

# Matematički model kogeneracijskog postrojenja na gorivo iz otpada

---

**Slunjski, Mihael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:867588>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mihael Slunjski**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Daniel R. Schneider, dipl. ing.

Student:

Mihael Slunjski

Zagreb, 2016.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se svim svojim nastavnicima i profesorima na pruženom znanju tijekom školovanja.*

*Posebno bih se želio zahvaliti svom mentoru prof. dr. sc. Danielu R. Schneideru na vremenu, strpljenju i trudu uloženom u mentorstvo ovoga rada te na korisnim savjetima i informacijama koje su mi uvelike pomogle prilikom pisanja ovog rada*

*Zahvaljujem se i dr. sc. Stjepku Katuliću, mag. ing., koji mi je uvelike pomogao oko razumijevanja i izrade rada dajući prijedloge i savjete.*

*Osim toga, želio bih se zahvaliti svim prijateljima i rodbini, a posebno svojim roditeljima Draženu i Maji Mariji na pruženoj potpori te strpljenju i razumijevanju koje su imali za mene tijekom svih ovih godina školovanja.*

Mihael Slunjski



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Mihael Slunjski

Mat. br.: 0035181290

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model kogeneracijskog postrojenja na gorivo iz otpada**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of a cogeneration plant fuelled by RDF**

Opis zadatka:

Održivo gospodarenje otpadom ne isključuje i njegovu energetska uporabu. Energija na gorivo proizvedeno iz otpada (GIO) koristi tehnologiju izgaranja u mješovitom fluidiziranom sloju. Postrojenje radi u kogeneracijskom načinu proizvodeći električnu energiju i procesnu paru (toplinska energija) za susjedno industrijsko postrojenje (papirna industrija). Toplinska snaga kotla je 40 MW a ogrjevna vrijednost goriva iz otpada (ambalažni otpad, neiskoristivi otpad od reciklaže, otpadno drvo, kanalizacijski mulj) kreće se u rasponu 8-18 MJ/kg. Kotao je troprolazni s ozračenim i konvektivnim dijelom, kao i odvojenim dijelom kotla na otpadnu toplinu. Cirkulacija je prirodna, kotao je s bubnjem. Postoji recirkulacija dimnih plinova kao i sekundarno uvođenje zraka za izgaranje (naknadno izgaranje). Parna turbina sastoji se od visokotlačnog i niskotlačnog dijela. Kondenzator je zrakom hlađen. Sve onečišćujuće tvari iz dimnih plinova efikasno se uklanjaju višestrukim sustavima za čišćenje dimnih plinova (filtri, cikloni, SCR DeNOx, mokro ispiranje, aktivni ugljen). Glavni parametri postrojenja su sljedeći (ostali potrebni podaci mogu se dobiti kod mentora):

Maseni tok svježe pare je: 48 t/h

Parametri svježe pare su: 44 bar/400 °C

Električna snaga postrojenja (maksimalna): 7,5 MW

Procesna para za industriju (toplinska energija): 31 t/h

Potrebno je:

1. Napraviti matematički model kogeneracijskog postrojenja na gorivo iz otpada (koje se sastoji od generatora pare sa svim izmjenjivačima, parne turbine, kondenzatora i pumpi) u programskom paketu Matlab,
2. Provesti simulaciju rada postrojenja pri nekoliko različitih opterećenja, počevši od tehničkog minimuma (60%) do tehničkog maksimuma (100%),
3. Izračunati ukupni stupanj iskoristivosti (efikasnost) postrojenja pri različitim opterećenjima, kao i električni te toplinski stupanj iskoristivosti.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.

Predviđeni datumi obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**Sadržaj**

1	Gospodarenje otpadom.....	1
1.1	Obrada otpada.....	2
1.1.1	Mehaničko biološka obrada .....	2
1.1.2	Obrada s obzirom na vrstu .....	3
1.2	Odlaganje.....	4
2	Energija iz otpada.....	5
2.1	Spaljivanje .....	5
2.2	Ostali načini dobivanja energije iz otpada.....	6
2.3	Razvoj dobivanja energije iz otpada.....	7
2.4	Emisija ugljičnog dioksida .....	8
2.5	Gorivo iz otpada (RDF/SRF).....	8
3	Spalionice otpada .....	10
3.1	Vrste spalionica .....	11
3.2	Proizvodnja energije iz otpada .....	11
3.3	Onečišćenje.....	11
3.4	Primjeri spalionica otpada .....	12
4	Tehnologije izgaranja.....	13
4.1	Tehnologija izgaranja na rešetci .....	13
4.2	Tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju.....	13
4.2.1	Mjehuričasti fluidizirani sloj (BFB).....	15
4.2.2	Cirkulirajući fluidizirani sloj (CFB).....	16
4.3	Zadani sustav .....	18
5	Direktiva 2000/76/EZ[12].....	22
5.1	Uvjeti rada postrojenja.....	23
5.2	Granične vrijednosti emisija u zrak (Prilog V.).....	24
6	Kogeneracija.....	28
6.1	Postrojenje protutlačne turbine.....	29

6.2	Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare .....	30
7	Matematički model.....	32
7.1	Carnotov ciklus.....	32
7.2	Rankineov ciklus .....	33
7.3	Matematički model spalionice.....	35
7.3.1	Promjene stanja .....	35
7.3.2	Tokovi energije .....	39
7.3.3	Ostalo .....	41
8	Rezultati .....	42
8.1	Analiza Rankineovog ciklusa .....	42
8.1.1	Matematički model Rankineovog ciklusa .....	42
8.1.2	Simulacija Rankineovog ciklusa između 60% i 100% nazivnog masenog protoka svježe pare.....	49
8.1.3	Stupnjevi iskorištenja Rankineovog ciklusa u ovisnosti o masenom protoku svježe pare	52
8.1.4	Simulacija Rankineovog ciklusa pri različitim temperaturama kondenzacije .....	52
8.1.5	Promjena masenog protoka svježe pare uslijed promjene temperature kondenzacije	53
8.1.6	Iskoristivosti Rankineovog ciklusa uslijed promjene temperature kondenzacije ...	57
8.2	Analiza rada postrojenja .....	57
8.2.1	Područje rada kotla.....	58
8.2.2	Simulacija rada kotla s gorivima različitih donjih ogrjevnih vrijednosti .....	59
8.2.3	Poveznica između temperature kondenzacije $\vartheta_{\text{kond}}$ i temperature okoliša $\vartheta_{\text{ok}}$ .....	61
9	Zaključak.....	63
10	Literatura .....	64

**Popis slika**

Slika 1.1.	Održivo gospodarenje otpadom [3].....	2
Slika 3.1.	Spalionica otpada Spittelau (Beč, Austrija)[5].....	10
Slika 4.1.	Kritična brzina fluidizacije.....	14
Slika 4.2.	Shema ložišta.....	16
Slika 4.3.	Shema ložišta.....	17
Slika 4.4.	Nacrt kotla [10] .....	18
Slika 4.5.	Profili temperatura i volumnog udjela kisika po visini kotla [11] .....	19
Slika 4.6.	Ovisnost iskoristivosti kotla o donjoj ogrjevnoj vrijednosti [11].....	20
Slika 4.7.	Ovisnost pretička zraka o donjoj ogrjevnoj vrijednosti[11].....	21
Slika 6.1.	Shema postrojenja protutlačne turbine .....	29
Slika 6.2.	Kruta veza proizvodnje toplinske i električne energije .....	30
Slika 6.3.	Shema kondenzacijskog postrojenja s reguliranim oduzimanjem pare .....	31
Slika 7.1.	Carnotov ciklus u $p,v$ i $T,s$ dijagramu.....	32
Slika 7.2.	Rankineov ciklus u svom osnovnom obliku i četiri osnovne komponente [15] .....	33
Slika 7.3.	$T,s$ dijagram tipičnog realnog Rankineovog ciklusa između tlakova 0,06 bar i 50 bar [15] .....	34
Slika 7.4.	Shema kogeneracijskog postrojenja .....	35
Slika 8.1.	$T,s$ dijagram.....	48
Slika 8.2.	Ovisnost toplinskih tokova o opterećenju .....	50
Slika 8.3.	Ovisnost masenih protoka o opterećenju .....	51
Slika 8.4.	Ovisnost snage o opterećenju .....	51
Slika 8.5.	Ovisnost iskoristivosti o opterećenju .....	52
Slika 8.6.	Ovisnost sadržaja pare o temperaturi kondenzacije .....	53
Slika 8.7.	Ovisnost opterećenja o temperaturi kondenzacije.....	54
Slika 8.8.	Ovisnost masenih protoka o temperaturi kondenzacije.....	55
Slika 8.9.	Ovisnost toplinskih tokova o temperaturi kondenzacije .....	56
Slika 8.10.	Ovisnost snaga o temperaturi kondenzacije .....	56
Slika 8.11.	Ovisnost stupnjeva iskoristivosti o temperaturi kondenzacije .....	57
Slika 8.12.	Područje rada kotla.....	59
Slika 8.13.	Ovisnost ukupne iskoristivosti postrojenja o donjoj ogrjevnoj vrijednosti $H_d$ .....	60
Slika 8.14.	Ovisnost ukupne iskoristivosti o opterećenju i donjoj ogrjevnoj vrijednosti.....	61
Slika 8.15.	Ovisnost protoka goriva o temperaturi okoliša .....	62



**Popis tablica**

Tablica 5.1.	Prosječne dnevne vrijednosti .....	25
Tablica 5.2.	Prosječne polusatne vrijednosti .....	25
Tablica 5.3.	Prosječne vrijednosti tokom oglednog razdoblja.....	26
Tablica 5.4.	Granične vrijednosti emisije dioksina i furana .....	26
Tablica 8.1.	Ulazni podatci.....	42
Tablica 8.2.	Rezultati proračuna.....	47
Tablica 8.3.	Rezultati proračuna u točkama Rankineovog ciklusa.....	48
Tablica 8.4.	Parametri rada kotla pri različitim opterećenjima .....	49
Tablica 8.5.	Minimalna temperatura kondenzacije .....	53
Tablica 8.6.	Ograničenja rada kotla.....	58

**Popis kratica**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
BFB	mjehurićasti fluidizirani sloj
CFB	cirkulacijski fluidizirani sloj
DeNO <sub>x</sub>	sustav uklanjanja dušikovih oksida
DeSO <sub>x</sub>	sustav uklanjanja sumporovih oksida
EKO	ekonomajzer
ISPAR	isparivač
LHV	donja ogrjevna vrijednost
MBT	mehaničko-biološki tretman
NT	niskotlačni dio turbine
PREGR	pregrijač pare
RDF	gorivo iz otpada
SRF	oporabljeno kruto gorivo
TOC	ukupni organski ugljik
VT	visokotlačni dio turbine

**Popis oznaka**

Oznaka	Mijerna jedinica	Opis
$h$	J/(kg K)	entalpija
$P_{NT}$	W	Snaga na niskotlačnom dijelu turbine
$P_{UK}$	W	Ukupna snaga
$P_{VT}$	W	Snaga na visokotlačnom dijelu turbine
$P_{P1}$	W	Snaga na niskotlačnoj pumpi oduzimanja
$P_{P2}$	W	Snaga na niskotlačnoj pumpi kondenzata
$P_{P3}$	W	Snaga na visokotlačnoj pumpi
$Q_h$	W	Toplina dovedena u kotlu
$Q_{eko}$	W	Toplinski tok doveden u ekonomajzeru
$Q_{isp}$	W	Toplinski tok doveden u isparivaču
$Q_{kog}$	W	Toplinski tok odveden prema industriji papira
$Q_{kond}$	W	Toplinski tok odveden u kondenzatoru
$Q_{pre}$	W	Toplinski tok doveden u pregrijaču
$x$	kg/kg	Sadržaj pare
$\eta_{NT}$	%	Iskoristivost niskotlačne turbine
$\eta_{VT}$	%	Iskoristivost visokotlačne turbine
$\eta_{P1}$	%	Iskoristivost niskotlačne pumpe oduzimanja
$\eta_{P2}$	%	Iskoristivost niskotlačne pumpe kondenzata
$\eta_{P3}$	%	Iskoristivost visokotlačne pumpe

## **SAŽETAK**

Otpad je jedan od najvećih problema današnjice, stoga je u budućnosti potrebno uložiti znatno više truda, vremena i novaca u sustave gospodarenja otpadom. Na količinu otpada znatno se može utjecati već prilikom dizajniranja proizvoda, a mogućnosti recikliranja otpada, najboljeg načina saniranja otpada, značajno su umanjene zbog needuciranosti građana.

Dok se stanje svijesti građana i lokalni pristup gospodarenju otpadom ne promjeni, te sustav gospodarenja otpadom bude spreman za kvalitetnije recikliranje otpada, dovoljno dobra alternativa je spaljivanje otpada.

Iako su spalionice otpada u javnosti najčešće prikazane kao veliki zagađivači okoliša, one to zapravo nisu. Spalionice otpada podliježu Direktivi o spaljivanju i suspaljivanju otpada u kojoj su strogo definirani uvjeti rada i granične vrijednosti onečišćujućih tvari. Kako bi zadovoljile zahtjeve Direktive spalionice otpada moraju imati sofisticirane sustave izgaranja i obrade dimnih plinova, kao što je na primjer izgaranje u fluidiziranom mješurastom sloju, DeNOx i DeSOx sustavi, sustavi odvajanja teških metala. Prema pisanju časopisa New York Times, moderne spalionice su toliko čiste, imaju tako male emisije štetnih plinova u atmosferu da daleko veću opasnost od emitiranja dioksina u atmosferu predstavljaju ispusti iz kamina u domaćinstvu ili s dvorišnih roštilja nego iz spalionice.

Osim smanjenja volumena otpada, spalionice se koriste i pri generiranju pare u kotlovima postrojenja za proizvodnju električne energije.

Ako se postrojenje za spaljivanje otpada izgradi pokraj tvornice kojoj je potrebna para za tehnološki proces ili u blizini stambenog bloka, spalionica se može koristiti za kogenerativnu proizvodnju električne i toplinske energije. Kogeneracijska postrojenja učinkovitija su od termoelektrana koje proizvode samo električnu energiju jer im je ukupna iskoristivost znatno viša.

