno-regulacionoj stanici RNG-u se prilagođavaju pritisak i temperatura za proces sagorevanja. Merilo protoka gasa mora da ispunjava uslove očitavanja protoka između 3,2 – 500 Sm³. Sklop za merenje količine gasa smešten je u metalnom ormanu zajedno sa sklopom regulacionih armatura postavljenom na betonskom temelju.

MRS treba da obori pritisak gasa sa maksimalnih 40 bara, koliki je pritisak na mestu priključenja, na 2,8 bara koliko je predviđen pritisak na ulazu u gasnu rampu ispred gasnog motora. Gasna rampa se nalazi na samom ulasku gasovoda u kogenerator gde se reguliše protok. Temperatura RNG-a se podešava na 17 °C.

2.6.2.2. Uređaji kogeneratorske jedinice

Kompletna oprema sistema kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije mora da se obezbedi i zaštititi od vremenskih neprilika i fizičkih oštećenja. Najefikasniji i najbezbedniji način je postavljanje svih elemenata u jedinstvenu celinu – čelični kontejner.

Kontejner je sastavljen od čeličnih segmenata koji su vareni u celinu sa dve odvojene prostorije. Manja služi za upravljanje kogeneratorom, dok su u drugoj smešteni delovi opreme (motor, generator, gasne instalacije, razmenjivači toplote, itd.).

Ceo kontejner je zvučno i toplotno izolovan kako ne bi remetio zahteve službi za bezbednost i zdravlje na radu. Kablovi sa merila (gas, ulje, topla voda) sprovedeni su kroz zidove kontejnera radi bezbednosti. Pored kontejnera, u kojem se nalazi glavni deo opreme za proizvodni proces, potrebno je postaviti prateću opremu. Na krov se postavlja razmenjivač toplote izduvnih gasova sa snopom cevi u omotaču, dimnjak za izduvne gasove, kao i sistem ventilatora za hlađenje sistema.

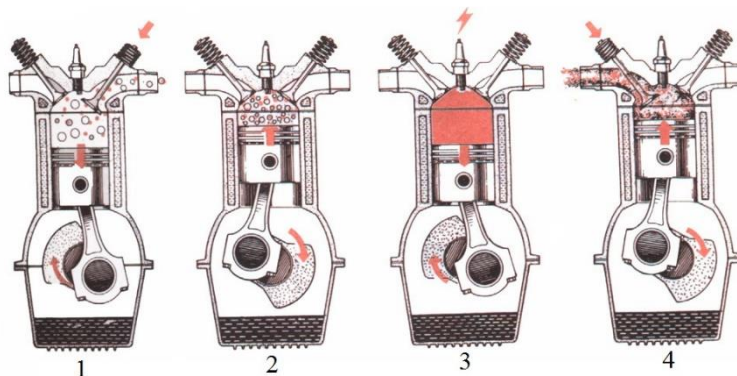
Gasni motor sa unutrašnjim sagorevanjem

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem su uređaji u kojima se vrši sagorevanje goriva, najčešće vazduha, u komorama za sagorevanje – cilindrima. Ekspanzija visokotemperaturnih i visokopritisnih gasova proizvedenih vrši direktnu silu na komponente motora, kao što su rasprskivač, lopatice, rotor ili klipovi, što je ispitivano u ovoj doktorskoj disertaciji. Ova sila prevodi hemijsku energiju goriva u korisnu mehaničku energiju. Snaga klipova se prenosi na osovinu koja prelazi u rotaciono kretanje. Ovo kretanje pokreće generator, koji je vezan na osovinu.

Kogeneraciono postrojenje obuhvaćeno analizom ove doktorske disertacije na naftnim poljima u Srbiji, pokreće četvorotaktni gasni motor sa unutrašnjim sagorevanjem u kojem se koristi RNG. Potreban je krug od četiri zamaha za sagorevanje, nakon čega se krug ponavlja, sve dok motor ima dotok gasa. Četiri takta u motoru su:

1. *Uvođenje* – Usisni ventili su otvoreni i smeša vazduh-gas se uvodi u cilindar, povećavajući njegovu zapreminu, sve dok klip ne dostigne najnižu tačku cilindra (donja mrtva tačka).
2. *Kompresija* – ventili se zatvaraju sa obe strane cilindra, a klip se iz najniže tačke penje ka najvišoj tački cilindra (gornja mrtva tačka) u cilindru sabijajući smešu vazduh-gas i povećavajući smeši pritisak i temperaturu. Neposredno pred dolazak klipa u najvišu tačku cilindra, svećica generiše varnicu čime se smeša gasa i vazduha pali.
3. *Radni takt* – Pritisak sagorevanja smeše vazduh-gas gura klip u najnižu tačku cilindra stvarajući više rada nego što je potrebno da se smeša sabije. Širenjem gasa opada njegova gustina, pritisak i temperatura. Kada klip dostigne najnižu tačku cilindra, potisni ventil za izduvne gasove se otvara.
4. *Izduvni gas* – Potisni ventil za izduvni gas ostaje otvoren dok se klip kreće ka najvišoj tački cilindra i usmerava izduvne gasove van cilindra. Na kraju ovog takta ventili za izduvni gas se zatvaraju, dok se uvodni ventili otvaraju, čime se završava jedan radni ciklus i počinje novi.

Na Slici 8 prikazana su 4 takta kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Nakon sagorevanja, osovinu pokreće generator čime se mehanička energija klipova prevodi u električnu energiju [41].



Slika 8. Uvođenje, komprimovanje, sagorevanje i izlaz gasa u cilindru [41]

Motori sa unutrašnjim sagorevanjem pokreću kogeneratorski sistem na naftnim poljima. Pored gasnih motora, mogu se koristiti i gasne turbine za sagorevanje gasa. Gasne turbine će se prvi put koristiti u kogenerativnim sistemima na gasnom polju Majdan. Karakteristike gasnog motora na naftnim poljima date su u Tabeli 3.

Tabela 3. Osnovne karakteristike motora sa unutrašnjim sagorevanjem

Karakteristika	Vrednost	Jedinica
Broj cilindara	12	-
Raspored cilindara	u V	-
Radna brzina	1500	min ⁻¹
Potrošnja ulja	0,2	g·kWh ⁻¹
Maksimalna izlazna snaga	977,3	kW

Ukoliko ulazno gorivo nije odgovarajućeg kvaliteta, može doći do degradacije komponenata unutar motora usled sagorevanja. Kaptazni gas je podložan promeni svog sastava u vremenu. Bezuslovno sagorevanje u motoru može dati ekonomsku opravdanost, ali ovaj scenario donosi probleme vezane za različite karakteristike sagorevanja što može da dovede do korozije, eksplozije ili erozije materijala [42].

Generator

Generatori predstavljaju rotacione sklopove koji prevode mehaničku energiju u električnu. Generatori se obično sastoje od rotora (pokretnog dela) i statora (statičnog dela) čija magnetna sila uzrokuje usmereno kretanje naelektrisanja. Izvor električne energije u

kogeneracionim jedinicama je sinhroni generator, sa tipičnim karakteristikama datim u Tabeli 4. Odnos realne snage i reaktivne snage sistema predstavljen je kao $\text{Cos } \varphi$ – faktor snage.

Tabela 4. Karakteristike sinhronog generatora kod kogeneracione jedinice

Karakteristika	Vrednost	Jedinica
$\text{Cos } \varphi$	0,8/1,0	-
Efikasnost pri normalnom radu	97,2	%
Napon (razlika potencijala)	400	V
Frekvencija	50	Hz

U kogeneratorskim sistemima, generator je osovino vezan za motor sa unutrašnjim sagorevanjem, čijom rotacijom se pokreće rotor.

Sistem za razmenu toplotne energije

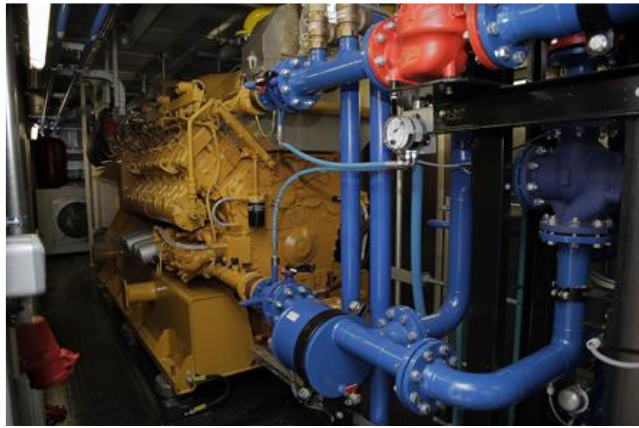
Sagorevanjem gasa u cilindrima motora produkuju se dimni gasovi visoke temperature (preko 500 °C), što prouzrokuje zagrevanje ulja motora i samih cilindara. Hlađenje motora, cilindara i dimnih gasova obavlja se u primarnom krugu pomoću rashladnog fluida glikol-voda. Sekundarni krug podrazumeva toplovodni sistem od kogeneratora do naftnog polja. Topla voda se zagreva u pločastom razmenjivaču toplote (Slika 15) pomoću smeše glikol-voda koja se zagreva do 90 °C u primarnom krugu.

Rashladni fluid glikol-voda koristi se za hlađenje motora, kao i za hlađenje ulazne smeše gas-vazduh kako bi pri ulasku u motor bila zahtevane temperature od 48,5 °C. Na Slici 9 je prikazan sistem (plave cevi) ulaska/izlaska smeše glikol-voda u/iz motora, što predstavlja prvi deo primarnog tehnološkog kruga razmene toplote.

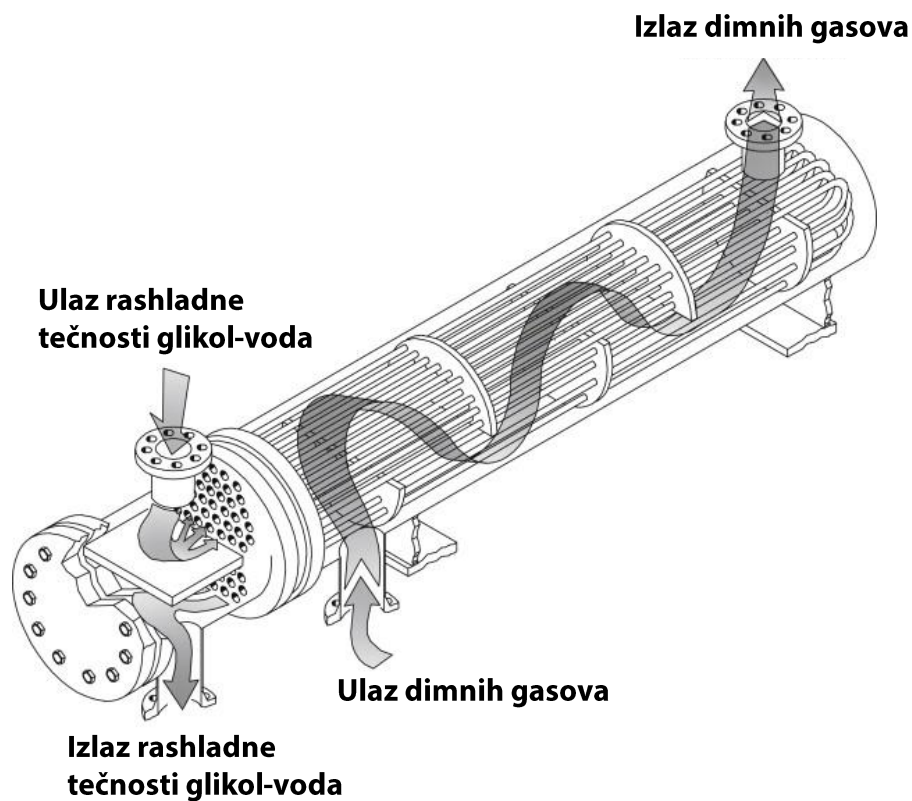
Rashladni fluid obeležen je plavom bojom u primarnom tehnološkom krugu, Slika 9. Glikol-voda ulazi u motor na temperaturi od oko 73 °C, da bi nakon izlaska iz motora smeša glikola i vode bila zagrejana do 85 °C. Nakon motora, smeša se usmerava na krov kontejnera kogeneratora, gde se nalazi razmenjivač toplote dimnih gasova, što predstavlja drugi deo primarnog kruga razmene toplote.

U ovom uređaju (Slika 10) smeša se zagreva do 90 °C nakon čega se šalje na pločasti razmenjivač, gde razmenjuje toplotu sa ležišnom vodom izdvojenom na naftnom polju.

Razmenjivač toplote izduvnih gasova sa snopom cevi je podložan degradaciji kada RNG koji se sagoreva u motoru sadrži primese poput H_2S . Nakon sagorevanja može doći do formiranja i kondenzacije sumporne kiseline što rezultira korozijom konstrukcionih elemenata razmenjivača toplote.



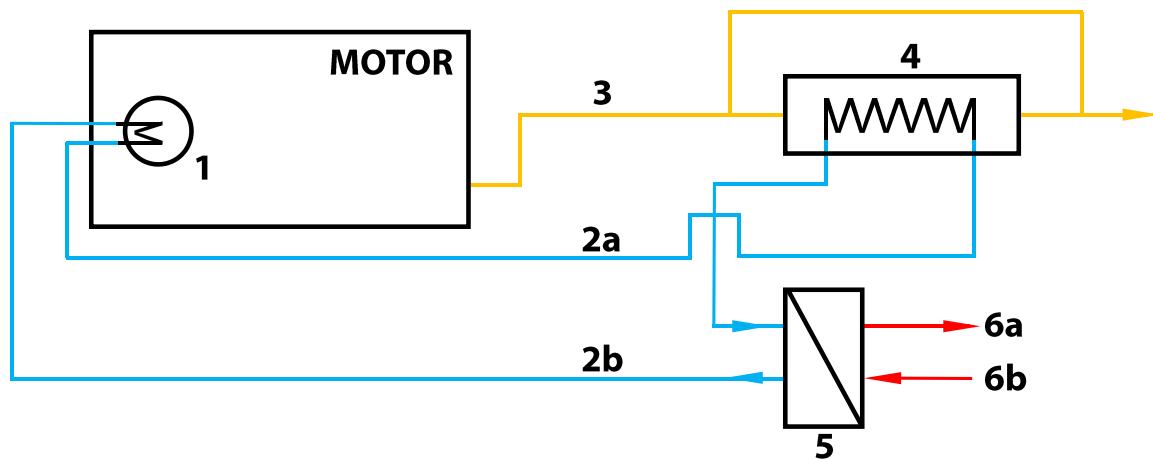
Slika 9. Sistem distribucije smeše glikol-voda u/iz motora



Slika 10. Razmenjivač toplote dimnih gasova, drugi deo primarnog kruga razmene toplote

Crvenom bojom (Slika 11) obeležena je voda u sekundarnom tehnološkom krugu. Dimni gasovi obeleženi su narandžastom bojom, gde se vidi da pre prolaska kroz razmenjivač toplote dimnih gasova postoji odvod kojim se dimni gasovi preusmeravaju ukoliko razmenjivač nije u funkciji ili su zadovoljene toplotne potrebe naftnog polja.

Toplotni sistem kogeneracione jedinice formira se sekundarnim krugom. Sekundarni krug predstavlja sistem predaje celokupne toplotne energije potrošaču na naftnom polju, prenoseći toplotu sa primarnog kruga. Tehnološki krug predstavlja deo razmene toplote između ulazne smeše gas/vazduh sa smešom glikol-voda. Ulazna smeša se zagreva pomoću radijacije izduvnih gasova, a tu toplotu predaje rashladnoj smeši kako bi pri ulasku u motor bila na zahtevanoj temperaturi.



Slika 11. Uprošćena tehnološka šema kogenerativnog postrojenja sa obeleženim primarnim (plava i žuta linija) i sekundarnim toplotnim krugom (crvena linija)

1. U motoru sa unutrašnjim sagorevanjem nalazi se pločasti razmenjivač toplote, prvi u toplotnom ciklusu razmene između dimnih gasova i rashladne tečnosti glikol-voda
- 2a. Tok glikol-vode nakon razmene toplote u motoru
- 2b. Tok glikol-vode sa polja ka motoru
3. Tok izduvnih gasova ga razmenjivaču toplote sa snopom cevi u omotaču
4. Razmenjivač toplote sa snopom cevi u omotaču u kojem se dešava razmena toplote između izduvnih gasova iz motora i rashladne tečnosti glikol-voda

5. Pločasti razmenjivač toplote koji služi za razmenu toplote između glikol-vode iz toplotnog kruga i glikol-vode sa naftnog polja.

6a. Zagrejana tečnost glikol-voda u svom toku prema naftnom polju

6b. Iskorišćena tečnost glikol-voda u svom toku dolazi sa naftnog polja i ponovo ulazi u toplotni krug.

Primarni krug za razmenu toplotne energije

Primarni krug predstavlja interni zatvoreni krug pod određenim pritiskom, koji preuzima toplotu od motora i dimnih gasova, predajući je sekundarnom krugu. Ukoliko iz tehničkih problema nije moguće preneti toplotu iz primarnog kruga, ona se šalje na uređaje za brzo hlađenje. U Tabeli 5 date su glavne karakteristike primarnog kruga za razmenu toplotne energije u sistemu.

Tabela 5. Karakteristike primarnog kruga

Parametri primarnog kruga	Vrednost	Jedinica
Medijum za prenos toplote	voda+etilen-glikol	-
Koncentracija etilen-glikola	35	%
Izlaz toplotne energije iz kruga	1039	kW
Maksimalni operativni nad-ritisak	300	kPa

Sekundarni krug za razmenu toplotne energije

Sekundarni krug predstavlja krug koji obezbeđuje isporuku toplotne energije ka potrošaču, koja se dobija hlađenjem motora i dimnih gasova (primarni krug). Obično je sekundarni krug podešen tako da povratna voda od potrošača bude na temperaturi 40-70 °C, dok je prosečna temperatura vode ka potrošačima 90°C. Oprema koja je postavljena van kontejnera (spojnice, cevi), moraju biti obezbeđene protiv zamrzavanja, dok cirkularna pumpa zadužena za kruženje vode u sekundarnom krugu. Tehnički parametri sekundarnog kruga dati su u Tabeli 6.

Tabela 6. Karakteristike sekundarnog kruga

Parametri sekundarnog kruga	Vrednost	Jedinica
Medijum za prenos toplote	Voda	-
Izlaz toplotne energije iz kruga	1039	kW
Temperature vode od/ka potrošaču	70/90	°C
Temperatura od potrošača min/max	40/70	°C
Nominalni protok kroz sekundarni krug	12,5	kg/s
Maksimalni operativni nad-pritisak	600	kPa
Preporučeni operativni nad-pritisak	450	kPa
Minimalni operativni nad-pritisak	100	kPa

Tehnološki krug

Tehnološki krug predstavlja krug hlađenja ulazne smeše vazduh/gas. Krug je zatvoren i izlazna temperatura rashladne smeše iz razmenjivača toplote iznosi 40 °C, dok nakon hlađenja ove smeše, temperatura raste do 43 °C. Radni parametri tehnološkog kruga dati su u Tabeli 7.

Tabela 7. Karakteristike tehnološkog kruga

Parametri tehnološkog kruga	Vrednost	Jedinica
Medijum za prenos toplote	voda+etilen-glikol	-
Koncentracija etilen-glikola	35	%
Izlaz toplotne energije iz kruga	97	kW
Temperatura rashladne tečnosti (pre hlađenja smeše)	40	°C
Temperatura rashladne tečnosti (nakon hlađenja smeše)	43	°C
Protok rashladne tečnosti	9,7	kg/s
Maksimalni operativni nad-pritisak	300	kPa

Trafostanica

Razvodna postrojenja su deo energetskeg sistema koji služi za prenos i distribuciju električne energije. U njima se najčešće nalaze transformatori pomoću kojih se vrši promena napona između prenosnih i distributivnih elektroenergetskih mreža.

Dobijena električna energija pomoću generatora distribuira se pomoću dalekovoda u elektroenergetsku mrežu. Da bi stigla do dalekovoda, potrebno je da prođe kroz trafostanicu koja je sastavni deo kogeneracionih jedinica na naftnom polju. Generator stvara niski napon od 0,4 kV koji se u trafostanici menja na srednji napon od 20 kV i kao takav se isporučuje u elektroenergetsku mrežu.

2.6.3. Ograničenja i problemi u radu kogeneracione jedinice

S obzirom da se RNG na naftnim poljima dobija separacijom od sirove nafte, njegov hemijski sastav se menja u vremenu. Ovo može dovesti do lošijih termodinamičkih karakteristika motora [43], ali i do degradacije delova motora i prateće opreme kogeneracione jedinice [44].

Varijacije hemijskog sastava RNG-a mogu uticati na efikasnost sagorevanja. Ukoliko se u sastavu gasa nalazi veća koncentracija azota, toplotna moć se snižava i samim tim više goriva se troši za istu izlaznu snagu motora [45]. Povećana koncentracija vodonika u sastavu RNG-a utiče na neuniformnost oslobođene toplote u cilindrima, što u ekstremnim situacijama može prouzrokovati fizičko oštećenje cilindra čime se ceo pogon stavlja van upotrebe [46]. Više o problemima različitih primesa u RNG-u biće rečeno u narednom poglavlju.

Promene u sastavu gasa mogu uticati na performanse celokupnog sistema, varirajući različite parametre za 1-5%, kao što su [47]:

- izlazna snaga motora
- brzina obrtaja
- ulazna količina goriva u motor
- specifična potrošnja goriva

Kontrola varijacije sastava RNG-a može se vršiti pomoću dva parametra, Vobeovog i metanskog broja.

Vobeov broj (Wobbe index) je parametar koji pokazuje količinu toplotnog opterećenja prilikom sagorevanja, tj. količinu toplote dovedenu gasom u gorionik po jedinici vremena:

$$I_w = \frac{HHV}{\sqrt{\rho_s}} \quad (1)$$

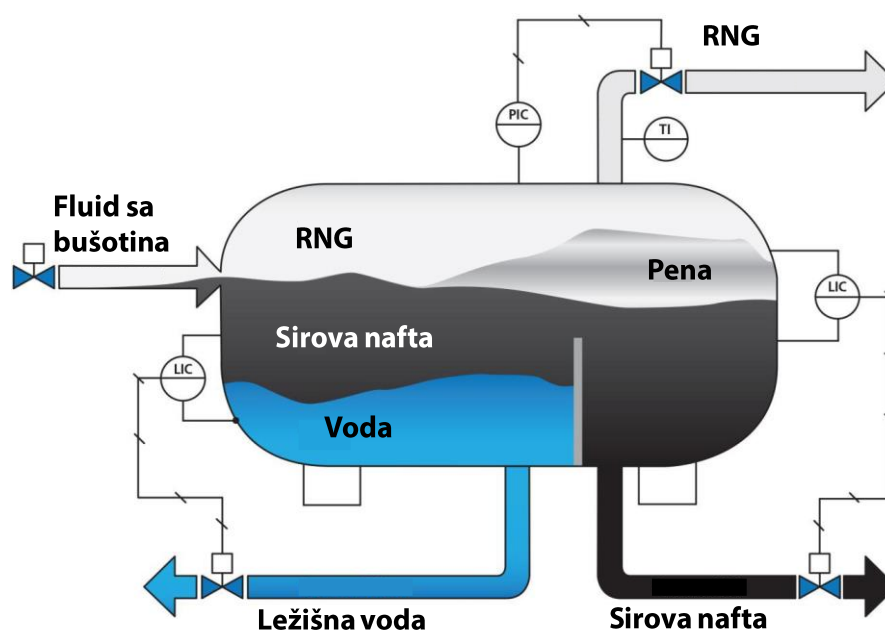
Vobeov broj je predstavljen kao I_w u jednačini 1 i predstavlja odnos gornje toplotne moći goriva (HHV) u odnosu na kvadratni koren njegove relativne gustine (ρ_s) [48]. Vobeov broj je ključni faktor u određivanju ujednačenosti različitih sastava gasa u jedinici vremena. Različiti sastavi gasa s identičnim Vobeovim brojem imaju istu količinu oslobođene energije prilikom sagorevanja u identičnim uslovima. Vobeov broj se određuje na samoj lokaciji pomoću odgovarajuće opreme i često se ne određuje ukoliko se radi o postrojenjima manje instalisane snage.

Metanski broj se određuje na osnovu udela metana u hemijskom sastavu RNG-a. Različiti tipovi motora imaju različite tolerancije na metanski broj, pa je važno pre postavljanja kogeneracione jedinice odrediti hemijski sastav gasa koji će se koristiti za sagorevanje. Metanski broj je važan faktor prilikom određivanja performansi motora, pogotovo u uslovima moguće varijacije sastava gasa [49].

Uticaj isporučene toplote na samom naftnom polju igra ključnu ulogu u postizanju visoke efikasnosti celokupnog procesa. Ukoliko se deo toplotne energije ne isporuči, ukupni koeficijent efikasnosti procesa opada što ugrožava ekonomsku isplativost investicije koja zavisi od "feed-in" tarife [50].

2.7. Rastvoreni naftni gas – RNG

Rastvoreni naftni gas (RNG) ili kaptažni gas nalazi se rastvoren u sirovoj nafti ili u gasnoj fazi iznad sirove nafte u ležištu [51], [52]. Rastvoreni naftni gas zajedno sa sirovom naftom se izvlači na površinu iz ležišta. Prilikom procene naftnih rezervi često se pronađu i susedne rezerve marginalnih količina RNG-a [53]. Da bi se RNG dalje procesuirao potrebno je izvršiti njegovo izdvajanje iz sirove nafte.



Slika 12. Proces separacije sirove nafte od vode i RNG-a i unutrašnjost uređaja na polju

Izdvajanje RNG-a iz sirove nafte

Fazna separacija sirove nafte na lokaciji eksploatacije vrši se pomoću sistema trofaznih separatora na osnovu razlike u gustinama. Voda i sirova nafta, kao teže frakcije odvajaju se sa dna uređaja, dok se RNG, kao najlakša frakcija, odvaja sa vrha. Na Slici 12. prikazan je separator za grubo odvajanje vode i gasa od sirove nafte.

Naftna polja s dugim eksploatacionim vekom poseduju veće količine RNG-a. Ovo nekada predstavlja problem naftnim kompanijama jer se usporava eksploatacija sirove nafte dok se angažuju dodatna postrojenja za procesuiranje RNG-a na površini što uvećava ukupne troškove proizvodnje. Ovo je jedan od razloga što se naftne kompanije odlučuju da RNG spaljuju ili ispuštaju u atmosferu, dok neki vraćaju RNG u bušotine kako bi povećali

energiju ležišta. Praćenjem gas-nafta faktora (GNF) mogu se odrediti količine RNG-a u bušotini, kao i njegov sastav i tehničke karakteristike.

Komercijalizacija ili monetizacija RNG-a zahteva pouzdana predviđanja njegove proizvodnje i eksploatacije iz sirove nafte. Procena proizvodnje RNG-a može da se izvede pomoću GNF-a, brzine proizvodnje nafte ili pomoću karakteristika i istorijata naftne bušotine [54]. U praksi, postoje dva presudna faktora koji utiču na proizvodnju RNG-a: količina rastvorenog gasa u sirovoj nafti i blizina naseljenog mesta [55].



