

Simulacija potrošnje energije na naftnim postrojenjima

Gojković, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:975434>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftno rudarstvo

SIMULACIJA POTROŠNJE ENERGIJE NA NAFTNIM POSTROJENJIMA

Diplomski rad

Gojković, Vedran

N-273

Zagreb, 2018.

SIMULACIJA POTROŠNJE ENERGIJE NA NAFTNIM POSTROJENJIMA

VEDRAN GOJKOVIĆ

Rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno rudarstvo
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Ptrošnja energije na naftnim postrojenjima dio je problematike energetske pokazatelja postrojenja unutar naftne industrije. Problematika energetske pokazatelja određena je odnosom potražnje i dobave energije promatranog energetske sustava. Određivanje energetske pokazatelja odabranog energetske sustava provodi se energetske analizom. Odabrani energetski sustav je odobalno proizvodno naftno postrojenje. Cilj rada je izrada osnovnog teoretske modela odabranog energetske sustava. Energetske analizom utvrđena su svojstva i osnovni energetski pokazatelji promatranog sustava. Određivanjem masenih i energetske tokova modela dobiveni su odnosi potražnje i dobave energije odabranog energetske sustava. Teoretski model odobalnog proizvodnog naftnog postrojenja osnovni je reprezentativni pokazatelj dinamike masenih i energetske tokova realnih sustava.

Ključne riječi: nafta, energetika, model

Diplomski rad sadrži: 41 stranica, 9 tablica, 20 slika i 13 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF

Pomoć pri izradi: Mag. ing. Amalia Lekić, asistent RGNF

Ocjenjivači:

1. Dr. sc. Luka Perković, , docent RGNF
2. Dr. sc. Tomislav Kurevija, izvanredni profesor RGNF
3. Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF

Datum obrane: 28.09.2018., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

ENERGY CONSUMPTION SIMULATION FOR OIL PLANTS

VEDRAN GOJKOVIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Energy power consumption of oil plants is part of the issue of energy performance indicators within the oil industry. The issue of energy indicators is determined by the relationship between demand and the energy supply of the observed energy system. The determination of energy indicators of a particular energy system is carried out by energy analysis. The selected energy system is an offshore oil production plant. The aim of the thesis is to produce the basic theoretical model of the selected energy system. Energy analysis has determined the properties and basic energy indicators of the observed system. By determining the mass and energy flows of the model, the relationship between the demand and energy supply of the selected energy system was obtained. The theoretical model of an offshore oil production plant is the basic representative indicator of the dynamics of mass and energy flows for real systems.

Keywords: oil, energetics, model

Thesis contains: 41 pages, 9 table, 20 figures and 13 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Luka Perković, PhD

Technical support and assistance: Amalia Lekić, MSc.

Reviewers:

1. Assistant Professor Luka Perković, PhD
2. Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD
3. Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Date of defense: September 28, 2018, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

Sadržaj

Popis slika.....	I
Popis tablica.....	II
Popis simbola.....	III
1. UVOD	1
2. METODA.....	2
3. ANALIZA SLUČAJA.....	17
3.1 Postavke slučaja	17
3.2 Modeliranje maseno-energetskih bilanci sustava.....	23
3.3 Analiza rezultata.....	35
4. ZAKLJUČAK	39
5. LITERATURA.....	40

Popis slika

Slika 2-1. Prikaz algoritma postupka izrade rada	2
Slika 2-2. Prikaz algoritma postupka izračuna jednadžbe stanja za jednu točku sustava	4
Slika 2-3. Prikaz generaliziranog slučaja postupka izračuna promjene entalpije.....	10
Slika 2-4. Prikaz algoritma izračuna molarnih udjela separiranih faza	12
Slika 3-1. Prikaz granica sustava modela i raspored podsustava	17
Slika 3-2. Prikaz algoritma modeliranja izdvojene količine plinskog goriva.....	24
Slika 3-3. Prikaz energetske bilance podsustava kogeneracije.....	26
Slika 3-4. Prikaz energetske bilance podsustava separacije	27
Slika 3-5. Prikaz energetske bilance podsustava proizvodnog razdjelnika	28
Slika 3-6. Prikaz energetske bilance podsustava rekompresije i tretmana plina	28
Slika 3-7. Prikaz energetske bilance podsustava kompresije plina	29
Slika 3-8. Prikaz energetske bilance podsustava tretmana plinskog goriva	29
Slika 3-9. Prikaz energetske bilance podsustava pumpanja nafte	30
Slika 3-10. Prikaz sheme modelirane električne i toplinske energije.....	30
Slika 3-11. Prikaz masenih tokova modela sustava u jedinici vremena.....	32
Slika 3-12. Prikaz energetske tokova dobave energije u jedinici vremena.....	32
Slika 3-13. Prikaz energetske tokova u jedinici vremena	34
Slika 3-14. Prikaz ovisnosti dobave masenog protoka i potražnje energije	35
Slika 3-15. Prikaz potrošnje energije u jedinici vremena.....	37
Slika 3-16. Prikaz dobave energije u jedinici vremena	37

Popis tablica

Tablica 2-1. Kemijski sastav proizvodnog fluida i pripadajuća svojstva	3
Tablica 2-2. Koeficijenti izračuna toplinskog kapaciteta pri konstantnom volumenu	6
Tablica 3-1. Pretpostavljene vrijednosti tlaka i temperature razmatranih podsustava	18
Tablica 3-2. Molarni udjeli kemijskih komponenti separiranih faza.....	20
Tablica 3-3. Molarni udjeli plinovite faze prije i nakon tretmana čišćenja plina	21
Tablica 3-4. Maseni protoci svih podsustava modela	24
Tablica 3-5. Vrijednosti promjena entalpija svakog podsustava i cijelog modela	25
Tablica 3-6. Energetski tokovi dobave energije u jedinici vremena	31
Tablica 3-7. Dobivene snage energetskih tokova.....	33

Popis simbola

ω_i = acentrični faktor pojedine komponente [-]

H = entalpija [J/mol]

ΔH_f° = entalpija formacije kemijske reakcije [MJ/mol]

H^{ID} = entalpija pri idealnim uvjetima [J/mol]

Z = faktor kompresibilnosti [-]

ϕ_i = fugacitet pojedine faze [-]

$G(V)$ = funkcija pretpostavljenog udjela plinske faze u smjesi fluida prije separacije [-]

$\dot{h}$ = gornja ogrjevna vrijednost [J/t]

C_p^{ID} = idealni toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku [J/Kmol]

C_v^{ID} = idealni toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu [J/Kmol]

S = izračunata tolerancija fazne ravnoteže [-]

f_i = koeficijent fazne ravnoteže pojedine faze [Pa]

T_{c_i} = kritična temperatura pojedine komponente [K]

p_{c_i} = kritični tlak pojedine komponente [Pa]

q = maseni protok [t/s]

z_i = molarni udio pojedine komponente [%]

x_i^w = molarni udio pojedine komponente faze vode [%]

x_i^o = molarni udio pojedine komponente naftne faze [%]

y_i = molarni udio pojedine komponente plinske faze [%]

v = molarni volumen [m³/mol]

K_i'' = omjer faze vode i plinske faze [-]

K_i' = omjer plinske i naftne faze [-]

R = opća plinska konstanta [J/Kmol]

ΔH_{rxn}° = oslobođena energija (gornja orgjevnost) [J/mol]

ΔH = promjena entalpije [J/mol]

ΔH^{ID} = razlika entalpija pri idealnim uvjetima [J/mol]

H^{dep} = razlika entalpije pri razmatranim i idealnim uvjetima [J/mol]

ΔH^{dep} = razlika razlike entalpije pri razmatranim i idealnim uvjetima [J/mol]

ΔT = razlika temperatura [K]

U^R = rezidualna unutarnja energija [J/mol]

C_p^R = rezidualni toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku [J/Kmol]

C_v^R = rezidualni toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu [J/Kmol]

$P_{el.}$ = snaga električne energije [W]

$\dot{H}$ = snaga energetskega toka [W]

$P_{topl.}$ = snaga toplinske energije [W]

T = temperatura [K]

p = tlak [Pa]

$\phi_{topl.}$ = toplinska energija u jedinici vremena [W]

C_p = toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku [J/Kmol]

C_v = toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu [J/Kmol]

w = udio faze vode u smjesi fluida prije separacije [-]

O = udio naftne faze u smjesi fluida prije separacije [-]

v = udio plinske faze u smjesi fluida prije separacije [-]

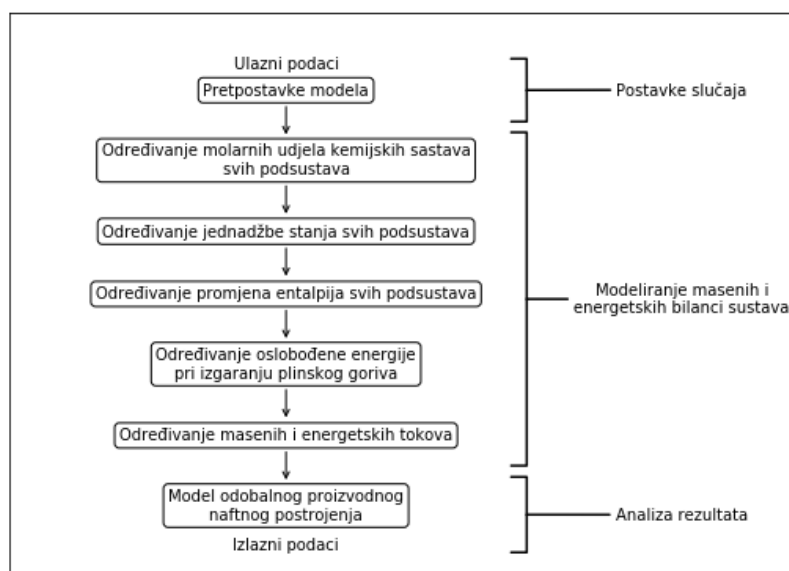
ε = zadana tolerancija fazne ravnoteže [-]

1. UVOD

Potrošnja energije na naftnim postrojenjima dio je problematike energetske pokazatelja postrojenja unutar naftne industrije. Razmatrana naftna postrojenja proizvodnog su tipa. Potrošnja energije predstavlja ukupnu potrebnu energiju kako bi promatrani sustav mogao izvršavati svoju funkciju u jedinici vremena. Osnovni energetske pokazatelji razmatranih sustava su potrošnja (potražnja) i dobava energije. Odnos potražnje i dobave energije predstavlja problematiku razmatranih energetske sustava. Odnos potražnje i dobave energije određuje dinamiku masenih i energetske tokova promatranog sustava. Energetske pokazatelji predstavljaju energetska svojstva promatranog sustava. Energetske pokazatelji određuju se energetske analizom odabranog sustava. Odabrani energetske sustav za provedbu energetske analize je odobalno proizvodno naftno postrojenje. Cilj rada je izrada osnovnog teoretskog modela odabranog energetske sustava, te provedba energetske analize. Interpretacija i raščlanjivanje svojstva i energetske pokazatelja teoretskog modela odobalnog proizvodnog naftnog postrojenja predstavlja provedbu energetske analize. Literatura korištena pri izradi rada sastoji se od nekoliko referenciranih članaka i knjiga. Dio literature sastoji se od članaka koji analiziraju proizvodni dan proizvodnih naftnih i plinskih postrojenja (platformi) u Sjevernom moru i Brazilu. Studije i analize koje procjenjuju stanje i učinkovitost takvih postrojenja uglavnom se temelje na ekološkom utjecaju ili na konvencionalnim energetske evaluacijama. Energetska evaluacija uključuje analizu energetske i eksergetske tokova energija i raspravu o mogućim unaprjeđenjima učinkovitosti i termodinamičkih pokazatelja promatranih sustava. Energetska analiza prikazuje i procjenjuje pretvorbu jednog oblika energije u drugi unutar promatranog sustava i temelji se na prvom zakonu termodinamike. Drugi dio literature odnosi se na izračune termodinamičkih svojstva i koeficijenata fluida korištenih za potrebe ovoga rada. Proračunski dio literature uključuje sve korištene pristupe, funkcije i formulacije potrebne za provedbu izračuna. Programski jezici korišteni pri izradi rada su Microsoft Office 2016 (Word, Excel), te Python Anaconda Cloud 3.7.0.