U ovom radu obrađena je problematika matematičkog modela Rankineovog procesa kogeneracijske spalionice otpada. Prikazane su promjene parametara postrojenja u različitim režimima rada (60% do 100% opterećenja), ovisnosti snaga, masenih i energetske tokova i iskoristivosti u ovisnosti o temperaturama kondenzacije.

**SUMMARY**

Waste is one of the biggest problems of today, consequently we need to invest considerably more effort, time and money in waste management systems. Waste quantity can be significantly reduced in the product desining stage, while recycling capacity, best way to handle waste, is greatly diminished due to lack of education of average citizen.

Until our state of mind and local waste management makes noticable change, or until our waste recycling systems improve in quality, good enough alternative is to burn it.

Although waste incinerators are seen as great polluters by the public, that is not the fact. Waste incinerators are subject to the Waste Incineration Directive in which strict rules and conditions define allowed pollutant emmissions. In order to meet those rules waste incinerators must have sophisticated incineration and flue gases tretment systems. E.g. combustion in a fluidized bubble coat, DeNO<sub>x</sub> i DeSO<sub>x</sub> systems, heavy metal separation systems. According to New York Times, modern waste incinerators are so clean, and emmit so few pollutants, that they outperform household fireplaces and barbecues in dioxin emissions.

Apart from waste volume reduction, incinerators generate steam for production of electrical energy.

Waste incinerators can be used for combined electricity and heat production if built near a factory which utilizes heat or near residential area. Combined electricity and heat production plants are more efficient than power plants where only electricity is generated.

This paper deals with mathematical model of Rankine process in waste incinerator with combined heat and electricity generation. It is shown how different parameters change depending on different loads (60% - 100%), different power outputs, mass and energy flows and efficiency changes in correlation with condensation temperature.

# **1 GOSPODARENJE OTPADOM**

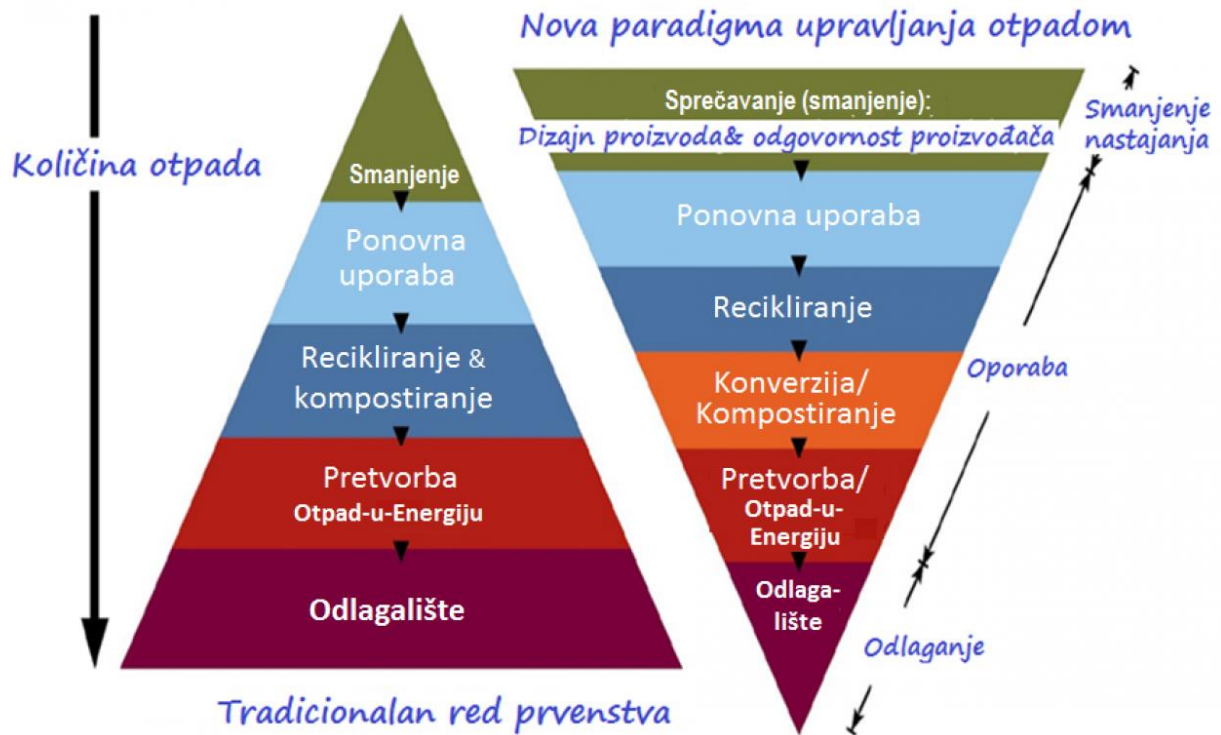
Gospodarenje otpadom [1] vrlo je složena djelatnost koja zahvaća sve grane gospodarstva, proizvodnje i potrošnje, a sadrži čitav niz postupaka i tehnologija od kojih se velik dio primjenjuje u različitim oblicima.

U okviru cjelovitog sustava gospodarenja otpadom, zastupljeni su sljedeći važniji postupci, zavisno o vrsti i svojstvima otpada:

- Izbjegavanje nastajanja otpada i smanjivanje opasnih svojstava:
- Skupljanje i prijevoz otpada,
- Vrednovanje – uporaba otpada:
  - odvojeno skupljanje,
  - reciklaža,
  - mehanička obrada,
  - spaljivanje s i bez rekuperacije energije
  - piroliza
  - biološka obrada - anaerobna, aerobna i mehaničko-biološka
  - termička obrada,
  - kemijsko-fizikalna obrada,
  - Konačno zbrinjavanje ostatnog otpada - odlaganje na deponiju s i bez proizvodnje bioplina

Zakon o održivom gospodarenju otpadom (NN 94/13) definirao je red prvenstva gospodarenja otpadom na sljedeći način:

1. sprječavanje nastanka otpada (mjere kojima se smanjuju količine otpada uključujući ponovnu uporabu proizvoda ili produženje životnog vijeka proizvoda),
2. priprema za ponovnu uporabu (postupci uporabe kojima se proizvodi ili dijelovi proizvoda koji su postali otpad provjerom, čišćenjem ili popravkom, pripremaju za ponovnu uporabu bez dodatne prethodne obrade),
3. recikliranje (svaki postupak uporabe, kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu, osim uporabe otpada u energetske svrhe, odnosno prerade u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za zatrpavanje),
4. drugi postupci uporabe npr. energetska uporaba i
5. zbrinjavanje otpada. [2]



Slika 1.1. Održivo gospodarenje otpadom [3]

## 1.1 Obrada otpada

### 1.1.1 Mehaničko biološka obrada

Cilj mehaničko bioloških obrada je smanjiti volumen obrađenom komunalnom otpadu, kroz izdvajanje pojedinih vrsta otpada koje se mogu sirovinski iskoristiti.

#### *Kompostiranje*

Kompostiranje je prirodan proces razgradnje biomase. Priroda sama reciklira svoj otpad u kružnom sustavu izmjene tvari i energije. Procesom kompostiranja nastaje visokovrijedan kompost (humus) te CO<sub>2</sub> kao posljedica metabolizma razgrađivača. Više od trećine ukupnog otpada koji nastaje u domaćinstvima je biootpad. Njegovim izdvajanjem tj. kompostiranjem, ne samo da smanjujemo količinu otpada na deponijima najmanje za trećinu, već i ostali otpad pogodan za recikliranje čuvamo od onečišćenja i neugodnih mirisa koji bi mogli nastati miješanjem. Također kompostiranjem čuvamo atmosferu od stakleničkih plinova, jer se na

deponijima biootpad anaerobno razgrađuje, tj. bez prisustva kisika što uz neugodan miris predstavlja i zapaljivi plin metan koji je 25 puta intenzivniji staklenički plin od CO<sub>2</sub>.

### *Fermentacija*

Fermentacija je anaerobna biološka obrada otpada i češće se primjenjuje u obradi muljeva, pri čemu se stvara bioplina kao glavni produkt fermentacije.

### *Termička obrada*

Osnovne vrste termičke obrade otpada su: spaljivanje (suspaljivanje) i piroliza. Prilikom termičke obrade otpada elementarne tvari se ne mogu uništiti. U dimnim plinovima nakon izgaranja one međusobno reagiraju pa nastaju novi spojevi, među kojima najpoznatiji otrovi današnjice: dioksini i furani. Spaljivanje ne pridonosi održivom razvoju, jer je dio linearne ekonomije, tj. ne omogućava slijedećim generacijama korištenje resursa. Ono što se može ponovno koristiti, reciklirati ili kompostirati treba ostaviti i za buduće generacije i nema opravdavanja za spaljivanje. Ostatni dio koji se ne može iskoristiti niti reciklirati može se pretvoriti u sintetički pijesak, oporabiti pirolizom, što je daleko prihvatljivije od spaljivanja u spalionicama i cementarama.

#### ***1.1.2 Obrada s obzirom na vrstu***

Komunalni otpad može se reciklirati, spaliti, pirolizirati, od njega se može proizvoditi gorivo, biološki obraditi i odložiti na deponij.

Industrijski otpad može se reciklirati, spaliti, pirolizirati, od njega se ne može proizvoditi gorivo, ni biološki obraditi, smije ga se odložiti na deponij.

Poljoprivredni otpad ne može se reciklirati, može ga se spaliti i pirolizirati, od njega se može proizvoditi gorivo, biološki ga obraditi, smije ga se odložiti na deponij.

Bolnički otpad ne može se reciklirati, može ga se spaliti i pirolizirati, od njega se ne može proizvoditi gorivo, ni biološki obraditi, niti ga se smije odložiti na deponij.

Građevinski otpad, pepeo i mulj jedino se smije odložiti na deponij.



Opasni otpad ne može se reciklirati, može ga se spaliti i pirolizirati, od njega se ne smije proizvoditi gorivo, ni biološki obraditi, niti ga se smije odložiti na deponij. Radioaktivni otpad spada u opasni otpad.

## **1.2 Odlaganje**

Odlaganjem otpada procesom raspadanja organskog dijela nastaje deponijski plin, a u kontaktu s vodom nastaju procjedne vode, stoga odlagališta trebaju biti izvedena kako bi se spriječilo dugoročno onečišćenje okoliša.

## 2 ENERGIJA IZ OTPADA

Korištenje otpada u proizvodnji energije ili energija iz otpada je proces dobivanja energije u obliku električne energije ili topline iz spaljivanja otpada. Otpadna energija je obnovljeni oblik energije. Većina procesa dobivanja električne energije iz otpadne energije sastoji se od izravnog spaljivanja, ili od dobivanja zapaljivog gorivog proizvoda, kao što su metan, metanol, etanol ili sintetička goriva. [4]

### 2.1 Spaljivanje

Spaljivanje, sagorijevanje organskog materijala kao što je otpad s mogućnošću obnavljanja energije je najčešći i najrašireniji oblik realizacije dobivanja energije iz otpada. Sva nova postrojenja za energiju iz otpada u Organizaciji za ekonomsku suradnju i razvoj moraju zadovoljiti određene emisijske standarde, uključujući one za dušikove okside ( $\text{NO}_x$ ), sumporov dioksid ( $\text{SO}_2$ ), teške metale i dioksine. Stoga, moderni tipovi spalionica za energiju iz otpada neusporedivo se razlikuju od starih tipova spalionica, od kojih neke niti su koristile obnovu energije niti obnovu materijala. Moderne spalionice smanjuju volumen originalnog otpada za 95-96 %, ovisno o sastavu i stupnju, mjeri obnavljanja materijala kao što je upotreba pepela u recikliranju.

Zabrinutost u vezi s radom spalionica odnosi se na emisije finih čestica, teških metala, dioksina (u tragovima) i emisija kiselih plinova, makar su te emisije relativno niske kod modernih spalionica. Također postoji zabrinutost koja uključuju zbrinjavanje otrovnog pepela koji odlazi u zrak i spaljenog pepela koji ostaje na dnu kao šljaka nakon spaljivanja. Rasprave o etici otpadnih resursa uključuju mišljenje da spalionice uništavaju vrijedne resurse, kao i strah da one mogu smanjiti poticaje i aktivnosti u recikliranju otpada. Spalionice imaju električne učinkovitosti reda veličine 14-28 %. Ostatak energije može biti iskorišten za npr. područno grijanje iz toplane, ili ostati neiskorišten u obliku otpadne topline.

Metoda korištenja spalionica za pretvorbu komunalnog otpada u energiju je relativno stara metoda proizvodnje energije iz otpada. Spaljivanjem se općenito podrazumijeva izgaranje goriva dobivenog iz otpada, koji služi za proizvodnju pregrijane pare koja napaja parne turbine koji onda proizvode električnu energiju za kućanstva i poslovne objekte. Jedan problem povezan sa pretvorbom spaljenog komunalnog otpada u električnu energiju je veliki potencijal da zagađeni dimni plinovi pušteni iz kotla uđu u atmosferu. Navedeni zagađeni dimni plinovi mogu biti kiselog djelovanja i 1980-ih uzrokovali su ekološku katastrofu pretvarajući običnu kišu u kiselu kišu. Od

toga događaja, industrija je riješila taj problem upotrebom vapnenih četki i elektrostatskih taložnika u dimnjacima. Mineral vapnenca korišten u ovim četkama ima pH vrijednost reda veličine 8 što znači da je lužnat. Prolaskom dima kroz vapnene četke, sve kiseline koje mogu biti sadržane u dimu će biti neutralizirane (kiselina + lužina = sol + voda). Na taj način vapnene četke sprječavaju emisiju kiselina u atmosferu, a time i mogućnost ekološke katastrofe (kisele kiše). Prema pisanju časopisa New York Times-a, moderne spalionice su toliko čiste, imaju tako male emisije štetnih plinova u atmosferu da daleko veću opasnost od emitiranja dioksina u atmosferu predstavljaju ispusti iz kamina u domaćinstvu ili s dvorišnih roštilja nego iz spalionice.