Slika 13. Horizontalni trofazni separator na naftnom polju

U cilju određivanja kapaciteta postrojenja za iskorišćenje RNG-a mora biti određena količina tehnički iskoristivog RNG-a. S obzirom da se rezerve ne mogu izmeriti u samoj bušotini, količine se obično procenjuju na osnovu navedenih parametara.

RNG ima sličan odnos ugljovodonika kao i prirodni gas, ali u zavisnosti od naftnog polja, udeli frakcija ugljovodonika i ostalih jedinjenja, kao što su N_2 i CO_2 , mogu veoma da variraju. U Tabeli 8 [12] dati su minimumi i maksimumi udela ugljovodonika, azota i ugljen-dioksida.

Postoje slučajevi gde su dokazane znatne rezerve iskoristivog RNG-a u naftnoj bušotini, ali tehno-ekonomski parametri ne idu u korist njegove eksploatacije. Po navodima [56], [57] količine RNG-a koje nisu komercijalno isplative predstavljaju više od polovine svetskih rezervi prirodnog gasa.

Tabela 8. Prosečni sastavi RNG-a na naftnim poljima u svetu

Komponenta	Hemijska formula	Molski udeo (%)
Metan	CH ₄	50 – 70
Etan	C ₂ H ₆	5 – 10
Propan	C ₃ H ₈	1 – 6
Butan	C ₄ H ₁₀	1 – 5
Pentan	C ₅ H ₁₂	1 – 4
Heksan	C ₆ H ₁₄	1 – 3
Azot	N ₂	1 – 15
Ugljen dioksid	CO ₂	1 – 25

Promena sastava kaptažnog gasa ima negativan uticaj na opremu za prenos toplotne energije. Razlog tome su nepoželjne čvrste čestice (praškaste materije) u izduvnim gasovima [58]. Drugi glavni problem varijabilnog sastava kaptažnog gasa javlja se kod vođenja procesa. Dolazi do smanjenog radnog veka opreme usled degradacije prouzrokovane različitim sastavom, što doprinosi porastu cene održavanja sistema jer se vreme između remonta skraćuje.

2.7.1. Uklanjanje neželjenih komponenata iz RNG-a

Izdvajanje azota iz rastvorenog naftnog gasa

Prirodni gas, jedan od glavnih primarnih energetske izvora, često sadrži značajne količine azota, inertnog gasa koji smanjuje toplotnu moć gasa [59]. Da bi se prirodni gas uveo u mrežu gasovoda, potrebno je iz njega ukloniti azot. Isti je slučaj i sa RNG-om ukoliko postoji mogućnost njegove distribucije u gasovodu. Prečišćavanjem se uklanja neželjeni azot i gas dostiže se kvalitet za dalju distribuciju.

Za manja gasna polja, kao što su u Vojvodini, koriste se membranski procesi za izdvajanje azota. Koristi se membranski proces za uklanjanje azota iz rastvorenog naftnog gasa. Zahtevi gasovoda dozvoljavaju ulazak gasa ukoliko je sadržaj N₂ između 4% i 6%. Rastvoreni naftni gas, prvobitno izdvojen iz sirove nafte, prolazi kroz set membrana čime se snižava koncentracija azota na tražene zahteve. Ovim postupkom godišnje se na naftnom polju Velebit prečisti oko 15 miliona Sm³ RNG-a.

Izdvajanje ugljen-dioksida iz rastvorenog naftnog gasa

Proces uklanjanja ugljen-dioksida iz gasa odnosi se na procese u kojima se koriste vodeni rastvori različitih alkilamina. Ovi procesi i postrojenja se nazivaju aminska postrojenja i koriste se radi uklanjanja CO₂ i H₂S iz gasova u rafinerijama nafte i gasa, te petrohemijskim postrojenjima. Amini koji se koriste u ovim postrojenjima mogu biti:

- dietanolamin (DEA)
- monoetanolamin (MEA)
- metildietanolamin (MDEA)
- diizopropanolamin (DIPA)

Uklanjanje CO₂ iz sastava gasa je neophodno kako bi se tretirani gas doveo do zahtevane koncentracije i nakon toga bio pušten u gasovod.



Slika 14. Aminsko postrojenje u Elemiru za uklanjanje CO₂ iz gasa

Monoetanolamin (MEA) ima veliku brzinu reakcije sa kiselim gasovima kao što je CO₂ i ima sposobnost uklanjanja visokog sadržaja CO₂ čak i pri niskim koncentracijama ugljen-dioksida. MEA obično uklanja 85-90% CO₂ od početne koncentracije gasa, što ga čini jednim od najefikasnijih rastvarača za uklanjanje CO₂ [59].

Postoje različite prepreke za uklanjanje CO₂ iz gasa:

- gas niskog pritiska otežava prenos CO₂ iz gasa u rastvor amina,
- prisustvo kiseonika u gasu može da uzrokuje degradaciju amina i formiranje kiseline,

- visoko energetska proces,
- skupa i velika postrojenja,
- skladištenje CO₂ nakon uklanjanja.

Sa domaćih naftnih polja dovodi se rastvoreni naftni gas do postrojenja u Elemiru, gde se koristi aminska postrojenje (Slika 14.) za uklanjanje CO₂ iz RNG-a, nakon čega zadovoljava zahteve gasovodne mreže. Na pomenuti način u Elemiru se godišnje preradi 15 miliona Sm³ RNG-a.

Izdvajanje vodonik sulfida (H₂S) iz RNG-a

Prevođenje hemijske energije u toplotnu i/ili mehaničku, a kasnije po potrebi i u električnu energiju pokreće današnju industriju. Gasovi koji mogu da se nađu u fosilnim gorivima, a da predstavljaju tehno – ekonomski problem su:

- Ugljen dioksid
- Azot
- Vodonik sulfid

Ugljen dioksid umanjuje donju toplotnu moć goriva, dok inertni gas, azot, nakon procesa oksidacije reaguje sa kiseonikom i formira azotne okside (NO₂, NO₃, N₂O) koji mogu da imaju štetne posledice po atmosferu. Sagorevanjem, vodonik sulfid reaguje sa kiseonikom, čime se dobija sumpor dioksid, a daljim oksidovanjem i sumpor trioksid.

Mehanizmi, po kojima vodonik sulfid prelazi u sumporove okside, prikazan je sledećim hemijskim reakcijama:



Ukoliko je nakon sagorevanja temperatura dimnih gasova niža od tačke rose sumporne kiseline, dolazi do kondenzacije SO₂ i SO₃ koji reaguju sa vodenom parom i tako formiraju sumporastu i sumpornu kiselinu:



Sumporna kiselina agresivnije deluje na metal (ugljenični čelik) od sumporaste, što dovodi do korozije i propadanja opreme u postrojenjima za eksploataciju nafte [60], [61]. Na postrojenju za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije na SOS može doći do degradiranja tehničkih karakteristika razmenjivača toplote sa snopom cevi u omotaču, Slika 15.



Slika 15. Razmenjivač toplote sa snopom cevi u omotaču nakon 3 meseca rada (levo) i izgled novog razmenjivača toplote sa snopom cevi u omotaču (desno)

Razmenjivač toplote sa snopom cevi ima kapacitet da preuzme toplotu dimnih gasova (koji nastaju sagorevanjem RNG-a u motoru kogeneracionog postrojenja) na rashladnu tečnost (glikol – voda) u vrednosti od 550 kW i ta toplotna energija zajedno sa preuzetom toplotom od hlađenja motora isporučuje se naftnom polju. Degradiranje funkcionalnosti razmenjivača toplote sa snopom cevi u omotaču, pored tehničkog, predstavlja i ekonomski problem.

Uklanjanje vodonik – sulfida iz sastava RNG-a predstavlja preventivnu aktivnost. Postoje različite tehnike uklanjanja H_2S iz ulazne toka RNG-a:

- membranskom separacijom;
- aktivnim ugljem – adsorpcija;
- zeolitom – adsorpcija;
- oksidima metala.

Svaka od navedenih tehnika ima svoje nedostatke, a glavni nedostatak jeste visoka cena adsorbenta.

2.7.2. Računanje donje toplotne moći RNG-a

Ključni radni parametar u projektovanju postrojenja kogeneracije na naftnim poljima predstavlja donja toplotna moć raspoloživog RNG-a na lokaciji. Sastav RNG-a na naftnom polju A predstavljen je u Tabeli 9.

Tabela 9. Sastav RNG-a na naftnom polju A

Komponenta u smeši	n – Udeo komponente (mol %)
CH ₄	77,19
C ₂ H ₆	4,05
C ₃ H ₈	5,83
C ₄ H ₁₀	3,94
C ₅ H ₁₂	1,52
C ₆ H ₁₄	0,86
CO ₂	6,02
N ₂	0,59

Nakon poznatog sastava RNG-a, primenjuje se Tabela 10. gde se nalaze toplote sagorevanja određenog ugljovodonika [62].

Tabela 10. Toplote sagorevanja ugljovodonika

Komponenta u smeši	h – Toplota sagorevanja (MJ/Sm ³)
CH ₄	33,89
C ₂ H ₆	60,31
C ₃ H ₈	86,25
C ₄ H ₁₀	111,98
C ₅ H ₁₂	137,91
C ₆ H ₁₄	164,08
C ₇ H ₁₆	33,88
CO ₂	0
N ₂	0

Donja toplotna moć svake komponente izračunava se pomoću sledeće relacije [63]:

$$\frac{n_x}{100} \cdot h_x = c_x \quad (6)$$

gde su n_x udeli komponenata RNG-a, h_x toplotna moć saogrevanja pojedinačnih komponenti RNG-a i c_x donja toplotna moć RNG-a. Kada se izračuna donja toplotna moć svake pojedinačne komponente, ukupna donja toplotna moć smeše se dobija sumiranjem pojedinačnih vrednosti:

$$LHV = \sum c_x, c_{x+1} \dots c_{x+5} \left(\frac{MJ}{Sm^3} \right) \quad (7)$$

2.7.3. Upravljanje materijalnim tokom RNG-a

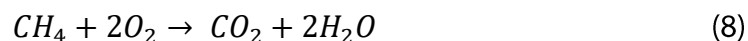
U narednim poglavljima će biti predstavljene tri uobičajene metode iskorišćenja RNG-a na naftnim poljima: Spaljivanje rastvorenog gasa na baklji (Scenario 1; S1), proizvodnja toplotne energije na sabirno-otpremonoju stanici (Scenario 2; S2) i simultana proizvodnja toplotne i električne energije (Scenario 3; S3).

2.7.3.1. Spaljivanje rastvorenog naftnog gasa na baklji (S1)

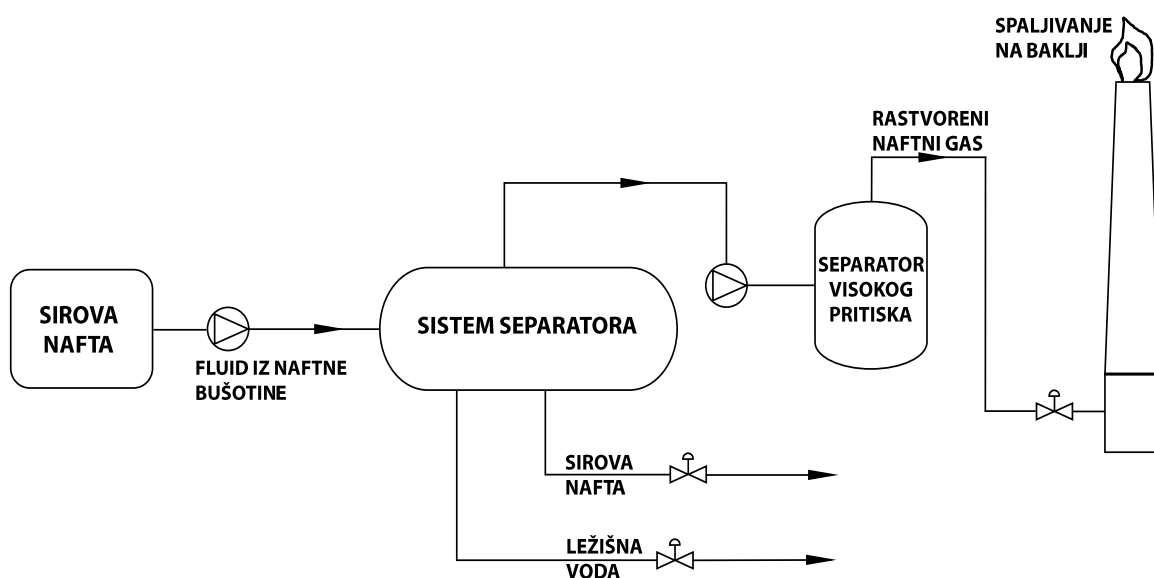
Najčešći način rešavanja RNG-a na naftnim poljima je njegovo spaljivanje na baklji [64]. Više od 150 milijardi m³ RNG-a spali se godišnje širom sveta [54], dok se u Vojvodini na naftnim poljima spali oko 80 miliona Sm³ (2014) kao otpadni tok eksploatacije sirove nafte [65]. Spaljivanje na baklji RNG-a smatra se globalnim problemom koji dovodi do ispuštanja velikih količina gasova koji izazivaju efekat staklene bašte, proizvodeći time oko 2% globalne emisije CO₂ iz energetskih izvora (Farina, 2011). Po navodima *Total Oil Company-a* iz 2011. godine [66] preko 30% CO₂ emisija je prouzrokovano usled sagorevanja ili ispuštanja RNG-a. Nažalost, u većini slučajeva gde se vrši spaljivanje RNG-a su države koje često doživljavaju restrikcije električne energije, pogotovo države u razvoju s velikim rezervama sirove nafte, kao što je Nigerija. Ova država je klasifikovana kao druga po količini spaljenog RNG-a, odmah iza Rusije.

Ukoliko se RNG ne spaljuje na bakljama, već samo ispušta u atmosferu, dolazi do formiranja eksplozivnih zona što ugrožava bezbednost na samom naftnom polju. Pored toga, ispuštanjem CH₄ stvara se i ekološki problem koji utiče na globalno zagrevanje. Metan,

kao najzastupljenija komponenta RNG-a ima 28 puta veći potencijal globalnog zagrevanja (PGZ) u odnosu na CO₂ [67]. Potencijal globalnog zagrevanja se odnosi na količinu toplote koju može da apsorbuje ispušteni gas u određenom vremenskom periodu u odnosu na CO₂. Po životnu sredinu je bolje i bezbednije rešenje sagorevanje RNG-a. Sagorevanjem metana oslobađa se CO₂, sledećom hemijskom reakcijom:



Međutim, spaljivanje RNG-a predstavlja gubitak energije, smanjenje potencijalne zarade za proizvođače nafte od njegovog iskorišćenja i prodaje kao ugljovodoničnih resursa [68]. Dijagram toka spaljivanja rastvorenog gasa na naftnom polju prikazan je na Slici 16.



Slika 16. Spaljivanje rastvorenog naftnog gasa na baklji

Prvo se rastvoreni naftni gas odvaja od sirove nafte i vode. Jednostavni fazni proces izdvajanja uz pomoć toplote, hemikalija i određenog vremena zadržavanja se obavlja u separacionom sistemu. Tečna faza se dalje obrađuje i služi za dobijanje sirove nafte. Nakon postupka separacije, dobijena gasna faza (tj. rastvoreni naftni gas) se pomoću kompresora usmerava na ispiranje gasa. Na kraju je sva količina rastvorenog naftnog gasa dobijena postupkom separacije spaljivana na baklji [69].

2.7.3.2. Proizvodnja toplotne energije na sabirno-otpremnoj stanici (S2)

Prema drugom scenariju, nakon razdvajanja sirove nafte i vode, pre nego što se rastvoreni naftni gas dalje preradi, potrebno je sušenje gasa. Temperatura rastvorenog gasa se snižava do tačke rose kada se voda kondenzuje u finu maglu. Metoda sušenja gasa služi za postizanje višeg stepena efikasnosti i smanjenje emisije otpadnih gasova. Tečnost za hlađenje gasa je smeša HFC jedinjenja koji ne sadrže hlor i stoga je potencijal oštećenja ozonskog omotača za ovu tečnost jednak nuli. Rastvoreni naftni gas se zatim usmerava na trokraki ventil. Kada je potrebna toplota za zagrevanje rezervoara, gas se preusmerava na gasni kotao, a inače se rastvoreni gas tretira primenom postupka prikazanog na Slici 17.

Nakon procesa sagorevanja, značajna količina toplotne energije dimnih gasova se obnavlja prolaskom kroz razmenjivač toplote i na taj način se dimni gasovi hlade a voda za napajanje se zagreva [70]. Dobijena toplotna energija koristi se za zadovoljavanje toplotnih potreba polja, kao što su:

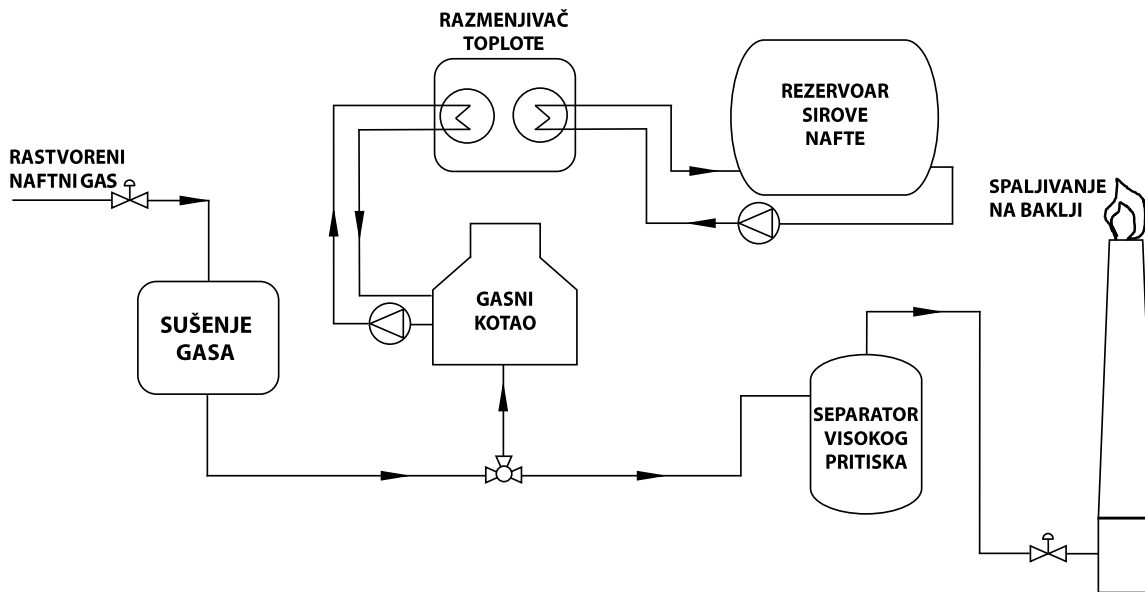
- zagrevanje operativnih prostorija,
- priprema sanitarne vode,
- zagrevanje rezervoara za otpremu sirove nafte,
- zagrevanje protivpožarnog rezervoara.

Za potrebe zagrevanja na naftnim poljima koriste se dve vrste gasnih kotlova. Na dva naftna polja (A i B) se koristi tip kotla sa toplom vodom, termalne nominalne snage 2,1 MW, odnosno 1 MW. Na naftnim poljima C i D koriste se kotlovi sa cevima izloženim vatri, termalne nominalne snage 1,6 MW.

Toplovodni kotao za naftne rezervoare i grejanje stanova sadrži jedinicu razmenjivača toplote u kojoj se sadržana voda zagreva u zatvorenom kolu, gasni gorionik i ispust dimnih gasova. U uslovima nominalnog opterećenja, temperatura vode u zatvorenom krugu se povećava sa 55 na 90°C, održavajući temperaturu naftnog rezervoara na oko 50°C [71].

Cev koja je izložena plamenu u kotlu se sastoji od gorionika i snopa cevi od nerđajućeg čelika okruženih zagrejanom vodom koja se prenosi na zasićenu suhu paru. Dimni gas prolazi kroz cevi od nerđajućeg čelika i proces isparavanja se odvija izvan cevi izloženih plamenu koje proizvode paru. Ostvarena temperatura i pritisak suve zasićene pare

iznose 200°C, odnosno 15 bara [72]. U nedavno objavljenim publikacijama se navodi da stopa efikasnosti iznosi oko 83% za oba tipa kotlova koji se koriste u ovoj studiji. Ovo odgovara stvarnoj stopi efikasnosti kotla koja je izračunavana i dobijena na ispitivanim naftnim poljima [73].



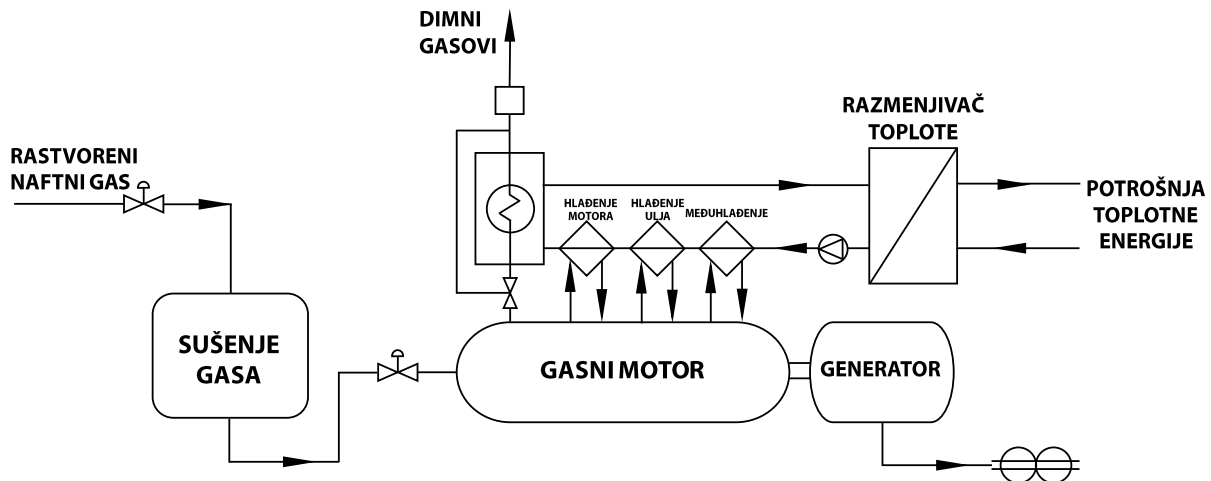
Slika 17. Delimično korišćenje rastvorenog naftnog gasa za grejanje naftnih rezervoara

2.7.3.3. Simultana proizvodnja toplotne i električne energije (S3)

U poslednjih nekoliko godina rastvoreni naftni gas predstavlja gorivo za kogenerativne sisteme izgrađene na naftnim poljima [74]. Termin kogeneracija podrazumeva proizvodnju električne i toplotne energije istovremeno iz istog izvora goriva [3]. Kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije je savremeno rešenje za povećanje energetske efikasnosti i smanjenje emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte sa značajno većom ukupnom efikasnošću u poređenju sa konvencionalnim elektranama, što dovodi do znatnog smanjenja potrošnje specifične energije goriva [75]. *Dincer i Rosen 2005*, su zaključili da bi povećanje efikasnosti proizvodnje energije putem primene kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije moglo da dostigne i do 40% efikasnosti u odnosu na konvencionalne elektrane [76].

Opis rada postrojenja na RNG, dat je u daljem tekstu. Nakon što se prisutna voda kondenzuje u sistemu za hlađenje, rastvoreni gas se uvodi u četvorotaktni motor sa unutrašnjim sagorevanjem na kojem je montiran generator [77]. U šemi kombinovanog postrojenja i uz primenu kombinovanog ciklusa, 80-90% energije goriva se pretvara u električnu energiju ili korisnu toplotu, sa nižim odnosom toplota/energija nego što je to slučaj kod jedno-ciklusnih gasnih turbina [78]. Sinhroni generator radi pri konstantnoj brzini i konstantnoj frekvenciji pod stabilnim uslovima i isporučuje 0,4 kV AC struje do transformatora, nakon čega se napon podiže na 20 kV i proizvedena struja se prenosi na mrežu. Toplotna energija izduvnih gasova se prenosi na fluid uz primenu pločastih razmenjivača toplote i distribuira do kotlova, za potrebe zagrevanja na naftnom polju (zagrevanje prostorija za boravak u toku zime, zagrevanje naftnih rezervoara, itd.) ili se prenosi u grejne sisteme, kao što je zagrevanje vode za daljinsko grejanje [79].

Prethodna istraživanja u vezi sa ukupnom efikasnošću kombinovanih postrojenja za proizvodnju toplotne i električne energije zabeležila su značajno povećanje efikasnosti u korist električne efikasnosti [80]. Nominalna električna efikasnost kombinovanih postrojenja je bila 45%, međutim, deo proizvedene električne energije se koristio za operativno održavanje (ventili, pumpe, ventilatori, noćno osvetljenje, itd.) i gubio se u prenosu električne energije (kablovi i transformator). Stoga, električna efikasnost korišćena u proračunima je podešena na 42%. Ukupna efikasnost kombinovanih postrojenja na četiri naftna polja koja se korišćena za izračunavanje u ovoj studiji iznosi 82%, a sastoji se od efikasnosti toplotne energije (40%) i efikasnosti električne energije (42%).



Slika 18. Korišćenje rastvorenog naftnog gasa u kombinovanom postrojenju

2.7.3.4. Ostale metode iskorišćenja RNG-a

Niske cene domaćeg prirodnog gasa, velike razdaljine između naftnih polja i potencijalnih tržišta koje za rezultat imaju visoke kapitalne troškove za izgradnju gasovoda definisani su kao glavne prepreke za korišćenje RNG-a [68]. Sa ekonomske tačke gledišta, postojeće tehnologije koje bi najefikasnije mogle da komercijalizaciju gas koji se spaljuje su kombinacija postrojenja za preradu gasa (GPP) i prodaje suvog gasa, kao i proizvodnja električne energije [54]. Najčešći proizvodi koji se prodaju direktno potrošačima posle prerade RNG-a uključuju suvi stripovani gas, tečne komponente prirodnog gasa-gazolin (NGL), prirodni benzin i tečne naftne gasove (TNG).

Pored navedenih metoda za iskorišćenje RNG-a, postoji još nekoliko tehnoloških opcija pomoću kojih se RNG može dalje procesuirati. Neke od tih metoda su [81]:

- ponovno vraćanje RNG-a u naftnu bušotinu
- komprimovanje RNG-a i njegova prodaja kao suvog gasa
- utečnjavanje RNG-a u tečni naftni gas (TNG)

Ponovno vraćanje RNG-a u naftnu bušotinu

Ova metoda se koristi radi održavanja pritiska unutar naftne bušotine i bolje eksploatacije sirove nafte, ali RNG se može ubrizgati u bušotinu radi podizanja energije ležišta [68]. Na ovaj način se i izbegavaju CO₂ emisije, ali i bezbedno uklanjanje kiselih gasova

[82]. Ova metoda nije bezbedna na svim lokacijama usled različitosti geološke strukture ležišta i sedimentnih stena.