2. METODA

Algoritamski prikaz postupka izrade rada prikazuje slika 2-1. Postupak izrade rada podijeljen je u tri koraka. Prvi korak odnosi se na ulazne podatke, odnosno sve potrebne pretpostavke ulaznih vrijednosti kako bi se moglo pristupiti sljedećem koraku postupka. Drugi korak je izrada teoretskog modela odobalnog proizvodnog naftnog postrojenja. Izrada modela provedena je modeliranjem masenih i energetskih bilanci zadanog sustava. Treći korak provedba je analize dobivenih rezultata modela. Izradom modela sustava određeni su odnosi potrošnje i dobave energije unutar granica sustava modela kroz razmatrani vremenski interval. Izradom masenih i energetskih tokova energije određena je funkcija osnovnih energetskih pokazatelja modela sustava.



Slika 2-1. Prikaz algoritma postupka izrade rada

Izračun svojstava proizvodnog fluida vezan je uz kemijski sastav i kritična svojstva. Molarni udjeli kemijskog sastava proizvodnog fluida zadani su prema prosječnim vrijednostima različitih proizvodnih fluida prema literaturi Van Nguyen et al. (2013). Proizvodni fluid je ulazni fluid u sustav i sastoji se od naftnog kondenzata s vezanom vodom i plinom. Slobodni plin nije pretpostavljena komponenta ulaznog proizvodnog fluida. Kemijski sastav proizvodnog fluida pretpostavljen je s odgovarajućim molarnim udjelima kemijskih komponenti sastava. Kemijski sastav proizvodnog fluida sastoji se od nekoliko stvarnih kemijskih komponenti i jednom teoretskom komponentom (C_{7+}) koja aproksimira

sve teške ugljikovodike koje stvarni proizvodni fluid može sadržavati. Svojstva kemijske komponente C_{7+} pretpostavljena su prema Jones i Pujado (2006) i Hussein et al. (2003), gdje su izračunata iz nekoliko pseudo-komponenti (teoretskih komponenti). Kritična svojstva su preuzeta iz Smith et al. (2001), sastoje se od kritičnog tlaka i temperature, te acentričnog faktora pojedine komponente sastava. Tablica 2-1 prikazuje pretpostavljene molarne udjele kemijskog sastava proizvodnog fluida i preuzeta pripadajuća svojstva pojedine prikazane kemijske komponente.

Tablica 2-1. Kemijski sastav proizvodnog fluida i pripadajuća svojstva

Kemijski sastav	Molarni udio (z_i) [%]	Molarna masa (M_{z_i}) [g/mol]	Kritična temperatura (T_{c_i}) [K]	Kritični tlak (p_{c_i}) [MPa]	Acentrični faktor (ω_i) [-]
CH ₄	49,20	16,04	190,56	4,599	0,01
C ₂ H ₆	4,70	30,07	305,41	4,880	0,10
C ₃ H ₈	4,70	44,10	369,77	4,240	0,15
n-C ₄ H ₁₀	3,40	58,12	425,10	3,784	0,20
n-C ₅ H ₁₂	1,40	72,15	469,65	3,365	0,25
n-C ₆ H ₁₄	0,60	86,18	506,40	3,030	0,30
CO ₂	0,90	44,01	304,11	7,374	0,27
N ₂	2,80	28,01	126,21	3,398	0,04
C ₇₊	12,30	156,52	654,31	2,236	0,51
H ₂ O	20,00	18,02	647,10	22,064	0,34

Izračun termodinamičkih svojstava svih fluida unutar sustava proveden je pomoću jednadžbe stanja prema Peng i Robinson (1976). Izračunom jednadžbe stanja dobiven je faktor kompresibilnosti (korekcija od idealnog stanja) svakog fluida. Binarni interakcijski parametri komponenata kemijskog sastava nisu uključeni u izračun jednadžbe stanja fluida. Slika 2-2 prikazuje algoritam postupka izračuna jednadžbe stanja za jednu točku sustava.



Slika 2-2. Prikaz algoritma postupka izračuna jednadžbe stanja za jednu točku sustava

Izračun jednadžbe stanja svih fluida u svakoj točki sustava (svakom podsustavu) proveden je prema jednadžbama (2-1, do 2-11):

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (2-1)$$

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N z_i z_j \sqrt{a_i a_j} \quad (2-2)$$

$$b = \sum_{i=1}^N z_i b_i \quad (2-3)$$

$$a_i = a_{c_i} \alpha_i \quad (2-4)$$

$$a_{c_i} = \frac{\Omega_a R^2 T_{c_i}^2}{p_{c_i}} \quad (2-5)$$

$$\alpha_i = \left[1 + \kappa_i \left[1 - \sqrt{\frac{T}{T_{c_i}}} \right] \right] \quad (2-6)$$

$$\kappa_i = 0,37464 + 1,54226\omega_i - 0,26992\omega_i^2 \quad (2-7)$$

$$b_i = \frac{\Omega_b R T_{c_i}}{p_{c_i}} \quad (2-8)$$

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (2-9)$$

$$A = \frac{ap}{R^2 T^2} \quad (2-10)$$

$$B = \frac{bp}{RT} \quad (2-11)$$

Gdje su: Z = faktor kompresibilnosti promatranog fluida [-]

R = opća plinska konstanta [J/Kmol]

T = temperatura promatranog fluida [K]

p = tlak promatranog fluida [Pa]

v = molarni volumen promatranog fluida [m³/mol]

T_{c_i} = kritična temperatura pojedine komponente promatranog fluida [K]

p_{c_i} = kritični tlak pojedine komponente promatranog fluida [Pa]

ω_i = acentrični faktor pojedine komponente promatranog fluida [-]

$\Omega_a = 0,4572355$

$\Omega_b = 0,0777961$

z_i = molarni udio pojedine komponente promatranog fluida [%]

Pomoću faktora kompresibilnosti određene su potrebne termodinamičke relacije parcijalnih derivacija pri konstantnim vrijednostima za svaku točku sustava (podsustav). Izračun toplinskog kapaciteta pri konstantnom molarnom volumenu za svaki fluid svih podsustava modela pri idealnim termodinamičkim uvjetima izrađen je pomoću pretpostavljenih koeficijenata pojedinih komponenti kemijskog sastava svih fluida unutar sustava prema Smith et al. (2001), svojstva koeficijenata C₇₊ frakcije kemijskog sastava aproksimirana su prema Smith et al. (2001). Tablica 2-2 prikazuje koeficijente za izračun toplinskog kapaciteta pri konstantnom volumenu.

Tablica 2-2. Koeficijenti izračuna toplinskog kapaciteta pri konstantnom volumenu

Kemijska komponenta	A	B [10 ³]	C [10 ⁶]	D [10 ⁻⁵]
CH ₄	1,70	9,081	-2,164	0
C ₂ H ₆	1,13	19,225	-5,561	0
C ₃ H ₈	1,21	28,785	-8,824	0
n-C ₄ H ₁₀	1,94	36,915	-11,402	0
n-C ₅ H ₁₂	2,46	45,351	-14,111	0
n-C ₆ H ₁₄	3,03	53,722	-16,791	0
CO ₂	5,46	1,045	0	-1,157
N ₂	3,28	0,593	0	0,04
C ₇₊	3,59	62,093	-19,471	0
H ₂ O	3,47	1,45	0	0,121

Termodinamičke relacije parcijalnih derivacija pri konstantnim vrijednostima izvedene su iz jednadžbe (2-1). Izračun termodinamičkih relacija parcijalnih derivacija pri konstantnim vrijednostima za svaki fluid unutar svih podsustava proveden je prema Smith et al. (2001) i Pratt (2001), prema jednadžbama (2-12, do 2-20):

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -1 \quad (2-12)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = \frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a(v+b)}{[v(v+b)+b(v-b)]^2} \quad (2-13)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v-b} + \frac{a'}{v(v+b)+b(v-b)} \quad (2-14)$$

$$a' = \frac{da}{dT} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N z_i z_j \left(\sqrt{\frac{a_j}{a_i}} a_i' + \sqrt{\frac{a_i}{a_j}} a_j' \right) \quad (2-15)$$

$$a_i' = \frac{da_i}{dT} = \frac{-z_i a_i}{\left[1 + z_i \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{c_i}}}\right)\right] \sqrt{TT_{c_i}}} \quad (2-16)$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{p} \left[T \left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p + Z \right] \quad (2-17)$$

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial T}\right)_p = \frac{\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_p (B - Z) + \left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_p (6BZ + 2Z - 3B^2 - 2B + A - Z^2)}{3Z^2 + 2(B - 1)Z + (A - 2B - 3B^2)} \quad (2-18)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial T}\right)_p = \frac{p}{R^2 T^2} \left(a' - \frac{2a}{T} \right) \quad (2-19)$$

$$\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_p = \frac{-bp}{RT^2} \quad (2-20)$$

Gdje su: $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T$ = parcijalna derivacija tlaka po molarnom volumenu pri konstantnoj temperaturi promatranog fluida [Pa/(m³/mol)]

$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$ = parcijalna derivacija tlaka po temperaturi pri konstantnom molarnom volumenu promatranog fluida [Pa/K]

$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ = parcijalna derivacija molarnog volumena po temperaturi pri konstantnom tlaku promatranog fluida [(m³/mol)/K]

$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_v$ = parcijalna derivacija temperature po tlaku pri konstantnom molarnom volumenu promatranog fluida [K/Pa]

Izračun toplinskog kapaciteta pri konstantnom molarnom volumenu svih fluida unutar svakog podsustava modela proveden je prema Smith et al. (2001) i Pratt (2001), prema jednadžbama (2-21, do 2-26):

$$C_v = C_v^{ID} + C_v^R \quad (2-21)$$

$$C_v^{ID} = \sum_{i=1}^N z_i C_{v_i}^{ID} \quad (2-22)$$

$$C_{v_i}^{ID} = R(A + BT + CT^2 + DT^{-2} - 1) \quad (2-23)$$

$$C_v^R = \frac{Ta''}{b\sqrt{8}} \ln \left[\frac{Z + B(1 + \sqrt{2})}{Z + B(1 - \sqrt{2})} \right] \quad (2-24)$$

$$a'' = \frac{da'}{dT} = \frac{d^2a}{dT^2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N z_i z_j \left[\frac{a'_i a'_j}{\sqrt{a_i a_j}} + \frac{a''_i \sqrt{a_j}}{\sqrt{a_i}} + \frac{a''_j \sqrt{a_i}}{\sqrt{a_j}} - \frac{1}{2} \left(\frac{a'_i \sqrt{a_j}}{\sqrt{a_i^3}} + \frac{a'_j \sqrt{a_i}}{\sqrt{a_j^3}} \right) \right] \quad (2-25)$$

$$a''_i = \frac{da'_i}{dT} = \frac{d^2a_i}{dT^2} = \frac{a_{c_i} \kappa_i \sqrt{\frac{T_{c_i}}{T}} (1 + \kappa_i)}{2TT_{c_i}} \quad (2-26)$$

Gdje su: C_v = toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu [J/Kmol]

C_v^{ID} = idealni toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu [J/Kmol]

C_v^R = rezidualni toplinski kapacitet pri konstantnom volumenu [J/Kmol]

Pomoću izračunatih relacija parcijalnih derivacija i toplinskog kapaciteta pri konstantnom volumenu, izračunati su toplinski kapacitet fluida pri konstantnom tlaku i rezidualna unutarnja energija fluida. Izračun toplinskog kapaciteta pri konstantnom tlaku i rezidualne unutarnje energije svih fluida unutar svakog podsustava modela proveden je prema Smith et al. (2001) i Pratt (2001), prema jednadžbama (2-27, do 2-30):

$$C_p = C_p^{ID} + C_p^R \quad (2-27)$$

$$C_p^R = C_v^R + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - R \quad (2-28)$$

$$C_p^{ID} = C_v^{ID} + R \quad (2-29)$$

$$U^R = \frac{Ta' - a}{b\sqrt{8}} \ln \left[\frac{Z + B(1 + \sqrt{2})}{Z + B(1 - \sqrt{2})} \right] \quad (2-30)$$