## 2.2 Ostali načini dobivanja energije iz otpada

Postoji niz drugih novih tehnologija koje omogućavaju proizvodnju energije iz otpada i drugih goriva bez izravnog spaljivanja. Mnoge od ovih tehnologija imaju veliki potencijal za proizvodnju većeg udjela električne energije iz iste količine sirovine nego što bi se proizvelo izravnim spaljivanjem. To je uglavnom zbog odvajanja korozivnih komponenti (pepeo) iz pretvorenog goriva, čime se omogućava viša temperatura sagorijevanja u npr. kotlovima, plinskim turbinama, motorima s unutarnjim izgaranjem, gorivnim člancima. Neke su u mogućnosti učinkovito pretvoriti energiju u tekuća ili plinovita goriva:

Termičke tehnologije:

- Uplinjavanje (omogućava proizvodnju gorućeg plina, vodika, sintetičkih goriva)
- Termička depolimerizacija (proizvodnja sintetičkih grubih goriva, koja nadalje mogu biti poboljšana)
- Piroлиза (proizvodnja gorućeg katrana/bioulja i ugljena)
- Plazma-lučno uplinjavanje ili proces plazma uplinjavanja (PGP) (proizvodi bogati sintetski plin uključujući vodik i ugljični monoksid upotrebljiv kod gorivih ćelija ili za generiranje električne energije za pogon plazma luka, iskoristivih keramičkih silikata i metalnih ingota, sol i sumpor)

Netermičke metode:

- Anaerobna razgradnja (Bioplin bogat metanom)
- Fermentacija proizvodnja vrenja (primjeri su etanol, mliječna kiselina, vodik)
- Mehanički biološki tretman (MBT)

- MBT + Anaerobna razgradnja
- MBT za Gorivo dobiveno iz otpada

### 2.3 Razvoj dobivanja energije iz otpada

Tijekom razdoblja 2001-2007 godine, godišnji kapacitet otpadne energije povećan je za otprilike četiri milijuna metričkih tona. Japan i Kina izgradili su nekoliko postrojenja čiji je princip rada baziran na izravnom taljenju ili na izgaranju u fluidiziranom sloju krutog otpada. U Kini postoji oko 50 takvih postrojenja. Japan je najveći korisnik termičke obrade komunalnog otpada u svijetu s udjelom od 40 milijuna tona. Neka od najnovijih postrojenja koriste ložačku tehnologiju, dok neka koriste naprednu tehnologiju obogaćivanja kisikom. Tu je i preko sto toplinskih postrojenja za pročišćavanje koje koriste relativno nove procese kao što je izravno taljenje, proces Ebara fluidizacije i termo-JFE proces uplinjavanja i taljenja. Indija je prvi bio-znanstveni centar razvila s ciljem kako bi smanjila udjel stakleničkih plinova u zemlji i vlastitu ovisnost o fosilnim gorivima.

Biofuel Energy Corporation of Denver, CO, je otvorila dva nova postrojenja biogoriva u Wood Riveru, NE, i Fairmont, MN, u srpnju 2008. godine. Ova postrojenja koriste destilaciju za dobivanje etanola koji se koristi za uporabu u motornim vozilima i drugim motorima. Oba postrojenja su trenutno na glasu da rade na više od 90% kapaciteta. Fulcrum BioEnergy inc. s bazom u Pleasantonu, CA, izgradilo je postrojenje za otpadnu energiju u blizini Rena, NV. Postrojenje je otvoreno početkom 2010. pod imenom Sierra BioFuels postrojenje.

Tehnologije otpadne energije uključuju fermentaciju, što može koristiti biomasu i stvoriti etanol, koristeći otpad celuloznog ili organskog materijala. U procesu fermentacije, šećer u otpadu pretvoren je u ugljični dioksid i alkohol, na isti način kao što se to događa u procesu proizvodnje vina. Općenito, fermentacija se odvija bez prisustva zraka. Esterifikacija se također može postići tehnologijom otpadne energije, a kao rezultat dobije se biodizel. Isplativost esterifikacije ovisit će o sirovini koja se koristi, i svim ostalim relevantnim faktorima kao što su udaljenost transporta, količina ulja prisutna u sirovini, i ostalim stvarima. Plinifikacija i piroliza sada mogu postići bruto učinkovitost toplinske pretvorbe u vrijednosti od 75%, međutim potpuno izgaranje je postignuto u uvjetima učinkovite pretvorbe goriva. Neki procesi pirolize trebaju vanjski izvor topline koji može biti isporučen od strane procesa plinifikacije, što omogućava da kombinirani proces bude samoodrživ.

## 2.4 Emisija ugljičnog dioksida

U termalnim tehnologijama otpadne energije, gotovo sav sadržaj ugljika iz otpada se emitira kao ugljični dioksid CO<sub>2</sub> u atmosferu (kada uključimo i završno izgaranje proizvoda iz pirolize i uplinjavanja; osim pri proizvodnji bio-ugljena za gnojivo). Komunalni kruti otpad sadrži otprilike isti maseni udio ugljika kao sami CO<sub>2</sub> (27%), stoga obradom jedne tone komunalnog otpada proizvede se otprilike jedna tona plina CO<sub>2</sub>.

U trenutku kad je otpad odložen na odlagalište otpada, jedna tona komunalnog otpada će proizvesti otprilike 62 m<sup>3</sup> metana putem anaerobne razgradnje biorazgradivog dijela otpada. Ovaj iznos metana ima dvostruko viši potencijal za izazivanje globalnog zatopljenja nego što to ima jedna tona plina CO<sub>2</sub>, koji bi bio proizveden izgaranjem. U nekim zemljama, velike količine odloženog otpadnog plina su prikupljene, no ipak potencijal izazivanja globalnog zatopljenja od strane odloženog deponijskog plina u npr. SAD-u 1999. godine je bio otprilike 32% veći nego što bi bila količina CO<sub>2</sub> koja bi bila emitirana izgaranjem.

Osim toga, gotovo sav biorazgradivi otpad je biomasa. Što, znači da je biološkog podrijetla. Ovaj materijal je formiran od strane biljaka koja koriste atmosferski plin CO<sub>2</sub>. Ako se te biljke ponovo posade CO<sub>2</sub> koji se oslobađa njihovim izgaranjem bit će uzet iz atmosfere još jednom.

Takve okolnosti su glavni razlog zašto više zemalja upravlja otpadnom energijom biomase kao obnovljivog izvora energije. Ostatak - uglavnom plastike i ostala ulja i plinski izvedeni proizvodi - većinom se tretiraju kao neobnovljivi izvori energije.

## 2.5 Gorivo iz otpada (RDF/SRF)

RDF - Refuse Derived Fuel - gorivo iz otpada

SRF- Solid Recovered Fuel - oporabljeno kruto gorivo

- Specified Recovered Fuel - određeno kruto gorivo [5]

RDF/SRF gorivo iz otpada proizvodi se iz neopasnog otpada, pa tako ulazni otpad odnosno sirovina može biti kruti komunalni otpad, poseban otpad iz proizvodnje, industrijski otpad, otpad iz trgovina, komunalni mulj i sl. [6]

Gorivo iz otpada proizvodi se u postrojenjima za gospodarenje otpadom iz neopasnog nerazvrstanog komunalnog otpada u skladu s hijerarhijom gospodarenja otpadom Europske unije.[6]

Hijerarhija gospodarenja otpadom definirana je EU Direktivom o otpadu Europske unije.

Da bi ga se klasificiralo kao gorivo iz otpada, takvo gorivo mora biti obrađeno, homogeno i sastavom odgovarati određenim kriterijima kao što su vlažnost, kalorijska vrijednost, sadržaj pepela, sadržaj teških metala i ostalo. Gorivo iz otpada se proizvodi u kontroliranim uvjetima te prema strogim kriterijima kvalitete i kontrole strogim propisima. Jedino ukoliko udovoljava europskim i hrvatskim standardima opisanima u normi HRN EN 15359:2012 može se koristiti kao zamjensko gorivo za dobivanje energije u industrijskim pogonima. Treba napomenuti da u normi HRN EN 15359:2012 nisu definirani zahtjevi za kvalitetu goriva. Kvalitetu RDF-a definira kupac što znači da kvaliteta goriva može varirati.

Gorivo iz otpada sastoji se od papira, kartona, drva, tekstila i sitne plastike, suho je i stabilno te bez neugodnih mirisa. Zbog visoke ogrjevne vrijednosti koristi se kao gorivo širom Europske unije u različitim postrojenjima, od cementnih peći do toplana i termoelektrana.

Korištenje goriva iz otpada donosi sljedeće koristi:

- smanjuje se udio korištenja fosilnih goriva - neobnovljivih prirodnih resursa
- smanjuje se količina otpada koji se mora odlagati na odlagalištima
- smanjuju se troškovi energije
- smanjuju se emisije stakleničkih plinova odnosno ugljičnog dioksida
- otvaraju se nove mogućnosti za razvoj lokalnog gospodarstva.

U Europskoj uniji gorivo iz otpada koristi se već tridesetak godina. Dosadašnja iskustva pokazuju da se u procesu proizvodnje cementa mogu koristiti velike količine goriva iz otpada na siguran način, uz značajne koristi. Primjeri iz europske industrije cementa pokazuju da postotak zamjene fosilnih goriva različitim vrstama zamjenskih goriva, što uključuje i dominantno gorivo iz otpada, ponegdje prelazi i 70 posto. Za usporedbu, u Hrvatskoj udio korištenja zamjenskih goriva iznosi samo pet posto i uglavnom se koriste otpadna ulja, komina masline, koštano brašno, dotrajale automobilske gume i gorivo pripremljeno iz industrijskog otpada.

### 3 SPALIONICE OTPADA

Spaljivanje je proces obrade otpada koji uključuje izgaranje organskih tvari u otpadnim materijalima. Spaljivanje i drugi visoko-temperaturni tretmani za obradu otpada nazivaju se "termička obrada". Spalionice smanjuju volumen otpada (prethodno komprimiranog u kamionima za odvoz otpada) za 95-96%. To znači da se zamjenom odlaganja otpada sa spaljivanjem otpada značajno smanjuje potreban volumen za odlaganje otpada. Kamioni za odvoz otpada često imaju ugrađen kompresor pa smanjuju obujam otpada prije isporuke spalionicama. Alternativno, na odlagalištima otpada, volumen nekomprimiranog otpada može biti smanjen za oko 70% pomoću statičnog čeličnog kompresora, ali sa značajnim troškovima energije. [7]



Slika 3.1. Spalionica otpada Spittelau (Beč, Austrija)[5]

### 3.1 Vrste spalionica

Spalionice otpada, osim velikih komunalnih sustava, mogu biti i manje, "šaržne" spalionice. Primjeri takvih spalionica su: spalionice animalnog otpada (otpada životinjskog podrijetla kao što je otpad iz klaonica, uginuća s farmi ...), spalionice medicinskog otpada (infektivnog i općenito medicinskog), spalionice industrijskog otpada i slično. Prednost takvih spalionica otpada je ta što se otpad (osobito potencijalno infektivan otpad kao što je animalni ili medicinski) zbrinjava na mjestu nastanka, bez potrebe za rizičnim i skupim transportom istog. Na taj se način umanjuje opasnost od širenja zaraznih bolesti i najčešće umanjuje trošak zbrinjavanja otpada.

Moderne spalionice ovakvog tipa su dvo-komorne spalionice, kod kojih se otpad spaljuje u primarnoj komori pod kontroliranim uvjetima, a dimni plin se provodi u sekundarnu komoru gdje se zadržava određeno vrijeme na vrlo visokim temperaturama kako bi se komponente dimnog plina razložile. Ovakve spalionice mogu biti mobilne, s opremom za neovisan rad na terenu (opremljene vlastitim izvorom energije) ili stacionarne.

### 3.2 Proizvodnja energije iz otpada

Toplina dobivena spaljivanjem otpada može biti korištena za proizvodnju pare koja može pokretati turbine i tako proizvoditi električnu energiju. Iz tone komunalnog otpada može biti (u prosjeku) proizvedeno oko 2-3 MWh električne energije i 2 MWh topline korištene za grijanje. Države oskudnih resursa, kao što su Japan. Danska i Švedska su više od stoljeća prednjačile u korištenju energije dobivene iz spaljivanja, iz lokalnih postrojenja koja su proizvodila toplinsku i električnu energiju. Niz drugih europskih zemalja, posebno Luksemburg, Nizozemska, Njemačka i Francuska, oslanjaju se na spaljivanje, kao način zbrinjavanja komunalnog otpada.

### 3.3 Onečišćenje

Dimni plinovi nakon spaljivanja mogu sadržavati značajne količine čestica, teških metala, dioksina, furana, sumporovog dioksida, metana i solne kiseline. Navedeni zagađeni dimni plinovi mogu biti kiselog djelovanja i 1980-ih uzrokovali su ekološku katastrofu pretvarajući običnu kišu u kiselu kišu. Od toga događaja, industrija je riješila taj problem upotrebom apsorbera s vapnom i elektrostatskih filtera u dimnjacima. Mineral vapnenca korišten u ovim četkama ima pH vrijednost reda veličine 8 što znači da je lužnat. Prolaskom dima kroz vapnene četke, sve kiseline koje mogu



biti sadržane u dimu će biti neutralizirane (kiselina + lužina = sol + voda). Na taj način vapnene četke sprječavaju emisiju kiselina u atmosferu, a time i mogućnost ekološke katastrofe (kisele kiše)

### 3.4 Primjeri spalionica otpada

Postrojenja za dobivanje energije iz spaljivanje otpada

- Montgomery County Resource Recovery Facility u Dickersonu, Maryland, USA (1995)
- Spittelau (1971), i Flötzersteig (1963), Beč, Austrija (Wien Energie)
- SYSAV u Malmö (2003 i 2008), Švedska (Flash presentation)
- Algonquin Power, Brampton, Ontario, Canada
- Teesside EfW postrojenje blizu Middlesbrough, Sjeveroistočna Engleska (1998)
- Spalionica Edmonton u Londonu, Engleska (1974)
- Burnaby Waste-to-Energy postrojenje, Metro Vancouver, Kanada (1988).