Komprimovanje RNG-a i njegova prodaja kao suvog gasa

Rastvoreni naftni gas ima manju gustinu od prirodnog gasa, a pošto za njegov transport moraju da se koriste postojeći gasovodi za prirodni gas, neophodno je izvršiti proces višestepene kompresije kako bi RNG dostigao željene parametre. Ovaj proces je skup, te da bi bio opravdan potrebna je konstanta prodaja po visokoj ceni. Jedan od nedostataka ove metode je nepostojeća gasovodna infrastruktura sa naftnih polja ka potrošačima, a njena izgradnja je u većini slučajeva ekonomski neopravdana.

Utečnjavanje RNG-a u tečni naftni gas (TNG)

Tečni naftni gas (TNG) ima široku primenu zbog svojih prednosti koje daje kao izvor energije, ali i kao sirovina za dobijanje drugih proizvoda nafte i petrohemijskih proizvoda. Glavna prednost TNG-a je njegova fleksibilnost prilikom distribucije ka potrošačima jer može da se transportuje gasovodom ili da se isporučuje u bocama. Može da se koristi i kao zamena za CFC (hlorovane i fluorovane ugljovodonike) koji se koriste kao potisni gas u kozmetičkim uređajima ili kao rashladna sredstva. Glavni nedostatak konverzije RNG-a u TNG jeste skupa infrastruktura i oprema pomoću koje bi se tehnološka operacija izvela. Često je razlog ekonomske neopravdanosti nedovoljna količina RNG-a na naftnom polju ili udaljenost od potrošača.

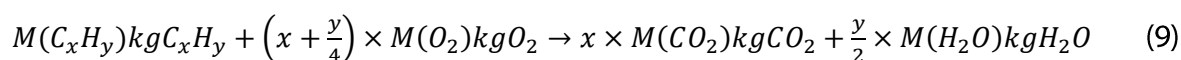
3. Materijali i metode

3.1. Određivanje sastava RNG-a

Sadržaj rastvorenog naftnog gasa je određivan primenom metode gasne hromatografije, prema SRPS EN ISO 6974-4:2008. Ova standardna metoda pruža smernice za određivanje sadržaja H₂, He, O₂, N₂, CO₂ i ugljovodonika, bilo kao pojedinačnih komponenti ili kao grupa. Donja toplotna moć rastvorenog naftnog gasa je određena prema standardu SRPS B.H8.129:2012. Ovaj pristup je pogodan za čitav niz različitih vidova primene, uključujući kalibraciju gasnih smeša i omogućavanja da se sastav prirodnog gasa i nepouzdana podaci koriste u izračunavanju toplotne moći i drugih fizičkih svojstava gasa.

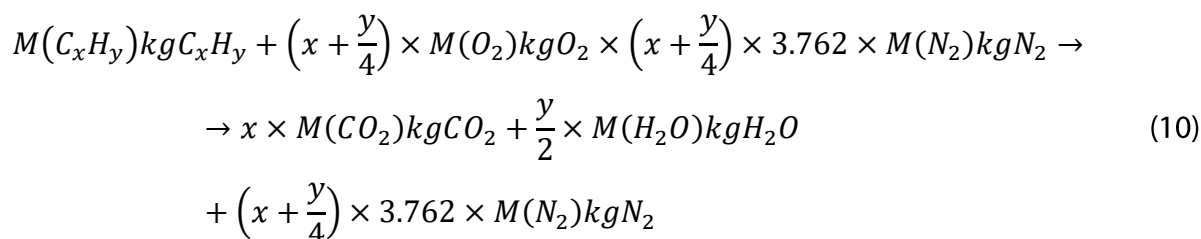
3.2. Određivanje emisija nakon sagorevanja kaptažnog gasa

U procesima sagorevanja, rastvoreni gas i vazduh se mešaju i dolazi do sagorevanja. Količina vazduha koji se meša sa gasnom strujom utiče na potpunost hemijskih reakcija sagorevanja. Stoga, kako bi se obezbedilo potpuno stehiometrijsko sagorevanje, gas (gorivo) i vazduh (oksidant) se prvo mešaju, a zatim sagorevaju u motoru. Formiranjem premiksa plamena, gorivo i vazduh proreaguju, pri čemu nastaju ugljen-dioksid i voda [83]. Tehnika premiksa je korišćena u sva 3 scenarija iskorišćenja RNG-a (pomenuti u poglavlju 2.3. Rastvoreni naftni gas). Međutim, uzimajući u obzir da na sagorevanje na baklji može da utiče vetar ili druge atmosferske pojave, što dovodi do slabijeg mešanja vazduha sa rastvorenim gasom, efikasnost sagorevanja na baklji mora biti smanjena na 98 %, što je rezultiralo ventiliranjem 2% RNG-a. Opšta reakcija za kompletno sagorevanje ugljovodonika iz RNG-a (Tabela 11) data je modifikovanom jednačinom *Ismail i Umukoro*-a [8]:



gde su x i y broj C- atoma i H- atoma u sagorevanju ugljovodonika, M predstavlja molarnu masu odgovarajućeg jedinjenja.

Međutim, pri korišćenju vazduha kao oksidanta mora se uzeti u obzir da suv vazduh sadrži oko 21% kiseonika i 78% azota (1% plemenitih gasova), i shodno tome jednačina je modifikovana:



Produkti sagorevanja po 1 kg C_x jedinjenja dati su u Tabeli 11.

Tabela 11. Produkti sagorevanja po 1 kg C_x jedinjenja

C_x (kg)		Produkt (P_i) (kg)		
		CO_2 (P_1)	H_2O (P_2)	N_2 (P_3)
C_1	1.00	2.75	2.25	13.17
C_2	1.00	2.93	1.80	12.29
C_3	1.00	3.00	1.64	11.97
C_4	1.00	3.03	1.55	11.81
C_{5+}	1.00	3.06	1.50	11.70

Dakle, stehiometrijska količina produkata sagorevanja za potpuno sagorevanje C_x iz rastvorenog gasa na naftnom polju se izražava kroz korelaciju:

$$m(P_i) = \frac{mass\%(C_x)}{100} \cdot P_i(C_x) \tag{11}$$

Gde su $m(P_i)$ masa obračunatog produkta sagorevanja (kg), $mass\%$ je maseni udeo odgovarajućeg ugljovodonika u rastvorenom gasu, a P_i predstavlja iznos produkta sagorevanja po 1 kg odgovarajućeg ugljovodonika (kg).

3.3. Analiza životnog ciklusa RNG-a

3.3.1. Ekološka procena iskorišćenja RNG-a

Ekološka opravdanost sve tri opcije korišćenja RNG-a analizirana je metodom procene životnog ciklusa (LCA) koja ima za cilj da proceni ekološke uticaje povezane sa životnim ciklusom proizvoda [84]. Ova analiza je sprovedena u skladu sa ISO 14040:2006 prema principima i konsekvantne LCA [85]. Za razliku od atributivne LCA, koja je čisto opisnog karaktera sa ciljem da se opišu ekološki relevantni fizički tokovi do i od životnog ciklusa i njegovih podsistema, konsekvantna LCA nastoji da identifikuje ekološke posledice neke analizirane odluke [86]. Atributivni pristup koristi prosečne podatke (npr. podatke koji predstavljaju prosečno ekološko opterećenje za proizvodnju jedinice robe ili usluga u sistemu), dok konsekvantni pristup koristi marginalne podatke (npr. podatke koji predstavljaju ekološko opterećenje procesa koji je zapravo pogođen malim promenama u potražnji ili ponudi) [85]. Izbor modelovanja pristupa je u skladu sa zahtevima Priručnika ILCD [87] kojim se preporučuje posledični pristup ako su rezultati LCA namenjeni da podrže neku odluku (npr. o alternativnim scenarijima iskorišćenja otpada).

LCA pristup se sastoji od sledeće četiri faze [88]: *i)* Cilj i definisanje obima, što obuhvata definiciju funkcionalne jedinice (FU) i granice sistema; *ii)* Analiza inventara životnog ciklusa (LCI), sa kompilacijom podataka o konzumiranim resursima i emisijama ispuštenim tokom životnog ciklusa proizvoda; *iii)* Procena uticaja životnog ciklusa (LCIA), koja se odnosi na procenu potencijalnih uticaja u vezi sa identifikovanim oblicima emisija i korišćenjem resursa; i na kraju *iv)* Tumačenje LCI i LCIA rezultata.

3.3.1.1. Funkcija i funkcionalna jedinica

U ovoj doktorskoj disertaciji opcije korišćenja RNG-a se posmatraju kao različita scenarija upravljanja otpadom; dakle, ova funkcija je definisana kao tretman RNG-a na ekološki povoljniji način. Funkcionalna jedinica u ovoj studiji je definisana kao jedan standardni kubni metar (Sm^3) RNG-a, shodno tome, svi ekološki tokovi i rezultati procene uticaja su izraženi "po 1 Sm^3 RNG-a".

3.3.1.2. Granice sistema

Granice sistema definišu jedinične procese koji su uključeni u proces koji se modeluje. Prema ISO 14040:2006, neki procesi ili tokovi mogu biti izostavljeni iz granica sistema ako je njihova relevantnost isuviše mala i njihovo izostavljanje neće značajno promeniti rezultate, a samim tim i zaključke istraživanja. Proces i tokovi vezani za proizvodnju, održavanje i raspolaganje odgovarajućom infrastrukturom su van granica sistema. Prethodne procene radnih parametara kotlova na pogon prirodnog gasa i kombinovanih postrojenja su pokazale da uticaji koji se odnose na infrastrukturu imaju zanemarljiv udeo u ukupnom uticaju proizvodnje energije (manje od 0,5% u kategorijama uticaja ispitivanih u ovoj studiji [89]. Pored toga, potencijalni ekološki uticaji u vezi sa odvajanjem RNG-a od sirove nafte i vode (Slika 12) su isključeni iz procene zbog njihovog malog potencijalnog uticaja na rezultate i pretpostavke da bi prikupljanje i priprema RNG-a bili isti za alternativne opcije korišćenja RNG-a.

Pored funkcije tretmana otpada, scenariji sa kombinovanim postrojenjima i kotlovima za zagrevanje imaju i druge funkcije. Proces sa kombinovanim postrojenjima omogućava tri različite funkcije: tretman otpadnih tokova, proizvodnju toplotne i električne energije, dok scenario sa kotlovima za zagrevanje obezbeđuje toplotu pored svog osnovnog zadatka. ISO 14040:2006 zahteva da sistemi koji se upoređuju ispunjavaju istu funkciju. Zbog toga sekundarne funkcije treba da budu isključene iz sistema. Ovo se može postići bilo podelom ukupnog ekološkog opterećenja multifunkcionalnog procesa između njegovih postojećih funkcija [90] ili proširenjem sistema [91] gde se granice sistema proširuju u cilju uključivanja dodatnih funkcija. Kod konsekventnih LCA problem multifunkcionalnosti se rešava putem proširenja sistema [87], [91]. Ovaj metod se često naziva metodom zamene, gde se multifunkcionalnom procesu dodaju i izbegavane emisije i iskorišćenje resursa iz alternativnog načina proizvodnje sekundarnih postojećih funkcija (npr. električna energija i toplota). Ovaj odnos je opisan kao (11):

$$E_{i,net} = E_i - \sum_{z=1}^m E_{z,i} \quad (12)$$

gde su $E_{i,net}$ neto količina ekološkog protoka i povezana sa određenim scenarijom korišćenja rastvorenog gasa, odnosno nakon proširenja sistema; E_i je bruto količina ekološkog protoka i povezana sa određenim scenarijom korišćenja RNG-a, odnosno pre proširenja sistema, $E_{z,i}$

je količina ekološkog protoka i povezana sa ekvivalentnom funkcijom zamenjenog procesa z ; m je broj zamenjenih procesa.

Metoda zamene mora biti dopunjena izborom alternativnih procesa koje izbegava sekundarna funkcija. Očigledan problem je u tome što električna i toplotna energija koje se proizvode u okviru scenarija za korišćenje RNG-a mogu da zamene različite procese. Na primer, može se pretpostaviti da električna energija proizvedena u kombinovanom postrojenju zamenjuje električnu energiju proizvedenu u termalnim ili hidro-elekttranama. Odabir izbegnutog procesa ima dubok uticaj na rezultate LCA zbog različitih ekoloških uticaja izbegnutih procesa [92]. Stoga je neophodno da se odabir postavi na naučnu osnovu u skladu sa smernicama relevantnih standarda.

Snabdevanje električnom energijom u Srbiji predstavlja mešavinu nekoliko različitih tehnologija. Centralizovane elektrane na pogon lignita proizvode većinu električne energije (oko 65% u 2014.) [93], dok hidroelektrane obezbeđuju najveći deo ostatka električne energije. Razumno je pretpostaviti da će električna energija proizvedena u kombinovanim postrojenjima zameniti električnu energiju proizvedenu u elekttranama na pogon lignita, što je najskuplja proizvodnja električne energije u okviru elektroenergetske mreže [94]. Za elektrane na pogon lignita se takođe pretpostavlja da su marginalni snabdevači električne energije za kotlove za zagrevanje (u Scenariju 2). Izlazna količina električne energije iz hidroelektrana je ograničena raspoloživim vodosnabdevanjem. Konsekventna LCA zahteva isključivanje ograničenih dobavljača kao potencijalno kratkoročno ili dugoročno marginalnih [85], [95].

Za sisteme upravljanja otpadom, energija koja se bazira na primeni lignita se smatra za marginalnu tehnologiju proizvodnje električne energije. Energija koja se bazira na korišćenju uglja se smatra za marginalnu tehnologiju za proizvodnju električne energije u mnogim evropskim zemljama [95], [96].

Snabdevanje električnom energijom povezano je sa elektroenergetskom mrežom, pa se stoga posmatra na nivou države, snabdevanje toplotnom energijom u Srbiji je u velikoj meri ograničeno na individualne potrošače, lokalno. Iz tog razloga samo izvori toplote koji se lokalno koriste na naftnim poljima smatraju za marginalnu tehnologiju. Trenutno, potrebe za toplotnom energijom na naftnim poljima su uglavnom zadovoljene sagorevanjem lož ulja u industrijskim kotlovima; dakle, ova tehnologija se smatra za marginalnu.

3.3.1.3. Izvor i kvalitet podataka

Relevantni podaci za modelovanje primarnog sistema, koji uključuju informacije o donjoj toplotnoj moći, gustini i sastavu RNG-a su primarni podaci prikupljeni direktno na osnovu merenja i dostavljenih izveštaja (Sekcija 3.1). Direktno emisije iz sagorevanja RNG-a su izračunate na osnovu sastava gasa i svojstava sagorevanja (Sekcija 3.2.).

LCI izbegnutih procesa (npr. proizvodnja električne i toplotne energije) obezbeđeni su putem baze podataka *ecoinvent 3.1* [97] koja se smatra za najobimniju LCI bazu podataka u Evropi. Podaci *ecoinvent 3.1* LCI koji se koriste za izračunavanje ekoloških opterećenja u vezi sa zamenjenim procesima su navedeni u Tabeli 12.

Tabela 12. Tip i LCI podaci za zamenjene procese

Sekundarna funkcija	Zamenjeni proces/proizvod (DP)	LCI podaci za DP [96]:
Električna energija	Električna energija iz lignita u Srbiji	Struja, visoki napon {RS} proizvodnja električne energije, lignit
	Električna energija iz kamenog uglja u Evropi	Struja, visoki napon {RoW} proizvodnja električne energije, kameni ugalj
	Električna energija iz prirodnog gasa u Evropi	Struja, visoki napon {RoW} proizvodnja električne energije, prirodni gas, u konvencionalnoj elektrani
Toplotna energija	Toplotna energija iz lož ulja	Toplota, lož ulje, na kotlovima 100kW, ne-modulacioni/CH

3.3.1.4. Metoda procene uticaja životnog ciklusa

Procena uticaja životnog ciklusa (LCIA) je ograničena na procenu potencijala globalnog zagrevanja (PGZ) i ukupnih potreba za fosilnom energijom za tri alternativna scenarija iskorišćenja RNG-a. Ove kategorije uticaja su odabrane pošto su smanjenja emisije gasova staklene bašte i uštede fosilnih izvora glavni razlozi za tretman i korišćenje RNG-a.

Potencijal globalnog zagrevanja se izračunava sa opšteprihvaćenim CO₂ faktorima ekvivalencije za 100-godišnji vremenski period što je preporučeno IPPC direktivom [98]. Kumulativne potrebe za fosilnom energijom se procenjuju pomoću metode kumulativne potražnja za energijom (KEN) [99]. Obe LCIA metode su integrisane u *SimaPro 8* softveru koji je korišćen za LCI i LCIA analizu.

3.4. Procena eksternih troškova emisija sagorevanjem kaptažnog gasa

Za procenu uticaja eksternog troška emisija gasova koji izazivaju efekat staklene bašte korišćena je Maihach-ova metoda [33]. Metoda daje uvid u detaljne procene novčane štete ili izbegnuti trošak koji se vezuje za emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. Troškovi vezani za ovakve gasova i dalje predstavljaju široko polje što doprinosi nesigurnosti metoda vezanih za ovu vrstu procene. Maibach i saradnici su predložili 25 EUR·Mg⁻¹ CO₂ kao centralnu vrednost za procenu novčane štete nastale klimatskim promenama, što je usvojeno za proračun u ovoj disertaciji. Novčana šteta nastala usled emisije ostalih gasova s efektom staklene bašte računata je množenjem 25 EUR·Mg⁻¹ CO₂ s faktorom potencijala globalnog zagrevanja CH₄ i N₂O koji iznose 23 i 296, redom [98]. Prema tome, eksterni troškovi vezani za CH₄ i N₂O su 575 EUR·Mg⁻¹ i 7400 EUR·Mg⁻¹, redom. Eksterni trošak životne sredine biće računat, za slučaj korišćenja RNG-A u kogenerativnim postrojenjima, po sledećoj jednačini:

$$EC = \sum_{i=1}^n E_i \cdot C_i - \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m E_{z,i} \cdot C_i \quad (13)$$

gde su: E_i bruto količina emisija i vezana za slučaj iskorišćenja kaptažnog gasa u kogenerativnim postrojenjima (pre nego što se primeni metoda zamene); $E_{z,i}$ je količina emisije i vezana za obezbeđivanje odgovarajuće funkcije zamenjenog procesa z ; m je broj zamenjenih procesa; C_i je faktor novčane štete za emisiju i (u EUR·kg⁻¹ emisije); n je broj (vrsta) emisije pokrivena analizom.

3.5. Simulacija kogenerativnog postrojenja s RNG-om kao pogonskim gorivom pomoću ASPEN Plus programskog paketa

Kako bi se stekao bolji uvid u pojedine delove procesa u kogenerativnim postrojenjima na naftnim poljima koja za pogonsko gorivo koriste RNG, izvršena je simulacija tehnološkog procesa pomoću softvera ASPEN Plus 8. U literaturi su dostupni modeli kogenerativnih postrojenja van naftnih polja i RNG-a [6], [5], te stoga nisu bili adekvatni za korišćenje u ovom istraživanju. Da bi se postavio uspešan model simulacije, potrebno je pratiti osnovne korake u njenom uspostavljanju, a to su: razdvajanje tehnološkog procesa na glavne blokove radi preciznijih rezultata, odabir odgovarajućeg termodinamičkog modela simulacije i unošenje dobijenih eksperimentalnih rezultata u model za simulaciju.

3.5.1. Razdvajanje tehnološkog procesa na odgovarajuće blokove

Da bi simulacija bila uspešna i verodostojna, potrebno je da proces bude segmentiran na nekoliko ASPEN blokova [100]. Za simulaciju kogenerativnog postrojenja korišćena su četiri odvojena bloka koja su naknadno spojena u jedan proces. To su:

- Blok mešača
- Compr blok (kompresori i turbine)
- Toplotni blok
- RGibbs blok (reaktor)

1) Blok mešača se koristi u svrhu namešavanja ulaznih tokova vazduha i kaptažnog gasa pred sagorevanje. Materijalni i energetski bilansi mikser bloka su računati pomoću sledećih relacija:

$$F_{out} = \sum F_{in} \quad (14)$$

$$F_{out}h_{out} = \sum F_{in}h_{in} \quad (15)$$

gde F predstavlja protoke, h molarnu entalpiju ili ulaznu količinu molova.

2) Compr blok se koristi za regulaciju pritiska fluida u sistemu i definiše ga jednačina:

$$\eta\Delta h = \int_{p_1}^{p_2} V dp \quad (16)$$

gde η predstavlja politropski ili izentropski faktor efikasnosti koji se procenjuje za proces, Δh predstavlja promenu entalpije između dva stanja, dok je V zapremina gasa, a p je pritisak.

3) Toplotni blok (razmenjivači toplote) se opisuju sledećim jednačinama:

$$q - m_{hot}c_P^{hot}(T_{in}^{hot} - T_{out}^{hot}) = 0 \quad (17)$$

$$q - m_{cold}c_P^{cold}(T_{out}^{cold} - T_{in}^{cold}) = 0 \quad (18)$$

$$q - UAF\Delta T_{LM} = 0 \quad (19)$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (20)$$

gde q predstavlja razmenjenu toplotu, m protok fluida, C_p toplotni kapacitet, T temperaturu (ulazne i izlaznog toka), ΔT razliku temperature na krajevima razmenjivača toplote. U je ukupni koeficijent prenosa toplote, F je korelacioni faktor za razmenjivače toplote sa snopom cevi u omotaču, dok je A površina za razmenu toplote.

4) RGibbs blok (reaktor) je korišćen za simulaciju procesa sagorevanja i za uspostavljanje hemijske ravnoteže reaktanata i produkata. Za multikomponentnu smešu važi sledeća jednačina po kojoj se računa Gibsova slobodna energija, g_{mix} :

$$g_{mix} = \sum x_i + RT \sum x_i \ln x_i \quad (20)$$

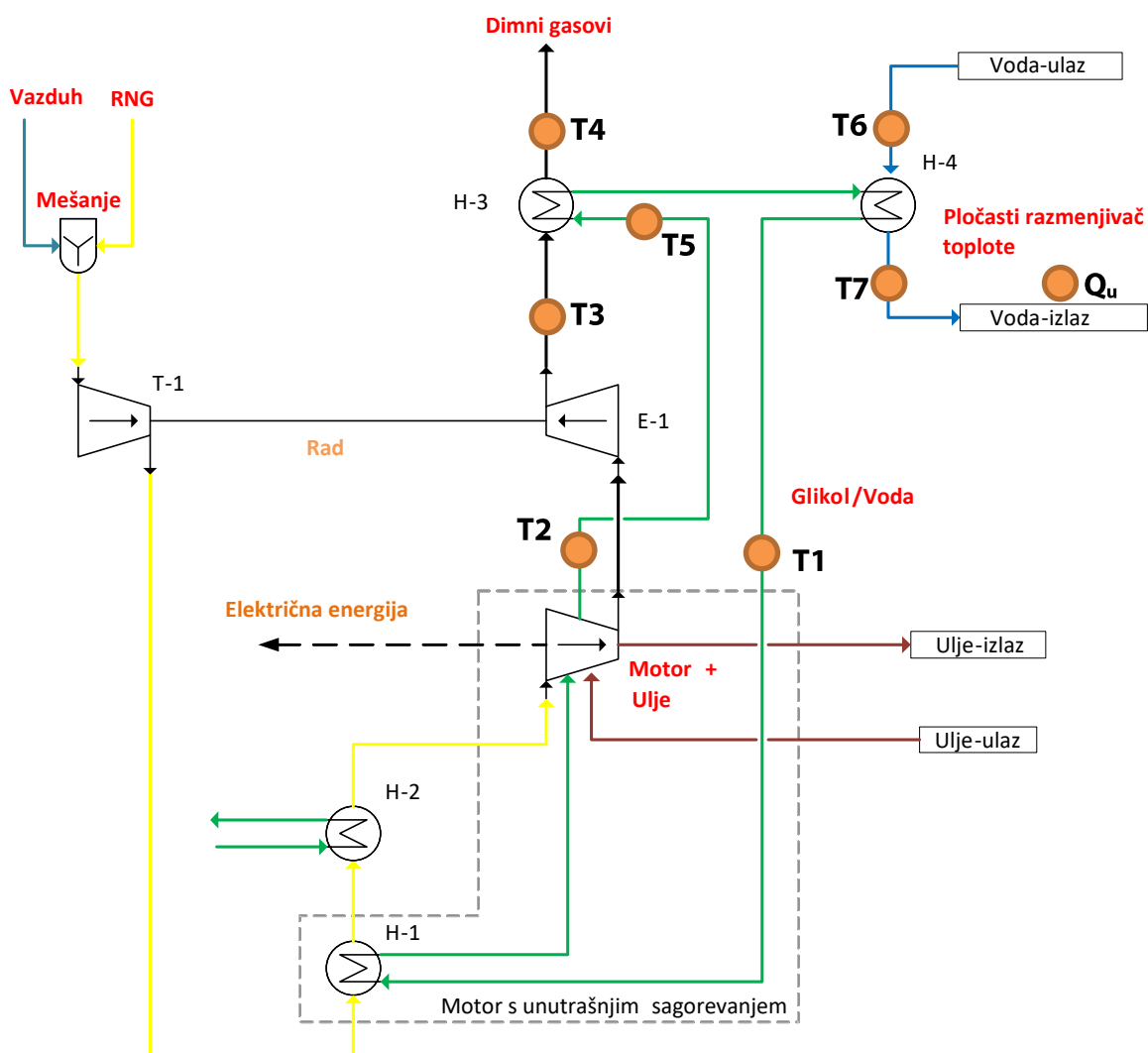
gde x_i predstavlja molski udeo komponente i .

3.5.2. Odabir termodinamičkog modela za simulaciju

Protoci, sastavi, kao i operativni parametri ulaznih i izlaznih tokova na naftnim poljima su prikupljeni na naftnim poljima i korišćeni u ASPEN simulaciji kogenerativnog postrojenja. U cilju daljeg razvijanja modela kogenerativnog postrojenja na naftnom polju u ASPEN-u, bilo je potrebno odabrati termodinamički model kako bi simulirani podaci bili što precizniji. Na osnovu prirode komponenata koje učestvuju u tehnološkom procesu, potencijalni izbor za adekvatno opisivanje parne i tečne faze mogu zadovoljiti jednačina stanja PENG-ROBINSON i NRTL (Nom-Random Two Liquid).

3.5.3. Opis tehnološkog procesa kogenerativnog postrojenja na naftnom polju i plan eksperimenta

Šema iskorišćenja RNG-a u kogenerativnom postrojenju na naftnim poljima prikazana je na Slici 19. Kogenerativno postrojenje na odabranom naftnom polju radi po principu sagorevanja RNG-a u motoru s unutrašnjim sagorevanjem. Prethodno se RNG namešava s vazduhom (1) koji je na temperaturi okoline i pritisak od 1 bara i protok 5.000 Sm³. Pre mešanja sa RNG-om, temperatura ambijentalnog vazduha se reguliše na konstantnih 25 °C, nakon čega se u uređaju za mešanje pravi smeša RNG/vazduh.