Gdje su: C_p = toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku [J/Kmol]

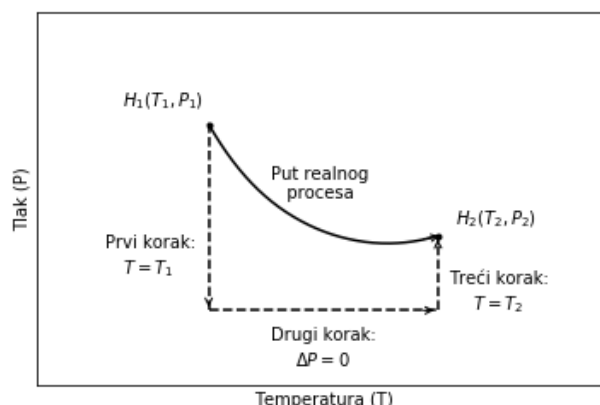
C_p^{ID} = idealni toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku [J/Kmol]

C_p^R = rezidualni toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku [J/Kmol]

U^R = rezidualna unutarnja energija [J/mol]

S izračunatim potrebnim svojstvima određena je razlika entalpije fluida pri zadanim uvjetima i entalpije idealnog fluida pri idealnim uvjetima (engl. „*enthalpy departure*“). Za fluid pri protjecanju između dvije odabrane točke sustava pri različitim zadanim uvjetima tlaka i temperature izračunata je razlika entalpija koja opisuje proces koji je fluid prošao kako bi prešao iz prvog stanja i prve odabrane točke sustava, u drugo stanje i drugu odabranu točku sustava. Razlika entalpija izračunata je prema Smith et al. (2001), koristeći alternativni termodinamički put opisanog procesa promjene svojstava i stanja od realnog, odnosno stvarnog tijeka procesa koji bi fluid prošao prelaskom jednog stanja u drugo. Rezultat takvog procesa je neovisan o prijednom putu koji dovodi do rješenja, nego ovisi o početnim i konačnim uvjetima. Ovim pristupom izračun razlike entalpija prvog i drugog stanja sustava je pojednostavljen i provodi se kroz tri koraka. Prvi korak uključuje već opisan izračun razlike entalpije fluida pri zadanim i idealnim termodinamičkim uvjetima. Drugi korak se sastoji od izračuna razlike entalpija fluida idealnih svojstava (minimalan tlak), pri drugom i prvom zadanom uvjetu temperature, a treći korak je izračun razlike entalpija fluida pri drugim i idealnim (minimalan tlak) uvjetima u drugoj odabranoj točki sustava. Zbrojem rješenja prva dva koraka izračuna i oduzimajući rješenje trećeg koraka, opisan je alternativni termodinamički put promjene entalpija realnog fluida iz prve odabrane točke sustava u drugu točku sustava s pripadajućim termodinamičkim uvjetima. Konačna izračunata vrijednost promjene entalpije alternativnim termodinamičkim putem jednaka je vrijednosti promjene entalpije realnim procesom, bez obzira što korišten put promjene svojstava nije isti kao

realni. Slika 2-3 prikazuje postupak izračuna promjene entalpije realnog fluida za opći generalizirani slučaj.



Slika 2-3. Prikaz generaliziranog slučaja postupka izračuna promjene entalpije

Izračun promjene entalpije svih fluida svakog podsustava modela proveden je prema jednadžbama (2-31, do 2-33):

$$\Delta H = H(T_{izlaz}, p_{izlaz}) - H(T_{ulaz}, p_{ulaz}) \quad (2-31)$$

$$\Delta H = H^{ID}(T_{izlaz}) + H^{dep}(T_{izlaz}, p_{izlaz}) - H^{ID}(T_{ulaz}) - H^{dep}(T_{ulaz}, p_{ulaz}) \quad (2-32)$$

$$\Delta H = \Delta H^{ID} + \Delta H^{dep} \quad (2-33)$$

Gdje su: ΔH = promjena entalpije unutar sustava [J/mol]

ΔH^{ID} = razlika entalpija promatranih fluida pri idealnim uvjetima [J/mol]

ΔH^{dep} = razlika razlike entalpije fluida pri razmatranim i idealnim uvjetima [J/mol]

H = entalpija promatranog fluida [J/mol]

H^{ID} = entalpija promatranog fluida pri idealnim uvjetima [J/mol]

H^{dep} = razlika entalpije fluida pri razmatranim i idealnim uvjetima [J/mol]

Izračun entalpije svih fluida pri idealnim uvjetima (minimalan tlak) svakog podsustava modela proveden je prema jednadžbi (2-34):

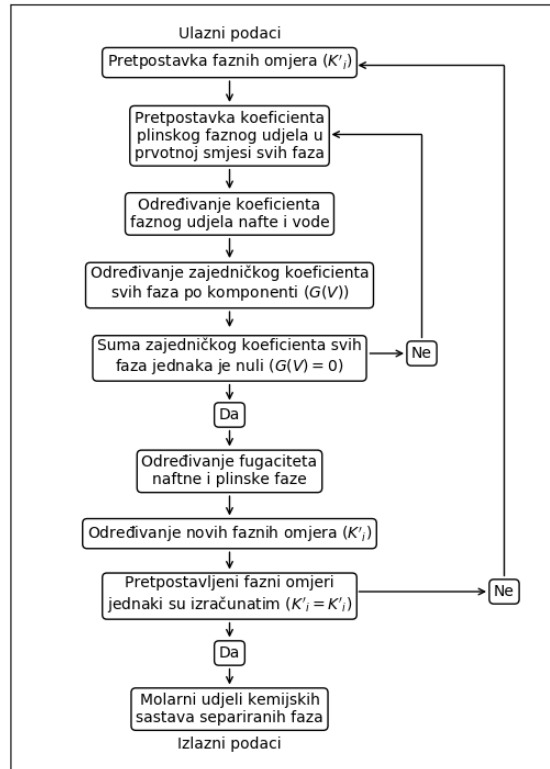
$$\Delta H^{ID} = C_p \Delta T \quad (2-34)$$

Gdje je: ΔT = razlika temperatura promatranih fluida [K]

Izračun razlike entalpije svih fluida unutar svakog podsustava modela pri razmatranim i idealnim uvjetima proveden je prema jednadžbi (2-35):

$$H^{dep} = H - H^{ID} = U^R + RT(Z - 1) \quad (2-35)$$

Izračun novih kemijskih sastava triju faza nakon separacije (plin, nafta, voda) (engl. „flash evaporation“) izvršen je prema Lapene et al. (2010). Sastoji se od nekoliko koraka. Prvi korak je pretpostavljanje faznih omjera koristeći jednadžbe (2-48, 2-49). Drugi korak je pretpostavljanje koeficijenta plinskog faznog udjela u prvotnoj smjesi svih faza proizvodnog fluida, te zadavanje molarnih udjela kemijskog sastava vodene faze u kojoj kemijska komponenta vode nosi maksimalnu vrijednost, dok su ostale kemijske komponente minimalnog udjela. Treći korak je zadavanje zajedničkog koeficijenta svih faza koristeći jednadžbu (2-47). Slijedećim korakom dobivaju se prvi molarni udjeli pojedinih kemijskih komponenti naftne i plinske faze iterirajući zajedničkog koeficijenta svih faza na postavljenu vrijednost, dok su molarni udjeli kemijskih komponenata faze vode već određeni. Slijedećim korakom određuju se fugaciteti naftne i plinske faze, te se pomoću njihovih vrijednosti izračunavaju novi početni omjeri faza u prvotnoj smjesi proizvodnog fluida. Ovim postupkom završen je jedan ciklus iteracije izračuna konačnih faznih omjera i molarnih udjela kemijskih komponenti triju faza. Iteracija postupka ponavlja se sve dok dobiveni fazni omjeri budu jednaki vrijednostima iz prethodnog ciklusa iteracije. Iteracija cijelog postupka ponavlja se sve dok uvjet ravnoteže nije zadovoljen. Slika 2-4 prikazuje algoritam postupka izračuna molarnih udjela kemijskih sastava triju faza nakon separacije.



Slika 2-4. Prikaz algoritma izračuna molarnih udjela separiranih faza

Izračun fazne ravnoteže fluida unutar podsustava separacije proveden je prema jednadžbama (2-36, 2-37):

$$f_i^O = f_i^V = f_i^W \quad (2-36)$$

$$\phi_i^O x_i^O p = \phi_i^V y_i^V p = \phi_i^W x_i^W p \quad (2-37)$$

Gdje su: f_i = koeficijent fazne ravnoteže pojedine faze [Pa]

ϕ_i = fugacitet pojedine faze [-]

y_i = molarni udio pojedine komponente plinske faze [%]

x_i^O = molarni udio pojedine komponente naftne faze [%]

x_i^W = molarni udio pojedine komponente faze vode [%]

Izračun faznih omjera unutar podsustava separacije proveden je prema jednadžbama (2-38, 2-39):

$$K_i' = \frac{y_i}{x_i^O} = \frac{\phi_i^O}{\phi_i^V} \quad (2-38)$$

$$K_i'' = \frac{y_i}{x_i^W} = \frac{\phi_i^W}{\phi_i^V} \quad (2-39)$$

Gdje su: K_i' = omjer plinske i naftne faze [-]

K_i'' = omjer faze vode i plinske faze [-]

Izračun materijalnog balansa unutar podsustava separacije proveden je prema jednadžbama (2-40, do 2-46):

$$V + O + W = 1 \quad (2-40)$$

$$W = \frac{z_W + V(x_W^O - y_W) - x_W^O}{1 - x_W^O} \quad (2-41)$$

$$x_i^O = \frac{z_i}{1 + V(K_i' - 1) - W} = \frac{z_i}{1 + V\left(K_i' - 1 + \frac{y_W - x_W^O}{1 - x_W^O}\right) + \frac{x_W^O - z_W}{1 - x_W^O}}; i \neq w \quad (2-42)$$

$$x_W^O = \frac{K_W''}{K_W'} \quad (2-43)$$

$$y_i = x_i^O K_i' = \frac{z_i K_i'}{1 + V\left(K_i' - 1 + \frac{y_W - x_W^O}{1 - x_W^O}\right) + \frac{x_W^O - z_W}{1 - x_W^O}}; i \neq w \quad (2-44)$$

$$y_W = K_W'' \quad (2-45)$$

$$x_{i=W}^W = 1; x_{i \neq W}^W = 0 \quad (2-46)$$

Gdje su: V = udio plinske faze u smjesi fluida prije separacije [-]

O = udio naftne faze u smjesi fluida prije separacije [-]

w = udio faze vode u smjesi fluida prije separacije [-]

Iterativni postupak zajedničkog koeficijenta svih faza unutar podsustava separacije proveden je prema jednadžbi (2-47):

$$G(V) = \sum_{i \neq w}^N \frac{z_i \left(K_i' - 1 + \frac{y_w - x_w^O}{1 - x_w^O} \right)}{1 + V \left(K_i' - 1 + \frac{y_w - x_w^O}{1 - x_w^O} \right) + \frac{x_w^O - z_w}{1 - x_w^O}} = 0 \quad (2-47)$$

Gdje je: $G(V)$ = funkcija pretpostavljenog udjela plinske faze u smjesi fluida prije separacije [-]

Pretpostavljeni fazni omjer za početni korak iterativnog postupka zajedničkog koeficijenta svih faza unutar podsustava separacije, pretpostavljen je prema jednadžbama (2-48, 2-49):

$$K_{i \neq w}' = \frac{p_{c_i}}{p} \exp \left[5.37 (1 + \omega_i) \left(1 - \frac{T_{c_i}}{T} \right) \right] \quad (2-48)$$

$$K_w' = \frac{p_{c_w}}{p} \frac{T}{T_{c_w}} \quad (2-49)$$

Iterativni postupak cijelog proračuna separacije faza proveden je sve dok uvjet ravnoteže nije zadovoljen, prema jednadžbi (2-36). Tolerancija fazne ravnoteže izračunata je prema jednadžbi (2-50):

$$S = \sum_{i=1}^N \left(\frac{f_i^O}{f_i^V} - 1 \right)^2; S < \varepsilon = 10^{-15} \quad (2-50)$$