Postrojenja za proizvodnju tekućeg goriva

- Edmonton postrojenje za proizvodnju etanola iz otpada, Enerkem-proces, potaknut gorivom dobivenim iz otpada, Edmonton, Alberta, Kanada.(2012)
- Mississippi postrojenje za proizvodnju etanola iz otpada, Enerkem-proces, Pontotoc Mississippi, USA. (2013)

Plazma Plinifikacija postrojenja na energiju iz otpada

- Američko ratno zrakoplovstvo posjeduje postrojenje za dobivanje energije iz prenosivog plazma otpada koje koriste PyroGenesis tehnologiju i smješteno je u Hurlburt polju, na Floridi.

Osim velikih postrojenja, domaće spalionice za otpadnu energiju također postoje. Na primjer, Refuge de Sarenne ima domaća postrojenja za energiju iz otpada. To je postignuto kombiniranjem plinskog kotla na drvo sa Stirlingovim motorom.

## 4 TEHNOLOGIJE IZGARANJA

Tehnologija izgaranja je važan dio u termoenergetskim postrojenjima jer je izvor korisne energije u vidu topline. Biomasa je oduvijek primarni izvor energije i čovjek ju je koristio za gorivo otkad je ovladao vatrom. Međutim, kada se biomasa koristi za dobivanje električne energije i topline, izgara se velika količina biomase koja nema homogena svojstva po cijelom volumenu, ili ima manju homogenost od ugljena, nafte i plina. Zbog toga je potrebno prilagoditi tehnologije izgaranja specifičnim svojstvima biomase i otpada koje nisu tako homogena goriva. Danas su tehnologija izgaranja na rešetci i u fluidiziranom sloju dvije najčešće korištene tehnologije u dobivanju energije iz biomase i otpada. [8]

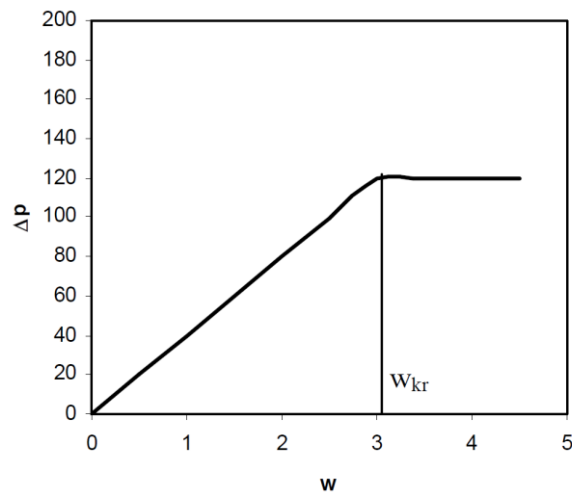
### 4.1 Tehnologija izgaranja na rešetci

Izgaranje kod ove vrste tehnologije događa se u kotlu na rešetci na koju se donosi biomasa i/ili otpad. Ovo je tradicionalna, tj. starija tehnologija izgaranja. Postupak spaljivanja je sličan onome kod tehnologije izgaranja u fluidiziranom stanju, razlika je u pretpripremi biomase i otpada. Tehnologija izgaranja na rešetci je pogodnija za kruta goriva (npr. poljoprivredni i šumski otpadci) i za postrojenja manjih snaga (<5MW). Kontrola i regulacija izgaranja vrši se upuhivanjem zraka ispod rešetke tako da se stvore turbulencije te na taj način poboljšaju izgaranje. Nedostatak ove tehnologije je taj što je izgaranje nepotpunije nego kod fluidiziranog sloja, lošiji rezultati izgaranja postoje i kod izgaranja goriva nejednolikog sastava i goriva s visokim udjelom vlage. Međutim, uz dobre regulacijske sustave postižu se visoke vrijednosti iskoristivosti jer je ova tehnologija razvijana dugi niz godina.

### 4.2 Tehnologija izgaranja u fluidiziranom sloju

Novija tehnologija izgaranja u kojoj se biomasa i/ili otpad tretiraju prije samog spaljivanja. Tretiranjem biomase i otpada prije spaljivanja postiže se veći stupanj homogenosti goriva bez obzira na njihovu vlažnost, udio pepela i kaloričnost. Tako se u fluidiziranom sloju mogu zajedno naći ostaci poljoprivredne proizvodnje, otpadci od sječe šuma zajedno s kućnim otpadom. Izgaranje u fluidiziranom sloju [9] pruža veliku fleksibilnost u pogledu zahtjeva na kvalitetu i vlažnost goriva, veću nego izgaranje na rešetci. Ova tehnologija postiže vrlo visoke vrijednosti iskoristivosti kotla, i do 90% bez obzira na to ima li otpad visok udio vlažnosti ili ne, jesu li komponente goriva slične kvalitete ili ne. Glavni nedostatak je cijena koja ja u odnosu na izgaranje na rešetci znatno veća i zbog toga se koristi samo u elektranama snage preko 5 MW. U samom

kotlu biomasa i otpad izgaraju i pretvaraju se u vrući granulirani sloj na kvarcnom pijesku. Ubrizgavanje zraka u taj sloj stvara turbulencije i na taj način pospješuje opskrbu svih dijelova goriva dovoljnom količinom kisika i približavaju ovaj proces potpunom izgaranju, što je cilj svakog izgaranja. Na taj način moguće je držati temperaturu izgaranja ispod 972 °C i znatno smanjiti udio dušičnih spojeva, naročito dušičnog monoksida, u dimnim plinovima.



Slika 4.1. Kritična brzina fluidizacije

Pri povećanju brzine strujanja zraka dinamički tlak u sloju može postići vrijednost koja je jednaka težini čestica, tako da dolazi do narušavanja stabilnosti sloja. Brzina koja odgovara ovim uvjetima naziva se minimalnom brzinom fluidizacije (*kritičnom brzinom*). S daljnjim povećanjem brzine zraka počinje tzv. fluidiziranje sloja koje se sastoji u tome da se osnovna masa gorivih čestica podiže s rešetke i počinje naizmjenično vrtložno kretanje gore-dolje, koje podsjeća na ključanje uzavrele vode. Pri ovome dolazi do intenzivnog miješanja goriva sa zrakom. U fluidiziranom sloju brzina strujanja mora biti veća od one koja odgovara kritičnoj brzini, jer se želi narušiti stabilnost sloja. Ako je brzina strujanja veća od srednje brzine strujanja koja dovodi do odnošenja osnovne mase gorivih čestica ostvaruju se uvjeti za izgaranje u cirkulirajućem fluidiziranom sloju.

U praksi se fluidizirani sloj ostvaruje sa što ravnomjernijim sastavom veličine gorivih čestica. Ložišta se koriste za male i srednje snage. Relativno su skupa zbog kompliciranog sustava za pripremu i dovod goriva. Međutim, sofisticirani sustav za dovod goriva omogućuje istovremeno dodavanje kalcija  $Ca$  u formi  $CaCO_3$  (vapnenac) koji veže sumporne spojeve i na taj način smanjuje zagađenje okoliša. Dok se klasičnim kotlovima mora dograđivati sustav za odsumporavanje, što ih bitno poskupljuje.

Druga velika prednost fluidiziranog loženja proizlazi iz činjenice da je moguće osigurati izgaranje na relativno niskim temperaturama 850-900 °C. To osigurava:

- smanjenu proizvodnju štetnih dušičnih oksida ( $NO_x$ ),
- upotrebu goriva sa sniženom temperaturom sinteriranja i omekšavanja pepela, te na taj način smanjuje zašljakivanje.

#### 4.2.1 Mjehurićasti fluidizirani sloj (BFB)

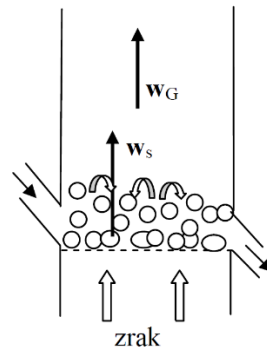
Tehnologija izgaranja u mjehurićastom fluidiziranom sloju (Bubbling fluidized bed - BFB) često se koristi u kotlovima manjih snaga, koji koriste goriva s visokim udjelima vlage i niskim ogrjevnim vrijednostima. Fluidizacija sloja se ostvaruje mlaznicama raspoređenim na dnu kotla; ovim postupkom omogućuje se izgaranje neizgorenog ugljika, te se tako podiže iskoristivost kotla. Sloj uglavnom formira kvarcni pijesak s malom količinom goriva. Fluidizacija krutih čestica nastupa kada struja primarnog zraka prođe kroz sloj s dovoljnom brzinom (iznad minimalne brzine fluidizacije) za svladavanje gravitacijske sile krutih čestica.

Primarni zrak upuhuje se s dna kotla i čini oko trideset posto zraka za izgaranje, ostatak zraka upuhuje se mlaznicama sekundarnog i tercijarnog zraka kako bi povećalo naknadno izgaranje.

Aerodinamička karakteristika mjehurićastog fluidiziranog sloja može se izraziti:

$$c_f \cdot A_{\text{čestica}} \cdot \rho_G \frac{w_s}{2} > G_{\text{čestica}} > c_f \cdot A_{\text{čestica}} \cdot \rho_G \frac{w_G}{2} \quad (4.1)$$

gdje su brzine  $w_s$  i  $w_G$ , prikazane na shemi ložišta.



Slika 4.2. Shema ložišta

$w_s$  brzina smjese zraka i dimnih plinova u fluidiziranom sloju

$w_G$  brzina smjese zraka i dimnih plinova iznad fluidiziranog sloja

Pri tome je  $w_s > w_G$  zato što je u sloju manji presjek za strujanje dimnih plinova u odnosu na presjek iznad sloja. Presjek je manji ne samo zbog goriva koje se nalazi u njemu, već i zbog kvarcnog pijeska koji se dodaje da bi zapunio prostor između čestica goriva i tako osigurao homogenu fluidizaciju.

Područje rada BFB kotlova je između minimalne brzine fluidizacije i brzine zahvaćanja na kojoj bi čestice sloja bile odvučene zrakom koji prolazi. Brzina primarnog zraka je oko 1,2 m/s pri punom opterećenju. Temperature izgaranja su između 800 i 950 °C, uobičajena temperatura sloja je oko 850 °C.

Jednostavnost konstrukcije ovakvih kotlova, turbulentni sloj niske temperature i mogućnost regulacije brzine fluidizacije i količine sekundarnog i tercijarnog zraka uzdiže BFB kotlove u odnosu na druge nefluidizirane kotlove u smislu fleksibilnosti za širok raspon ogrjevnih vrijednosti goriva, efikasnosti, niže emisije polutanata manjih investicijskih i troškova održavanja. Jedino CFB tehnologija ima bolje značajke.

#### 4.2.2 Cirkulirajući fluidizirani sloj (CFB)

Tehnologija cirkulirajućeg fluidiziranog sloja slična je BFB konceptu, koristi se u većim kotlovima i ima značajno veću efikasnost (do 95%).

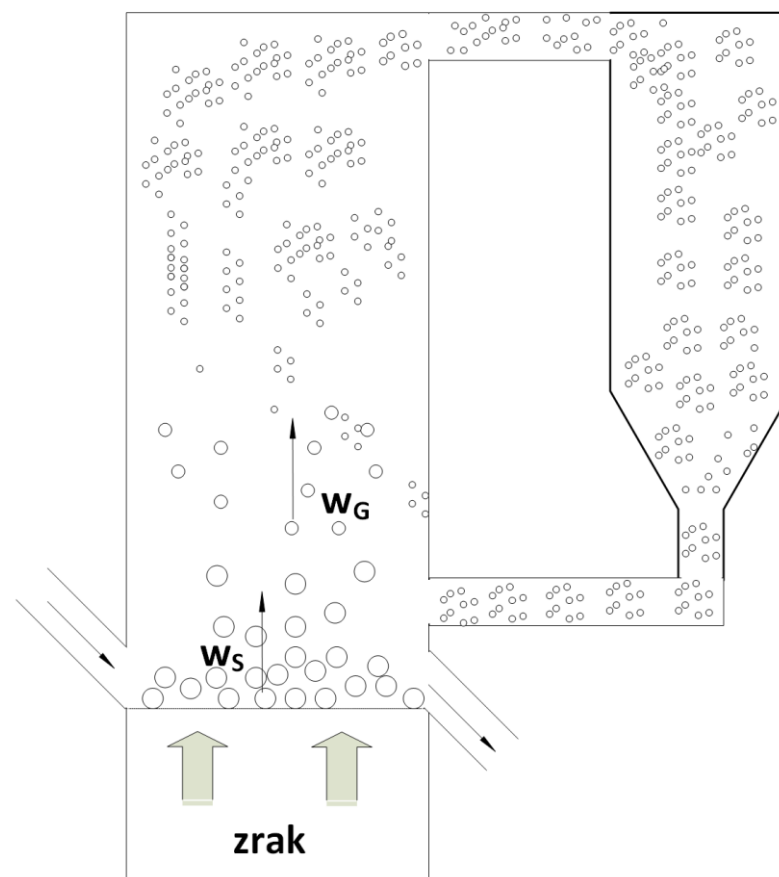
CFB konfiguracija sadrži sustav za odvajanje krutih čestica, koji odvaja zahvaćene čestice iz ispušnih plinova i vraća ih u sloj izgaranja. CFB ima sustave pregrijača koji omogućuju još veću iskoristivost i fleksibilnost na vrstu goriva.

Brzina zahvaćanja predstavlja granicu koja definira prelazak s BFB tehnologije na CFB. Područje rada CFB tehnologije je iznad brzine zahvaćanja. Iznad te brzine materijal sloja biva zahvaćen i čestice bivaju distribuirane kroz cijeli kotao uz postepeno smanjenje gustoće sloja od dna prema vrhu kotla. Brzina fluidiziranja je veća nego kod BFB i može biti između 4,5 i 6,7 m/s.