Slika 19. Tehnološka šema proizvodnje toplotne i električne energije u kogenerativnom pogonu na naftnom polju u Srbiji

Rastvoreni naftni gas ima svoj predtretman u merno regulacionoj stanici, gde se regulišu pritisak i temperatura na 3 bara i 18 °C. Turbina T-1 koristi toplotnu radijaciju izduvnih gasova za komprimovanje smeše RNG/vazduh na 3 bara i podizanje temperature na 195 °C. Razmenjivač toplote H-1 i H-2 smanjuju temperaturu smeše na 55 °C, zagrevajući smešu rashladnog fluida glikol-voda, istovremeno stvarajući uslove za sagorevanje smeše RNG/vazduh. Smeša RNG/vazduh sprovodi se u motor sa unutrašnjim sagorevanjem, gde se sagoreva u cilindrima na temperaturi od 1475 °C i pritisku od 86 bara. Klipovi pokreću osovinu koja je povezana za generator koji isporučuje 0,4 kV napona ka transformatoru, dok motor stvara maksimalnu snagu od 950 kW_e. Motor se hladi rashladnim fluidom glikol-voda pomoću razmenjivača toplote u motoru. Izduvni gasovi iz motora se usmeravaju na razmenjivač toplote sa snopom cevi koji se nalazi na krovu kogeneratorske konstrukcije, predstavljen kao H-3. Izduvni gasovi prenose toplotu rashladnom fluidu, nakon čega mogu da se ispuste u atmosferu preko dimnjaka. Konačno rashladni fluid predaje potrebnu toplotu vodi, kroz pločasti razmenjivač toplote H-4, koja se koristi za toplotne potrebe naftnog polja, kao što su grejanje, zagrevanje radnog prostora ili procesne vode [79], [101].

U cilju uspostavljanja što preciznije simulacije kogenerativnog postrojenja u ASPEN-u, mereni su i prikupljeni operativni parametri u toku 2018. godine na odabranom naftnom polju. Pomoću prikupljenih eksperimentalnih podataka i izvršene analize stabilnosti sistema, uspostavljena je simulacija u ASPEN-u. Sa Slike 19 se mogu videti merna mesta s kojih će podaci biti prikupljeni. Temperatura T_1 se odnosi na ulazni materijalni tok glikol-vode u motor, dok se T_2 odnosi na izlazni tok glikol-vode iz motora. Ona nam omogućava uvid u količinu predate toplote s motora (Q_1) na rashladnu smešu. T_3 i T_4 su temperature izduvnih gasova pre i posle razmenjivača toplote na krovu kogeneratorske jedinice, pomoću kojih će biti izračunata količina toplotne energije (Q_2) koja se preda s izduvnih gasova na rashladnu smešu glikol-voda. T_5 predstavlja temperaturu glikol-vode nakon izmene toplote (Q_2) od izduvnih gasova. Temperatura T_6 predstavlja temperaturu grejnog medijuma sa naftnog polja ka kogeneratorskoj jedinici, a temperatura T_7 je temperatura grejnog medijuma nakon pločastog razmenjivača toplote koji se koristi za isporuku ukupne toplotne energije ka potrošačima na naftnom polju ($Q_{predato}$). Ukupna količina toplotne energije $Q_{predato}$, koja se dobija nakon pločastog razmenjivača toplote jednaka je sumi pojedinačnih generisanih toplotnih energija kroz ceo sistem.

$$Q_{predato} = Q_1 + Q_2 \quad (22)$$

Kogenerativni sistem je podešen na snagu od 650 kW_e i odgovarajuće temperature su merene nakon 30 minuta, tj. nakon uspostavljanja ravnoteže svih operativnih parametara. Nakon toga je snaga sistema, s korakom od 50 kW_e povećavana do 900 kW_e. Za svaku izlaznu snagu izmereni su planom predviđeni operativni parametri sistema (T₁-T₇ i Q_u).

3.5.4. Određivanje ukupne energetske efikasnosti sistema

Određivanje ukupne energetske efikasnosti ima za cilj da odredi stepen iskorišćenja goriva u odnosu na dobijenu energiju. U Tabeli 1 navedene su kategorije subvencionisanih proizvođača električne energije u zavisnosti od načina njenog dobijanja i uslovi za dobijanje statusa povlašćenog proizvođača [4]. U slučaju kogenerativnih postrojenja na RNG, godišnja ukupna efikasnost mora da zadovolji kriterijum od najmanje 75%. Kogenerativna postrojenja na različita goriva mogu da postignu ukupnu efikasnost i do 80% [102]. Ukoliko se kriterijum ne ispuni, status povlašćenog proizvođača energije se gubi (otkupna cena 8,89 c€/kWh). Ključni parametar u održavanju visokog stepena iskorišćenja goriva jeste distribucija toplotne energije na naftnom polju (koja može da čini i do 40% energije goriva). Drugi zakon termodinamike govori da ukupna ulazna energija u sistemu ne može biti u celosti prevedena u koristan rad, tj. da nije moguće iskoristiti 100% ulaznog goriva. Neizbežno je da se određena količina toplote izgubi, a poželjno je da se ta toplota odbaci na što nižim izlaznim temperaturama (izduvni gas na dimnjaku) kako bi se postigla najveća moguća efikasnost [103]. U određenim situacijama na naftnim poljima kada količina potrebne toplotne energije opadne, kogeneratorski sistem se podešava u *heat tracking mode*, gde se proizvodnja električne energije prilagođava generisanju toplotne energije kako se ukupna efikasnost sistema ne bi spustila ispod 75%, što predstavlja (pored regulacije sopstvene potrošnje električne energije) ključni faktor u održavanju visoke efikasnosti, a samim tim i ekonomsku isplativost investicije [104].

Ukupna energetska efikasnost sistema biće određena za eksperimentalne i simulirane podatke pomoću sledeće jednačine [40]:

$$\eta = \frac{W_e + Q_u}{\dot{V} \cdot H_d \cdot \frac{1000}{3600}} \cdot 100 \quad (23)$$

Gde W_e predstavlja ukupnu električnu energiju [MJ] koja se predaje u elektroenergetsku mrežu, a Q_u predstavlja ukupnu toplotnu energiju [MJ] koja se predaje potrošaču na naftnom polju. \dot{V} i H_d su uložene količine i donja toplotna moć RNG-a [Sm^3], [MJ] respektivno.

4. Rezultati i diskusija

Rezultati izračunatog hemijskog sastava RNG-a sa naftnih polja u Srbiji predstavljeni su u poglavlju 4.1. Rezultati LCI analize (poglavlje 4.2) pružaju informacije o ispuštenim emisijama i resursima koji se potroše u čitavom životnom ciklusu svakog od scenarija iskorišćenja RNG-a. Potencijalni uticaji na životnu sredinu u vezi sa identifikovanim oblicima ekoloških emisija i korišćenja resursa se procenjuju pomoću odgovarajućih LCIA metoda i predstavljeni su u poglavlju 4.3. Analiza eksternih troškova emisija u odnosu na odabrani scenario iskorišćenja RNG-a predstavljena je u poglavlju 4.4. Ograničenja i nesigurnosti LCA rezultata biće obrazložena u poglavlju 4.5. Eksperimentalni rezultati merenja operativnih parametara kogeneratorske jedinice biće predstavljeni u poglavlju 4.6. Rezultati ASPEN simulacije kogenerativnog postrojenja na naftnom polju u Srbiji biće predstavljeni u poglavlju 4.7. Analiza uticaja promene protoka, sastava i toplotne moći RNG-a na generisanu toplotnu energiju biće predstavljena u poglavlju 4.8. Ograničenja i nesigurnosti ASPEN simulacije i njene pouzdanosti biće diskutovane u poglavlju 4.9.

Rezultati i diskusija – I deo (LCA analiza iskorišćenja RNG-a)

4.1. Hemijski sastav RNG-a sa naftnim polja u Srbiji

Hemijski sastav i druge relevantne karakteristike rastvorenog naftnog gasa (donja toplotna moć (DTM) i gustina gasa, ρ) nakon sušnice za gas, za odabrano naftno polje (A, B, C i D) prikazani su u Tabeli 13.

Tabela 13. Sastav i karakteristike rastvorenog naftnog gasa na četiri naftna polja u Srbiji

Naftno polje	C ₁ ^a (% mase)	C ₂ (% mase)	C ₃ (% mase)	C ₄ (% mase)	C ₅₊ ^b (% mase)	N ₂ (% mase)	CO ₂ (% mase)	DTM (MJ·Sm ⁻³)	ρ (kg·m ⁻³)
A	69.38	5.22	5.30	2.26	10.20	5.81	1.83	38.06	0.8398
B	60.11	16.34	9.29	1.96	8.36	0.32	3.62	41.66	0.8893
C	68.60	5.33	0.88	0.18	0.37	6.59	18.04	31.04	0.8268
D	66.21	5.46	0.98	0.12	0.25	6.00	20.98	30.69	0.8436

^aC_x se odnosi na ugljovodonike sa odgovarajućim brojem atoma ugljenika

^bSva jedinjenja viša od pentana sumirani su kao C₅₊.

4.2. Popis životnog ciklusa tri scenarija korišćenja RNG-a

Izabrani LCI podaci za svaki scenario su prikazani u Tabeli 14. Podaci se odnose na prosečne vrednosti za četiri ispitivana naftna polja u Srbiji. S obzirom na fokus ovog istraživanja, navedeni su samo ekološki tokovi povezani sa globalnim zagrevanjem i iscrpljivanje fosilnih resursa. Neki gasovi izazivaju efekat staklene bašte i izvori fosilnog goriva nisu uzeti u obzir. Međutim, ovo neće značajno uticati na rezultate LCIA s obzirom na njihov zanemarljiv kumulativni uticaj (manje od 1% u obe kategorije uticaja). U Tabeli 14. prikazana je razlika između bruto i neto tokova koji su povezani sa svakim od scenarija iskorišćenja RNG-a. Bruto tokovi se odnose na ukupne oslobođene emisije i ukupne resurse koji se potroše u svakom scenariju tokom svog životnog ciklusa, bez obzira na sporedne proizvode. Kada se sporedni proizvodi oduzmu iz sistema dobijaju se neto rezultati.

Tabela 14. Popis životnog ciklusa različitih scenarija korišćenja RNG-a (po 1 Sm³ rastvorenog gasa)

Tok	Jedinica	S1: Spaljeno ^a	S2: Kotlovi			S3: Kombinovana postrojenja			
			bruto*	DP: toplota	neto	bruto*	DP: el.energija	DP: toplota	neto
Izlaz									
El.energija	MJ	0	0	0	0	14.85	-14.85	0	0
Toplota	MJ	0	30.06	-30.06	0	14.15	0	-14.15	0
Topl.(gubitak)	MJ	35.36	nema	nema	nema	nema	nema	nema	nema
Ulaz									
Rastv.gas	MJ	35.36	35.36	0	35.36	35.36	0	0	35.36
Prirodni gas	MJ	0	0.03	-2.24	-2.21	0	-0.72	-1.05	-1.77
Ugalj	MJ	0	3.00	-0.64	2.36	0	-62.99	-0.30	-63.29
Sirova nafta	MJ	0	0.03	-37.70	-37.67	0	-0.70	-17.74	-18.44
Emisije									
C ₁ *	g(CO ₂)	1511	1542	nema	nema	1542	nema	nema	nema
C ₂ *	g(CO ₂)	201	205	nema	nema	205	nema	nema	nema
C ₃ *	g(CO ₂)	106	108	nema	nema	108	nema	nema	nema
C ₄ *	g(CO ₂)	32	32	nema	nema	32	nema	nema	nema
C ₅ *	g(CO ₂)	125	127	nema	nema	127	nema	nema	nema
Ukupno CO ₂	g	1975	2279	-2747	-	2015	-5540	-1293	-4817
					468.28				
CH ₄	g	40.30	0.15	-2.54	-2.39	0	-3.23	-1.19	-4.43
N ₂ O	g	0	0.00	-0.03	-0.03	0	-0.03	-0.01	-0.04

Napomene: * prosek za četiri naftna polja.

Bruto vrednosti pokazuju slične rezultate za svaki scenario. Na primer, bruto masa CO₂ pri tretmanu 1 Sm³ RNG-a je u rasponu od 1,97 do 2,28 kg. Bruto emisije CO₂ su najniže u Scenariju 1 (spaljivanje na baklji) pošto se deo ugljenika iz rastvorenog gasa emituje kao CH₄, dok Scenario 2 i 3 podrazumevaju potpuno sagorevanje ugljovodonika iz RNG-a. Iako sagorevanje rastvorenog gasa u kombinovanim postrojenjima i kotlovima za zagrevanje za rezultat ima jednake emisije, ovi drugi često imaju veće bruto vrednosti (Tabela 14). Bruto vrednosti za scenario sa kotlovima za zagrevanje uključuju tokove životnog ciklusa povezane sa dodatnom električnom energijom utrošenom za cirkulacione pumpe, sisteme kontrole, itd. Ova količina električne energije se obezbeđuje iz termo-elektrana na lignit u iznosu od 5,56 Wh po MJ gasa koji sagoreva u kotlovima za zagrevanje [99].

Neto tokovi su izračunati uzimajući u obzir koristi od obnovljene toplotne i električne energije. Osim svoje primarne funkcije, odnosno tretmana otpadnih tokova, Scenariji 2 i 3 proizvode i vredna energetska davanja koja mogu da zamene ekvivalentnu količinu energije koja dolazi iz marginalnih procesa. Pretpostavka je da se podrazumeva da električna i toplotna energija nastali kao sporedni proizvodi tretmana rastvorenog gasa zamenjuju električnu energiju proizvedenu u termoelektranama na lignit, odnosno toplotnu energiju proizvedenu u kotlovima na lož ulje.

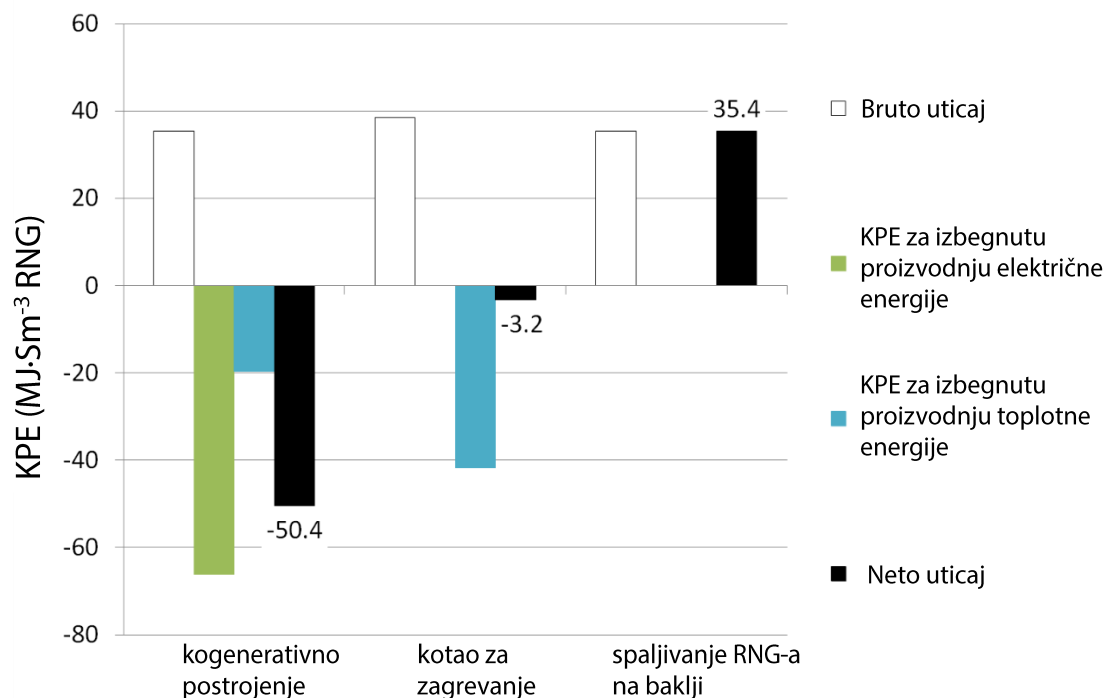
Neto tokovi se izračunavaju oduzimanjem ekoloških tokova povezanih sa izbegnutom marginalnom proizvodnjom od bruto rezultata. Kao rezultat nastaje značajna razlika između neto tokova povezanih sa različitim scenarijima. Na primer, Scenario 2 ima veću bruto emisiju CO₂ od Scenarija 1 (2,28 kg·Sm⁻³ u poređenju sa 1,97 kg·Sm⁻³; tabela 4), ali zahvaljujući izlaznoj toplotnoj energiji, može da se zameni 30,1 MJ konvencionalne toplotne energije za koju bi bilo potrebno 2,75 kg CO₂ (Tabela 14). Dakle, neto emisija CO₂ u vezi sa Scenarijom 2 procenjena je na -0,47 kg. Negativna vrednost znači da Scenario 2 neće povećati sadržaj CO₂ u atmosferi, već umesto toga ima potencijal da ga smanji zbog izbegavanja ispuštanja CO₂ iz zamenjenih procesa. Koristi od izbegnutih procesa su još izraženije u Scenariju 3 gde kombinovana postrojenja obezbeđuju dve izlazne energije (14,8 MJ električne energije i 14,2 MJ toplotne energije), koje mogu da zamene marginalnu električnu i toplotnu energiju. Ovo donosi najveće ekološke koristi za Scenario 3, kako u pogledu ispuštanja CO₂, tako i potreba za fosilnom energijom.

4.3. Procena uticaja životnog ciklusa za opcije korišćenja rastvorenog gasa

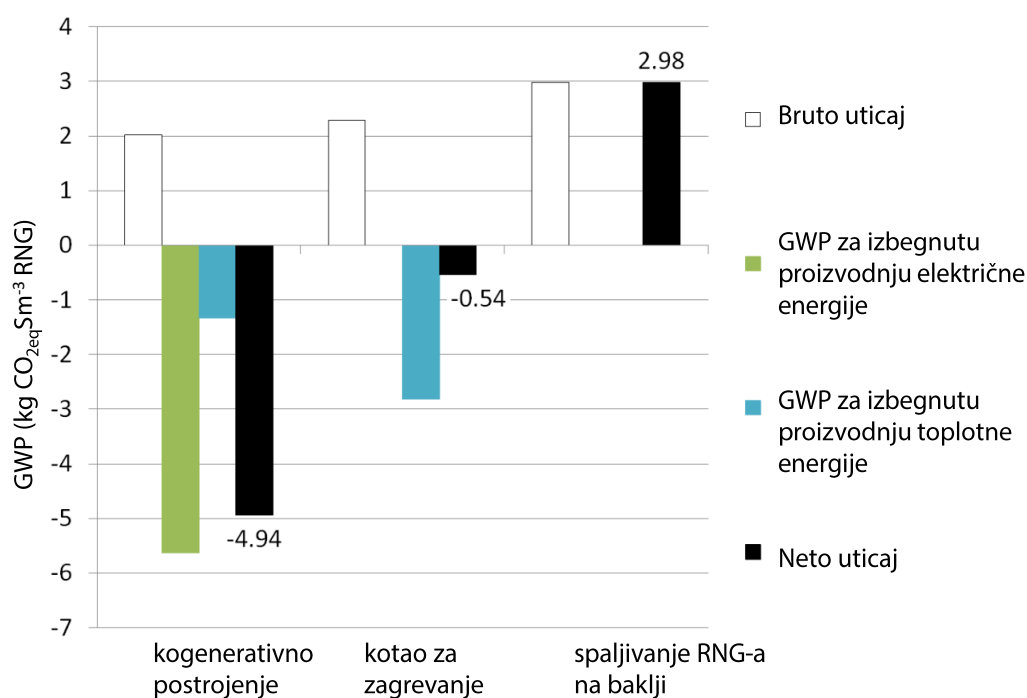
Slike 20 i 21 pokazuju ekološke uticaje životnog ciklusa i izbegnute uticaje tri scenarija korišćenja rastvorenog naftnog gasa. U upravljanju otpadom LCA pozitivni rezultati ukazuju na štetne uticaje na životnu sredinu, odnosno opterećenje životne sredine ili korišćenje resursa, a negativne vrednosti pokazuju uštede [105]. Prema tome, negativna vrednost ukazuje na ekološku korist koja nastaje kada su izbegnuti uticaji veći od uticaja vezanih za proces tretiranja otpada.

U ovoj studiji se rastvoreni naftni gas smatra za potencijalni izvor energije. Stoga, njegovo sagorevanje dovodi do osiromašenja resursa. Na Slici 20 se može videti da spaljivanje na baklji za rezultat ima iscrpljivanje fosilnih energenata za 35,4 MJ po Sm^3 rastvorenog naftnog gasa spaljenog na baklji. Scenariji koji obuhvataju kombinovana postrojenja i kotlove za zagrevanje imaju negativne CED (-48,7, odnosno -2,1 MJ po Sm^3 rastvorenog gasa). Ovo se može objasniti visokim CED kod izbegnutih procesa, posebno zamenjene marginalne električne energije.

Potencijal globalnog zagrevanja koji se odnosi na spaljivanje na baklji se procenjuje na 2,98 $\text{kg CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{Sm}^{-3}$ (Slika 21.). Ovo je više nego kod onih koji su rezultat drugih opcija za tretiranje otpada zbog emisija CH_4 čiji je rezultat delimično sagorevanje i odsustvo regeneracije energije. Korišćenje rastvorenog gasa u kotlovima za zagrevanje i kombinovanim postrojenjima bi rezultiralo ekološkim benefitima pošto potencijal globalnog zagrevanja kod izbegnutih procesa premašuje ekološka opterećenja koja proističu iz sagorevanja rastvorenog naftnog gasa. Potencijali globalnog zagrevanja u Scenarijima 2 i 3 su procenjeni na -0,54 i -4,94 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}$ (Slika 21).



Slika 20. Potreba za kumulativnom energijom iz fosilnih izvora za tri alternativna scenarija korišćenja rastvorenog naftnog gasa (po 1 Sm³ rastvorenog gasa)

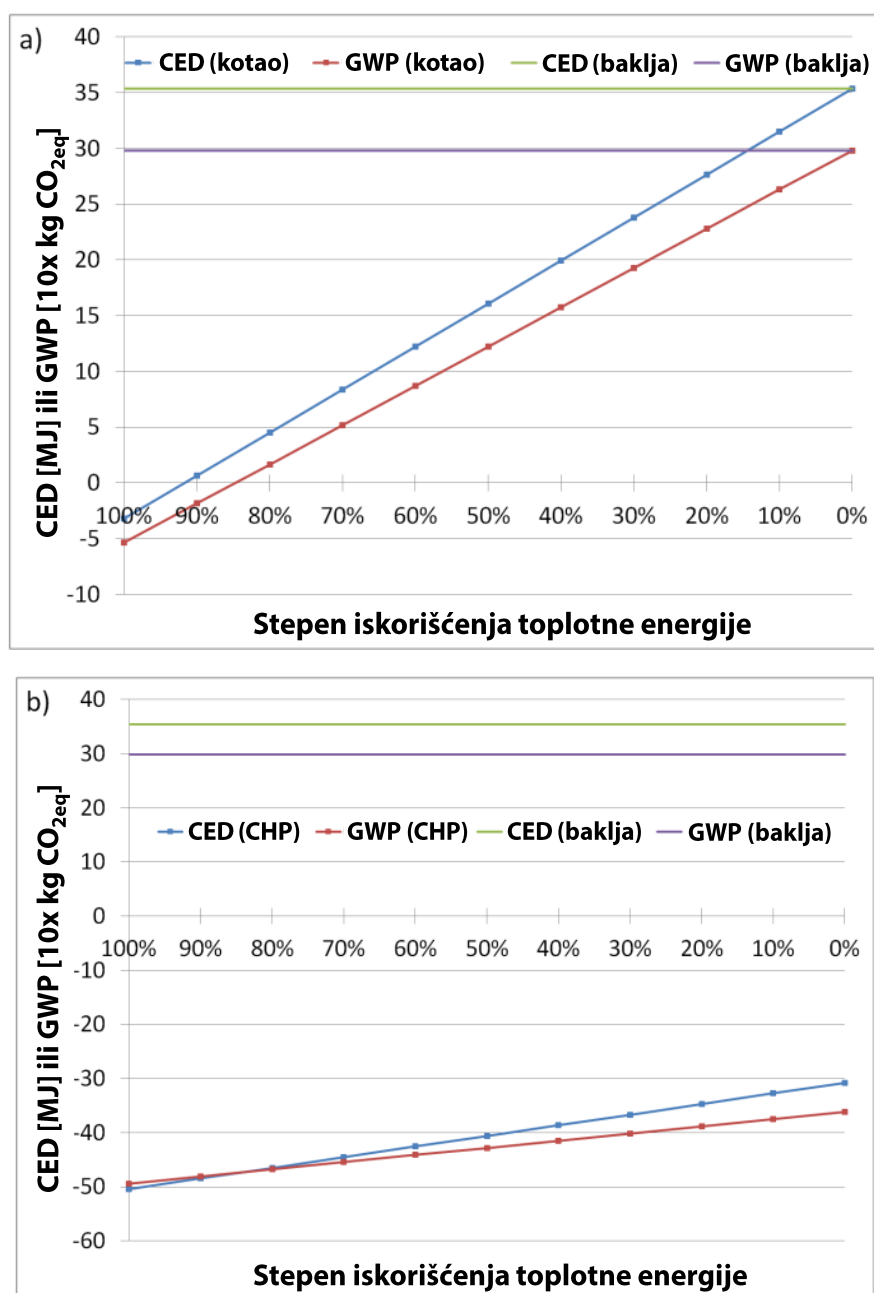


Slika 21. Uticaji na globalno zagrevanje tri alternativna scenarija korišćenja rastvorenog gasa (po 1 Sm³ rastvorenog gasa)

Rezultati prikazani na Slikama 20 i 21 podrazumevaju potpunu regeneraciju energije u slučaju Scenarija 2 i 3. U Srbiji, proizvođači energije iz visoko efikasnih izvora dobijaju status

povlašćenog proizvođača i na taj način se postrojenju obezbeđuje prioritet poveznja na elektrodistributivnu mrežu, ako tehnički uslovi to dozvoljavaju [106]. Dakle, stopa realizacije od 100% za električnu energiju može biti izvodljivo ukoliko se dobije status povlašćenog proizvođača električne energije. Međutim, potpuna realizacija iskorišćenja toplotne energije često nije moguća zbog nedostatka dovoljne i stabilne lokalne potražnje za toplotnom energijom. Zbog toga se naša osnovna pretpostavka da će 100% proizvedene toplotne energije zameniti alternativne izvore može pokazati kao precenjena. Za testiranje osetljivosti LCA rezultata u ovoj disertaciji varirana je stopa iskorišćenja toplote od 100% do 0%.

Kao što je prikazano na Slikama 22a i 22b, mogućnost korišćenja toplotne energije predstavlja važan aspekt koji treba uzeti u obzir u procesu odlučivanja. Ne iznenađuje činjenica da je scenario sa kotlovima za zagrevanje mnogo osetljiviji na ovom parametru nego scenario koji se odnosi na kombinovana postrojenja. Na primer, ako je stopa iskorišćenosti toplotne energije smanjena sa 100% na 20%, potencijal globalnog zagrevanja scenarija sa kotlovima za zagrevanje i kombinovanim postrojenjima bi se povećao za 524%, odnosno 22%. Ipak, čak i pri veoma niskom nivou iskorišćenja toplotne energije, ekološki parametri Scenarija 2 i 3 su ipak bolje u poređenju sa spaljivanjem na baklji (Slika 22).