Gdje su: S = izračunata tolerancija fazne ravnoteže [-]

ε = zadana tolerancija fazne ravnoteže [-]

Jednadžba koeficijenta fugaciteta izvedena je iz jednadžbe stanja prema Smith et al. (2001). Izračun koeficijenata fugaciteta unutar podsustava separacije proveden je prema jednadžbama (2-51, do 2-54):

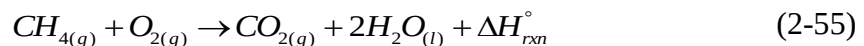
$$\ln \phi_i = (BB)_i (Z - 1) - \ln (Z - B) - \frac{A}{2\sqrt{2}B} ((AA)_i - (BB)_i) \ln \left[\frac{Z + B(1 + \sqrt{2})}{Z + B(1 - \sqrt{2})} \right] \quad (2-51)$$

$$f_i = z_i \phi_i p \quad (2-52)$$

$$(AA)_i = \frac{2}{a} \left[\sum_{j=1}^N \sqrt{a_i a_j} \right] \quad (2-53)$$

$$(BB)_i = \frac{b_i}{b} \quad (2-54)$$

Izračun oslobođene energije dobivene izgaranjem plinskog goriva proveden je prema Smith et al. (2001). Plinsko gorivo je prema Van Nguyen et al. (2016), nakon procesa tretmana čišćenja, pretpostavljenog kemijskog sastava čisti metan. Izračunom je dobivena gornja ogrjevna vrijednost plinskog goriva. Produkti izgaranja (voda i ugljikov dioksid) odbacuju se u okoliš izvan granica sustava. Određivanje gornje ogrjevnosti provedeno je koristeći vrijednost koeficijenta standardne topline formacije za metan prema Smith et al. (2001). Kemijska reakcija izgaranja plinskog goriva prikazana je jednadžbom (2-55):



Gdje su: $CH_{4(g)}$ = metan u plinovitom stanju

$O_{2(g)}$ = kisik u plinovitom stanju

$CO_{2(g)}$ = ugljikov dioksid u plinovitom stanju

$H_2O_{(l)}$ = voda u tekućem stanju

ΔH_{rxn}° = oslobođena energija (gornja ogrjevna vrijednost) [J/mol]

Jednadžba izračuna oslobođene energije pri izgaranju plinskog goriva prikazana je jednadžbom (2-56):

$$\Delta H_{rxn}^{\circ} = \sum \Delta H_{f, (produkata)}^{\circ} - \sum \Delta H_{f, (reaktanata)}^{\circ} \quad (2-56)$$

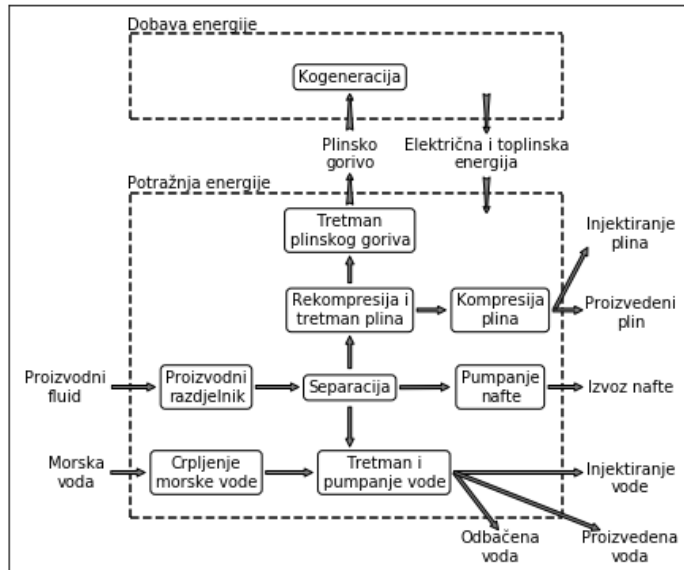
Gdje su: $\Delta H_{f, (produkata)}^{\circ}$ = entalpija formacije produkata kemijske reakcije [J/mol]

$\Delta H_{f, (reaktanata)}^{\circ}$ = entalpija formacije reaktanata kemijske reakcije [J/mol]

3. ANALIZA SLUČAJA

3.1. Postavke slučaja

Odabrani teoretski model odobalnog proizvodnog naftnog postrojenja sastoji se od nekoliko glavnih podsustava, nužnih za funkcioniranje odabranog sustava i nekoliko dodatnih podsustava kako bi se model približio prosječnoj strukturi razmatranih realnih postrojenja iz dostupne literature. Prema Van Nguyen et al. (2016), glavni podsustavi nužni za funkcioniranje teoretskog modela su proizvodni razdjelnik, separacija, pumpanje nafte i kogeneracija. Dodatni podsustavi uključeni u model postrojenja su rekompresija i tretman plina, kompresija plina, tretman i pumpanje vode, tretman plinskog goriva i crpljenje morske vode. Granice sustava modela postavljene su od proizvodnog razdjelnika do izvoza, odbacivanja i injektiranja produkata postrojenja. Bušotine proizvodnog sustava nisu uključene u model, iako je pretpostavljeno da se proizvodni fluid iz raznih bušotina akumulira kroz proizvodni razdjelnik. Slika 3-1 prikazuje raspored odabranih podsustava i granice sustava.



Slika 3-1. Prikaz granica sustava modela i raspored podsustava

Modeliranje teoretskog sustava podrazumijeva pretpostavke termodinamičkih uvjeta svakog razmatranog podsustava. Termodinamički uvjeti odnose se na svojstva tlaka i temperature fluida koji se nalazi u razmatranoj točki sustava. Svaka točka sustava, odnosno

svaki podsustav zahtjeva unaprijed pretpostavljene vrijednosti svojstava tlaka i temperature koje će odgovarajući fluid sadržavati u razmatranoj točki sustava. Takva pretpostavka nužna je karakteristika svakog razmatranog podsustava unutar modela, kako bi svaki podsustav mogao obavljati svoju unaprijed pretpostavljenu (određenu) funkciju. Pretpostavljene vrijednosti svojstava tlaka i temperature za svaku točku modela odabrane su prema Voldsund et al. (2013) i Van Nguyen et al. (2016). Tablica 3-1 prikazuje pretpostavljene vrijednosti termodinamičkih svojstava razmatranih podsustava modela.

Tablica 3-1. Pretpostavljene vrijednosti tlaka i temperature razmatranih podsustava

Podsustav		Ulaz		Izlaz	
		Temperatura [K]	Tlak [MPa]	Temperatura [K]	Tlak [MPa]
Proizvodni razdjelnik		358,15	16,50	344,15	7,00
Prije separacije		344,15	7,00	319,15	0,28
Separacija	Plin	319,15	0,28	319,15	0,28
	Nafta			319,15	0,28
	Voda			319,15	0,28
Rekompresija i tretman plina	Prvi stupanj	319,15	0,28	303,15	0,28
	Drugi stupanj	303,15	0,28	344,15	7,00
Kompresija plina		344,15	7,00	413,15	20,00
Tretman plinskog goriva		344,15	7,00	298,15	1,80
Kogeneracija		298,15	1,80	-	-
Pumpanje nafte		319,15	0,28	333,15	10,00
Voda nakon separacije		319,15	0,28	292,15	0,28
Crpljenje morske vode		292,15	0,10	292,15	0,28
Tretman i pumpanje vode		292,15	0,28	303,15	10,00

Proizvodni fluid od proizvodnog razdjelnika prenosi se vlastitom energijom do podsustava separacije, gdje se svojstva tlaka i temperature proizvodnog fluida reduciraju na potrebne zadane dimenzionirane uvjete separacije. Molarni udjeli i kemijski sastav proizvodnog fluida prikazuje tablica 2-1. Opis svojstava i sastava proizvodnog fluida je prikazan u poglavlju 2. Akumuliranje proizvodnog fluida unutar proizvodnog razdjelnika zahtjeva promjenu svojstava temperature i tlaka na zajednička svojstva cijelog akumuliranog proizvodnog fluida unutar naftovoda nakon prolaska kroz podsustav proizvodnog razdjelnika. Takva redukcija termodinamičkih svojstava proizvodnog fluida događa se prolaskom proizvodnog fluida kroz niz ventila koji su prema Van Nguyen et al. (2014) unaprijed postavljeni za potrebnu redukciju i kontrolu svojstava. Teoretski model sustava ne uključuje različita svojstva temperature i tlaka za svaku moguću bušotinu, nego su pretpostavljena zajednička ekvivalentna svojstva za sve bušotine definirane kao ulaz proizvodnog fluida u proizvodni razdjelnik ekvivalentnim naftovodom koji zamjenjuje sve moguće bušotine realnih postrojenja. Separacija na realnim postrojenjima prema Nguyen i Oliveira (2018) sastoji se od nekoliko stupnjeva separacije, za potrebe modela također je pretpostavljen ekvivalentni separator koji zamjenjuje sve moguće potrebne stupnjeve separacije jednim trofaznim separatorom. Termodinamički uvjeti separacije pretpostavljeni su prema Voldsund et al. (2013) kako bi se mogli odrediti novi molarni udjeli kemijskih sastava triju faza nakon separacije, stoga je potrebna dodatna redukcija svojstava tlaka i temperature u točki sustava prije separacije. Tablica 3-2 prikazuje dobivene molarne udjele kemijskih sastava pripadajućih faza fluida nakon separacije.

Tablica 3-2. Molarni udjeli kemijskih komponenti separiranih faza

Kemijski sastav	Plin (y_i) [%]	Nafta (x_i^o) [%]	Voda (x_i^w) [%]
CH ₄	72,32	1,49	0,00
C ₂ H ₆	6,84	0,52	0,00
C ₃ H ₈	6,70	1,29	0,00
n-C ₄ H ₁₀	4,63	2,15	0,00
n-C ₅ H ₁₂	1,74	1,80	0,00
n-C ₆ H ₁₄	0,64	1,36	0,00
CO ₂	1,32	0,07	0,00
N ₂	4,12	0,04	0,00
C ₇₊	1,69	91,28	0,00
H ₂ O	0,00	0,00	100,00

Naftna faza nakon separacije prenosi se tlakom separacije do podsustava pumpanja nafte. Podsustav pumpanja naftne faze omogućava nafti dovoljnu tlačnu snagu za kontinuiran izvoz proizvedene nafte izvan granica modela sustava. Vodena faza nakon separacije akumulira se u podsustavu tretmana (čišćenja) vode zajedno s morskom vodom koja se crpi, te se zatim pumpa za potrebe izvoza proizvedene vode, injektira za potrebe podržavanja tlaka u ležištu i dijelom odbacuje. Podsustav crpljenja morske vode modeliran je prema Voldsund et al. (2014) i prenosi morsku vodu tlakom crpljenja do podsustava za tretman i pumpanje vode. Podsustav za tretman i pumpanje vode modeliran je prema Van Nguyen et al. (2013) i ne uzima u obzir kemijske aditive za tretman čišćenja, nego početne i konačne uvjete temperature i tlaka u ovoj točki modela sustava. Granice sustava postavljene su na pumpanju proizvedene vode za izvoz i injektiranje, te odbačenom dijelu vode. Plinovita faza nakon separacije prenosi se tlakom separacije u podsustav rekompresije i tretmana plina, gdje se tretira i ujedno komprimira. Tretman čišćenja plinovite faze sastoji se od dva stupnja djelovanja. Prvi stupanj tretmana plinovite faze je hlađenje, te zatim uklanjanje visokomolekularnih ugljikovodika (VMU) iz smjese plina. Drugi stupanj tretmana plinovite faze je izdvajanje kiselih frakcija i primjesa iz smjese plina. Kemijski aditivi nisu uzeti u obzir pri izradi modela, nego termodinamički uvjeti i molarni udjeli

kemijskog sastava svakog stupnja procesa tretmana plina. Tablica 3-3 prikazuje molarne udjele plinovite faze prije i nakon tretmana čišćenja plina.