Aerodinamička karakteristika cirkulirajućeg fluidiziranog sloja može se izraziti:

$$c_f \cdot A_{\text{čestica}} \cdot \rho_G \frac{w_s}{2} > c_f \cdot A_{\text{čestica}} \cdot \rho_G \frac{w_G}{2} > G_{\text{čestica}} \quad (4.2)$$

gdje su brzine  $w_s$  i  $w_G$ , prikazane na shemi ložišta.



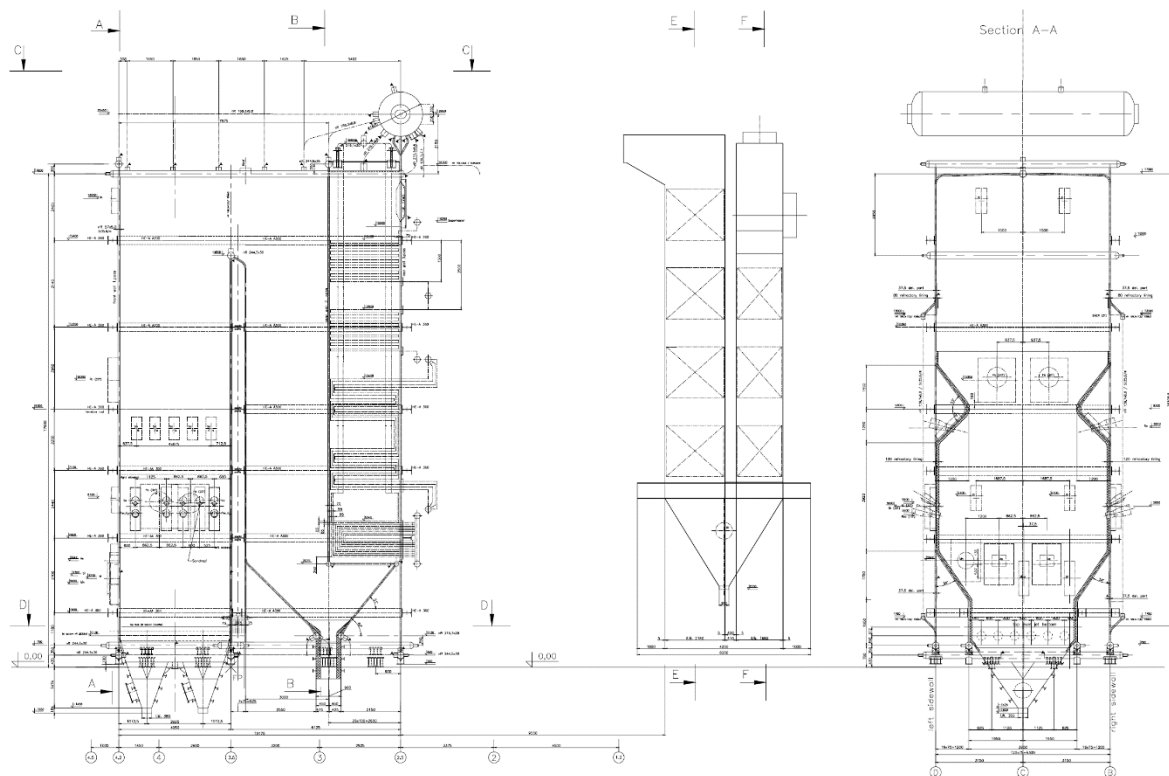
Slika 4.3. Shema ložišta

$W_S$  brzina smjese zraka i dimnih plinova u fluidiziranom sloju

$W_G$  brzina smjese zraka i dimnih plinova iznad fluidiziranog sloja

### 4.3 Zadani sustav

U svrhu ovoga rada zadan je kotao s mjehuričastim fluidiziranim slojem. Izgaranje u sloju je izgaranje u bogatoj smjesi čime je omogućena regulacija temperature izgaranja između 650 i 850 °C. Stoga je moguće izgaranje i goriva s niskom temperaturom taljenje pepela. Ovakav koncept izgaranja omogućuje homogeniji profil temperature u prvom prolazu kotla, što rezultira nižim emisijama  $NO_x$ .



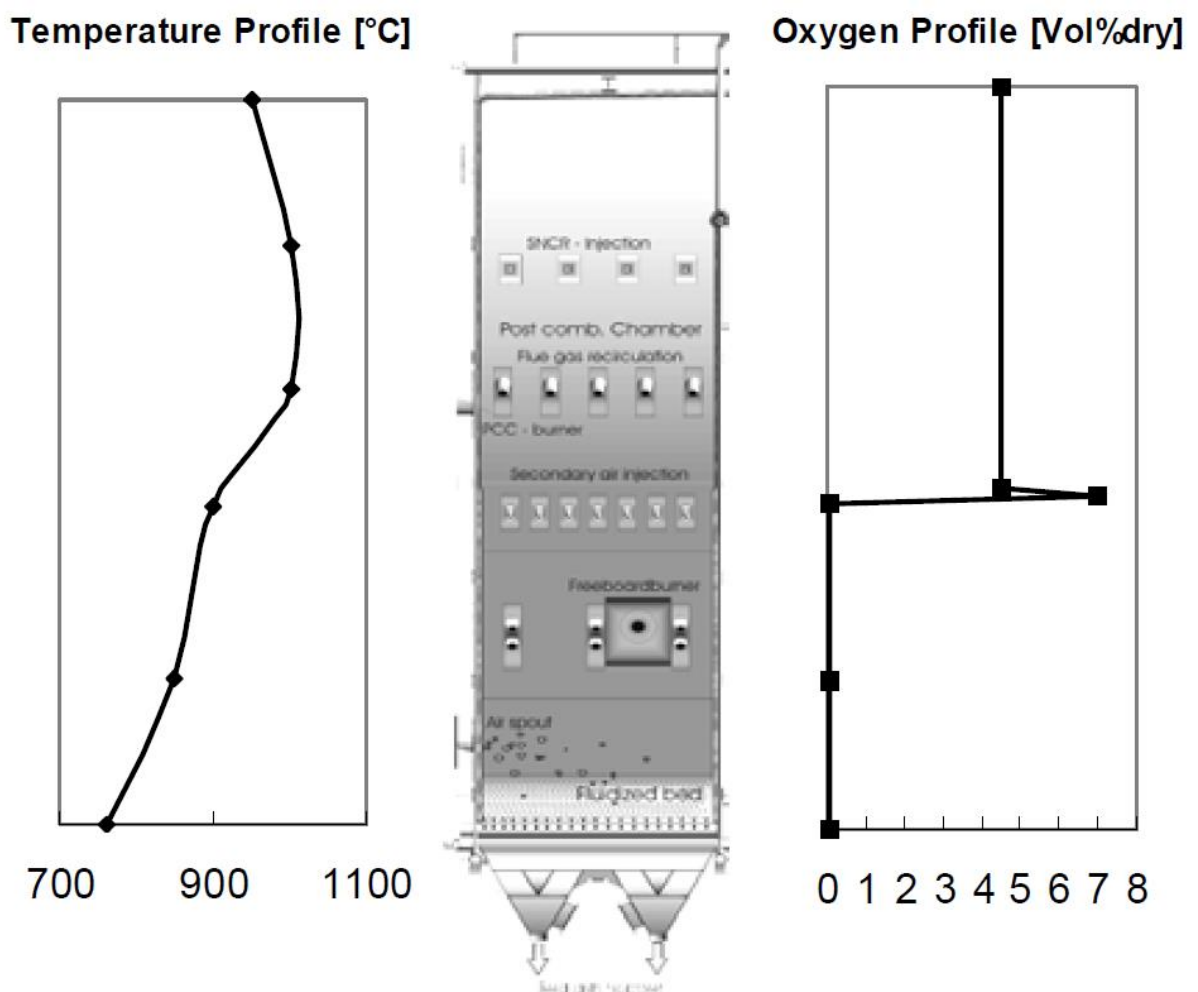
Slika 4.4. Nacrt kotla [10]

#### Tehnologija izgaranja [11]

Glavno svojstvo ovakve tehnologije je princip postepenog izgaranja. Udio kisika u fluidiziranom sloju je nizak, smjesa je izrazito bogata ( $\lambda \approx 0,35$ ), dio goriva izgara odmah, a ostatak se

rasplinjava. Regulacija temperature i omjera goriva i zraka vrši se miješanjem primarnog zraka s recirkuliranim dimnim plinovima, prilikom čega se razina fluidiziranja sloja održava konstantnom. Kada se primarni zrak ne bi miješao s recirkuliranim dimnim plinovima ne bi bilo moguće održati razinu fluidiziranja sloja konstantnom, jer bi se maseni protok zraka, a time i brzina fluidiziranja, mijenjao u ovisnosti o ogrjevnoj vrijednosti goriva. Takav rad kotla u podstohiometrijskom radu u sloju omogućuje održavanje temperature sloja u rasponu između 650°C i 850 °C. Stoga se i goriva s niskim temperaturama taljenja pepela mogu sagorijevati bez bojazni od pojave zašljakivanja površina. Standardna radna temperatura fluidiziranog sloja je otprilike 760 °C.

Plinovi nastali rasplinjavanjem u sloju potpuno izgaraju nakon dodavanja sekundarnog zraka u kotao, prilikom čega dolazi do povećanja temperature i koncentracije kisika kao što se vidi na Slici 4.5 Turbulencije u ovom dijelu prvog prolaza rezultiraju iznimno niskim vrijednostima CO u plinovitom gorivu.

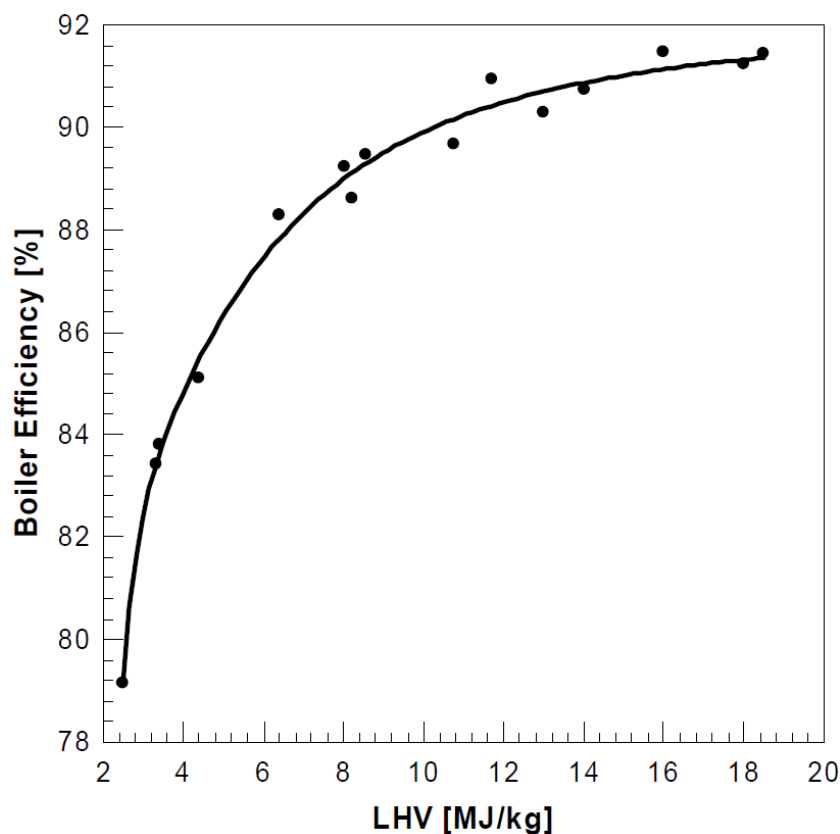


Slika 4.5. Profili temperatura i volumnog udjela kisika po visini kotla [11]



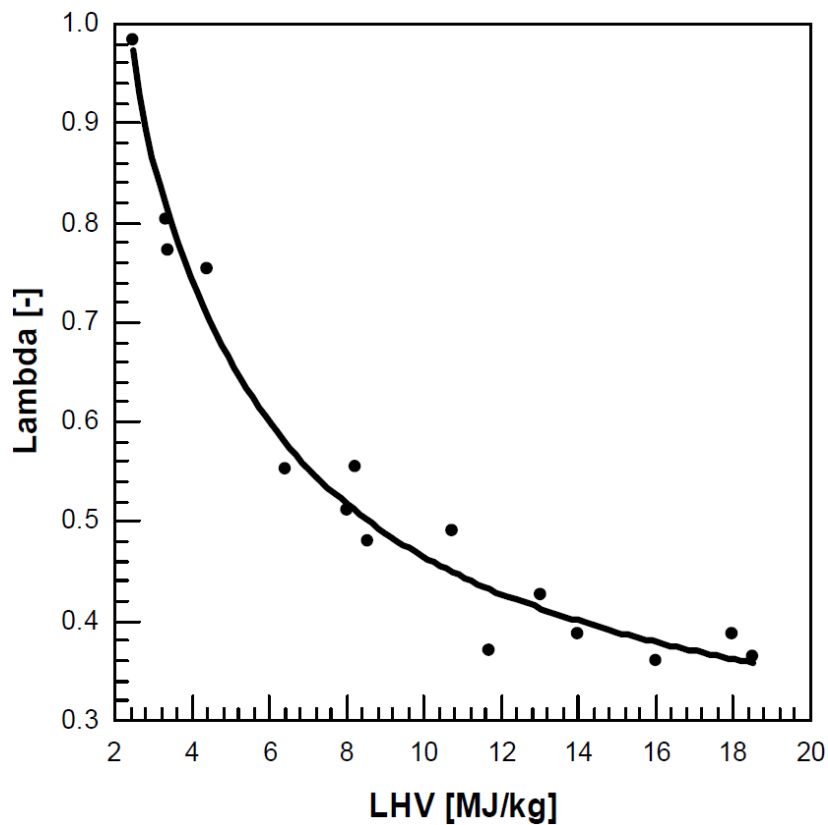
U slučaju izgaranja goriva visoke ogrjevne vrijednosti, ubrizgava se recirkulacijski plin iznad područja sekundarnog zraka kako bi „ohladio“ ispušne plinove u komori naknadnog izgaranja. Takav koncept postepenog izgaranja rezultira homogenim i umjerenim temperaturnim profilom i nižim  $\text{NO}_x$  emisijama u prvom prolazu kotla. Dodatno  $\text{NO}_x$  je moguće kontrolirati ugradnjom SNCR sustava na prikladnom temperaturnom nivou u kotlu. Ta svojstva omogućuju rad kotla s gorivima širokog spektra ogrjevnih vrijednosti od 3 MJ/kg do 20 MJ/kg.