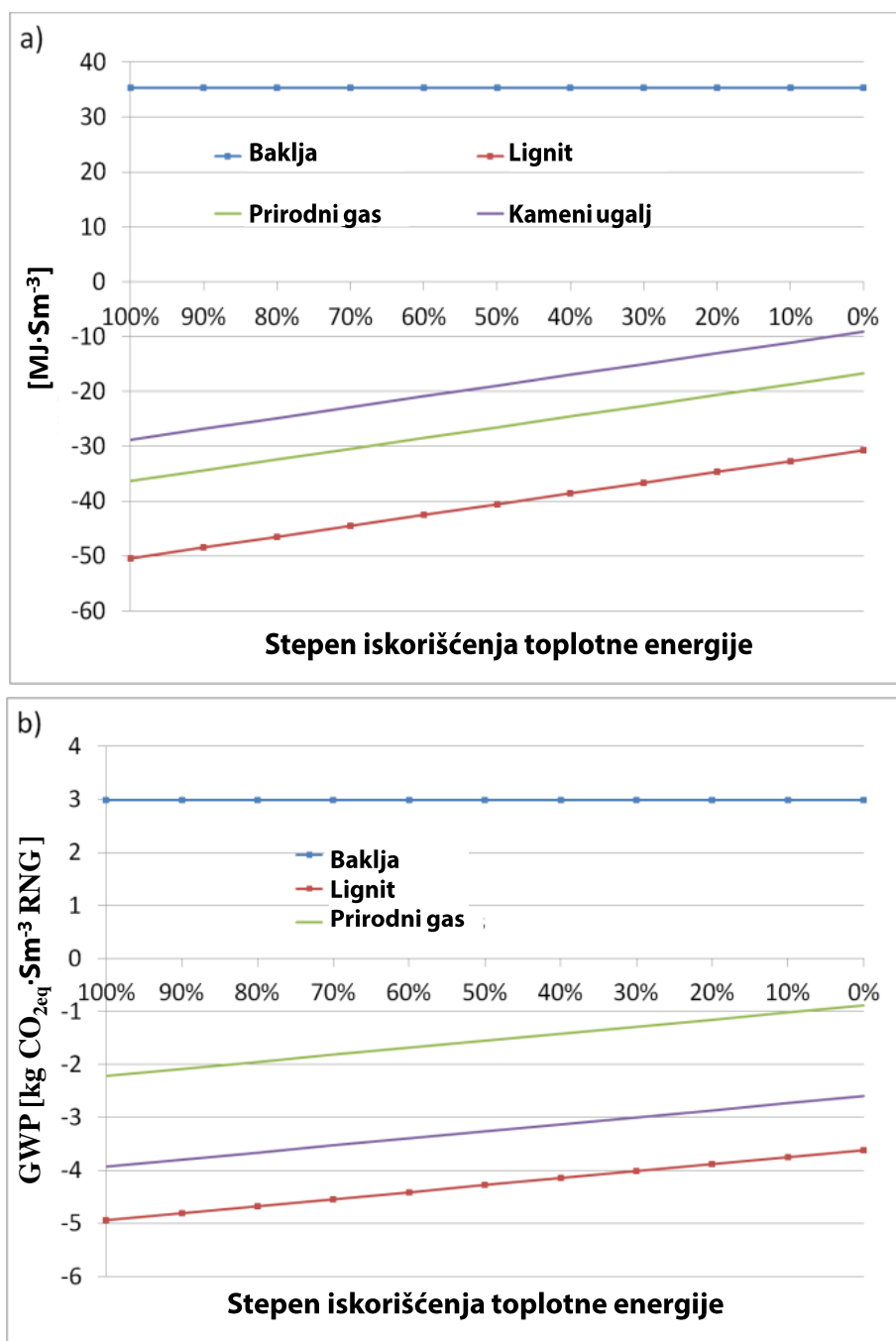
Slika 22. Ekološki uticaji korišćenja rastvorenog naftnog gasa u (a) kotlovima za zagrevanje ili (b) kombinovanim postrojenjima u zavisnosti od stope iskorišćenja toplotne energije (MJ·Sm⁻³ ili 10 kg CO_{2eq}·Sm⁻³)

U toku 2014. godine, oko 82 miliona Sm³ rastvorenog naftnog gasa je ispušteno u obliku otpadnog proizvoda iz industrije ekstrakcije nafte u Srbiji (Interni dokument: Gasni pregled Naftne industrije Srbije). Od ovog iznosa samo oko 13% je korišćeno u kombinovanim postrojenjima (Interni dokument: Proizvodnja i potrošnja energije Naftne industrije Srbije u 2014. godini). Ako je 100% rastvorenog naftnog gasa dobijenog na

naftnim poljima u Srbiji iskorišćeno u kombinovanim postrojenjima za proizvodnju električne i toplotne energije, umesto 100% spaljivanja na baklji, mogla bi se ostvariti godišnja ušteda od 0,65 Tg CO_{2eq} i 7032 TJ energije, s obzirom na prosečnu toplotnu vrednost rastvorenog naftnog gasa u Srbiji (35,36 MJ·Sm⁻³) i potpunu regeneraciju toplotne energije. U najgorem slučaju, koji podrazumeva stope realizacije od 0% za toplotnu energiju, očekivane uštede su još uvek značajne (0,54 Tg CO_{2eq} i 5423 TJ energije). U 2012. godini, ukupni uticaj globalnog zagrevanja gasova koji izazivaju efekat staklene bašte objavljen u Srbiji procenjen je na 56 Tg CO_{2eq} [107], dok je primarna potrošnja energije iznosila 586123 TJ [55]. Dakle, potpuno iskorišćenje rastvorenog naftnog gasa u kombinovanim postrojenjima za proizvodnju električne i toplotne energije može da smanji potencijal globalnog zagrevanja i primarnu potrošnju energije u Srbiji za oko 1%.

Kao što je navedeno u [46] izbor marginalne električne energije značajno utiče na rezultate LCA. Električna energija proizvedena na bazi kamenog uglja je definisana kao marginalna od strane brojnih istraživača [95], [96], međutim, pojavljuju se i druga mišljenja. Prema Lundu [108], marginalna električna energija u skandinavskim zemljama je mešavina električne energije dobijene iz uglja i prirodnog gasa, dok Fruergaard i dr. [96] predlažu analize osetljivosti ukoliko nije moguće jasno definisanje. Na Slici 23 mogu se videti očekivani uticaji korišćenja rastvorenog naftnog gasa u kombinovanim postrojenjima uzimajući u obzir i druge tehnologije osim električne energije proizvedene na bazi lignita kao proizvođače marginalne električne energije.

Električna energija proizvedena od kamenog uglja i prirodnog gasa je ekološki prihvatljivija od električne energije proizvedene na bazi lignita koja se koristi u centralnim scenarijima i stoga su očekivane uštede manje. Slika 23 pokazuje da su, uz pretpostavku da je marginalna električna energija ona koja je proizvedena na bazi prirodnog gasa ili kamenog uglja, uštede znatno smanjene za scenarija sa kombinovanim postrojenjima, za 2,59, odnosno 0,88 kg CO_{2eq} po Sm³ rastvorenog gasa. Ova smanjenja u uštedama su evidentna i u smislu CED. Ipak, izbor marginalne tehnologije neće uticati na ukupne zaključke o prednostima korišćenja rastvorenog naftnog gasa u kombinovanim postrojenjima za proizvodnju električne i toplotne energije, umesto u njegovom spaljivanju na baklji.



Slika 23. CED (a) i potencijal globalnog zagrevanja (b) scenario kombinovanih postrojenja u zavisnosti od pretpostavke o stopi iskorišćenja zamenjene električne i toplotne energije

4.4. Ograničenja i nesigurnosti

Postoje tehnička, ekonomska i hemijska ograničenja u vezi sa korišćenjem rastvorenog naftnog gasa. Što se tiče globalnih tehničkih i ekonomskih pitanja, glavne probleme predstavljaju, udaljene geografske lokacije između izvora i potencijalnih potrošača rastvorenog gasa, nedostatak infrastrukture i niske cene domaćeg gasa.

Jedan od najčešćih hemijskih problema korišćenja rastvorenog naftnog gasa je visok sadržaj H_2S u hemijskom sastavu rastvorenog gasa, što ga čini kiselim. Problem korišćenja kiselih gasova se ne može rešiti bez razvoja ekonomski izvodljivih i ekološki prihvatljivih procesa odsumporavanja [108].

Odnos zapremine rastvorenog naftnog gasa i količine proizvedene sirove nafte se naziva koeficijent gas-nafta. Ovo otvara još jedan problem u praćenju rastvorenog naftnog gasa, pošto mnoga naftna polja nisu opremljena uređajima za merenje protoka i sastava gasa. Savinov [109] je naveo da su zapremine rastvorenog naftnog gasa (proizvedene, iskorišćene i spaljene) uglavnom bile procenjivane, a zatim izračunate, a ne izmerene instrumentalnim metodama. Nedostatku merenja je uglavnom doprinela i činjenica da se rastvoreni naftni gas smatrao za otpadni materijal dobijen prilikom proizvodnje sirove nafte, pa je dugi niz godina bio spaljivan na baklji ili ispuštan u atmosferu.

Osim toga, rastvoreni naftni gas sadrži ugljovodonike C_1-C_8 u različitim udelima. Do kvarova na motorima često dolazi u prisustvu manjih količina nečistoća u ugljovodonicima u rastvorenom naftnom gasu (1-2 vol%), što drastično smanjuje radni vek motora. Prisustvo ugljovodonika C_{5+} sa niskim oktanskim brojem u rastvorenom naftnom gasu na naftnim poljima ometa njegovu direktnu primenu za klipne motore na gasni pogon, usmeravanje rastvorenog naftnog gasa do postrojenja za njegovu preradu pre korišćenja, što čini kombinovana postrojenja za proizvodnju toplotne i električne energije ekonomski povoljnom investicijom [110].

4.5. Eksterni troškovi emisija

Tabela 14 pokazuje protoke materijala i energije za tri različite opcije potencijalnog iskorišćenja. Vrednosti predstavljaju prosek za četiri naftna polja koja su bila predmet istraživanja. Tabela 15 sadrži samo podatke o emisijama gasova koji izazivaju efekat staklene bašte. Bruto protok se odnosi na ukupne emisije oslobođene sagorevanjem 1000 Sm^3 RNG bez uzimanja u obzir koristi od emisija izbegnutih zamenom tehnoloških procesa. S druge strane, neto rezultati uzimaju u obzir izbegnute emisije koje su vezane za potisnute tehnološke procese usled proizvodnje električne i/ili toplotne energije u scenarijima S2 i S3. Bruto vrednosti pokazuju slične rezultate za sva tri istraživana scenarija za iskorišćenje RNG od 2015. godine (do $2283 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}$ na 1000 Sm^3 RNG). Bruto uticaj je najviši kod scenarija sa

grejnim kotlovima (S2) jer rezultati dobijeni LCA metodom takođe obuhvataju i emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte povezane sa proizvodnjom električne energije koja se koristi za pokretanje pumpi, kontrolnih sistema, itd. što je oko 0,0056 kWh po MJ RNG sagorelog u kotlovima [99]. U ovoj studiji je uzeta pretpostavka da pomoćna električna energija dolazi iz elektrana u Srbiji koje koriste lignit.

Neto vrednosti pokazuju rezultate izbegnutih emisija iz potisnutih procesa se oduzimaju od bruto rezultata. Za razliku od bruto rezultata, neto rezultati pokazuju značajnu fluktuaciju. Uključivanje u procenu izbegnutog tereta ima značajan uticaj na rezultate LCA metode. Na primer, scenario S2 ima veći uticaj na bruto globalno zagrevanje nego scenario S1 (2283 kg CO_{2eq} u poređenju sa 2226 kg CO_{2eq}; Tabela 14), ali zahvaljujući proizvodnji toplotne energije može da zameni 30,06 GJ konvencionalne toplotne energije dobijene iz lakog lož ulja što bi dovelo do emisije 2814 kg CO_{2eq} (Tabela 14). Stoga, neto uticaj na globalno zagrevanje povezan sa scenarijom S2 procenjen je na -532 kg CO_{2eq}. Negativna vrednost znači da u scenariju S2 neće doći do povećanja koncentracije gasova sa efektom staklene bašte u atmosferi; umesto toga, postoji potencijal za smanjenje te koncentracije zahvaljujući izbegnutim emisijama gasova koji izazivaju efekat staklene bašte koji nastaju u potisnutim procesima. U scenariju S3, CHP postrojenje ima dva rezultata (14.8 GJ električne energije i 14.2 GJ toplotne energije); stoga, ekološke koristi su još naglašenije. Izbegnut uticaj na globalno zagrevanje se procenjuje na 6946 kg CO_{2eq}, što daje neto uticaj od -4932 kg CO_{2eq} po 1000 Sm³ RNG sagorelog u CHP postrojenjima.

Slika 24 pokazuje bruto i neto eksterne troškove nastalih usled emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte oslobođenih u sva tri alternativna scenarija tokom njihovog životnog veka. Pozitivni rezultati procesa prerade otpada ukazuju na eksterne troškove tj. marginalnu ekološku štetu dok negativna vrednost ukazuje na uštedu [105]. Stoga se negativna vrednost odnosi na marginalne ekološke koristi koje nastaju kada su eksterni troškovi povezani sa izbegnutim uticajem veći od eksternih troškova povezanih sa procesom prerade otpada.

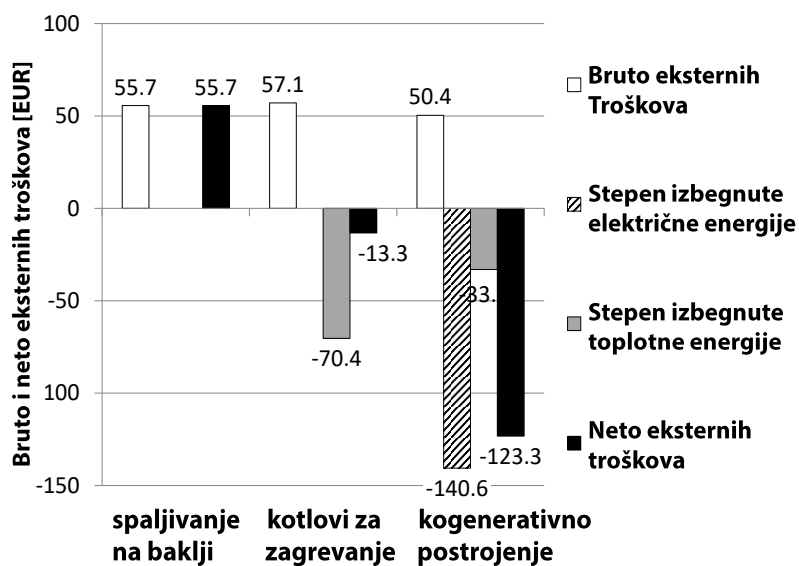
Eksterni troškovi povezani sa sagorevanjem RNG na sistemu baklji se procenjuju na 55,7 evra na 1000 Sm³ RNG sagorelog na sistemu baklji. Ovi troškovi su veći od onih koji nastaju iz drugih opcija prerade otpada usled emisije CH₄ koji su posledica delimičnog sagorevanja i izostanka rekuperacije energije. Iskorišćenje RNG u kotlovima za grejanje (S2) i CHP postrojenjima (S3) bi imalo za rezultat neto uštedu jer su eksterni troškovi vezani za

potisnute tehnološke procese viši od eksternih troškova koji su posledica emisija oslobođenih sagorevanjem RNG (Slika 24). Neto eksterni troškovi za scenarije S2 i S3 su procenjeni na -13,3 tj. -123,3 EUR na 1000 Sm³.

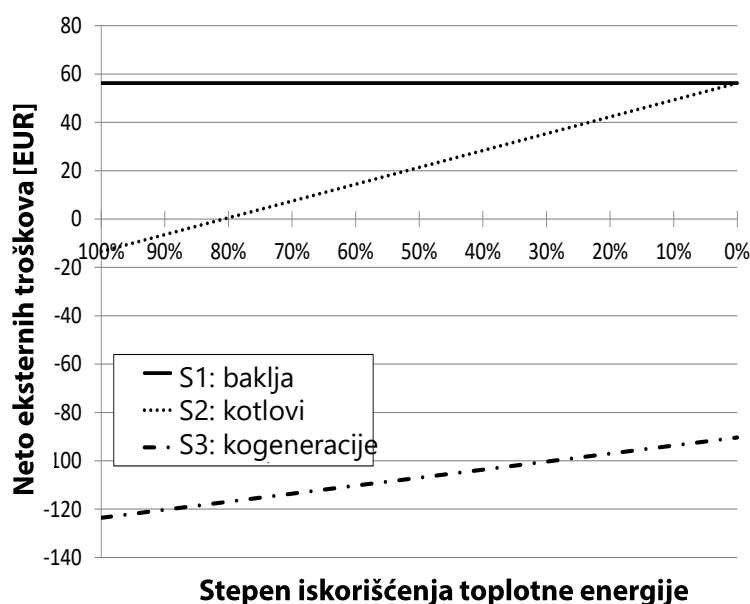
Rezultati prikazani na Slici 24 pretpostavljaju potpunu rekuperaciju energije u slučaju scenarija S2 i S3. U Srbiji, visoko efikasna CHP postrojenja imaju povlašćeni pristup državnoj električnoj mreži ukoliko se ispune uslovi za *feed-in* tarifu [106]; stoga je realistično pretpostaviti 100%-nu stopu realizacije za električnu energiju. Potpuna realizacija za toplotnu energiju često nije moguće usled odsustva dovoljne i stabilne potražnje na lokalnom tržištu. Stoga je pretpostavka da će toplotna energija proizvedena u scenarijima S2 i S3 potisnuti alternativne procese proizvodnje toplotne energije možda suviše optimistična. Analiza osetljivosti je sprovedena sa ciljem da se utvrdi osetljivost scenarija S2 i S3 na potencijalnu stopu iskorišćenja toplotne energije. Slika 10 pokazuje rezultate vrednovanja eksternih troškova ukoliko se iskorišćenje toplotne energije smanji sa 100% na 0%.

Kao što je prikazano na Slici 25, mogućnost iskorišćenja toplotne energije ima značajan uticaj na eksterne troškove zaštite životne sredine u scenarijima S2 i S3. Stoga ovaj aspekt treba uzeti u obzir prilikom odlučivanja o odgovarajućoj tehnologiji i opremi za iskorišćenje RNG. Ne iznenađuje činjenica da je scenario sa grejnim kotlovima (S2) osetljiviji na ovaj parametar od scenarija sa CHP postrojenjima (S3). Na primer, pri stopi iskorišćenja toplotne energije od 50% u scenariju S2, neto eksterni troškovi iznose 21 evro na 1000 Sm³ (Slika 24) što predstavlja povećanje od 259% u poređenju sa scenarijom sa 100%-nom stopom iskorišćenja toplotne energije. S druge strane, u scenariju S3, ako stopa iskorišćenja toplotne energije padne sa 100% na 50%, eksterni troškovi povezani sa scenarijom S3 će se povećati samo 13% (sa -123 EUR na -107 EUR; Slika 25).

Procenjuje se da se oko 80 milion Sm³ RNG godišnje oslobađa sa lokacija u Srbiji na kojima se eksploatiše nafta [65]. Ukoliko bi se ukupna količina RNG spalila na sistemu baklji, to bi uzrokovalo 4,2 miliona evra štete usled oslobođenih gasova koji izazivaju efekat staklene bašte nastalih sagorevanjem RNG.



Slika 24. Bruto i neto eksterni troškovi povezani sa tri alternativna scenarija iskorišćenja RNG (u evrima, na 1000 Sm³ RNG)



Slika 25. Neto eksterni troškovi iskorišćenja RNG u zavisnosti od stope iskorišćenja toplotne energije (u evrima, na 1000 Sm³ RNG)

S druge strane, u slučaju da se 100% rekuperiranog RNG gasa sa naftnih polja u Srbiji iskoristi u CHP postrojenjima umesto da se u istom procentu sagori na sistemu baklji, eksterni troškovi u vezi sa RNG gasom bi se smanjili za 14 miliona evra godišnje (uz pretpostavljenu prosečnu toplotnu vrednost RNG i potpunu rekuperaciju toplotne energije). Čak i u slučaju nulte stope realizacije toplotne energije, očekivana ušteda je i dalje značajna – oko 10 miliona evra godišnje.

Rezultati i diskusija – II deo (ASPEN simulacija kogenerativnog postrojenja na naftnom polju)

4.6. Podaci sa kogenerativnog postrojenja

Na kogenerativnom postrojenju na naftnom polju izmerene su vrednosti operativnih parametara po ranije uspostavljenom planu eksperimenta. U Tabeli 15 su date eksperimentalne vrednosti temperatura i toplotne energije za svaku zadatu električnu snagu.

Tabela 15. Eksperimentalne vrednosti temperaturnih parametara za različite električne snage

[°C]	650 [kW _e]	700 [kW _e]	750 [kW _e]	800 [kW _e]	850 [kW _e]	900 [kW _e]
T ₁	80,3	80	79,6	79	78,3	76,8
T ₂	88,2	88,1	88,2	88,1	88,3	88
T ₃	553	551	546	541	535	525
T ₄	118	118	119	120	121	123
T ₅	98,2	98,6	99,4	100	100,6	101,4
T ₆	81,9	82	82	82,5	82,4	82,9
T ₇	91,9	92,1	92,4	93,1	93,5	94,1
Q _u [kW _t]	709,45	726,85	758,08	766,98	774,44	815,48

Temperatura T₁ (temperatura rashladne smeše glikol-voda pre ulaska u motor) je pokazala opadajući trend s porastom podešene snage motora, od 80,3 °C za 650 kW_e do 76,8 °C za 900 kW_e. Temperatura T₂ (temperatura rashladne smeše glikol-voda nakon izlaska iz motora) je pokazala veoma male promene s porastom snage motora, varirajući od 88 do 88,3 °C. Temperaturna razlika $\Delta T_{1,2} = T_2 - T_1$ se povećava s porastom snage kogeneratorske jedinice. Temperature T₃ (temperatura dimnih gasova pre ulaska u razmenjivač toplote sa snopom cevi) i T₄ (temperatura dimnih gasova na izlazu iz razmenjivača toplote sa snopom cevi) pokazuju sličan trend kao i temperature T₁ i T₂, odnosno razlika temperatura se povećava sa porastom snage kogeneratorske jedinice. Razlika temperatura T₃ između 700 kW_e i 650 kW_e iznosi 2 °C, dok razlika temperatura T₃ za 900 kW_e i 650 kW_e iznosi 28 °C. Najveća razlika temperatura je prisutna između prvog i poslednjeg eksperimenta. Izmerena

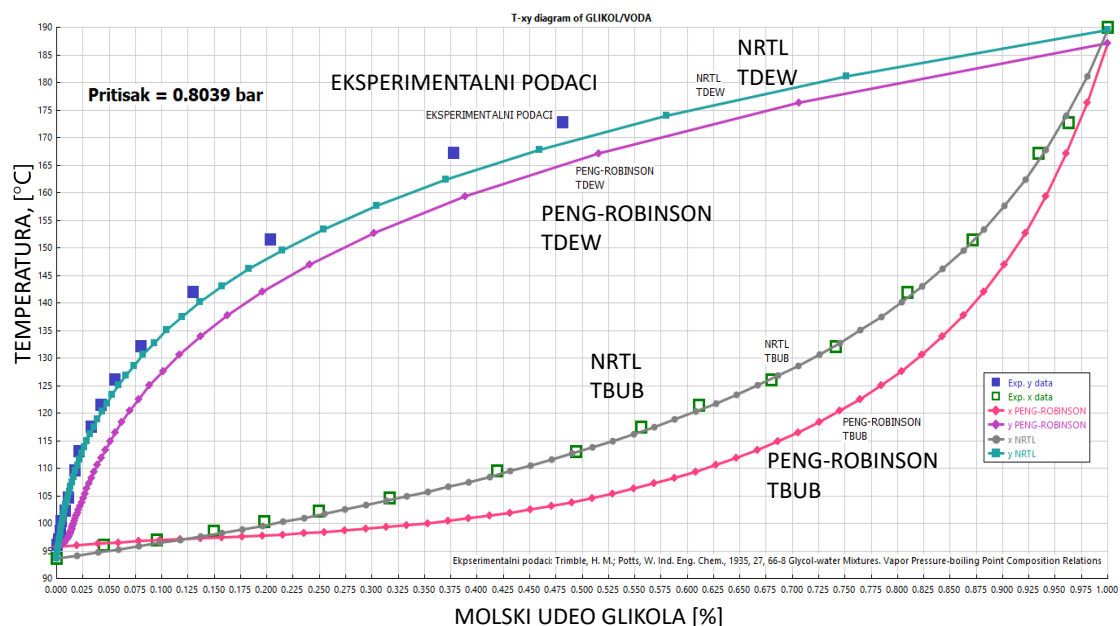
temperatura T3 (temperatura izduvnih gasova), pre ulaska u razmenjivač toplote iznosi 553 °C za 650 kW_e, dok je za 900 kW_e iznosila 525 °C. Temperatura T4 (temperatura izduvnih gasova nakon razmenjivača toplote) pokazuje trend rasta s porastom električne snage, ali uz mnogo manju razlikom nego temperatura T3. Razlika između temperatura T4 za 900 kW_e i 650 kW_e iznosi samo 5 °C.

Temperatura T5 (temperatura rashladnog fluida glikol-voda nakon izmene toplote s izduvnim gasovima) pokazuje ujednačen trend rasta s porastom električne snage, $\Delta T_5 = 0,4 - 3,2$ °C. Struja glikol-vode ulazi u pločasti razmenjivač toplote gde predaje toplotnu energiju struji vode koja dolazi s naftnog polja (T6). Pri svim električnim snagama kogeneratorske jedinice temperatura T6 ima stabilan i ujednačen trend. Grejni medijum kojim se naftno polje snabdeva toplotnom energijom napušta sistem i obeležen je temperaturom T7 koja pokazuje blagi trend porasta s razlikom od $\Delta T_7 = 0,2 - 2,2$ °C.

Izmerene ukupne toplotne energije na kalorimetru pokazale su velike razlike u odnosima prema generisanoj električnoj energiji. Za 650 kW_e odnos ukupne toplotne energije Q_u iznosi 1,09, dok za 900 kW_e ovaj odnos iznosi 0,9. S porastom električne snage rastu i međusobne razlike ukupne generisane toplote, sa $\Delta Q_{u(700-650 \text{ kW}_e)} = 17,44 \text{ kW}$, pa do $\Delta Q_{u(900-850 \text{ kW}_e)} = 41,04 \text{ kW}$.

4.7. Uspostavljanje ASPEN simulacije kogenerativnog postrojenja

Pre razvijanja ASPEN simulacije bilo je neophodno odabrati odgovarajući termodinamički model. Na osnovu generisanog faznog dijagrama odabran je NRTL model za računanje tačke ključanja tečne faze (glikol-voda). Na osnovu Slike 26 može se zaključiti da NRTL model ima najveću preciznost ponašanja tečne faze na liniji ključanja u odnosu na prikazane eksperimentalne podatke [111]. Kada je odgovarajući termodinamički model odabran (NRTL), razvijena je ASPEN simulacija kogenerativnog postrojenja za svaki set eksperimentalnih podataka.