Tablica 3-3. Molarni udjeli plinovite faze prije i nakon tretmana čišćenja plina

Kemijski sastav	Ulaz (y_i) [%]	Izlaz (y_i') [%]
CH ₄	72,32	100,00
C ₂ H ₆	6,84	0,00
C ₃ H ₈	6,70	0,00
n-C ₄ H ₁₀	4,63	0,00
n-C ₅ H ₁₂	1,74	0,00
n-C ₆ H ₁₄	0,64	0,00
CO ₂	1,32	0,00
N ₂	4,12	0,00
C ₇₊	1,69	0,00
H ₂ O	0,00	0,00

Očišćena frakcija plinovite faze nakon podsustava rekompresije i tretmana plina, dijeli se na frakciju koja se koristi za pogonsko gorivo kogeneracije i frakciju koja se prenosi do podsustava za kompresiju plina. Frakcija plinovite faze ulazi u podsustav kompresije tlakom tretmana i rekompresije plina, te se proizvedeni plin komprimira, a zatim novim tlakom kompresije izvozi i utiskuje (injektira) u bušotine za potrebe plinskog lifta izvan granica sustava modela. Podsustavi rekompresije i tretmana plina i kompresije plina modelirani su prema Van Nguyen et al. (2014). Frakcija plinovite faze izdvojena za potrebe pogonskog goriva kogeneracije prenosi se tlakom rekompresije i tretmana plina u podsustav tretmana plinskog goriva. Tretman plinskog goriva podrazumijeva mijenjanje termodinamičkih uvjeta plinskog goriva u uvjete pogodne za izgaranje prema Voldsund et al. (2013). Nakon tretmana plinsko gorivo prenosi se novim tlakom u podsustav kogeneracije energije. Teoretski model sustava izrađen je na način da se točna količina plinovite faze izdvoji nakon prolaska kroz podsustav rekompresije i tretmana plina koja pri izgaranju u podsustavu kogeneracije daje točne količine električne i toplinske energije kolike su

potrebne za rad sustava u cjelini (potražnjom energije sustava). Podsustav kogeneracije modeliran je prema Van Nguyen et al. (2016) s učinkovitošću generiranja električne i toplinske energije iznosom od 28%, s pretpostavljene tri turbine za generaciju električne energije, od kojih su dvije konstantno u pogonu, pri konstantnom kapacitetu rada iznosa 60%, a treća je rezervna. Nusprodukti izgaranja plinskog goriva su voda i ugljikov dioksid. Temperatura produkata kemijske reakcije izgaranja plinskog goriva dovodi se na vrijednost temperature reaktanata, jer se oslobođena toplina i latentna toplina za pretvorbu vode u vodenu paru iskorištavaju za generaciju toplinske energije, a voda izlazi iz sustava u kondenziranom obliku. Produkti izgaranja odbacuju se izvan granica modela sustava u okoliš. Generirana toplinska i električna energija koristi se za pogon svih ostalih podsustava modela osim podsustava proizvodnog razdjelnika.

3.2. Modeliranje maseno-energetskih bilanci sustava

Konačni izrađeni model postrojenja funkcija je masenih protoka i promjena entalpija unutar svakog podsustava modela. Promjena entalpije fluida koji prolazi kroz određeni podsustav modela definira funkciju promatranog podsustava. Negativne promjene entalpije opisuju oslobađanje energije razmatrane točke sustava, dok pozitivne promjene entalpije opisuju potrebnu energiju koju treba dovesti podsustavu kako bi se takav proces mogao dogoditi. Negativne promjene entalpije mogu se modelirati izgubljenom energijom fluida ili odvedenom energijom hlađenjem fluida razmatranog procesa podsustava. Unutar granica sustava zbroj svih pozitivnih promjena entalpija predstavlja ukupnu energiju koju treba dovesti sustavu po molu fluida, kako bi sustav u cjelini mogao funkcionirati. Maseni protoci pretpostavljeni su za ulazne točke sustava prema Van Nguyen et al. (2013) za proizvodni razdjelnik i prema Van Nguyen et al. (2014) za crpljenje morske vode. Najznačajnija promjena masenih protoka događa se unutar podsustava separacije, nakon kojeg se dijeli na tri masena protoka povezana sa svojom odgovarajućom separiranom fazom proizvodnog fluida. Odvajanje potrebne količine plinskog goriva nakon rekompresije i tretmana plina modelirano je prema uvjetu potražnje energije modela. Ukupna potražnja energije jednaka je zbroju pozitivnih promjena entalpije podijeljena s odgovarajućom ukupnom molarnom masom svakog fluida unutar sustava, kako bi jedinica izražavanja bila potrebna energija po masi protoka fluida. Množenjem potražnje energije po masi s odgovarajućim masenim protokom fluida dobivene su vrijednosti potražnje izražene snagom (energija u vremenu). Uvjet potražnje energije modela za maseni protok odvojenog plinskog goriva jest jednakost vrijednosti energije masenog protoka plinskog goriva s ukupnom potražnjom energije postrojenja. Izjednačavanje dobave (plinskog goriva) i potražnje energije postrojenja dobiveno je iterativnim postupkom mijenjajući potrebnu količinu plinskog goriva koja bi svojim izgaranjem oslobodila jednaku ukupnu energiju kolika je potražnja. Ukupna energija podrazumijeva električnu i toplinsku energiju dobivenu podsustavom kogeneracije izgaranjem plinskog goriva. Izračun izlaznih masenih protoka podsustava kompresije plina i tretmana i pumpanja vode proveden je množeći ulazni maseni protok s odgovarajućim omjerom izlaznog i ulaznog masenog protoka. Omjeri izlaznih i ulaznih masenih protoka pretpostavljeni su za podsustave kompresije plina i tretmana i pumpanja vode prema Van Nguyen et al. (2014). Slika 3-2 prikazuje algoritam postupka modeliranja izdvojene količine plinskog goriva. Tablica 3-4 prikazuje određene masene protoke za svaki podsustav modela.



Slika 3-2. Prikaz algoritma modeliranja izdvojene količine plinskog goriva

Tablica 3-4. Maseni protoci svih podsustava modela

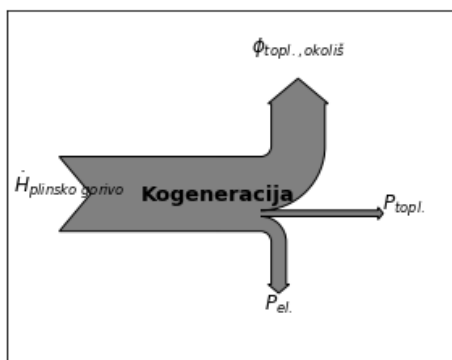
Podsustav		Ulaz	Izlaz
		Maseni protok (q) [t/s]	Maseni protok (q) [t/s]
Proizvodni razdjelnik		0,2050	0,2050
Separacija	Plin	0,2050	0,0910
	Nafta		0,0950
	Voda		0,0190
Rekompresija i tretman plina	Plinsko gorivo	0,0910	0,0013
	Kompresija plina		0,0402
	Izdvojeni sadržaj		0,0496
Kompresija plina	Proizvedeni plin	0,0402	0,0083
	Injektiranje plina		0,0319
Tretman plinskog goriva		0,0013	0,0013
Pumpanje nafte		0,0950	0,0950
Crpljenje morske vode		0,1389	0,1389
Tretman i pumpanje vode	Proizvedena voda	0,1579	0,0385
	Injektiranje vode		0,0770
	Odbacivanje vode		0,0424

Odabrani sustav modeliran je prema prvom zakonu termodinamike. Maseni protoci modelirani su zakonom očuvanja mase. Zbroj svih masenih protoka koji ulaze u određenu točku sustava mora biti jednak zbroju masenih protoka koji izlaze iz promatrane točke sustava. Energetski tokovi modelirani su zakonom očuvanja energije. Zbroj svih tokova energije koji ulaze u određenu točku sustava mora biti jednak zbroju tokova energije koji izlaze iz promatrane točke sustava. Određivanjem masenih protoka svake točke sustava ujedno je određena i ukupna potražnja energije sustava u jedinici vremena. Tablica 3-5 prikazuje vrijednosti potrebne dovedene ili oslobođene snage svakog podsustava modela.

Tablica 3-5. Vrijednosti promjena entalpija svakog podsustava i cijelog modela

Podsustav		Promjena entalpije (ΔH) [MW]
Proizvodni razdjelnik		-8,52
Prije separacije		2,71
Separacija		0,00
Rekompresija i tretman plina	Prvi stupanj	-2,04
	Drugi stupanj	1,84
Kompresija plina		6,64
Tretman plinskog goriva		-0,07
Kogeneracija		-19,71
Pumpanje nafte		3,20
Voda nakon separacije		-2,46
Crpljenje morske vode		0,02
Tretman i pumpanje vode		5,29
Zbroj svih pozitivnih promjena (Potražnja)		19,71

Modeliranje energetskega tokova sustava provedeno je koristeći izračunate podatke snage energije u jedinici vremena. Energetski tokovi funkcija su entalpija i promjena entalpija unutar sustava. Izračunati podaci snage energije u jedinici vremena dobiveni su množeći gornju ogrjevnju vrijednost promatranog energetskog toka s pripadajućim masenim protokom sustava, ogrjevna vrijednost predstavljaju akumuliranu energiju u fluidu promatrane točke sustava. Akumulirana energija fluida sustava dominirana je kemijskom energijom ugljikovodika. Promjene entalpije predstavljaju dovedenu ili oslobođenu energiju fluida u jedinici vremena. Pozitivne promjene entalpije predstavljaju dovedenu snagu promatranom fluidu unutar odgovarajućeg podsustava modela. Negativne promjene entalpije predstavljaju oslobođenu energiju u jedinici vremena promatranog fluida unutar odgovarajućeg podsustava modela. Oslobođena energija rezultat je procesa promjene entalpije i modelirana je na način da promatrani fluid odgovarajućeg podsustava djeluje interaktivno s okolišem, te nepovratno predaje oslobođenu energiju u jedinici vremena u okoliš. Ulazna entalpija odnosi se na plinsko gorivo i jednaka je određenoj gornjoj ogrjevnoj vrijednosti promatranog fluida. Modeliranje energetskega tokova podsustava kogeneracije provedeno je prema jednadžbi (3-1) energetskog balansa. Slika 3-3 prikazuje blok shemu modeliranja energetskega tokova energetske bilance podsustava kogeneracije.



Slika 3-3. Prikaz energetske bilance podsustava kogeneracije

$$\dot{H}_{\text{plinsko gorivo}} = P_{\text{el.}} + P_{\text{topl.}} + \phi_{\text{topl., okoliš}} \quad (3-1)$$

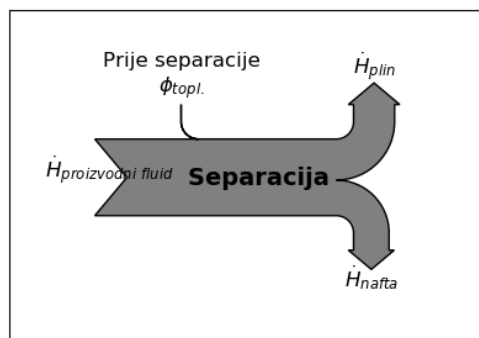
Gdje su: $\dot{H}_{\text{plinsko gorivo}}$ = snaga akumulirana u plinskom gorivu [MW]

$P_{\text{el.}}$ = snaga električne energije [MW]

$P_{\text{topl.}}$ = snaga toplinske energije [MW]

$\phi_{topl., okoliš}$ = neiskorištena, oslobođena snaga topline u okoliš [MW]

Modeliranje energetskih tokova podsustava separacije provedeno je prema jednačbama (3-2, 3-3) energetskog balansa. Slika 3-4 prikazuje modeliranje energetske bilance energetskih tokova podsustava separacije.