Na Slici 4.6 može se vidjeti ovisnost iskoristivosti kotla o donjoj ogrjevnoj vrijednosti goriva. Efikasnost kotla značajno ovisi o donjoj ogrjevnoj vrijednosti goriva za donje ogrjevne vrijednosti u intervalu između 2 i 8 MJ/kg. U intervalu od 8 do 18 MJ/kg ovisnost efikasnosti o donjoj ogrjevnoj vrijednosti nešto je manja.



Slika 4.6. Ovisnost iskoristivosti kotla o donjoj ogrjevnoj vrijednosti [11]

Slika 4.7 prikazuje ovisnost donje ogrjevne vrijednosti o pretičku zraka potrebnom za održavanje željene temperature izgaranja od 760 °C. Cilj je održati podstehiometrijske uvjete kako bi se ostvarile niske temperature u sloju i izbjeglo zašljakivanje površina. Udio kisika tj. pretičak zraka kontrolira se miješanjem ispušnih plinova s udjelom kisika do 4,5%v1 sa zrakom za izgaranje.



Slika 4.7. Ovisnost pretička zraka o donjoj ogrjevnoj vrijednosti[11]

Iz Slike 4.7. može se vidjeti da goriva s donjom ogrjevnom vrijednošću između 2,5 i 6 MJ/kg zahtijevaju visoke vrijednosti pretička zraka  $\lambda$  kako bi temperatura u sloju bila u željenom intervalu. Kod goriva s donjim ogrjevnim vrijednostima nižima od 2,5 MJ/kg vrijednost pretička zraka približava se vrijednosti jedan, što znači da su nužni stehiometrijski uvjeti kako bi se održala željena temperatura.

Više vrijednosti pretička zraka upućuju na visok udio vode budući da je nju potrebno ispariti energijom dobivenom izgaranjem. Iz Slike 4.7 jasno se može vidjeti da se ovisnost potrebnog pretička zraka i donje ogrjevne vrijednosti „izravnava“ između 8 i 18 MJ/kg. Za standardnu biomasu pretičak zraka kreće se između 0,35 i 0,45.

## 5 DIREKTIVA 2000/76/EZ[12]

Cilj ove Direktive je, u mjeri u kojoj je to moguće, prilikom spaljivanja i suspaljivanja otpada spriječiti ili ograničiti negativne utjecaje na okoliš, a posebno onečišćenja putem emisija u zrak, tlo, površinsku i podzemnu vodu te rizike za zdravlje ljudi koji iz njih proizlaze.

Taj cilj ostvaruje se strožim uvjetima za rad i tehničkim zahtjevima, određivanjem graničnih vrijednosti emisije postrojenjima za spaljivanje i suspaljivanje unutar Zajednice te ispunjavanjem zahtjeva Direktive 75/442/EEZ.

### *Definicije*

„postrojenje za spaljivanje” znači svaka nepokretna ili pokretna tehnička jedinica ili oprema namijenjena termičkoj obradi otpada s ili bez korištenja topline oslobođene izgaranjem. To uključuje spaljivanje otpada oksidacijom i druge postupke termičke obrade poput pirolize, plinifikacije ili plazma obrade, ako se tvari nastale tim postupcima obrade naknadno spaljuju.

Ova definicija obuhvaća mjesto i cjelokupno postrojenje za spaljivanje, uključujući i sve linije za spaljivanje, prihvata otpada, skladištenje, strojeve za prethodnu obradu na licu mjesta, sustave za otpadno gorivo i opskrbu zrakom, kotao, postrojenja za obradu otpadnih plinova, postrojenja za obradu ili skladištenje ostataka i otpadne vode na licu mjesta, dimnjak, naprave i sustave za nadzor spaljivanja, za bilježenje i praćenje uvjeta u kojima se odvija spaljivanje;

„postrojenje za suspaljivanje” znači svako nepokretno ili pokretno postrojenje čija je prvenstvena svrha proizvodnja energije ili predmeta i:

- koji otpade koristi kao svoje redovno ili dopunsko gorivo, ili
- u kojem se otpad toplinski obrađuje radi odlaganja.

Obavlja li se suspaljivanje tako da glavna svrha postrojenja nije proizvodnja energije ili predmeta nego toplinska obrada otpada, to se postrojenje smatra postrojenjem za spaljivanje.

Ovom definicijom obuhvaćeni su mjesto i cjelokupno postrojenje, uključujući i sve linije za suspaljivanje, prihvata otpada, skladištenje, strojeve za prethodnu obradu na licu mjesta, sustave za opskrbu otpadom, gorivom i zrakom, kotao, postrojenja za obradu otpadnih plinova, postrojenja

za obradu i skladištenje ostataka ili otpadne vode, odvod, uređaje i sustave za nadzor spaljivanja, za bilježenje i praćenje uvjeta u kojima se odvija spaljivanje;

## 5.1 Uvjeti rada postrojenja

Postrojenja za spaljivanje svoju djelatnost moraju obavljati tako da se postigne razina spaljivanja pri kojoj je udio ukupnog organskog ugljika (TOC) u šljaki i pepelu manji od 3% ili je njihov gubitak kod paljenja manji od 5% težine suhe tvari. Ako je potrebno, rabe se tehnike prethodne obrade otpada.

Postrojenja za spaljivanje moraju se projektirati, opremiti i graditi, a djelatnost u njima obavljati na način koji omogućuje da se temperatura plina nastalog u postupku, nakon zadnjeg dovoda svježeg zraka za izgaranje, kontrolirano i ujednačeno i u najpovoljnijim uvjetima, na dvije sekunde, podigne na 850 °C mjereno na unutarnjoj stijenci ili na nekoj drugoj reprezentativnoj točki unutar komore peći, koju je odobrilo nadležno tijelo. Ako se spaljuju opasni otpadi s više od 1% halogenih organskih tvari, izraženih kao klor, temperatura se mora podignuti na 1100 °C tijekom barem dvije sekunde.

Svaka linija postrojenja za spaljivanje mora biti opremljena barem jednim pomoćnim plamenikom. Taj se plamenik mora automatski uključiti kada temperatura plinova koji izgaraju nakon zadnjeg dovoda svježeg zraka za izgaranje padne ispod 850 °C ili 1100 °C, ovisno o slučaju. On se također mora rabiti tijekom pokretanja i gašenja rada postrojenja kako bi se sve vrijeme trajanja tih radnji, i sve dok u komori za izgaranje ima nespaljenog otpada, osiguralo održavanje temperature na 850 °C ili, prema potrebi, na 1100 °C.

Kad se temperatura za vrijeme pokretanja rada ili gašenja postrojenja spusti ispod 850 °C ili 1100 °C, ovisno o slučaju, pomoćni plamenik ne smije se ložiti gorivom koje može prouzročiti veće emisije od onih koje nastaju od paljenja plinskoga ulja, kako je utvrđeno člankom 1. stavkom 1. Direktive Vijeća 75/716/EEZ, tekućim plinom ili prirodnim plinom.

Postrojenja za spaljivanje ili suspaljivanje moraju imati i koristiti automatski sustav za sprečavanje dodavanja otpada:

- a) pri pokretanju rada postrojenja, sve dok se ne dosegne temperatura od 850 °C ili, prema potrebi, 1100 °C;

- b) kad god stalna mjerenja propisana ovom Direktivom pokazuju da je, zbog poremećaja rada ili kvara uređaja za pročišćavanje, prijedena bilo koja granična vrijednost emisije.
- c) kad god se ne održava temperatura od 850 °C ili 1100 °C, ovisno o slučaju;

Kada se u industriji celuloze ili papira suspaljuje vlastiti otpad na mjestu njegova nastanka u postojećim kotlovima, takvo odobrenje uvjetuje se zadovoljavanjem barem odredaba o graničnim vrijednostima emisije određenima u Prilogu V. za ukupan organski ugljik.

## **5.2 Granične vrijednosti emisija u zrak (Prilog V.)**

U Prilogu V. ove Direktive definirane su granične vrijednosti emisija u zrak.

Postrojenja za spaljivanje i suspaljivanje moraju se projektirati, opremiti i graditi, a zatim svoju djelatnost obavljati tako da se spriječe emisije u zrak zbog kojih bi moglo doći do znatnijih onečišćenja prizemnog zračnog sloja; posebno se otpadni plinovi moraju, uz pomoć dimnjaka čija se visina određuje vodeći računa o čuvanju ljudskoga zdravlja i okoliša, ispuštati pod nadzorom i u skladu s važećim normama Zajednice o kvaliteti zraka.

Postrojenjem za spaljivanje ili suspaljivanje mora upravljati za to osposobljena fizička osoba.

*Prosječne dnevne vrijednosti:*

Tablica 5.1. Prosječne dnevne vrijednosti

Ukupna praškasta tvar	10 mg/m <sup>3</sup>
Organske tvari u obliku plina i pare, izražene kao ukupni organski ugljik	10 mg/m <sup>3</sup>
Vodikov klorid (HCl)	10 mg/m <sup>3</sup>
Vodikov fluorid (HF)	1 mg/m <sup>3</sup>
Sumporov dioksid (SO <sub>2</sub> )	50 mg/m <sup>3</sup>
Dušikov oksid (NO) i dušikov dioksid (NO <sub>2</sub> ), izraženi kao dušikov dioksid za postojeća postrojenja za spaljivanje kapaciteta više od 6 tona na sat ili nova postrojenja za spaljivanje	200 mg/m <sup>3</sup>
Dušikov oksid (NO) i dušikov dioksid (NO <sub>2</sub> ), izraženi kao dušikov dioksid za postojeća postrojenja za spaljivanje kapaciteta više od 6 tona na sat ili manje	400 mg/m <sup>3</sup>

*Prosječne polusatne vrijednosti:*

Tablica 5.2. Prosječne polusatne vrijednosti

	<b>(100%) A</b>	<b>(97%) B</b>
Ukupna praškasta tvar	30 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>
Organske tvari u obliku plina i pare, izražene kao ukupni organski ugljik	20 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>
Vodikov klorid (HCl)	60 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>
Vodikov fluorid (HF)	4 mg/m <sup>3</sup>	2 mg/m <sup>3</sup>
Sumporov dioksid (SO <sub>2</sub> )	200 mg/m <sup>3</sup>	50 mg/m <sup>3</sup>
Dušikov oksid (NO) i dušikov dioksid (NO <sub>2</sub> ), izraženi kao dušikov dioksid za postojeća postrojenja za spaljivanje kapaciteta preko 6 tona na sat ili nova postrojenja za spaljivanje	400 mg/m <sup>3</sup>	200 mg/m <sup>3</sup>

Sve prosječne vrijednosti tijekom oglednoga razdoblja u trajanju od najmanje 30 minuta, a najviše 8 sati

Tablica 5.3. Prosječne vrijednosti tokom oglednog razdoblja

Kadmij i njegovi spojevi, izraženi kao kadmij (Cd)	ukupno 0,05 mg/m <sup>3</sup>	0,1 mg/m <sup>3</sup>
Talij i njegovi spojevi, izraženi kao talij (Tl)		
Živa srebro i njezini spojevi, izraženi kao živa (Hg)	0,05 mg/m <sup>3</sup>	0,1 mg/m <sup>3</sup>
Antimon i njegovi spojevi, izraženi kao antimon (Sb)	ukupno 0,5 mg/m <sup>3</sup>	ukupno 1 mg/m <sup>3</sup>
Arsen i njegovi spojevi, izraženi kao arsen (As)		
Olovo i njegovi spojevi, izraženi kao olovo (Pb)		
Krom i njegovi spojevi, izraženi kao krom (Cr)		
Kobalt i njegovi spojevi, izraženi kao skupni kobalt (Co)		
Bakar i njegovi spojevi, izraženi kao bakar (Cu)		
Mangan i njegovi spojevi, izraženi kao mangan (Mn)		
Nikal i njegovi spojevi, izraženi kao nikal (Ni)		
Vanadij i njegovi spojevi, izraženi kao vanadij (V)		

Prosječne vrijednosti mjere se tijekom oglednoga razdoblja tijekom najmanje 6 sati, a najviše 8 sati. Granična vrijednost emisije odnosi se na ukupnu koncentraciju dioksina i furana izračunanu pomoću koncepta ekvivalenta toksičnosti u skladu s Prilogom I.

Tablica 5.4. Granične vrijednosti emisije dioksina i furana

Dioksini i furani	0,1 ng/m <sup>3</sup>
-------------------	-----------------------

Sljedeće granične vrijednosti emisije koncentracija ugljik oksida (CO) ne smiju se prekoračiti u plinovima nastalim izgaranjem (uključujući i faze pokretanja i gašenja):

- 50 miligrama/m<sup>3</sup> za plin nastao izgaranjem, utvrđeno kao prosječna dnevna vrijednost,

- 150 miligrama za plin nastao izgaranjem koji je u barem 95 % svih mjerenja utvrđen kao 10-minutna prosječna vrijednost, ili 100 mg/m<sup>3</sup> plina nastalog izgaranjem utvrđeno u svim mjerenjima kao prosječna polusatna vrijednost u bilo kojem dijelu 24-satnog razdoblja.

Nadležno tijelo može odobriti izuzeća za postrojenja za spaljivanje koja primjenjuju postupak izgaranja u fluidiziranom sloju pod uvjetom da je dozvolom predviđena granična vrijednost emisije za ugljikov monoksid (CO) od najviše 100 mg/m<sup>3</sup> kao prosječna vrijednost na sat.



## 6 KOGENERACIJA

Relativno visoka apsolutna temperatura okoline, sukladno s drugim zakonom termodinamike, sprečava da se u poznatim toplinskim ciklusima nešto više od 40% ulazne energije, sadržane u gorivu, pretvori u koristan mehanički rad. Ostali dio energije mora se, kao neizbježan gubitak, ispuštati u prirodni toplinski spremnik, tj. okolinu.