Slika 26. Fazni dijagram za tečnu fazu glikol-voda

Simulacija je izvedena sekvencijalno po glavnim blokovima tehnološkog procesa radi lakše kontrole prilikom postavljanja simulacije, koji su kasnije objedinjeni [100]. Glavni blokovi u simulaciji bili su:

- Priprema RNG-a za sagorevanje
- Sagorevanje
- Tokovi energetskog bilansa (toplotne i električne energije)

Priprema RNG-a za sagorevanje

Plava linija (VAZDUH) predstavlja ulazni materijalni tok ambijentalnog vazduha, pre mešanja sa RNG-om. Protok RNG-a kroz sistem obeležen je crvenom bojom, a razlikuju se njegovi operativni parametri po fazama do motora s unutrašnjim sagorevanjem. Prvi materijalni tok, struja RNG-a pod nazivom GAS1 predstavlja njegov dotok iz merno-regulacione stanice. U mikser uređaju B1 vrši se sjedinjavanje ova dva materijalna toka u jedan koji se sprovodi u sistem kao GAS2. Prolaskom kroz turbinu (TURBSA) smeši se povećava temperatura na 195 °C pomoću toplote dimnih gasova iz motora turbinom, koji ulaze u drugu turbinu u sistemu (TURBEKS), čime RNG nastavlja svoj tok i dalje je obeležen kao GAS3. Snižavanje temperature RNG-a pre sagorevanja na 55 °C odvija se u razmenjivaču toplote E-1ST. Materijalni tok RNG-a pod nazivom GAS5 uvodi se u motor, gde se odigrava sagorevanje RNG-a.

Tokovi energetskog bilansa (toplotne i električne energije)

Tokovi energije u kogeneratorskom sistemu čine toplotna i električna energija. Električna energija je zadana na početku simulacije kao željeni energetski tok. Tok električne energije predstavljen je izlaznom isprekidanom linijom *RAD – W* kao izlaz iz uređaja *TURBINA*. Tokovi toplotne energije nošeni su rashladnim fluidom glikol-vode koji je predstavljen zelenom linijom kroz šemu u ASPEN-u kao *GV(1-5)*.

Analiza dobijenih temperaturnih vrednosti

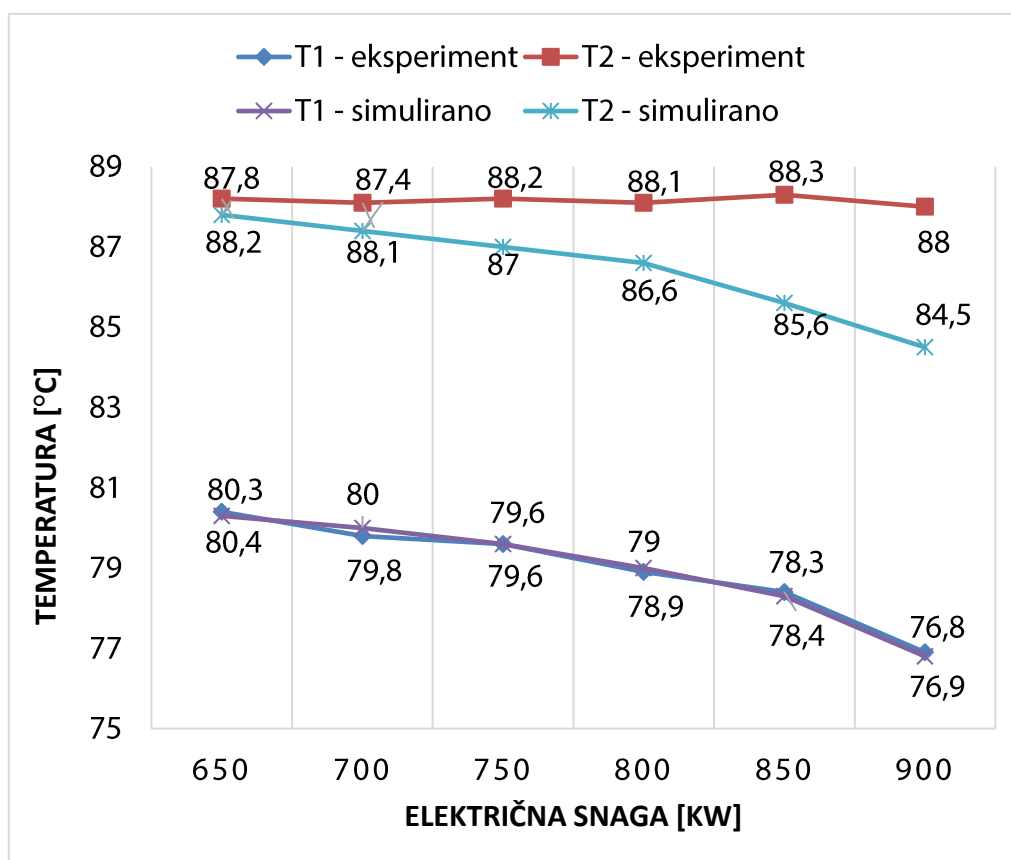
Simulacija je izvedena za svaku zadatu električnu snagu od 650 kW_e do 900 kW_e s korakom od 50 kW_e. Tabela 16 prikazuje simulirane ključne operativne parametre upoređene s eksperimentalnim vrednostima na osnovu kojih je izračunata generisana toplotna energija sistema.

Tabela 16. Upoređene vrednosti temperatura iz eksperimenta i ASPEN simulacije

Električna snaga kogeneratora [kW _e]		650	700	750	800	850	900
T ₁ [°C]	Eksperiment	80.40	79.80	79.60	78.90	78.40	76.90
	Simulacija	80.30	80.00	79.60	79.00	78.30	76.80
T ₂ [°C]	Eksperiment	88.20	88.10	88.20	88.10	88.30	88.00
	Simulacija	90.00	89.90	89.80	89.60	88.80	87.80
T ₃ [°C]	Eksperiment	553.00	551.00	546.00	541.00	535.00	525.00
	Simulacija	374.70	379.10	393.40	416.20	401.10	430.30
T ₄ [°C]	Eksperiment	118.00	118.00	119.00	120.00	121.00	123.00
	Simulacija	98.30	100.10	103.40	108.40	107.90	112.60
T ₅ [°C]	Eksperiment	98.20	98.60	99.40	100.00	100.60	101.40
	Simulacija	98.30	98.70	99.60	100.90	99.80	100.50
T ₆ [°C]	Eksperiment	81.90	82.00	82.00	82.50	82.40	82.90
	Simulacija	81.30	82.00	82.00	82.50	82.40	82.90
T ₇ [°C]	Eksperiment	92.50	92.50	93.00	93.50	93.70	94.00
	Simulacija	92.20	92.70	93.20	94.20	93.50	94.00

Temperatura T_{1,exp} pokazala je opadajući trend s porastom snage motora i pri najvećoj snazi (900 kW_e) pokazala najmanju vrednost od 76,9 °C, dok su u ASPEN-u, vrednosti temperature

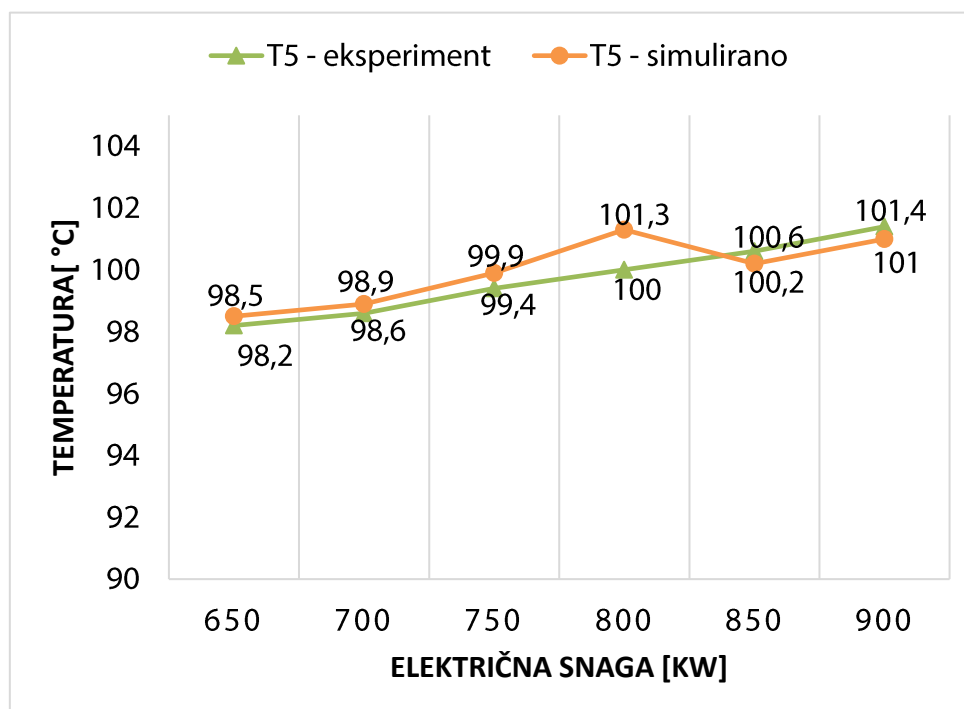
$T_{1,sim}$ opadale s porastom snage. Najveća razlika u simuliranim vrednostima je iznosila $\Delta T_{1sim} = 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$, između 900 kW_e i 650 kW_e , dok je za eksperimentalne vrednosti najveća razlika iznosila takođe $\Delta T_{1exp} = 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperatura T_1 predstavlja ulaz RNG-a u motor i na osnovu razlike $\Delta T_{1,2}$ određuje se količina predate toplotne energije od strane motora (Q_1) rashladnoj smeši glikol-voda. Kogeneratorska jedinica poseduje sistem automatskog upravljanja i regulacije na osnovu kojeg se podešavaju svi operativni parametri sistema u cilju pouzdane proizvodnje električne energije. S povećanjem zadate električne snage povećava se i generisana količina toplote u sistemu usled veće količine sagorelog RNG-a. Povećavajući razliku temperatura na ulazu i izlazu iz motora $\Delta T_{1,2}$, povećava se količina predate toplote rashladnoj smeši glikol-voda. Količina predate toplotne energije je ključna u održavanju „feed-in“ tarife. Najmanja razlika temperatura T_2 dobijena je pri najmanjoj električnoj snazi od 650 kW_e od $\Delta T_{2sim-exp} = 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Porastom električne snage uvećavala se razlika između eksperimentalnih i simuliranih podataka, pa je pri najvećoj električnoj snazi od 900 kW_e razlika iznosila $\Delta T_{2sim-exp} = 3,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Na Slici 28 prikazane su vrednosti za eksperimentalne i simulirane vrednosti T_1, T_2 .



Slika 28. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T_1 i T_2

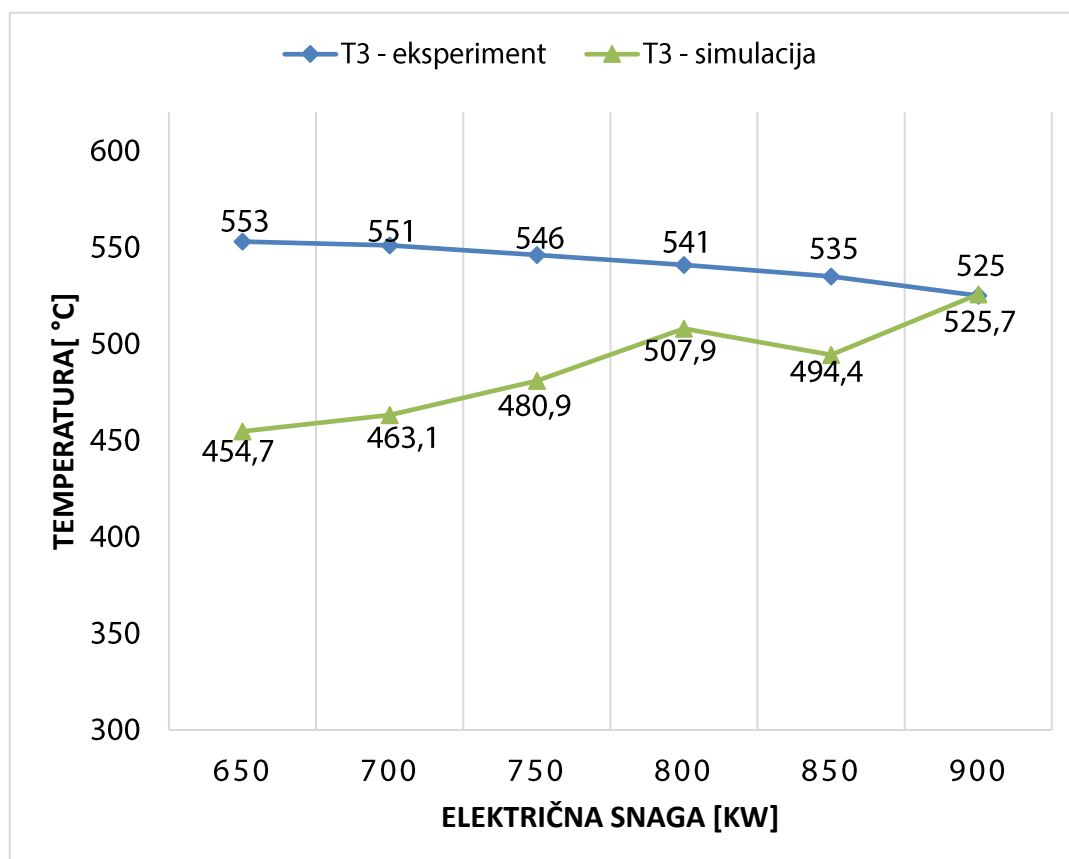
Sa Slike 28 mogu se uočiti opadajući trendovi eksperimentalne i simulirane vrednosti temperature T_1 s porastom električne snage, a veoma male promene i stabilan trend kod vrednosti temperature $T_{2,exp}$ dok simulirana temperatura $T_{2,sim}$ pokazuje trend opadanja s porastom električne snage.

Temperatura T_5 predstavlja rashladni fluid nakon razmenjivača sa snopom cevi u omotaču (krovni razmenjivač), odnosno temperaturu fluida nakon preuzete toplotne energije od izduvnih gasova (Q_2). Temperature T_5 imaju trend porasta i u simuliranim i u eksperimentalnim vrednostima. Simulirane vrednosti su zanemarljivo veće u odnosu na eksperimentalne vrednosti sa izuzetkom u poslednja dva eksperimenata za električne snage 850 i 900 kW_e gde simulirane vrednosti imaju pad vrednosti u odnosu na eksperimentalne vrednosti za $\Delta T_5 = 0,4$ °C. Porast temperatura T_5 s porastom električne snage ukazuje na veću količinu toplotne energije koja se predaje rashladnom fluidu glikol-voda nakon razmenjivača toplote sa snopom cevi. Temperature ulaska glikol vode u sistem (T_1) prati trend opadanja, dok temperature T_5 (kada je glikol-voda preuzela raspoloživu toplotnu energiju) prati trend rasta, što ukazuje na povećanje temperaturne razlike $\Delta T_{1,5}$. Sa Slike 30 može se zaključiti da je povećanjem električne snage povećana količina RNG-a za sagorevanje što dovodi do veće količine toplotne energije, što rezultira u povećanju razlika temperatura T_1 i T_5 kako bi sistem mogao da preda veću količinu proizvedene toplote.



Slika 29. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T_5

Temperature T_3 i T_4 odnose se na temperaturu izduvnih gasova pre i posle razmenjivača toplote sa snopom cevi u omotaču. Vrednosti temperatura $T_{3,exp}$ i $T_{3,sim}$ se porastom električne snage približavaju istoj vrednosti, da bi pri najvećoj električnoj snazi od 900 kW_e temperaturna razlika bila najmanja i iznosila $\Delta T_3 = 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Pri električnoj snazi od 650 kW_e temperaturna razlika bila najmanja i iznosila $\Delta T_3 = 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Pri električnoj snazi od 650 kW_e razlika temperatura (simulirane i eksperimentalne) bila je najveća i iznosila $\Delta T_3 = 98,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Velika temperaturna razlika pojavljuje se u prva tri eksperimenta ($650, 700$ i 750 kW_e) što je prikazano na Slici 30.

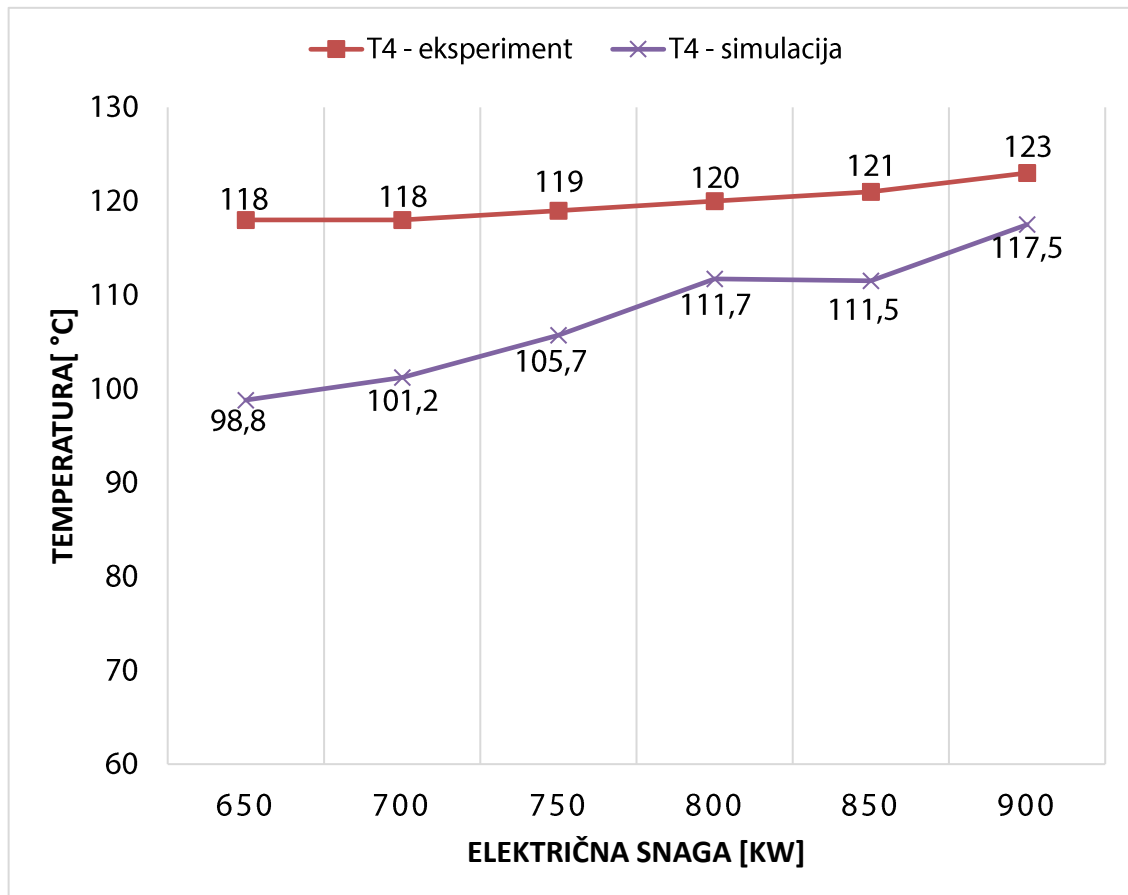


Slika 30. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T_3

Ovaj trend se može povezati s trendom temperatura T_1 i T_2 i T_5 jer ukoliko se iz motora preda više toplotne energije rashladnom fluidu glikol-voda, temperatura izduvnih gasova koji napuštaju motor (temperatura T_3) je niža što potvrđuje opadanje temperature $T_{3,exp}$. Simulirane vrednosti temperature $T_{3,sim}$ ukazuju na trend rasta s porastom električne snage, što pokazuje da u ASPEN simulaciji postoji monotoni porast dela toplotne energije koji se ne predaje s izduvnih gasova iz motora na rashladni fluid, što uzrokuje konstantni porast simulirane vrednosti $T_{5,sim}$. Ovo može biti pokazatelj količine toplotne energije koja se gubi u sistemu, a ne može da se izmeri prilikom eksperimenta usled nedostatka adekvatnih

instrumenata, što će biti diskutovano i prikazano u poglavlju *Analiza dobijenih vrednosti toplotne energije*.

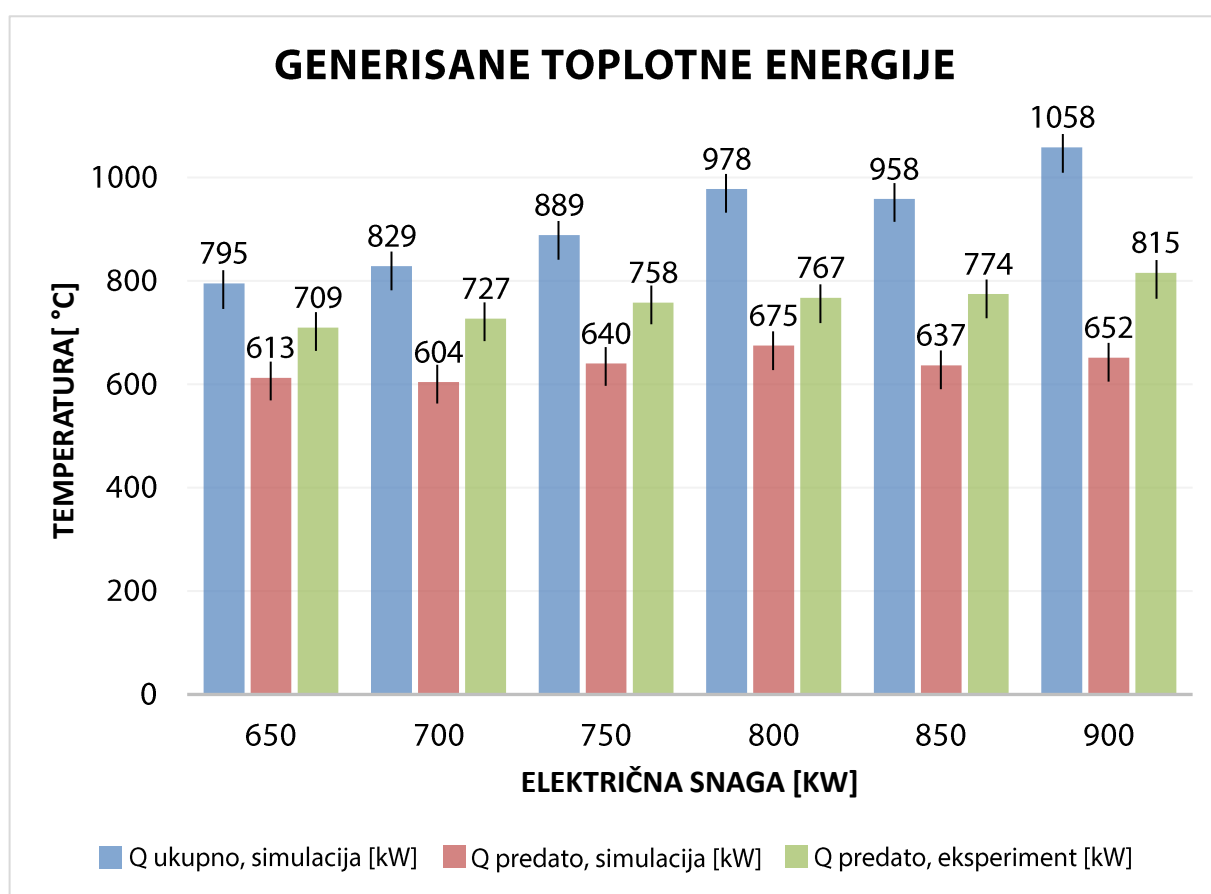
Temperature $T_{4,exp}$ i $T_{4,sim}$ (temperature izduvnih gasova nakon razmenjivača toplote sa snopom cevi koje se ispuštaju kroz dimnjak) pokazuju smanjenje temperaturne razlike s povećanjem električne snage motora od $\Delta T_4 = 19,2$ °C za snagu od 650 kW_e, pa do $\Delta T_4 = 5,5$ °C za snagu od 900 kW_e, što se može uočiti sa Slike 31.



Slika 31. Eksperimentalne i simulirane vrednosti temperatura T4

Analiza dobijenih vrednosti toplotne energije

Nakon analize generisanih temperatura u ASPEN simulaciji izvršeno je poređenje simuliranih i eksperimentalnih vrednosti toplotnih energija za svaku električnu snagu (od 650 kW_e do 900 kW_e). Na SLici 32 prikazane su eksperimentalne i simulirane vrednosti toplotnih energija koje se predaju potrošaču (Q_{predato}), kao i vrednosti ukupnih toplotnih energija koje se generišu u sistemu (Q_{ukupno}). Q_{ukupno} nema svoju eksperimentalnu vrednost jer se jedino merilo toplotne energije u kogeneratorskoj jedinici nalazi nakon pločastog razmenjivača toplote (Q_{predato}).



Slika 32. Eksperimentalne i simulirane vrednosti toplotnih energija

Na električnoj snazi od 650 kW_e eksperimentalna vrednost predate toplotne energije iznosila je 709,45 kW_t, dok je simulirana vrednost bila 612,63 kW_t, s razlikom od 96,8 kW_t. Za svaku električnu snagu koja se uveća za 50 kW_t primetan se porast razlike Q_{predato,exp} i Q_{predato,sim}. Sa Slike 32 može se uočiti da je simulirana vrednost predate toplotne energije Q_{predato,sim} u svakoj podešenoj snazi niža u odnosu na eksperimentalne vrednosti Q_{predato,exp}. U najnižoj snazi od

650 kW_e razlika iznosi $\Delta Q_{predato} = 96,8 \text{ kW}_t$, dok je za najveću električnu snagu od 900 kW_e razlika najveća i iznosi $\Delta Q_{predato} = 163,9 \text{ kW}_t$. Međutim, ako se posmatra ukupna količina proizvedene toplotne energije u simulaciji ($Q_{ukupno,sim}$), primetno je da je za svaku električnu snagu generisano više toplotne energije nego što je to u eksperimentu zahtevano ($Q_{predato,exp}$). Primetno je da su tokom eksperimenata vrednosti toplotne energije imale veći rast u odnosu na simulirane vrednosti. Razlika toplotne energije $Q_{predato,sim}$ za 900 i 650 kW_t iznosi 38,9 kW_t, dok je razlika toplotne energije $Q_{predato,exp}$ iznosila 106 kW_t. Ovo pokazuje da je u eksperimentalnim uslovima sistem održavao koeficijent odnosa toplotne i električne energije od 0,91 (za električnu snagu od 650 kW_e) do 1,09 (za električnu snagu od 900 kW_e), što ukazuje na povećanje proizvodnje toplotne energije srazmerno porastu električne snage, dok je koeficijent odnosa toplotne i električne energije u simuliranim vrednostima toplotne energije ($Q_{predato,sim}$) iznosio od 0,9 (za 650 kW_e) do 0,7 (za 900 kW_e), što ukazuje na manju proizvodnju toplotne energije u odnosu na električnu snagu.

Simulirane vrednosti ukupne generisane toplote u sistemu ($Q_{ukupno,sim}$) zadovoljavaju u svakoj električnoj snazi toplotne vrednosti predate količine toplote ($Q_{predato,exp}$). Razlika između ove dve vrednosti ($Q_{ukupno,sim} - Q_{predato,exp}$) ukazuje na izgublenu količinu toplote iz nekog razloga (termodinamički gubici, neizolovanost ili zaprljanost sistema, neadekvatno upravljanje, oštećenje opreme, različit sastav RNG-a u vremenu, greška modela ASPEN simulacije, itd.). U Tabeli 17 prikazane su vrednosti razlike ovih toplotnih energija, kao i odstupanje razlike od $Q_{ukupno,sim}$.