Slika 3-4. Prikaz energetske bilance podsustava separacije

$$\dot{H}_{proizvodnog fluida} + \phi_{topl.} = \dot{H}_{plin} + \dot{H}_{nafta} \quad (3-2)$$

$$\dot{H} = \dot{h} \times q \quad (3-3)$$

Gdje su: $\dot{H}$ = snaga energetskog toka promatranog fluida [MW]

$\phi_{topl.}$ = toplinska energija dovedena podsustavu u jedinici vremena [MW]

$\dot{h}$ = gornja ogrjevna vrijednost promatranog fluida [MJ/t]

q = maseni protok promatranog fluida [t/s]

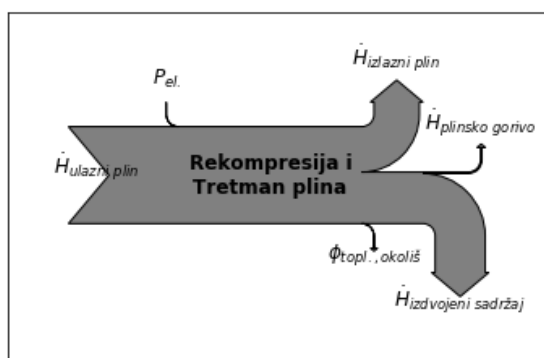
Modeliranje energetskih tokova podsustava proizvodnog razdjelnika provedeno je prema jednačbi (3-4) energetskog balansa. Slika 3-5 prikazuje modeliranje energetske bilance energetskih tokova podsustava proizvodnog razdjelnika.



Slika 3-5. Prikaz energetske bilance podsustava proizvodnog razdjelnika

$$\dot{H}_{\text{proizvodnog fluida, ulaz}} = \dot{H}_{\text{proizvodnog fluida, izlaz}} + \phi_{\text{topl., okoliš}} \quad (3-4)$$

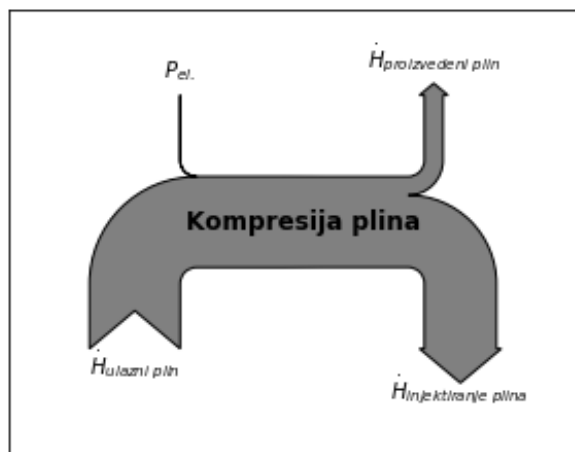
Modeliranje energetske tokova podsustava rekompresije i tretmana plina provedeno je prema jednadžbi (3-5) energetskog balansa. Slika 3-6 prikazuje modeliranje energetske bilance energetske tokova podsustava rekompresije i tretmana plina.



Slika 3-6. Prikaz energetske bilance podsustava rekompresije i tretmana plina

$$\dot{H}_{\text{plin, ulaz}} + P_{el.} = \dot{H}_{\text{plin, izlaz}} + \dot{H}_{\text{plinsko gorivo}} + \dot{H}_{\text{izdvojeni sadržaj}} + \phi_{\text{topl., okoliš}} \quad (3-5)$$

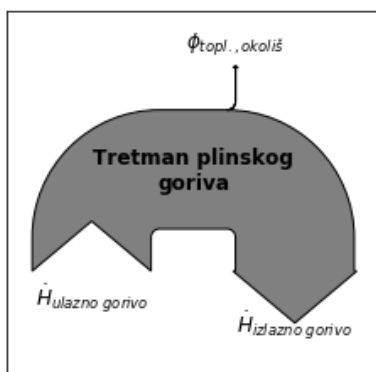
Modeliranje energetske tokova podsustava kompresije plina provedeno je prema jednadžbi (3-6) energetskog balansa. Slika 3-7 prikazuje modeliranje energetske bilance energetske tokova podsustava kompresije plina.



Slika 3-7. Prikaz energetske bilance podsustava kompresije plina

$$\dot{H}_{\text{plin, ulaz}} + P_{\text{el.}} = \dot{H}_{\text{proizvedeni plin}} + \dot{H}_{\text{injektiranje plina}} \quad (3-6)$$

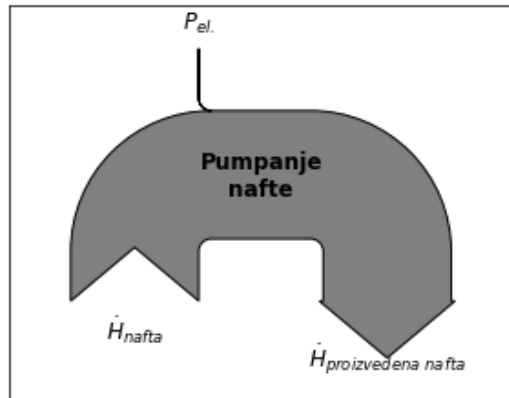
Modeliranje energetske tokova podsustava tretmana plinskog goriva provedeno je prema jednađbi (3-7) energetskeg balansa. Slika 3-8 prikazuje modeliranje energetske bilance energetske tokova podsustava tretmana plinskog goriva.



Slika 3-8. Prikaz energetske bilance podsustava tretmana plinskog goriva

$$\dot{H}_{\text{gorivo, ulaz}} = \dot{H}_{\text{gorivo, izlaz}} + \phi_{\text{topl., okoliš}} \quad (3-7)$$

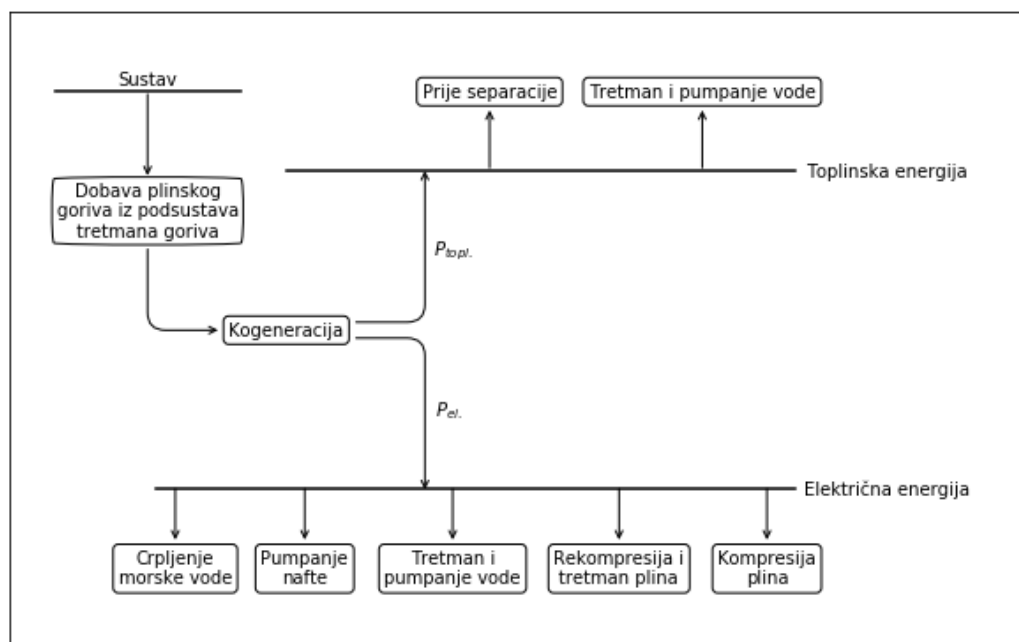
Modeliranje energetske tokova podsustava pumpanja nafte provedeno je prema jednađbi (3-8) energetskeg balansa. Slika 3-9 prikazuje modeliranje energetske bilance energetske tokova podsustava pumpanja nafte.



Slika 3-9. Prikaz energetske bilance podsustava pumpanja nafte

$$\dot{H}_{nafta} + P_{el.} = \dot{H}_{proizvedena nafta} \quad (3-8)$$

Određivanjem energetske tokova modela određen je odnos dobave i potražnje energije sustava. Slika 3-10 prikazuje shemu toka električne i toplinske energije u jedinici vremena. Tablica 3-6 prikazuje određene snage energetske tokova dobave energije sustava.

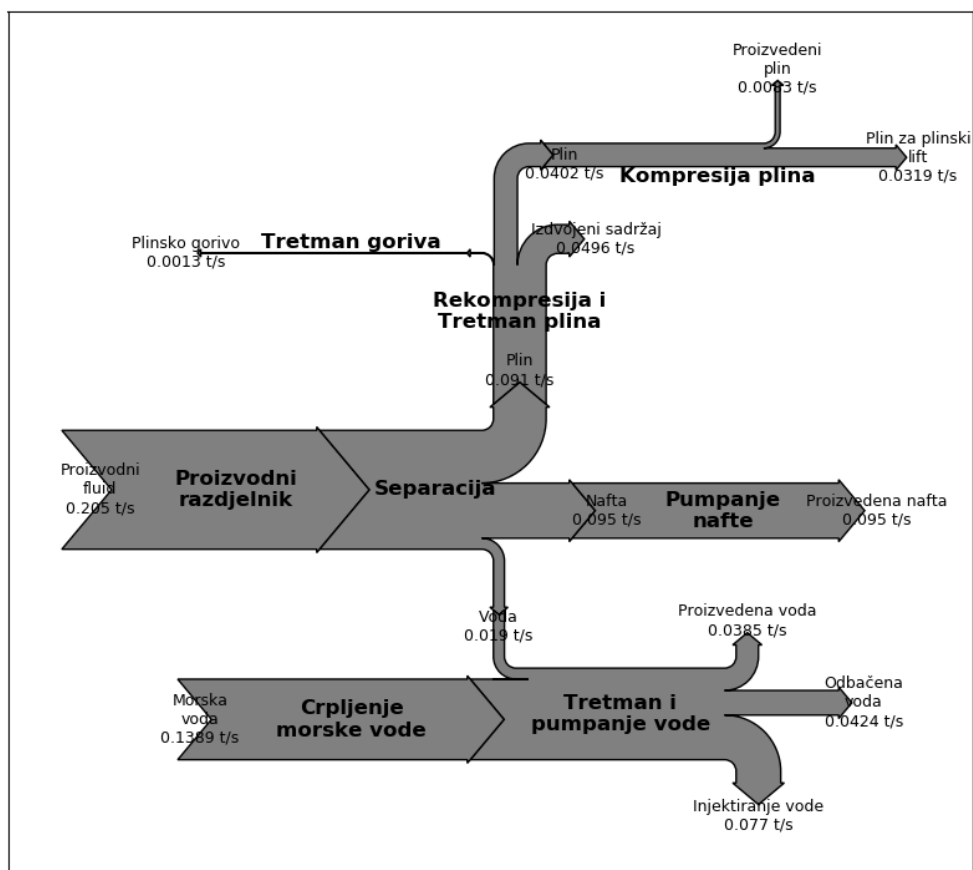


Slika 3-10. Prikaz sheme modelirane električne i toplinske energije

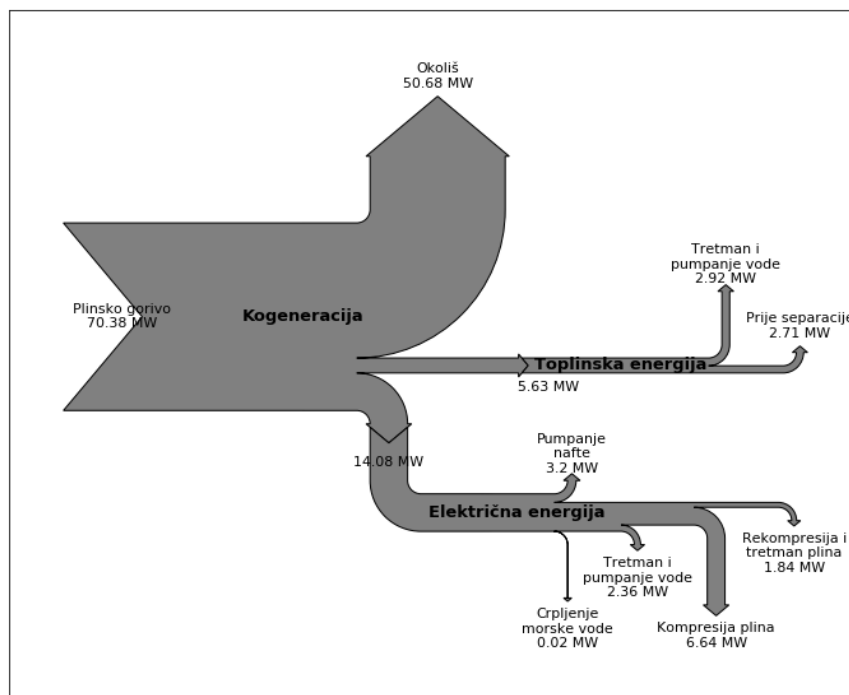
Tablica 3-6. Energetski tokovi dobave energije u jedinici vremena