Najveći nedostatak današnjih klasičnih termoelektrana je upravo u tome što se u njima ne može iskoristiti otpuštena niskotemperaturna energija koja se, hlađenjem radnoga fluida u kondenzatoru, nepovratno gubi. Međutim, upravo industrijska procesna postrojenja (uz centralizirane sustave grijanja) pružaju mogućnost vraćanja i iskorištavanja te energije u obliku topline primjenom energetskih procesa s vezanom proizvodnjom električne i toplinske energije. Tako se dolazi do primjene tzv. kogeneracije [13] kojom se učinkovitije vrednuje primarna energija, odnosno bolje iskorištava eksergija goriva.

Toplinska se energija koristi za tehnološke potrebe u industriji ili za zagrijavanje prostorija (centralno grijanje). U pravilu se za tu svrhu koristi para ili topla voda koje se proizvode u generatorima pare ili generatorima tople vode, izgaranjem goriva. Parametri takve pare su relativno niski jer su potrebne temperature u rasponu 70-200 °C. Međutim, izgaranjem se goriva u ložištu razvijaju temperature od 1500-1600 °C. Zbog velikih će temperaturnih razlika ( $1500 - 200 = 1300^\circ\text{C}$ ) i gubici nepovrativosti (prirast entropije) biti veliki. Zbog toga se nameće rješenje po kojemu se proizvodi para visokih parametara pogodnih za ostvarivanje parnoturbinskog kružnog procesa (temperaturna razlika je  $1500 - 500 = 1000^\circ\text{C}$ ), a odvođenje se topline iz procesa odvija na onim temperaturama koje su pogodne za traženo zagrijavanje (od 70-200 °C). Ovo vrijedi onda kada postoji istovremena potreba za toplinskom i električnom energijom, što je u pravilu slučaj.

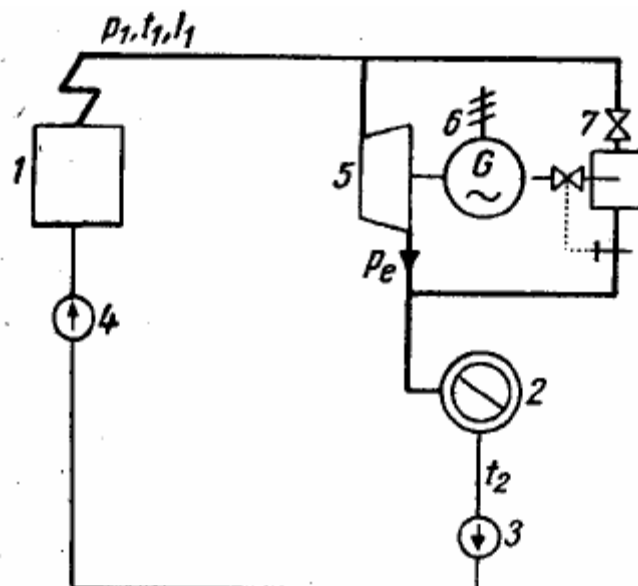
Tipovi postrojenja za vezanu proizvodnju toplinske i električne energije:

1. postrojenje protutlačne turbine,
2. postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare,
3. postrojenje plinske turbine s korištenjem otpadne topline dimnih plinova,
4. motori s unutarnjim izgaranjem s iskorištavanjem otpadne topline.

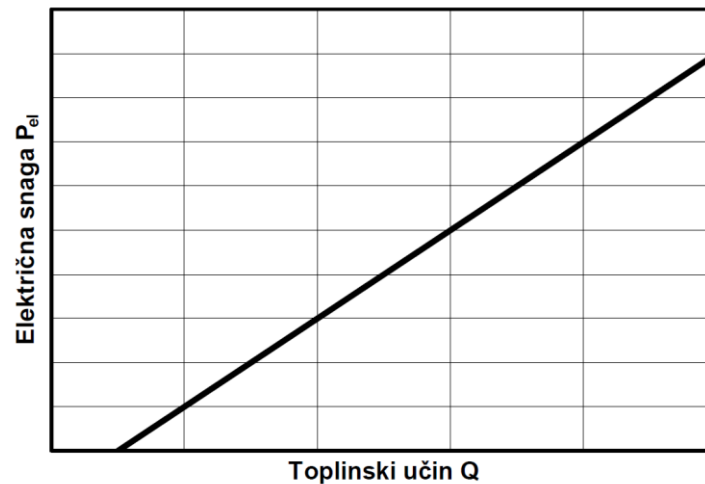
## 6.1 Postrojenje protutlačne turbine

Najklasičniji sustav za kombiniranu proizvodnju mehaničke i toplinske energije sastoji se od proizvodnje pare u loženim generatorima pare, ekspanzije u turbini do određenog tlaka te njezina razvođenja u sustav za iskorištenje toplinske energije. Taj princip je dobro poznat i danas se najčešće primjenjuje.

Na Slici 6.1 također je prikazana shema postrojenja protutlačne turbine. Para ide iz generatora pare u protutlačnu turbinu i ekspanzira do protutlaka koji ima temperaturu zasićenja koja odgovara temperaturi potrebnoj za zagrijavanje nekog tehnološkog procesa. Protutlačne su turbine obično manjih snaga te jednostavnije, a time i jeftinije izvedbe. Obično se koriste u industrijskim energanama za vezanu proizvodnju toplinske i električne energije. Zagrijavanje se pare ili vode odvija u grijalici. Veza proizvedene električne i toplinske energije prikazana je na Slici 6.2 Budući da je nemoguće očekivati da će se konzum električne i toplinske energije u potpunosti poklapati s njihovom proizvodnjom, postrojenje je opremljeno obilaznim vodom oko turbine s reducir ventilom, za slučajeve kada potreba za toplinskom energijom premašuje proizvodnju pare koja odgovara proizvodnji električne energije. Kada je proizvedena količina pare veća od količine potrebne za grijanje, višak se može ispuštati u atmosferu. Time pogon postrojenja postaje fleksibilniji. U pravilu potreba za toplinskom energijom određuje opterećenje postrojenja.



Slika 6.1. Shema postrojenja protutlačne turbine

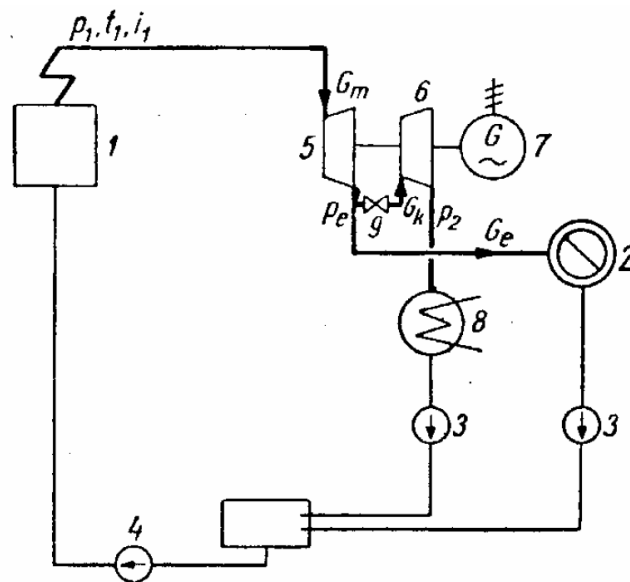


Slika 6.2. Kruta veza proizvodnje toplinske i električne energije

Osnovni nedostatak ovakve vezane proizvodnje mehaničke i toplinske energije sastoji se u nemogućnosti bilanciranja proizvedene električne energije i topline s potrebama korisnika u pojedinom trenutku. Stoga se proces obično podešava tako da zadovolji potrebe u toplinskoj energiji, a električna energija se bilancira usporednim spojem s javnom mrežom iz koje se uzima ili u nju dodaje razlika energije. Opisani nedostatak rješava se ugradnjom tzv. kondenzacijsko-oduzimne turbine za pogon generatora, gdje se toplinska energija za potrošače podešava promjenom oduzimanja pare iz turbine, a električna energija regulacijom protoka pare kroz kondenzacijski dio turbine.

## 6.2 Postrojenje kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem pare

Shema kondenzacijskog postrojenja s reguliranim oduzimanjem pare prikazana je na Slici 6.3. Turbina ima najmanje dva stupnja: visokotlačni i niskotlačni. Između njih se vrši oduzimanje pare za zagrijavanje grijalice na takav način da se održava konstantna vrijednost tlaka. Oko visokotlačnog dijela turbine postoji obilazni parovod s reducir ventilom radi fleksibilnosti pogona. Postoje dva granična režima pogona: čisti kondenzacijski pogon kada nema potrebe za toplinskom energijom i čisti protutlačni pogon kada je potreba za toplinskom energijom toliko velika da ne preostaje pare za niskotlačni turbinski stupanj. U stvarnosti se ne može voziti čisti protutlačni pogon zbog toga što jedan dio pare (oko 10 % nazivnog protoka) uvijek mora strujati kroz niskotlačni dio turbine zbog hlađenja lopatica i diskova. Kondenzacijska se postrojenja s reguliranim oduzimanjem pare koriste najčešće u gradskim toplanama.



Slika 6.3. Shema kondenzacijskog postrojenja s reguliranim oduzimanjem pare

Takva kombinirana proizvodnja električne energije i topline pogodna je i najčešće primjenjivana tamo gdje je, u prvom redu zbog osiguranja stalne i sigurne opskrbe električnom energijom, nužan autonoman izvor, kao npr. u rafinerijskim, petrokemijskim i sličnim procesnim pogonima koji su vrlo osjetljivi na prekide u opskrbi energijom. Pritom se mora imati na umu da se većim udjelom rada kondenzacijskoga djela turbine smanjuje iskoristivost procesa.

## 7 MATEMATIČKI MODEL

Spalionice otpada su parno-turbinska postrojenja koja rade na principu Rankineovog ciklusa.

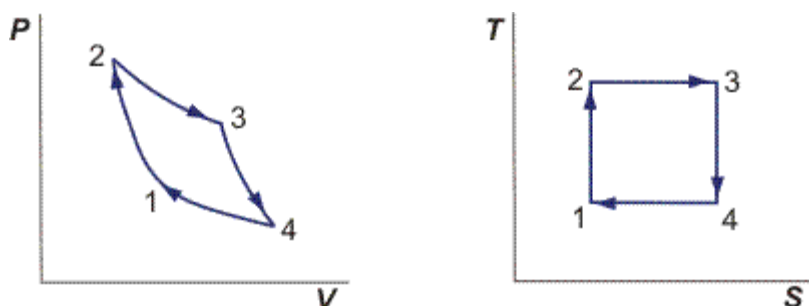
### 7.1 Carnotov ciklus

Carnotov ciklus [14] se odvija između dvije izoterme i dvije izentrope. Ako je temperatura dovođenja topline jednaka temperaturi ogrjevnog spremnika i ako je temperatura odvođenja jednaka temperaturi rashladnog spremnika, govorimo o idealnom Carnotovom ciklusu. Idealni Carnotov ciklus je tehnički neprimjenjiv jer podrazumijeva izotermni prijenos topline koji traje beskonačno dugo. Ipak, kako je Carnotov ciklus u potpunosti ravnotežni proces, služi nam kao svojevrsni etalon kvalitete drugih kružnih ciklusa jer maksimalni rad između dviju temperatura bi se postigao upravo Carnotovim ciklusom.

$$\eta_{carnot} = \frac{W}{\Phi_1} \quad (7.1)$$

$$\eta_{carnot} = \frac{m \cdot R \cdot (T_d - T_{od}) \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}}{m \cdot R \cdot T_d \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} \quad (7.2)$$

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_{od}}{T_d} \quad (7.3)$$



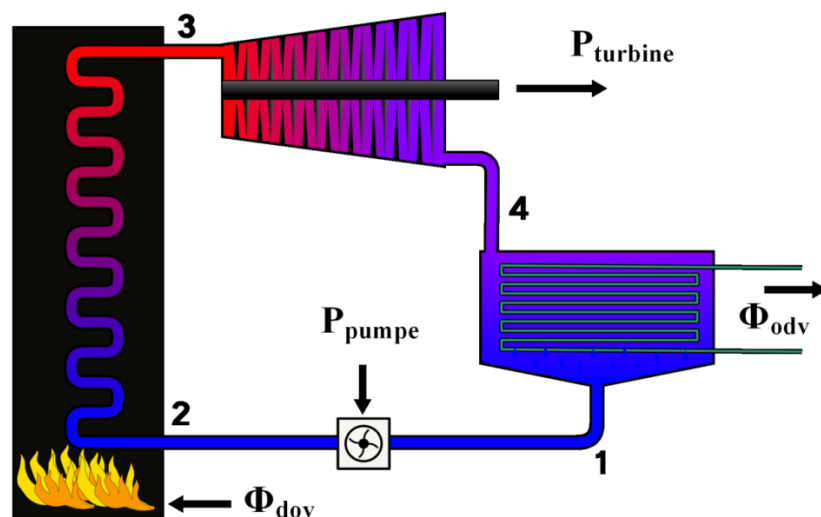
Slika 7.1. Carnotov ciklus u  $p,v$  i  $T,s$  dijagramu

Termički stupanj djelovanja realnog Carnotova ciklusa raste s povećanjem razlike termodinamičkih temperatura dovođenja i odvođenja topline.