Tabela 17. Razlike i odstupanja toplotnih energija

Električna snaga [kW _e]	$\Delta Q_{ukupno,sim-predato,exp}$ [kW _e]	Odstupanje [%]
650	85,8	10,8
700	101,8	12,3
750	130,6	14,7
800	210,6	21,5
850	184,0	19,2
900	243,0	22,9

Primetan je rast odstupanja od 10,8% za najmanju električnu snagu od 650 kW_e do 22,9% za najveću električnu snagu od 900 kW_e. Rast razlike može se pripisati povećanju električne

energije što uzrokuje povećanje količine RNG-a za sagorevanje i samim tim produkciju veće količine izduvnih gasova.

Kao i u svakom motoru s unutrašnjim sagorevanjem, određena količina toplotne ili mehaničke energije bespovratno napusti motor. U istraživanjima koja je sproveo Bailey [112] procenjuje se da u nekim slučajevima čak 87% količine rada osovine napušta motor u obliku otpadne toplote. ASPEN simulacija ne uzima u obzir toplotne gubitke i njene uzroke, pa je dobijena ukupna toplotna energija ($Q_{\text{ukupno,sim}}$) u svakom proračunu veća od eksperimentalne vrednosti ($Q_{\text{predato,exp}}$). Vrlo brzo nakon puštanja motora u rad, na procesnoj opremi dolazi do formiranja različitih slojeva oksida ili korozije koji remete očekivan prenos toplotne energije [60], [81], [101].

Usled termodinamičkih ograničenja, neiskoristiva toplotna energija može iznositi najviše 13,2% i može se podeliti prema sledećim gubicima [113]:

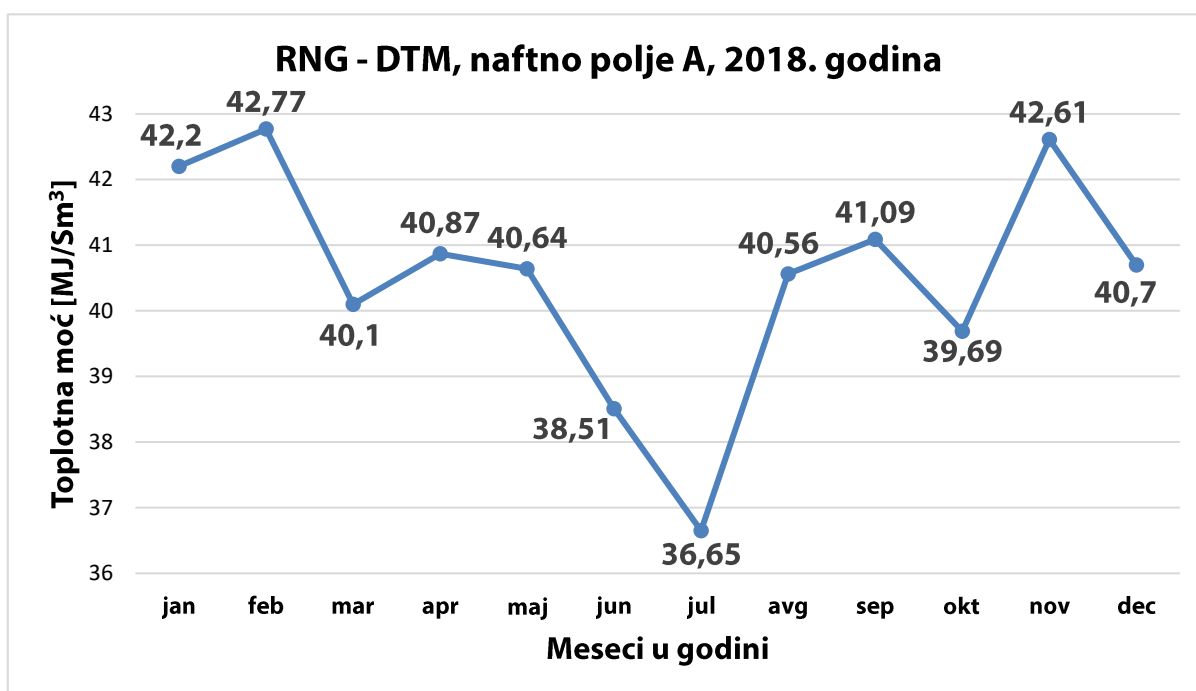
- radijacija motora – 1,5%
- radijacija generatora – 1,2%
- hlađenje grejnog medijuma glikol-voda – 3,9%
- dimni gasovi – 6,6%

Porastom proizvodnje električne snage povećava se generisana količina toplotne energije usled veće potrošnje RNG-a. Pri električnim snagama od 800, 850 i 900 kW_e primetan je nagli skok u razlikama između eksperimentalnih i simuliranih vrednosti u odnosu na električne snage od 750 kW_e do 650 kW_e. Ovo se može pripisati i promenljivom sastavu RNG-a čija donja toplotna moć može da varira tokom vremena. Promene u sastavu RNG-a mogu uticati na donju toplotnu moć i stabilnost uniformnog sagorevanja gasa. Takođe, ukoliko se poveća količina azota u sastavu RNG-a dolazi do smanjenje donje toplotne moći [45]. Varijabilna količina metana u RNG-u može uticati na neuniformno raspoređen plamen u cilindrima, što remeti proces sagorevanja, i dovodi do nekontrolisanih, intenzivnijih eksplozija u cilindrima koje ih mogu oštetiti, pa čak i razoriti [46]. Po različitim navodima [47], [114], [115], glavnu ekonomsku ulogu igra kvalitet goriva i njegov sastav prilikom određivanja performansi celokupnog sistema i određivanje veka isplativosti investicije. Varijacije sastava RNG-a mogu dovesti do sledećih promena [47]:

- 0,5% - 1,5% promene brzine obrtaja motora
- 1% - 3% promene masenog protoka RNG-a na ulasku u motor

- 3% - 4% promene energetskeg bilansa RNG-a

Da bi se odredio uticaj sastava RNG-a na generisanu toplotnu energiju u toku njegove eksploatacije, praćena je analiza njegovog sastava. Određivanje sastava gasa vrši se nakon uzimanja uzorka iz gasovoda na naftnom polju, što se radi dva puta mesečno. Na osnovu određenog sastava RNG-a računa se donja toplotna moć, ali se određuju i parametri za optimalan rad kogeneracionog postrojenja. Na Slici 33 prikazana je donja toplotna moć RNG-a na naftnom polju A tokom 2018. godine.



Slika 33. Godišnja varijacija u sastavu RNG-a na naftnom polju A

Može se primetiti da je donja toplotna moć različita u različitim periodima godine, što ukazuje i na mogućnosti dnevne varijacije sastava RNG-a. Najniža vrednost iznosila je 36,65 MJ/Sm³, dok je najveća vrednost donje toplotne moći 42,77 MJ/Sm³. Razlike u DTM iznose najviše 6,12 MJ/Sm³. Ovo pokazuje da je moguć uticaj sastava RNG-a na parametre sagorevanja prilikom eksploatacionog veka kogenerativnog postrojenja.

Da bi se odredio udeo uticaja sastava RNG-a na proizvodnju toplotne energije, formirano je pet različitih sastava RNG-a za istu DTM od 36,65 MJ, što je prikazano u Tabeli 18.

Tabela 18. Različiti sastavi RNG-a izračunati pomoću Matchada za istu toplotnu moć

Sastav	1	2	3	4	5
C1	0.66900	0.66900	0.67131	0.71314	0.68843
C2	0.05509	0.10257	0.11670	0.01580	0.11167
C3	0.04315	0.04768	0.03552	0.03867	0.00575
iC4	0.01032	0.00233	0.00020	0.00500	0.01230
nC4	0.02523	0.02389	0.01105	0.02710	0.00105
iC5	0.00394	0.00010	0.00016	0.00770	0.00770
nC5	0.00387	0.00010	0.00010	0.00750	0.00750
C6+	0.00664	0.00040	0.01000	0.01000	0.01000
CO ₂	0.17787	0.09363	0.11935	0.17018	0.15032
N ₂	0.00490	0.06030	0.03561	0.00490	0.00527

Dobijeni sastavi gasa korišćeni su u ASPEN simulaciji kako bi se odredila ukupna količina generisane toplote u sistemu ($Q_{\text{ukupno,sim}}$) za dati sastav RNG-a. U Tabeli 18 prikazane su vrednosti simuliranih ukupnih toplotnih energija za svaki sastav gasa od 36,65 MJ za svaku električnu snagu kogeneratora (od 650 do 900 kW_e). Iz Tabele 19 može se uočiti da je za istu toplotnu moć (36,65 MJ) i istu električnu snagu (počevši od 650 kW_e) ukupna generisana toplota različita. Za električnu snagu od 650 kW_e razlika između najveće i najmanje vrednosti ukupne generisane toplote iznosi 3,69 kW_t, dok za najveću električnu snagu od 900 kW_e razlika između najveće i najmanje vrednosti ukupne generisane toplote iznosi 4,58 kW_t. Za 650 kW_e najveća količina ukupne generisane toplote od 787,73 kW_t dobijena je sastavom 1. Najmanja vrednost ukupne generisane toplotne energije od 784,04 kW_t za 650 kW_e dobijena je sastavom 2. Veći udeo etana i propana u sastavu prirodnih gasova dovodi do ranog sagorevanja [116], što je pokazalo negativan uticaj na generisanu količinu toplote. Komponente etana i propana u sastavu 1 i 4 imaju najmanju vrednost udela od 0,098% i 0,054%, dok u sastavima 2 i 3 (na osnovu kojih se generisala najniža vrednost toplotne energije) udeo iznosio 0,15%.

Tabela 19. Različite generisane toplotne energije za istu toplotnu moć od 36 MJ i različite električne snage

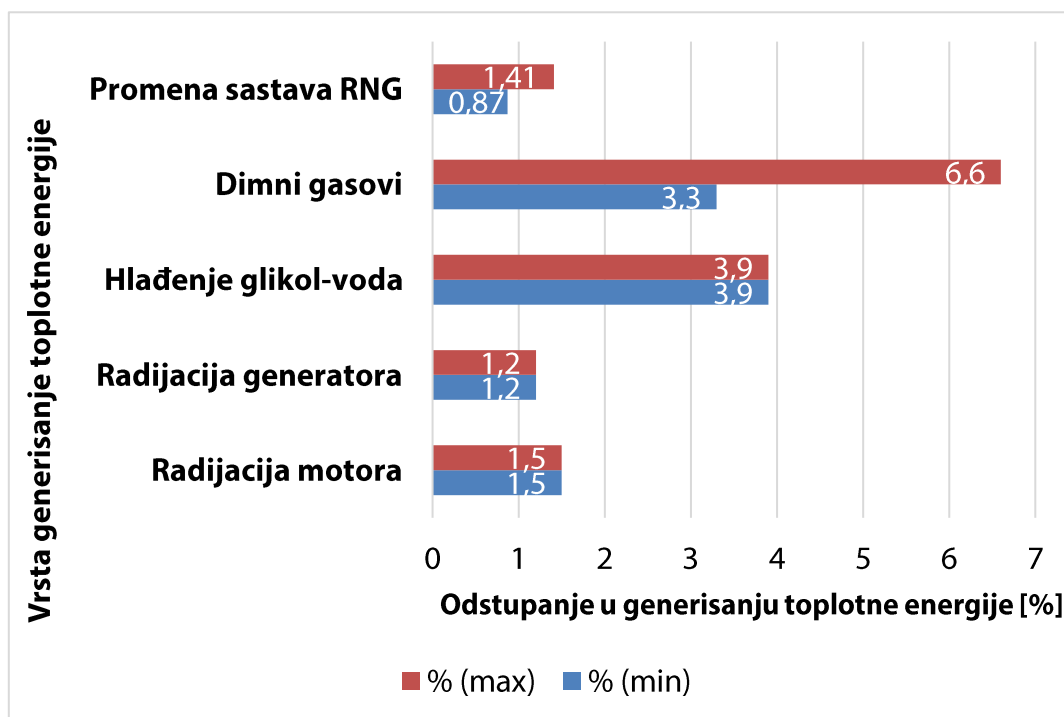
Sastav	650 kW	700 kW	750 kW	800 kW	850 kW	900 kW
Q _u [kW _t] 1	787.73	820.73	880.35	969.04	949.49	1049.20
Q _u [kW _t] 2	784.04	816.85	876.26	964.83	945.06	1044.62
Q _u [kW _t] 3	784.39	817.22	876.64	965.24	945.48	1045.24
Q _u [kW _t] 4	787.00	819.96	879.53	968.21	948.61	1048.30
Q _u [kW _t] 5	785.55	818.44	877.92	966.56	946.87	1046.50

Vrednosti ukupnih generisanih toplota za DTM od 42 MJ podeljene su sa minimalnim, maksimalnim i srednjim vrednostima dobijenih ukupnih toplotnih energija za DTM od 36,65 MJ čime je izračunato mogući uticaj sastava i DTM RNG-a na generisanje toplote, što je predstavljeno u Tabeli 21. Odstupanje MIN,% odnosi se na najniže vrednosti dobijene toplotne energije za DTM od 36,65 MJ, dok se MAX,% odnosi na najviše vrednosti ukupne toplotne energije dobijene za istu toplotnu moć.

Tabela 20. Najveće i najmanje razlike u generisanim toplotnim energijama za istu toplotnu moć od 36 MJ

Odstupanje	650 kW _e	700 kW _e	750 kW _e	800 kW _e	850 kW _e	900 kW _e
MIN, %	1,41	1,42	1,40	1,31	1,40	1,31
MAX, %	0,95	0,95	0,93	0,87	0,93	0,88
Srednje, %	1,20	1,20	1,18	1,11	1,18	1,11

Na osnovu prikazane Tabele 20 može se uočiti da je uticaj različitog sastava RNG-a na generisanu toplotnu energiju u rasponu od 0,87% do 1,41%. Svi prethodno navedeni uticaji na generisanje toplotne energije u kogeneratorskom sistemu predstavljeni su na Slici 34 gde se mogu uočiti najmanje i najveće vrednosti za određeni uzrok odstupanja u proizvodnji toplotne energije.

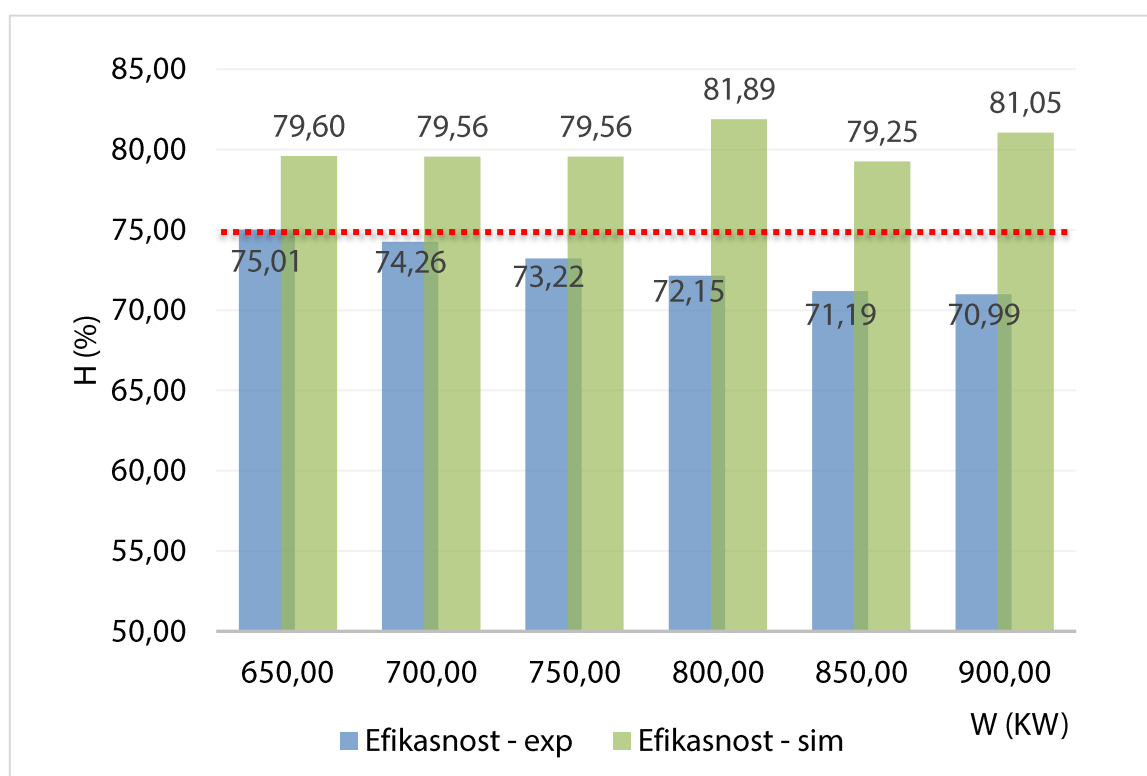


Slika 34. Moguća odstupanja generisane toplotne energije u zavisnosti od gubitaka

Kada se saberu svi uticaji na generisanje toplotne energije, dobija se najmanja vrednost od 10,77%, dok je najveća moguća dobijena vrednost 14,61%. Kada se ovi gubici uporede s Tabelom 19 može se uočiti da se vrednosti najmanje razlike u generisanim toplotama (10,8%) poklapaju s najmanjim vrednostima toplotnih gubitaka. Najveće odstupanje od 22,9% stvara razliku u odnosu na najviše moguće toplotne gubitke (14,61%) od 8,29%. Ovim je utvrđeno da simulacija može da posluži kao stabilan model za proveru procesnih parametara, ali da se porastom električne energije stvara određeno odstupanje koje može imati značajan uticaj na rezultate simulacija. U sledećem poglavlju izvršena je analiza energetske efikasnosti sistema.

4.8. Analiza energetske efikasnosti sistema

Po zakonskoj regulativi Republike Srbije, da bi se ispunio uslov za dobijanje i održavanje statusa povlašćenog proizvođača električne energije potrebno je dostići ukupnu prosečnu godišnju efikasnost iznad 75% [4]. Prilikom vršenja eksperimenata na naftnom polju, sistem je bio podešen na 650 kW_e električne snage i tom prilikom sistem je isporučivao 709 kW_t toplotne energije čime je postignuta željena efikasnost od 75%.



Slika 35. Analiza energetske efikasnosti prikazana kroz „feed-in“ tarifu

Međutim kako je analiza odmicala i kako su se podešavane električne snage uvećavale za po 50 kW_e, tako je ukupna efikasnost počela da opada do 70,99% za najveću električnu snagu od 950 kW_e, što se može videti iz Slike 35.

Opadanje energetske efikasnosti direktno je vezano za varijaciju toplotne energije u sistemu. Na stepen efikasnosti utiču i potrošnja RNG-a i njegova donja toplotna moć. Ukoliko se u motor uvede RNG različitog sastava, dolazi do promene protoka kako bi se u sistemu održala ravnoteža u cilju proizvodnje zadate količine električne energije, što dovodi do promene potrošnje RNG-a, čime se menja stepen efikasnosti. Takođe, ukoliko su potrebe potrošača za toplotnom energijom manje nego što je proizvedeno u kogeneratoru, ta razlika

energije se vraća u sistem nepotrošena, što utiče na ukupan stepen efikasnosti. Tokom merenja operativnih parametara potražnja za toplotnom energijom bila tolika da se sva proizvedena količina isporučivala ka naftnom polju, te se može smatrati da opadanje stepena efikasnosti u eksperimentalnim uslovima uzrokovano promenom sastava RNG-a. S obzirom da je stepen efikasnosti počeo da opada, može se zaključiti da je DTM opadala i da je iz tog razloga bilo potrebno sagoreti veće količine RNG-a da bi se zadovoljila proizvodnja električne energije. U simuliranim podacima za svaku električnu snagu stepen efikasnosti bio je iznad 75% i može se pratiti trend ravnog stepena efikasnosti osim za električne snage 800 i 900 kW_e gde se pojavljuje odstupanje za 2%, ali i dalje sistem u ASPEN-u nije pokazao opadanje ispod 75%. Prilikom pokretanja simulacije, zadati protoci, sastav RNG-a, kao i potrebna električna energija ostaju nepromenjivi, pa se iz tog razloga stepen efikasnosti nije menjao, ali više vrednosti mogu se pripisati neuračunatim gubicima koji su prikazani u poglavlju *Analiza dobijenih vrednosti toplotne energije*.

4.9. Ograničenja i nesigurnosti

Postoje brojna tehnička, ekonomska i hemijska ograničenja u vezi sa korišćenjem RNG-a. Jedan od najčešćih hemijskih problema korišćenja RNG-a je visok sadržaj H₂S u hemijskom sastavu RNG-a, što ga čini kiselim. Problem korišćenja kiselih gasova se ne može rešiti bez razvoja ekonomski izvodljivih i ekološki prihvatljivih procesa desulfurizacije [56].

Odnos zapremine RNG-a i količine dobijene nafte se naziva koeficijent gas-nafta. Ovo otvara još jedan problem u praćenju proizvodnje i distribucije RNG-a, pošto mnoga naftna polja nisu opremljena ovakvim i sličnim uređajima za merenje gasa.

Osim toga, rastvoreni naftni gas sadrži ugljovodonike C₁-C₈ u različitim udelima. Do kvarova na motorima često dolazi već pri manjim količinama nečistoća u ugljovodicima u RNG-u (1-2 vol%), što skraćuje radni vek motora. Prisustvo ugljovodonika C₅+ sa niskim oktanskim brojem u RNG-u na naftnim poljima ometa njegovu direktnu primenu za klipne motore na gasni pogon, usmeravanje RNG-a do postrojenja za njegovu preradu pre korišćenja, što čini kombinovana postrojenja za proizvodnju toplotne i električne energije ekonomski povoljnom investicijom [11].

Na kvalitet simulacije u ASPEN-u može veoma uticati odabir termodinamičkog modela, s obzirom da Peng-Robinson model bolje opisuje tečne faze, a NRTL bolje opisuje sisteme

gasnih faza. U kogeneratorskom sistemu postoje dve odvojene faze koje međusobno razmenjuju toplotu, a to su gasna linija RNG-izduvni gas i druga tečna linija grejnog medijuma glikol-voda.

Promene u sastavu RNG-a tokom vremena mogu ugroziti ukupan stepen efikasnosti jer smanjenjem DTM dolazi do veće potrošnje RNG-a čime se obara efikasnosti sistema.

Na naftnom polju može doći do smanjene potrebe za toplotnom energijom (najčešće u letnjim periodima ili kada se vrši remont rezervoara za otpremu sirove nafte), pa se tada sistem podešava da radi u „*heat tracking*“ režimu kako bi stepen efikasnosti bio iznad 75% [104]. Time se obara količina električne energije koja se proizvodi i predaje u elektrodistributivnu mrežu.

Ukoliko na naftnom polju ne postoji realna potreba za preuzimanjem ukupne proizvedene toplotne energije, ta energija se vraća u sistem, čime se obara ukupna efikasnost, što negativno utiče na *feed-in* tarifu. Postoje metode pomoću kojih se rad motora podešava u odnosu na toplotne potrebe polja (*heat tracking mode*).

Postoje procesni parametri koji se ne mogu meriti iz tehničkih razloga, kao što su mesta izuzetno visoke temperature ili pritiska. Takvi parametri se mogu proceniti ASPEN simulacijom i na osnovu njih se može izvršiti optimizacija procesa. Međutim, ukoliko je i najmanji deo opreme zaprljan slojem oksida, gareži ili ulja, dolazi do znatnih odstupanja u prenosu toplote od predviđenih proračuna.

5. Zaključak

Rastvoreni naftni gas (RNG) predstavlja otpadni tok prilikom eksploatacije sirove nafte na naftnim poljima. Dugo godina RNG se spaljivao na bakljama što je imalo ekonomsku, ali ne i ekološku opravdanost. Poslednjih godina RNG je počeo da se koristi kao gorivo u kombinovanim pogonima za proizvodnju toplotne i električne energije – kogeneracije. Na taj način neželjni otpadni tok može se prevesti u korisne vidove energije. Kako bi analizirali ekološke i energetske parametre iskorišćenja RNG-a u kogenerativnim postrojenjima, izvršen je proračun za tri scenarija iskorišćenja RNG-a korišćenjem programskog paketa SimaPro i razvijen je detaljni model simulacije kogenerativnog postrojenja u ASPEN Plus 8.0, nakon čega se došlo do sledećih zaključaka:

- Gasovi koji izazivaju efekat staklene bašte koji se ispuštaju spaljivanjem rastvorenog gasa na baklji doprinose globalnom zagrevanju sa prosečnim uticajem od $2,98 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{Sm}^{-3}$ ($2,5\text{-}3,6 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{Sm}^{-3}$).
- Upoređujući tri potencijalne mogućnosti korišćenja rastvorenog naftnog gasa kroz ekološke tokove i rezultate procene uticaja može se zaključiti da korišćenje rastvorenog gasa u kombinovanim postrojenjima za proizvodnju toplotne i električne energije i kotlovima za zagrevanje može da obezbedi značajno smanjenje emisije CO_2 zamenom marginalne proizvodnje toplotne i električne energije. Potencijal globalnog zagrevanja se smanjuje za 265% prilikom sagorevanja RNG-a u kogenerativnim postrojenjima i 118% korišćenjem RNG-a u kotlovima za zagrevanje, u odnosu na potencijal globalnog zagrevanja prilikom spaljivanja rastvorenog naftnog gasa na bakljama.
- Potrebe za kumulativnom fosilnom energijom u scenarijima sagorevanja RNG-a u kogenerativnim postrojenjima i kotlovima za zagrevanje iznosile su $-48,7$ i $-2,1 \text{ MJ}\cdot\text{Sm}^{-3}$. Negativne vrednosti ukazuju da su izbegnuti uticaji zamenjenih procesa (npr. električne i/ili toplotne energije) veći od uticaja koji se povezuju sa sagorevanjem rastvorenog naftnog gasa u kombinovanim postrojenjima ili kotlovima za zagrevanje.
- Scenario primene kombinovanih postrojenja za proizvodnju toplotne i električne energije ima svojih prednosti u odnosu na kotlove za zagrevanje, ne samo zbog

povoljnih rezultata LCA, već i njihove manje osetljivosti na kapacitet toplotne realizacije i nepostojanje ograničenja za korišćenje električne energije.

- Rezultat analize osetljivosti je pokazao da izbor marginalnog električnog provajdera ima značajan uticaj na rezultate scenarija sa kombinovanim postrojenjima, međutim, taj izbor neće promeniti opšti zaključak da je korišćenje RNG-a u ovim postrojenjima od veće koristi nego spaljivanje. Ali i pored toga, postoje razna tehnička, ekonomska i hemijska ograničenja u vezi sa primenom RNG-a.
- Na osnovu izvršene analize ASPEN simulacije kogenerativnog postrojenja na naftnom polju izračunato je da uticaj hemijskog sastava RNG-a na generisanu toplotnu energiju iznosi od 0,87% do 1,41%, dok je ukupni uticaj hemijskog sastava RNG-a na ukupno generisanu toplotnu energiju u rasponu od 10,77% do 14,61%.
- Postavljanjem sabirnog rezervoara za RNG na naftnom polju može se pozitivno uticati na promenu hemijskog sastava tako što bi se pre uvođenja u motor RNG ujednačio po sastavu i kao takav usmeravao na sagorevanje. To bi doprinelo pouzdanosti proračuna sagorevanja i lakšoj manipulaciji čitavog postrojenja, bez nepredviđenih neželjenih posledica.
- Nanošenjem sloja izolacione presvlake od 0,5 mm debljine na klipove, glave cilindra i ventile, gubici toplote u prenosu na rashladni medijum mogu se smanjiti za 23, 34 i 46% za visoka, srednja i niska opterećenja, redom. U slučaju bez izolacionog sloja gubici toplote u prenosu toplote na rashladni medijum iznose 27,36 i 49% [117].