Podsustav		Ulaz	Izlaz
		Snaga toka ($\dot{H}$) [MW]	Snaga toka ($\dot{H}$) [MW]
Tretman plinskog goriva		70,46	70,38
Kogeneracija	Okoliš	70,38	50,68
	Električna energija		14,08
	Toplinska energija		5,63
Toplinska energija	Prije separacije	5,63	2,71
	Tretman i pumpanje vode		2,92
Električna energija	Rekompresija i tretman plina	14,08	1,84
	Kompresija plina		6,64
	Pumpanje nafte		3,20
	Tretman i pumpanje vode		2,36
	Crpljenje morske vode		0,02

Grafički prikaz masenih i energetskih tokova modela izrađen je prema Sankey modelu grafičkog prikazivanja. Grafički prikaz masenih i energetskih tokova pobliže prikazuje strukturu i dinamiku, te granice sustava izrađenog modela postrojenja. Slika 3-11 prikazuje masene tokove izrađenog teoretskog modela odobalnog proizvodnog naftnog postrojenja. Slika 3-12 prikazuje energetske tokove izrađenog modela.



Slika 3-11. Prikaz masenih tokova modela sustava u jedinici vremena



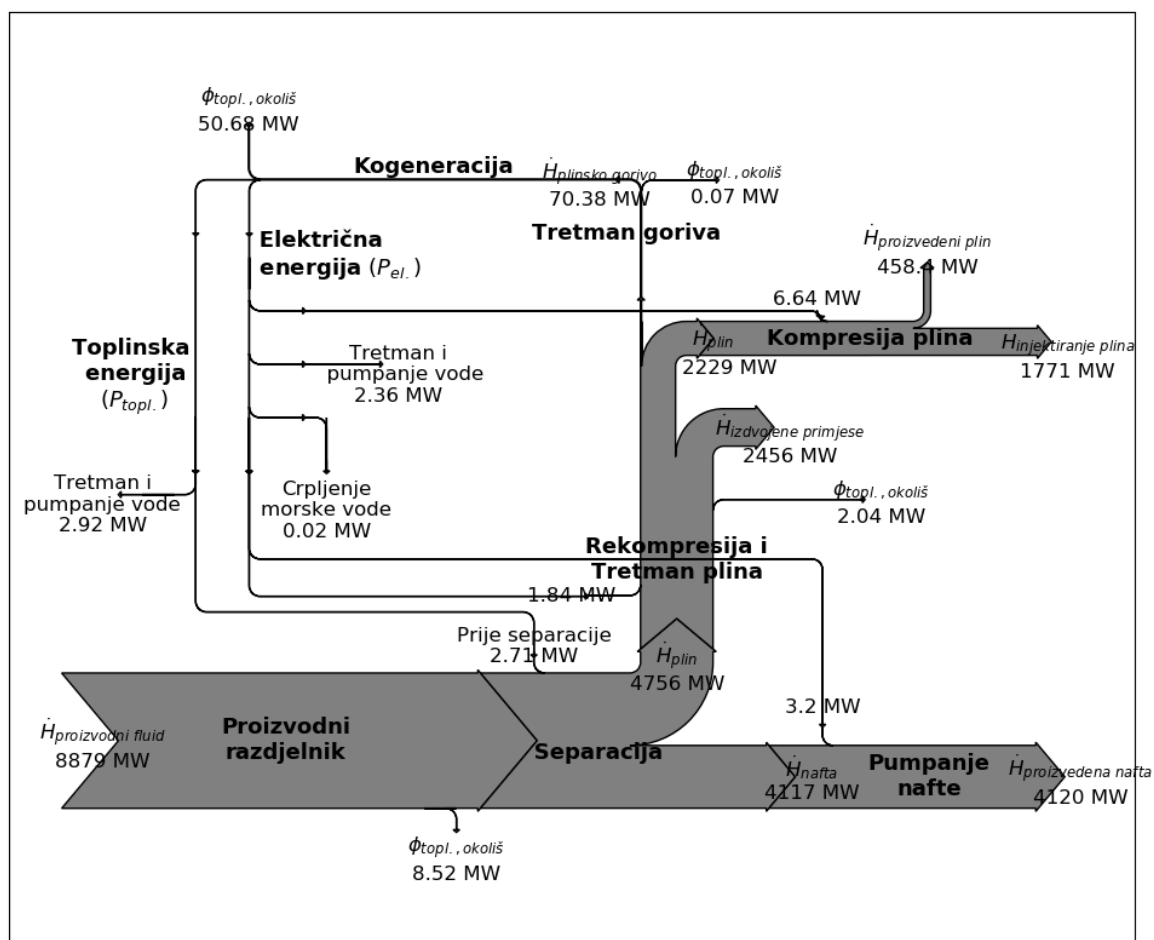
Slika 3-12. Prikaz energetske tokove dobave energije u jedinici vremena

S ciljem ostvarivanja potpunije i točnije energetske procjene modela sustava, modelirani su energetske tokovi cijelog sustava. Energetski tokovi cijeloga sustava omogućavaju određivanje energetskih pokazatelja poput energetske učinkovitosti (η), energetske intenzivnosti (i_h), izgubljene energije (ω_h) i specifične potrošnje energije (w). Zbog složenosti izračuna gornjih ogrjevnih vrijednosti fluida koji su reprezentirani smjesom ugljikovodika i kiselih plinova pri različitim termodinamičkim uvjetima tlaka i temperature, pretpostavljene su specifične gornje ogrjevne vrijednosti ($\dot{h}$) izražene energijom po masi ulaznog proizvodnog fluida u sustav i izlaznog fluida proizvedene nafte, ogrjevne vrijednosti fluida mokrog i kiselog plina pri ulasku u podsustav rekompresije i tretmana plina i očišćenih primjesa plina koje se odbacuju na izlazu iz podsustava rekompresije i tretmana plina izračunate su prema energetskom balansu iz pretpostavljenih vrijednosti. Opisane ogrjevne vrijednosti pretpostavljene su prema statističkom priručniku svjetske energetske agencije (engl. „*International Energy Agency, IEA*“) Garnier et al. (2004). Slika 3-13 prikazuje energetske tokove svih podsustava u jedinici vremena. Tablica 3-7 prikazuje pretpostavljene ogrjevne vrijednosti i dobivene vrijednosti snaga energetskih tokova svih razmatranih podsustava modela.

Tablica 3-7. Dobivene snage energetskih tokova

Pretpostavljene ogrjevnne vrijednosti [MJ/kg]		
Proizvodni fluid	47,73	
Proizvedena nafta	43,32	
Izračunate ogrjevnne vrijednosti [MJ/kg]		
Plinsko gorivo	55,51	
Plin nakon separacije	52,27	
Izdvojeni sadžaj iz separiranog plina	49,55	
Podsustav	Ulaz	Izlaz
	Snaga toka [MW]	Snaga toka [MW]
Proizvodni razdjelnik	8878,78	8870,25
Prije separacije	8870,25	8872,96

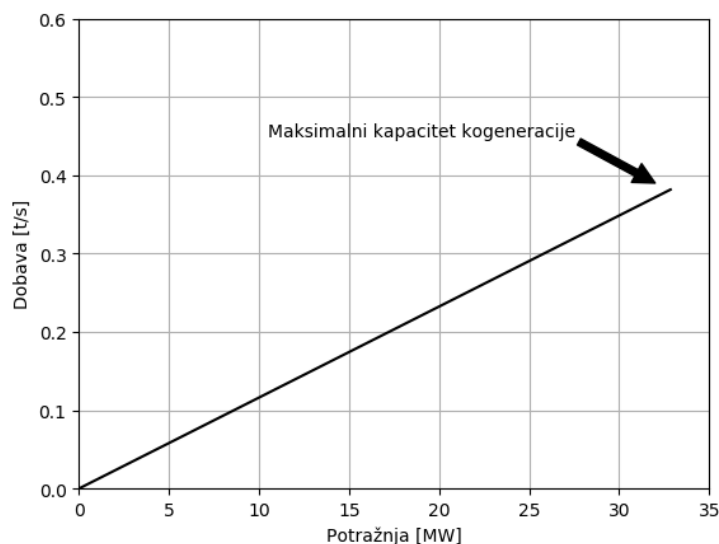
Separacija	Plin	8872,96	4756,33
	Nafta		4116,63
Rekompresija i tretman plina	Plinsko gorivo	4756,33	70,46
	Kompresija plina		2229,22
	Izdvojeni sadržaj		2456,46
Kompresija plina	Proizvedeni plin	2229,22	458,36
	Injektiranje plina		1770,93
Tretman plinskog goriva		70,46	70,38
Pumpanje nafte		4116,63	4119,83



Slika 3-13. Prikaz energetske tokova u jedinici vremena

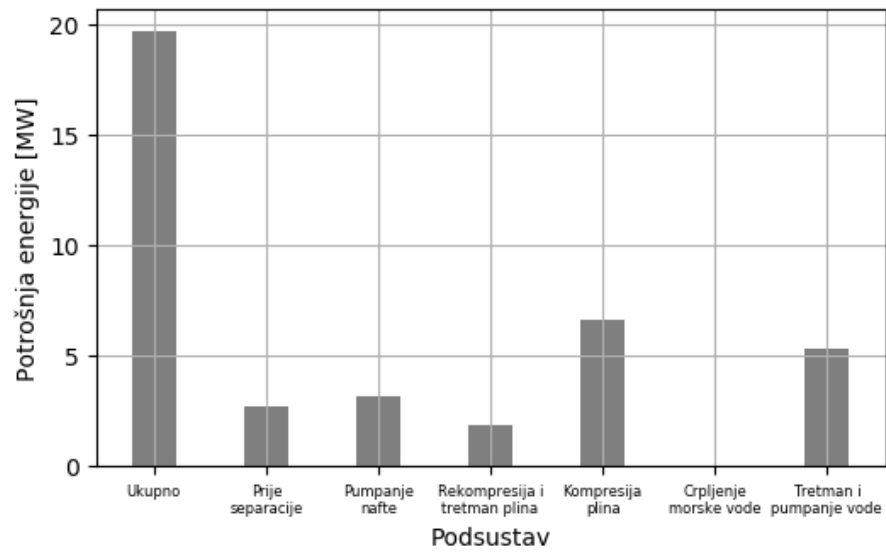
3.3. Analiza rezultata

Teoretski model odobalnog naftnog postrojenja osnovni je reprezentativni pokazatelj dinamike masenih i energetske tokova realnih sustava. Određeni maseni protoci i energetske tokovi svih podsustava modela predstavljaju konačan oblik, funkciju i strukturu teoretskog modela. Dobava ulaznog masenog protoka proizvodnog fluida i potražnja energije podsustava izrađenog modela međusobno su ovisni. Dobava masenog protoka proizvodnog fluida uvjetuje maseni protok plinskog goriva koji svojim izgaranjem unutar podsustava kogeneracije generira dobavu energije za cijeli sustav. Dobavom energije sustava zadovoljava se potražnja energije podsustava modela. Dobava i potražnja energije uvijek trebaju poprimati jednaku vrijednost kako bi sustav mogao funkcionirati. Međutim dobava energije određena je domenom koju uvjetuje nazivni kapacitet rada kogeneracijskog podsustava. Posljedica takve ograničenosti domene vrijednosti dobave energije također uvjetuje domenu vrijednosti potražnje energije. Stoga su potražnja i dobava energije, te dobava ulaznog masenog protoka proizvodnog fluida modela ograničene maksimalnim vrijednostima. Ovisnost dobave ulaznog masenog protoka proizvodnog fluida u sustav i potražnje energije modela za različite pretpostavljene vrijednosti ulazne dobave masenog protoka proizvodnog fluida prikazuje slika 3-14.

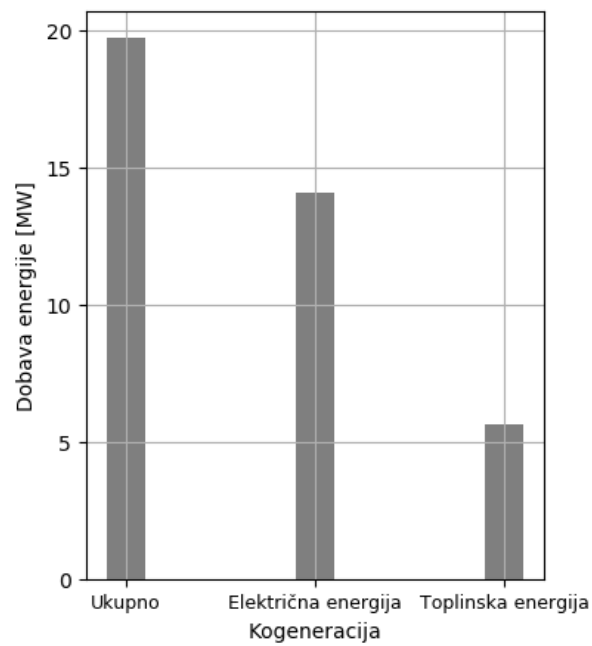


Slika 3-14. Prikaz ovisnosti dobave masenog protoka i potražnje energije

Prikazane vrijednosti dobave masenog protoka i potražnje energije konstantne su kroz vremenski period. Razlog tome je dugovječnost ležišnih uvjeta. Izrađeni model reprezentiran je svojstvima izraženim u jedinici vremenskog intervala. Zbog razlike korištenog vremenskog intervala i vremenskog vijeka ležišnih uvjeta, proizvodni fluid ne mijenja termodinamička svojstva i kemijski sastav, odnosno promjena ležišnih uvjeta je zanemarena. Drugi razlog je funkcioniranje podsustava modela, koji su dimenzionirani za rad pri konstantnom protoku. Moguće promjene dobave masenog protoka proizvodnog fluida, dobave i potražnje energije kroz duži vremenski period dogodile bi se samo kada bi određeni dodatni podsustavi djelomično zaustavili obavljanje svojih funkcija. Slika 3-15 prikazuje simuliranu potrošnju energije podsustava i cijelog sustava u jedinici vremena. Dobivenu potrošnju energije podsustava rekompresije i tretmana plina, kompresije plina, pumpanja nafte, tretmana i pumpanja morske vode i crpljenja morske vode interpretirana je korištenjem električne energije kako bi se ostvario potreban tlačni potencijal i temperaturna promjena, proces opisan promjenom entalpije odgovarajućeg podsustava. Dobivenu potrošnju energije podsustava tretmana i pumpanja vode i prije separacije interpretirana je korištenjem toplinske energije kako bi se ostvarila potrebna promjena temperature i tlaka fluida u promatranoj točki sustava opisana odgovarajućom promjenom entalpije. Dobava energije potrebna za takvu promjenu entalpije podsustava tretmana i pumpanja vode interpretirana je potražnjom energije koja se zadovoljava djelomično iz dobave toplinske energije, a djelomično iz električne energije, kako bi se ostvarila potrebna promjena temperature i tlaka prema podacima koje prikazuje tablica 3-1. Prema dobivenim podacima najveću potrošnju električne energije predstavlja podsustav kompresije plina, što se slaže s rezultatima Van Nguyen et al. (2013) i Voldsund et al. (2013). Ukupna potrošnja energije iznosi 19,71 MW, što je unutar prosjeka vrijednosti od 18-26 MW koje opisuje Van Nguyen et al. (2014). Dobivena učinkovitost pretvorbe energije izgaranja plinskog goriva u električnu energiju iznosi 20,00%, a u toplinsku energiju iznosi 8,00%. Dobivene vrijednosti učinkovitosti generiranja električne i toplinske energije jednake su pretpostavljenoj ukupnoj vrijednosti učinkovitosti generiranja dobave energije s kojom je modeliran podsustav kogeneracije, iznosom od 28%. Slika 3-16 prikazuje simuliranu ukupnu dobavu energije cijelog sustava u jedinici vremena. Dobiveni odnos dobave i potražnje energije teoretskog modela proizvodnog naftnog postrojenja je linearan i funkcija je energetske tokove sustava.



Slika 3-15. Prikaz potrošnje energije u jedinici vremena



Slika 3-16. Prikaz dobave energije u jedinici vremena

Različiti energetske pokazatelji izrađenog modela izvedeni su iz vrijednosti energetskih tokova sustava. Energetska učinkovitost (η) definirana je prema Van Nguyen et al. (2014), omjerom energije akumuliranoj u nafti i plinu koja izlazi iz sustava u jedinici vremena, uključujući energiju akumuliranu u plinu za injektiranje, prema energiji akumuliranoj u proizvodnom fluidu koja ulazi u sustav po jedinici vremena. Energetska učinkovitost modela iznosi 98,95%. Energija akumulirana u fluidu unutar sustava dominirana je kemijskom energijom ugljikovodika. Energija akumulirana u proizvodnom fluidu koja ulazi u sustav po jedinici vremena, korištena za izračun energetske učinkovitosti sustava odnosi se na kemijsku energiju nafte i plina unutar smjese proizvodnog fluida, stoga je za potrebe izračuna komponenta kiselih plinova i komponenta vode zanemarena. Energetska intenzivnost (i_h) definirana je prema Van Nguyen et al. (2014), omjerom akumulirane energije u plinskom gorivu korištenog za generaciju dobave energije prema energiji akumuliranoj u proizvedenom plinu i nafti. Energetska intenzivnost izrađenog modela iznosi 1,54%. Izgubljena energija (ω_h) definirana je prema Van Nguyen et al. (2014), omjerom energije akumulirane u ispušnim plinovima prema energiji akumuliranoj u proizvedenoj nafti i plinu. Izgubljena energija modela iznosi 1,11%. Specifična potrošnja energije (w) definirana je prema Van Nguyen et al. (2014), potrošnjom energije potrebnoj kako bi se proizvela jedna jedinica mase nafte. Specifična potrošnja energije izrađenog modela iznosi 207,40 MJ/t ili 57,61 kWh/t proizvedene nafte. Izračunate vrijednosti energetskih pokazatelja odgovaraju dobivenim vrijednostima prema Van Nguyen et al. (2014). Ovisno o točnosti pretpostavljenih gornjih ogrjevnih vrijednosti, izračunate vrijednosti energetskih pokazatelja energetske učinkovitosti i energetske intenzivnosti izrađenog modela odgovaraju prosječnim vrijednostima realnih sustava, dok dobivene vrijednosti, izgubljene energije i specifične potrošnje energije modela su veće od prosječnih vrijednosti realnih sustava prema Van Nguyen et al. (2014).

4. ZAKLJUČAK

Energetskom analizom utvrđena su svojstva i osnovni energetske pokazatelji promatranog sustava. Teoretski model proizvodnog naftnog postrojenja funkcija je masenih i energetskih tokova izrađenog sustava, što prikazuje slika 3-11 i slika 3-12. Odnos potražnje i dobave energije određuje dinamiku masenih i energetskih tokova modela sustava. Dobava i potražnja energije ograničene su maksimalnim vrijednostima koje su uvjetovane nazivnim kapacitetom rada podsustava kogeneracije. Odnos dobave i potražnje energije je linearan i funkcija je energetskih tokova modela sustava. Najveća potrošnja električne energije karakteristika je podsustava kompresije plina. Dobivene vrijednosti ukupne potrošnje energije u jedinici vremena podudaraju se s vrijednostima prema Van Nguyen et al. (2014). Ukupna dobava energije postrojenja funkcija je generirane energije izgaranjem izdvojene količine plinskog goriva. Dobava energije podijeljena je na električnu i toplinsku energiju. Teoretski model proizvodnog naftnog postrojenja modeliran je za obavljanje svoje funkciju pri konstantnim uvjetima pretpostavljenih ležišnih svojstava. Energetska učinkovitost i energetska intenzivnost modela odgovaraju prosječnim vrijednostima realnih postrojenja. Vrijednosti energetske učinkovitosti i energetske intenzivnosti modela reprezentativni su pokazatelji vrijednosti realnih sustava. Vrijednosti izgubljene energije i specifične potrošnje energije modela veće su od prosječnih vrijednosti realnih sustava. Određeni maseni i energetske tokovi modela predstavljaju konačan oblik, funkciju i strukturu teoretskog modela. Teoretski model odobalnog naftnog postrojenja osnovni je reprezentativni pokazatelj dinamike masenih i energetskih tokova realnih sustava.

5. LITERATURA

GARNIER, J. Y.; METZROTH, L.; REECE, M.; TRÉANTON, K.; ELLIOTT, J.; CASTELLANO, B.; GAVAY, C.; KUBECEK, V.; KUCHTA, J.; D'ORTIGUE, O. L.; TAVOULARIDIS, P.; ROUBANIS, N.; LOESOEENEN, P., 2004. *Energy Statistics Manual*. Paris: OECD/IEA.

HUSSEIN, K. A. A.; AGGOUR, M. A.; FAHIM, M. A., 2003. *Petroleum and gas field processing*. New York: CRC Press.

JONES, D. S. J.; PUJADO, P. P., 2006. *Handbook of petroleum processing*. Dordrecht: Springer Science & Business Media.

LAPENE, A.; NICHITA, D. V.; DEBENEST, G.; QUINTARD, M., 2010. Three-phase free-water flash calculations using a new Modified Rachford-Rice equation. *Fluid Phase Equilibria*, Issue 297, pp. 121-128.

PENG, D. Y.; ROBINSON, D. B., 1976. A New Two-Constant Equation of State. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15(1), pp. 59-64.

PRATT, R. M., 2001. Thermodynamic properties involving derivatives Using the Peng-Robinson Equation of State. *Chemical Engineering Education*, pp. 112-115.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; Abbott, M. M., 2001. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. 6th ur. New York: McGraw-Hill.

VAN NGUYEN, T.; OLIVEIRA, J. S., 2018. System evaluation of offshore platforms with gas liquefaction processes. *Energy*, Issue 144, pp. 594-606.

VAN NGUYEN, T.; VOLDSUND, M.; BREUHAUS, P.; ELMEGAARD, B., 2016. Energy efficiency measures for offshore oil and gas platforms. *Energy*, Issue 117, pp. 325-340.

VAN NGUYEN, T.; JACYNO, T.; BREUHAUS, P.; VOLDSUND, M.; ELMEGAARD, B., 2014. Thermodynamic analysis of and upstream petroleum plant operated on a mature field. *Energy*, Issue 68, pp. 454-469.

VAN NGUYEN, T.; PIEROBON, L.; ELMEGAARD, B.; HAGLIND, F.; BREUHAUS, P.; VOLDSUND, M., 2013. Exergetic assessment of energy systems on North Sea oil and gas platforms. *Energy*, Issue 62, pp. 23-36.

VOLDSUND, M.; NGUYEN, T. V.; ELMEGAARD, B.; ERTESVAG, I. S.; ROSJORDE, A.; JOSSANG, K.; KJELSTRUP, S., 2014. Exergy destruction and losses on four North Sea offshore platforms: A comparative study of the oil and gas processing plants. *Energy*, Issue 74, pp. 45-58.

VOLDSUND, M.; ERTESVAG, I. S.; HE, W.; KJELSTRUP, S., 2013. Exergy analysis of the oil and gas processing on a North Sea oil platform a real production day. *Energy*, Issue 55, pp. 716-727.

Izjava

Ovom izjavom izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja i vještina stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu, Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Vedran Gojković