6. Literatura

- [1] S. Selvakumaran, B. Limmeechokchai, T. Masui, and T. Hanaoka, "Low carbon society scenario 2050 in Thai industrial sector," *Energy Convers. Manag.*, vol. 85, pp. 663–674, 2014.
- [2] J. Song, W. Yang, and Y. Higano, "Introducing renewable energy and industrial restructuring to reduce GHG emission : Application of a dynamic simulation model," *Energy Convers. Manag.*, vol. 96, pp. 625–636, 2015.
- [3] EDUCOGEN, "The European Education Tool on Energy-Efficiency through the Use of Cogeneration," 2002.
- [4] NREAP, "REPUBLIC OF SERBIA Ministry of Energy, Development and Environmental Protection NATIONAL RENEWABLE ENERGY ACTION PLAN OF THE REPUBLIC OF SERBIA," 2013.
- [5] A. Ong'iro, V. Ismet Ugursal, A. M. Al Taweel, and G. Lajeunesse, "Thermodynamic simulation and evaluation of a steam CHP plant using ASPEN plus," *Applied Thermal Engineering*, vol. 16, no. 3. pp. 263–271, 1996.
- [6] L. Zheng and E. Furimsky, "ASPEN simulation of cogeneration plants," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 11. pp. 1845–1851, 2003.
- [7] T. Damartzis, S. Michailos, and A. Zabaniotou, "Energetic assessment of a combined heat and power integrated biomass gasification – internal combustion engine system by using Aspen Plus[®]," *Fuel Process. Technol.*, vol. 95, pp. 37–44, 2012.
- [8] O. S. Ismail and G. E. Umukoro, "Modelling combustion reactions for gas flaring and its resulting emissions," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 28, no. 2, pp. 130–140, 2014.
- [9] D. Borello *et al.*, "Thermo-Economic Assessment of a olive pomace Gasifier for Cogeneration Applications," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 252–258, 2015.
- [10] A. Caf, D. Urbancl, P. Trop, and D. Goricanec, "Exploitation of low-temperature energy sources from cogeneration gas engines," *Energy*, vol. 108, pp. 86–92, 2016.
- [11] P. Patrizio, S. Leduc, D. Chinese, and F. Kraxner, "Internalizing the external costs of

- biogas supply chains in the Italian energy sector," *Energy*, vol. 125, pp. 85–96, 2017.
- [12] M. M. Zyryanova, P. V. Snytnikov, Y. I. Amosov, V. D. Belyaev, and V. V. Kireenkov, "Upgrading of associated petroleum gas into methane-rich gas for power plant feeding applications. Technological and economic benefits," *Fuel*, vol. 108, pp. 282–291, 2013.
- [13] C. T. Chang, M. Costa, M. La Villetta, A. Macaluso, D. Piazzullo, and L. Vanoli, "Thermo-economic analyses of a Taiwanese combined CHP system fuelled with syngas from rice husk gasification," *Energy*, vol. 167, pp. 766–780, 2019.
- [14] P. S. Nigam, "Production of liquid biofuels from renewable resources," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 52–68, 2011.
- [15] EUROSTAT, "Energy statistics - an overview," 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview&oldid=401563.
- [16] IEA, "World Energy Balances 2019," Paris.
- [17] M. Klein, *The Power Makers: Steam, Electricity and the Men Who Invented Modern America*. New York: Bloomsbury press, 2009.
- [18] D. Flin, *Cogeneration, A user's guide*. London: Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [19] A. Chmielewski and R. Gumi, "Aspects of balanced development of RES and distributed micro-cogeneration use in Poland: Case study of a m CHP with Stirling engine," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 930–952, 2016.
- [20] S. Luthra, S. Kumar, D. Garg, and A. Haleem, "Barriers to renewable / sustainable energy technologies adoption: Indian perspective," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 762–776, 2015.
- [21] IRENA, "RENEWABLE ENERGY: A KEY CLIMATE SOLUTION," 2017.
- [22] M. A. M. Ramli and S. Twaha, "Analysis of renewable energy feed-in tariffs in selected regions of the globe: Lessons for Saudi Arabia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45,

- pp. 649–661, 2015.
- [23] WEC, "World Energy Scenarios 2019," London, 2019.
- [24] P. Kundur, *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [25] J. L. Sawin, "Renewable energy policies, Global Status Report 2014," New York, 2014.
- [26] M. H. Johnatan, *Ekonomija životne sredina i prirodnih resursa, savremeni pristup*. Univerzitet Tuft, 2009.
- [27] M. Holland, "Revealing the costs of air pollution from industrial facilities in Europe," 2011.
- [28] X. Lemaire, "Glossary of Terms in Sustainable Energy Regulation," 2004.
- [29] E. Specht, T. Redemann, and N. Lorenz, "International Journal of Thermal Sciences Simplified mathematical model for calculating global warming through anthropogenic CO₂," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 102, pp. 1–8, 2016.
- [30] M. Haque, G. Won, P. Joo, and S. Yoon, "Field Crops Research Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping," *F. Crop. Res.*, vol. 193, no. 2016, pp. 133–142, 2020.
- [31] A. S. L. Gouveia, L. C. Tomé, and I. M. Marrucho, "Towards the potential of cyano and amino acid-based ionic liquid mixtures for facilitated CO₂ transport membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 510, pp. 174–181, 2016.
- [32] J. V. Spadaro and A. Rabl, "EXTERNAL COSTS OF ENERGY : APPLICATION OF THE EXTERNE METHODOLOGY IN FRANCE Final Report for Contract JOS3-CT95-0010," no. January, 1998.
- [33] M. Maibach, "Handbook on estimation of external cost in the transport sector," 2007.
- [34] IEA, "Market Report Series energy efficiency 2018," Paris.
- [35] R. P. Cote, "Designing eco-industrial parks : a synthesis of some experiences," *J. Clean. Prod.*, vol. 6, pp. 181–188, 1998.

- [36] A. Ernsest, *Eco-Industrial Park Handbook for Asian Developing Nations*. Oakland, CA: Environment Department, Indigo Development, 2001.
- [37] A. M. El-Melih, "Experimental examination of syngas recovery from acid gases," *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 64–68, 2016.
- [38] K. Jayaraman and I. Gokalp, "Gasification characteristics of petcoke and coal blended petcoke using thermogravimetry and mass spectrometry analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 80, pp. 10–19, 2015.
- [39] G. Oluleye, M. Jobson, R. Smith, and S. J. Perry, "Evaluating the potential of process sites for waste heat recovery," *Appl. Energy*, vol. 161, pp. 627–646, 2016.
- [40] J. Song, Y. Li, C. Gu, and L. Zhang, "Thermodynamic analysis and performance optimization of an ORC (Organic Rankine Cycle) system for multi-strand waste heat sources in petroleum re fi ning industry," *Energy*, vol. 71, pp. 673–680, 2014.
- [41] V. Ganesan, *Internal Combustion Engines (Fourth Edition)*. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd, 2013.
- [42] T. Watanabe, "International Oil & Gas Conference and Exhibition in China," in *Gas to Wire System (GTW) for Developing " Small Gas Field" and Exploiting " Associated Gas*, 2006, p. 6.
- [43] M. Basha, S. M. Shaahid, and L. Al-hadhrami, "Energy Procedia Impact of Fuels on Performance and Efficiency of Gas Turbine Power Plants," vol. 14, pp. 558–565, 2011.
- [44] N. Eliaz, "Hot corrosion in gas turbine components," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 9, pp. 31–43, 2000.
- [45] C. Samaras, "An Emissions Model for NO_x and CO Emission Trend from Industrial Gas Turbines," *Int. Gas Turbine Congr.*, vol. IGTC11, 2011.
- [46] J. O. Jaber, S. D. Probert, and P. T. Williams, "Gaseous fuels (derived from oil shale) for heavy-duty gas turbines and combined-cycle power generators," vol. 60, pp. 1–20, 1998.
- [47] P. Walsh, *Gas Turbine Performance*. Oxford: Blackwell Publishing Company, 2004.

- [48] O. Florisson, "Rapid determination of the Wobbe index of natural gas Rapid determination of the Wobbe index of natural gas," *J. Phys. E.*, vol. 22, pp. 436–439, 1989.
- [49] S. P. Roy, "Predicting Wobbe Index and methane number of a renewable natural gas by the measurement of simple physical properties," *Fuel*, vol. 224, no. December 2017, pp. 121–127, 2018.
- [50] S. Van Erdeweghe, J. Van Bael, B. Laenen, and D. William, "Optimal configuration for a low-temperature geothermal CHP plant based on thermoeconomic optimization," *Energy*, vol. 179, pp. 323–335, 2019.
- [51] H. Tonje, "Associated Petroleum Gas in Russia, reasons for non-utilization," Lysaker, Norway, 2010.
- [52] B. E. D. Attanasi, P. A. Freeman, S. Jewell, and U. S. G. Survey, "Role of Stranded Gas in Increasing Global Gas Supplies," Virginia, US, 2013.
- [53] P. Pujihatma, S. Pramono, and T. Agung, "Journal of Natural Gas Science and Engineering Combined heat and power – multi-objective optimization with an associated petroleum and wet gas utilization constraint," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 54, no. July 2017, pp. 25–36, 2018.
- [54] PFC, "Using Russia's Associated Gas Prepared for the Global Gas Flaring Reduction Partnership and the World Bank," 2007.
- [55] J. Deyette, "The Natural Gas Gamble," 2015.
- [56] J. Gudmundsson, "Hydrate nonpipeline technology," in *4th International Conference on Gas Hydrates*, 2002, pp. 19–23.
- [57] C. Seungyong, "Comparing exploitation and transportation technologies for monetisation of offshore stranded gas," in *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, 2001.
- [58] N. Eliaz, G. Shemesh, and R. M. Latanision, "Hot corrosion in gas turbine components," vol. 9, pp. 31–43, 2002.

- [59] R. W. Baker and K. Lokhandwala, "Natural Gas Processing with Membranes : An Overview," pp. 2109–2121, 2008.
- [60] J. M. Blanco and F. Pen, "Increase in the boiler ' s performance in terms of the acid dew point temperature : Environmental advantages of replacing fuels," vol. 28, pp. 777–784, 2008.
- [61] A. G. Okkes, "Get acid dew point of flue gas," *Hydrocarb. Process. Process.*, vol. 66, no. 7, pp. 53–55, 1987.
- [62] F. D. Rossini, "The heats of combustion of methane and carbon monoxide," *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 6, pp. 37–49, 1931.
- [63] M. Gulič, *Steam Boilers*. Belgrade, Serbia: Mechanical Engineering Department at University of Belgrade, 1986.
- [64] A. Korppoo, "Russian associated petroleum gas flaring limits : Interplay of formal and informal institutions," vol. 116, no. May 2012, pp. 232–241, 2018.
- [65] NIS, "Gas Overview 2014," Novi Sad, Serbia, 2014.
- [66] TOC, "Reducing the Flaring of Associated Gas, Total Oil Company," 2011. [Online]. Available: <http://www.total.com/en/our-challenges/preserving-theenvironment/%0Acombating-climate-change/reducing-the-flaring-of-associated-gas-%0A201005.html>.
- [67] G. Myhre, "Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge, UK, 2013.
- [68] J. S. P. Loe and O. Ladehaug, "Reducing gas flaring in Russia : Gloomy outlook in times of economic insecurity," *Energy Policy*, vol. 50, pp. 507–517, 2012.
- [69] A. Aycaguer, M. Lev-on, and A. M. Winer, "Reducing Carbon Dioxide Emissions with Enhanced Oil Recovery Projects : A Life Cycle Assessment Approach," no. 5, pp. 303–308, 2001.
- [70] K. Zhu, J. Xia, X. Xie, and Y. Jiang, "Total heat recovery of gas boiler by absorption

- heat pump and direct- contact heat exchanger," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 71, no. 1, pp. 213–218, 2014.
- [71] J. Lizarraga, "Cogeneration with gas turbines for dryers and hot water boilers," *Heat Recover. Syst. CHP*, vol. 15, no. 3, pp. 319–325, 1995.
- [72] F. J. G. Ortiz, "Modeling of fire-tube boilers," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 16, pp. 3463–3478, 2011.
- [73] C. Krishnanunni, S., Josephkunju Paul, "Evaluation of Heat Losses in Fire Tube Boiler," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 2, no. 12, 2012.
- [74] GCC, "Cogeneration / Combined Heat and Power (CHP)," 2011.
- [75] M. Shnaiderman and N. Keren, "Cogeneration versus natural gas steam boiler : A techno-economic model," *Appl. Energy*, vol. 131, pp. 128–138, 2014.
- [76] I. D. A and M. A. Rosen, "Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development," vol. 9, pp. 169–189, 2005.
- [77] E. B. Milton, *Thermodynamics, Combustion and Engines*. Chapman & Hall, 1995.
- [78] G. F. C. Saravanamuttoo, H. I. H., Rogers, *Gas turbine theory*. Prentice Hall, 2001.
- [79] A. Rosato and S. Sibilio, "Energy performance of a micro-cogeneration device during transient and steady-state operation : Experiments and simulations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 52, no. 2, pp. 478–491, 2013.
- [80] A. Martens, "The energetic feasibility of CHP compared to the separate production of heat and power," vol. 18, 1998.
- [81] Torleif Haugland, "Associated Petroleum Gas Flaring Study for Russia, Kazakhstan, Turkmenistan and Azerbaijan," 2013.
- [82] D. R. Bott, "Flaring Questions+Answers," Toronto, Canada, 2007.
- [83] U. R. Warnatz, J., Maas, U., Dibble, *Combustion (Vol. 3)*. Berlin, Germany: Springer, 2001.
- [84] S. Galera and F. J. G. Ortiz, "Life cycle assessment of hydrogen and power production

- by supercritical water reforming of glycerol," *Energy Convers. Manag.*, vol. 96, pp. 637–645, 2015.
- [85] R. Weidema, B.P. Ekvall, T. Heijungs, "Guidelines for applications of deepened and broadened LCA. CALCAS project (Work package 5), Deliverable D18," no. 37075, 2009.
- [86] T. Wolf, M.A. Ekvall, "Life Cycle Inventory (LCI) Modelling and Attributional/Consequential Issues," *SETAC Globe*, vol. 12, no. 10, p. 2, 2011.
- [87] EC, *ILCD Handbook - General guide for Life Cycle Assessment, detailed guidance*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010.
- [88] C. Strazza, A. Del, P. Costamagna, M. Gallo, E. Brignole, and P. Girdinio, "Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 100, pp. 64–77, 2015.
- [89] R. Dones *et al.*, "Life Cycle Inventories of Energy Systems : Results for Current Systems in Switzerland and other UCTE Countries," no. 5, 2007.
- [90] R. Heijungs and J. B. Guine, "Allocation and ' what-if ' scenarios in life cycle assessment of waste management systems," vol. 27, pp. 997–1005, 2007.
- [91] B. Ekvall, T. Weidema, "System Boundaries and Input Data in Consequential Life Cycle Inventory Analysis," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 9, no. 3, pp. 161–171, 2004.
- [92] T. L. T. Nguyen and J. E. Hermansen, "System expansion for handling co-products in LCA of sugar cane bio-energy systems : GHG consequences of using molasses for ethanol production," *Appl. Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 254–261, 2012.
- [93] Electrical Power Industry of Serbia, "Technical report on electricity for 2013," Belgrade, Serbia, 2014.
- [94] T. H. Christensen, *Solid waste technology & management (Vol. 2)*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley., 2011.
- [95] B. Weidema, "Market information in life cycle assessment," 2003.

- [96] T. Fruergaard, T. Astrup, and T. Ekvall, "Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions," no. March, pp. 724–737, 2009.
- [97] G. Weidema, B.P.; Bauer, Ch.; Hischer, R.; Mutel, Ch.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, "Overview and methodology, Data quality guideline for the ecoinvent database version 3," *The ecoinvent database*, 2013.
- [98] S. Solomon, *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [99] R. Frischknecht *et al.*, "Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods," no. 3, 2007.
- [100] C. Somers, A. Mortazavi, Y. Hwang, R. Radermacher, P. Rodgers, and S. Al-hashimi, "Modeling water / lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4197–4205, 2011.
- [101] P. A. Pilavachi, "Power generation with gas turbine systems and combined heat and power," vol. 20, pp. 1421–1429, 2000.
- [102] J. Keirstead, N. Samsatli, N. Shah, and C. Weber, "The impact of CHP (combined heat and power) planning restrictions on the efficiency of urban energy systems," *Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 93–103, 2012.
- [103] C. S. Reddy and L. Graves, "INTERNATIONAL ^ Low Heat Rejection Engine Research Status : Where Do We Go from Here ?," 1990.
- [104] M. Bianchi, A. De Pascale, and P. Ruggero, "Guidelines for residential micro-CHP systems design," *Appl. Energy*, vol. 97, pp. 673–685, 2012.
- [105] O. Parkes, P. Lettieri, and I. D. L. Bogle, "Life cycle assessment of integrated waste management systems for alternative legacy scenarios of the London Olympic Park," *Waste Manag.*, vol. 40, pp. 157–166, 2015.
- [106] F. Kiss and Z. Zavargo, "Renewable energy policy in the Republic of Serbia," vol. 15, pp. 752–758, 2011.

- [107] WRI, "Climate Analysis Indicators Tool: WRI's Climate Data Explorer: Serbia GHG Emissions, Washington, DC: World Resources Institute.," 2014.
- [108] H. Lund, B. V. Mathiesen, and P. Christensen, "Energy system analysis of marginal electricity supply in consequential LCA," pp. 260–271, 2010.
- [109] A. E. Savinov, "Utilization of Associated Petroleum Gas in Russia," in *Utilization of Associated Petroleum Gas in Russia*, 2007.
- [110] O. Braginski and S. Chernavskii, "Utilization of associated petroleum gas: Economic issues," *Russ. J. Gen. Chem.*, vol. 81, no. 12, pp. 2542–2546, 2011.
- [111] H. Trimble and W. Potts, "Glycol-Water Mixtures, Vapor Pressure-boiling Point-composition Relations," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 27, no. 1, pp. 66–68, 1935.
- [112] M. M. Bailey, *Comparative evaluation of three alternative power cycles for waste heat recovery from the exhaust of adiabatic diesel engines*. 1985.
- [113] M. M. J. B. Lb, "Only for reference Fuel gas data : Genset :," p. 578204, 2012.
- [114] M. M. El-Wakil, *Powerplant technology*. Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd, 1985.
- [115] F. Casazza, J., Casazza J., Delea, "Understanding electric power systems: an overview of the technology and the marketplace," *John Wiley Sons*, vol. 13, 2003.
- [116] D. Flowers, S. Aceves, C. K. Westbrook, and J. R. Smith, "Detailed Chemical Kinetic Simulation of Natural Gas HCCI Combustion: Gas Composition Effects and Investigation of Control Strategies," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 123, no. x, pp. 433–439, 2001.
- [117] I. Taymaz, "An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine," vol. 31, pp. 364–371, 2006.

Plan tretmana podataka

Naziv projekta/istraživanja
Eko-energetska analiza i simulacija kogenerativnih postrojenja na naftnim poljima
Naziv institucije/institucija u okviru kojih se sprovodi istraživanje
a) Tehnološki fakultet Novi Sad, Univerzitet u Novom Sadu b) Naftna industrija Srbije, Novi Sad, Srbija
Naziv programa u okviru kog se realizuje istraživanje
Doktorske studije
1. Opis podataka
<p>1.1 Vrsta studije</p> <p><i>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</i></p> <p>_____Doktorska disertacija_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>1.2 Vrste podataka</p> <p>a) <u>kvantitativni</u></p> <p>b) <u>kvalitativni</u></p> <p>1.3. Način prikupljanja podataka</p> <p>a) ankete, upitnici, testovi</p> <p>b) kliničke procene, medicinski zapisi, elektronski zdravstveni zapisi</p> <p>c) genotipovi: navesti vrstu _____</p> <p>d) administrativni podaci: navesti vrstu _____</p> <p>e) uzorci tkiva: navesti vrstu _____</p> <p>f) snimci, fotografije: navesti vrstu – <u>fotografije iz eksperimentalnog rada</u></p> <p>g) tekst, navesti vrstu – <u>literatra</u></p> <p>h) mapa, navesti vrstu _____</p> <p>i) ostalo: opisati – <u>eksperimentalni podaci</u></p> <p>1.3 Format podataka, upotrebljene skale, količina podataka</p> <p>1.3.1 Upotrebljeni softver i format datoteke:</p> <p>a) Excel fajl, datoteka _____</p> <p>b) SPSS fajl, datoteka _____</p> <p>c) PDF fajl, datoteka _____</p> <p>d) Tekst fajl, datoteka – <u>da</u></p> <p>e) JPG fajl, datoteka – <u>da</u></p> <p>f) Ostalo, datoteka – <u>da, emf</u></p> <p>1.3.2. Broj zapisa (kod kvantitativnih podataka)</p> <p>a) broj varijabli _____</p> <p>b) broj merenja (ispitanika, procena, snimaka i sl.) _____</p> <p>1.3.3. Ponovljena merenja</p> <p>a) da</p>

b) ne

Ukoliko je odgovor da, odgovoriti na sledeća pitanja:

- a) vremenski razmak između ponovljenih mera je _____
- b) varijable koje se više puta mere odnose se na _____
- c) nove verzije fajlova koji sadrže ponovljena merenja su imenovane kao _____

Napomene: _____

Da li formati i softver omogućavaju deljenje i dugoročnu validnost podataka?

a) Da

b) Ne

Ako je odgovor ne, obrazložiti _____

2. Prikupljanje podataka

2.1 Metodologija za prikupljanje/generisanje podataka

2.1.1. U okviru kog istraživačkog nacrta su podaci prikupljeni?

- a) eksperiment, navesti tip – testiranje zadatih parametara na industrijskom postrojenju
- b) korelaciono istraživanje, navesti tip _____
- c) analiza teksta, navesti tip – prikupljanje podataka iz literature
- d) ostalo, navesti šta _____

2.1.2 Navesti vrste mernih instrumenata ili standarde podataka specifičnih za određenu naučnu disciplinu (ako postoje).

Određivanje sadržaja H₂, He, O₂, N₂, CO₂ i ugljovodonika standardom SRPS EN ISO 6974-4:2008

Donja toplotna moć rastvorenog naftnog gasa određena je standardom SRPS B.H8.129:2012

2.2 Kvalitet podataka i standardi

2.2.1. Tretman nedostajućih podataka

- a) Da li matrica sadrži nedostajuće podatke? Da Ne

Ako je odgovor da, odgovoriti na sledeća pitanja:

- a) Koliki je broj nedostajućih podataka? _____
- b) Da li se korisniku matrice preporučuje zamena nedostajućih podataka? Da Ne
- c) Ako je odgovor da, navesti sugestije za tretman zamene nedostajućih podataka

2.2.2. Na koji način je kontrolisan kvalitet podataka? Opisati

Kvalitet podataka je kontrolisan primenom standardnih procedura već razvijenih u laboratorijama u kojima su vršena merenja.

2.2.3. Na koji način je izvršena kontrola unosa podataka u matricu?

Kontrola unosa podataka u matricu je izvedena poređenjem dobijenih podataka sa literaturnim, stvarnim i eksperimentalnim.

3. Tretman podataka i prateća dokumentacija

3.1. Tretman i čuvanje podataka

3.1.1. Podaci će biti deponovani u repozitorijum doktorskih disertacija na Univerzitetu u Novom Sadu.

3.1.2. URL adresa _____

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Da li će podaci biti u otvorenom pristupu?

a) Da

b) Da, ali posle embarga koji će trajati do _____

c) Ne

Ako je odgovor ne, navesti razlog _____

3.1.5. Podaci neće biti deponovani u repozitorijum, ali će biti čuvani.

Obrazloženje

3.2 Metapodaci i dokumentacija podataka

3.2.1. Koji standard za metapodatke će biti primenjen? _____

3.2.2. Navesti metapodatke na osnovu kojih su podaci deponovani u repozitorijum.

Ako je potrebno, navesti metode koje se koriste za preuzimanje podataka, analitičke i proceduralne informacije, njihovo kodiranje, detaljne opise varijabli, zapisa itd.

3.3 Strategija i standardi za čuvanje podataka

3.3.1. Do kog perioda će podaci biti čuvani u repozitorijumu? _____

3.3.2. Da li će podaci biti deponovani pod šifrom? Da Ne

3.3.3. Da li će šifra biti dostupna određenom krugu istraživača? Da Ne

3.3.4. Da li se podaci moraju ukloniti iz otvorenog pristupa posle izvesnog vremena?

Da Ne

Obrazložiti

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Ovaj odeljak MORA biti popunjen ako vaši podaci uključuju lične podatke koji se odnose na učesnike u istraživanju. Za druga istraživanja treba takođe razmotriti zaštitu i sigurnost podataka.

4.1 Formalni standardi za sigurnost informacija/podataka

Istraživači koji sprovode ispitivanja s ljudima moraju da se pridržavaju Zakona o zaštiti podataka o ličnosti (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) i odgovarajućeg institucionalnog kodeksa o akademskom integritetu.

4.1.2. Da li je istraživanje odobreno od strane etičke komisije? Da Ne

Ako je odgovor Da, navesti datum i naziv etičke komisije koja je odobrila istraživanje

4.1.2. Da li podaci uključuju lične podatke učesnika u istraživanju? Da Ne

Ako je odgovor da, navedite na koji način ste osigurali poverljivost i sigurnost informacija vezanih za ispitanike:

- a) Podaci nisu u otvorenom pristupu
 - b) Podaci su anonimizirani
 - c) Ostalo, navesti šta
-

5. Dostupnost podataka

5.1. Podaci će biti

- a) javno dostupni
- b) dostupni samo uskom krugu istraživača u određenoj naučnoj oblasti
- c) zatvoreni

Ako su podaci dostupni samo uskom krugu istraživača, navesti pod kojim uslovima mogu da ih koriste:

Ako su podaci dostupni samo uskom krugu istraživača, navesti na koji način mogu pristupiti podacima:

5.4. Navesti licencu pod kojom će prikupljeni podaci biti arhivirani.

Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade

6. Uloge i odgovornost

6.1. Navesti ime i prezime i mejl adresu vlasnika (autora) podataka

Vuk Rajović, rajovic89@gmail.com

6.2. Navesti ime i prezime i mejl adresu osobe koja održava matricu s podacima

Vuk Rajović, rajovic89@gmail.com

6.3. Navesti ime i prezime i mejl adresu osobe koja omogućuje pristup podacima drugim istraživačima

Vuk Rajović, rajovic89@gmail.com