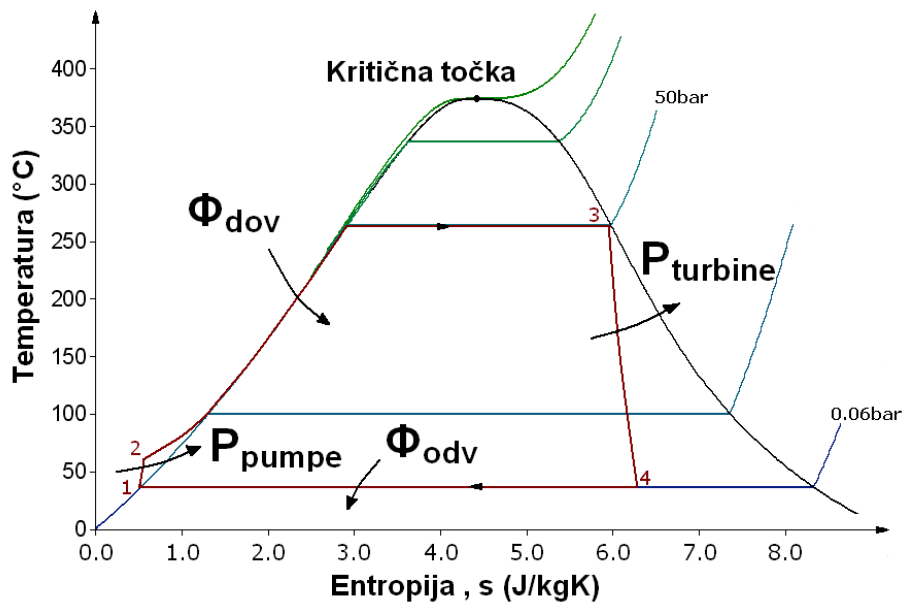
Iz prikazanog se daje zaključiti da je u svrhu povećanja termičkog stupnja djelovanja poželjno postići što višu temperaturu dovođenja i što nižu temperaturu odvođenja topline.

## 7.2 Rankineov ciklus

Rankineov ciklus (ili Clausius-Rankineov proces [15]) je termodinamički kružni proces koji ulaznu toplinu pretvara u mehanički rad. Proces se odvija između dvaju toplinskih spremnika, a radni medij, koji je uglavnom voda (vodena para), vraća se u svoje početno stanje nakon niza termodinamičkih procesa s čime je jedan ciklus završen. Ovaj proces je od izuzetne važnosti jer se njime proizvodi oko 85% električne energije na cijelom svijetu. Naziv je dobio po škotskom inženjeru i fizičaru Williamu Johnu Macquornu Rankineu i R.J.E. Clausiusu.



Slika 7.2. Rankineov ciklus u svom osnovnom obliku i četiri osnovne komponente [15]



Slika 7.3.  $T,s$  dijagram tipičnog realnog Rankineovog ciklusa između tlakova 0,06 bar i 50 bar [15]

Radno je sredstvo vodena para, nastala izobarnim isparavanjem u generator pare, koja izentropno ekspanzira u turbini ostvarujući mehanički rad, zatim izobarno kondenzira u kondenzatoru, te se izentropskom kompresijom vraća u generator pare.

Komponente osnovnog Rankineovog ciklusa kao osnovnog modela parne elektrane su: Parni kotao, turbina, kondenzator i pumpa. Postoje četiri osnovna procesa u Rankineovom ciklusu, koji su označeni na Slici 7.3.

**1-2:** Voda se izentropski tlači na visoki tlak koji odgovara tlaku koji vlada u parnom kotlu.

**2-3:** U parnom kotlu se pri konstantnom tlaku voda zagrijava vrućim dimnim plinovima, nastalim od određenog goriva, od stanja pothlađene kapljevine do stanja suhozasićene pare.

**3-4:** Suhozasićena vodena para nakon izlaska iz kotla ulazi u turbinu gdje izentropski ekspanzira pri čemu proizvodi mehanički rad.

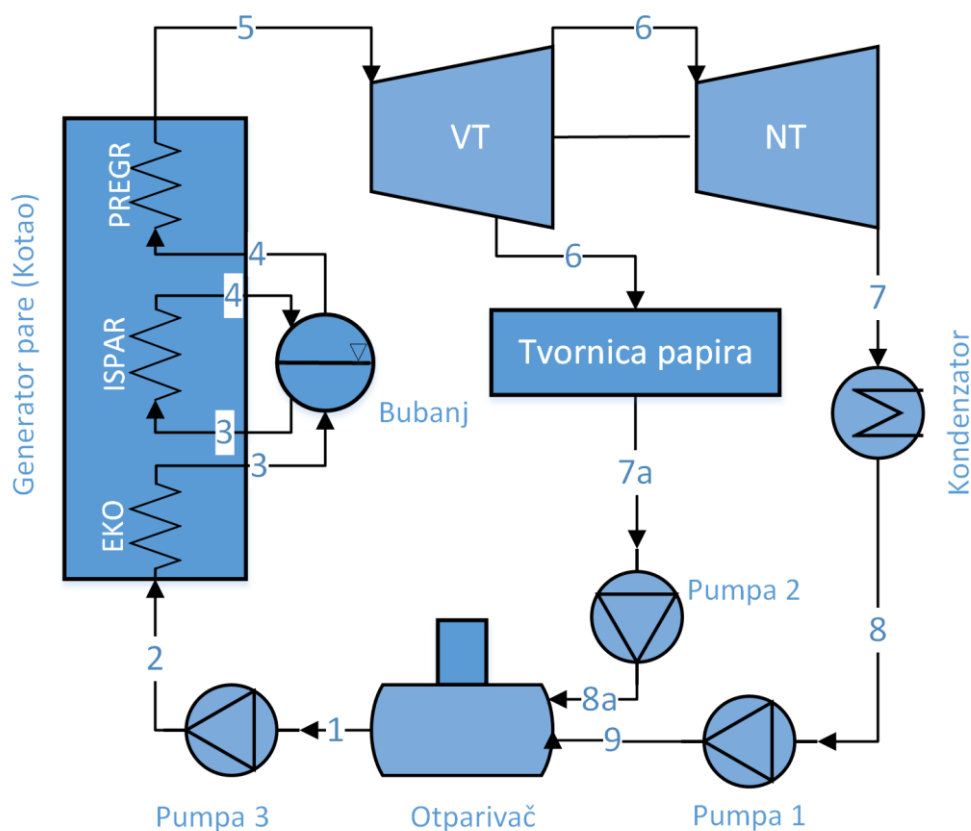
**4-1:** Nakon izlaska iz turbine, nastala zasićena (mokra) para ulazi u kondenzator gdje se pri konstantnom tlaku hladi i kondenzira do stanja vrele kapljevine nakon čega je spremna za ulazak u pumpu i time je ciklus završen.

U svakom realnom Rankineovom ciklusu promjene stanja 1-2 i 3-4 nisu izentropske, već generiraju određeni iznos entropije, što uzrokuje smanjenje izlaznog rada turbine i povećanje uloženog rada za pumpu. To dovodi do smanjenja stupnja djelovanja cijelog procesa.

U grafičkom je prikazu omeđen dvjema izentropama i dvjema izobarama. Ako je proveden u zasićenom području, proces je identičan Carnotovu kružnom procesu.

### 7.3 Matematički model spalionice

U zadatku diplomskog rada definirani su glavni parametri i odlike primijenjenog procesa.



Slika 7.4. Shema kogeneracijskog postrojenja

#### 7.3.1 Promjene stanja

##### 1-2 Kompresija

Voda se komprimira u visokotlačnoj pumpi na tlak s kojim prolazi kroz generator pare.



$$h_{2iz} = h_1 + \frac{P_{p1}}{q_{m1}} \quad (7.4)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2iz} - h_1}{\eta_{p1}} \quad (7.5)$$

### 2-3 Zagrijavanje u ekonomajzeru

Ekonomajzer je posljednja izmjenjivačka površina u generatoru pare. U njemu se predgrijava voda i ulazi u bubanj, a dimni plinovi se hlade na temperaturu s kojom ulaze u dimnjak.

$$h_3 = h_2 + \frac{\Phi_{eko}}{q_{m1}} \quad (7.6)$$

### 3-4 Zagrijavanje u isparivaču

U isparivačkom djelu generatora pare dolazi do promjene faze (isparavanja) vode. Kapljevita faza iz bubnja ulazi u krug isparivača i vraća se u obliku pare u bubanj.

$$h_4 = h_3 + \frac{\Phi_{isp}}{q_{m1}} \quad (7.7)$$

### 4-5 Zagrijavanje u pregrijaču

Parna faza iz bubnja ulazi u pregrijačke površine i pregrijava se na temperaturu s kojom ulazi u visokotlačni dio turbine

$$h_5 = h_4 + \frac{\Phi_{pre}}{q_{m1}} \quad (7.8)$$

*5-6 Ekspanzija u VT dijelu turbine*

U visokotlačnom dijelu turbine para ekspandira do tlaka oduzimanja za industriju papira. Dio pare odvodi se prema tvornici papira, a dio u niskotlačni dio turbine.

$$h_{6iz} = h_5 + \frac{P_{VT}}{q_{m1}} \quad (7.9)$$

$$h_6 = h_5 + (h_{6iz} - h_5) \cdot \eta_{VT} \quad (7.10)$$

*6-7 Ekspanzija u NT dijelu turbine*

Dio pare koji ulazi u niskotlačni dio turbine ekspandira do tlaka kondenzacije.

$$h_{7iz} = h_6 + \frac{P_{NT}}{q_{m2}} \quad (7.11)$$

$$h_7 = h_6 + (h_{7iz} - h_6) \cdot \eta_{NT} \quad (7.12)$$

*7-8 Kondenzacija*

U kondenzatoru para iz niskotlačnog dijela turbine kondenzira do stanja vrele kapljevine.

$$h_8 = h_7 + \frac{\Phi_{kond}}{q_{m2}} \quad (7.13)$$

*8-9 Kompresija u niskotlačnoj pumpi kondenzata*

Nakon kondenzacije kapljevitava voda komprimira se u pumpi do tlaka miješanja.

$$h_{9iz} = h_8 + \frac{P_{p2}}{q_{m2}} \quad (7.14)$$

$$h_9 = h_8 + \frac{h_{9iz} - h_8}{\eta_{p2}} \quad (7.15)$$

### 9-1 Miješanje u otplinjaču.

Tokovi iz niskotlačnog dijela turbine i iz papirne industrije miješaju se u otplinjaču prilikom čega se otplinjavaju i plinovi otopljeni u vodi.

$$h_1 = h_9 + h_{8a} \quad (7.16)$$

### 6-7a Oduzimanje topline prema kogeneraciji

Para oduzeta s visokotlačnog dijela turbine koristi se u procesima u industriji papira gdje kondenzira.

$$h_{7a} = h_6 + \frac{\Phi_{kog}}{q_{m3}} \quad (7.17)$$

### 7a-8a Kompresija u niskotlačnoj pumpi industrije papira

Kondenzat iz tvornice papira komprimira se na tlak miješanja i takva ulazi u otplinjač.

$$h_{8aiz} = h_{7a} + \frac{P_{p3}}{q_{m3}} \quad (7.18)$$

$$h_{8a} = h_{7a} + \frac{h_{8aiz} - h_{7a}}{\eta_{p3}} \quad (7.19)$$

### 7.3.2 Tokovi energije

*Toplinski tok doveden u kotlu*

Ukupan toplinski tok predan na radni medij u kotlu. Uključuje toplinski tok dobiven na ekonomajzerskim, isparivačkim i pregrijačkim površinama.

$$\Phi_h = q_{m1} \cdot (h_5 - h_2) \quad (7.20)$$

*Toplinski tok odveden prema industriji papira*

Para oduzeta na tlaku oduzimanja odlazi na izmjenjivač topline (grijalicu) u kojoj kondenzira i predaje toplinski tok industriji papira.

$$\Phi_{ip} = -q_{m3} \cdot (h_{7a} - h_6) \quad (7.21)$$

*Toplinski tok odveden u kondenzatoru*

$$\Phi_c = -q_{m2} \cdot (h_8 - h_7) \quad (7.22)$$

*Snaga odvedena u visokotlačnom dijelu turbine*

Kroz visokotlačni dio turbine prolazi ukupan maseni tok radnog medija i ekspandira do tlaka oduzimanja.

$$P_{VT} = -q_{m1} \cdot (h_6 - h_5) \quad (7.233)$$

*Snaga odvedene u niskotlačnom dijelu turbine*

Kroz niskotlačni dio turbine prolazi samo maseni tok radnog medija koji se ne oduzima na tlaku oduzimanja.

$$P_{NT} = -q_{m2} \cdot (h_7 - h_6) \quad (7.244)$$

*Snaga dovedena na pumpi kondenzata*

Pumpa kondenzata podiže tlak kondenzata iz kondenzatora na tlak miješanja.

$$P_{P1} = q_{m2} \cdot (h_9 - h_8) \quad (7.255)$$

*Snaga dovedena na pumpi oduzimanja*

Pumpa oduzimanja podiže tlak kondenzata iz grijalice na tlak miješanja.

$$P_{P2} = q_{m3} \cdot (h_{8a} - h_{7a}) \quad (7.266)$$

*Snaga dovedena na visokotlačnoj pumpi*

Visokotlačna pumpa podiže tlak ukupnog masenog protoka radnog medija na tlak isparavanja.

$$P_{P3} = q_{m1} \cdot (h_2 - h_1) \quad (7.277)$$

*Ukupna snaga*

Snaga umanjena za vlastitu potrošnju za pogon pumpi, tj. snaga koja se predaje u mrežu.

$$P_{UK} = P_{VT} + P_{NT} - P_{P1} - P_{P2} - P_{P3} \quad (7.288)$$

### 7.3.3 Ostalo

*Električna iskoristivost*

$$\eta_E = \frac{P_{UK}}{\Phi_h} \quad (7.29)$$

*Toplinska iskoristivost*

$$\eta_T = \frac{\Phi_{ip}}{\Phi_h} \quad (7.30)$$

*Ukupna iskoristivost*

$$\eta_{UK} = \frac{P_{UK} + Q_{ip}}{\Phi_h} \quad (7.31)$$

*Sadržaj pare*

Sadržaj pare ne smije biti niži od 85% zbog opasnosti od erozije i korozije zadnjih stupnjeva lopatica.

$$x = \frac{h - h'}{h'' - h'} \quad (7.32)$$

## 8 REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacija zadanih u tekstu zadatka i provedenih u programskom paketu MATLAB™. U poglavlju 8.1 analiziran je Rankineov ciklus postrojenja, dok su u poglavlju 8.2 analizirane veličine i ograničenja cijelog postrojenja, uključujući ovisnosti o donjoj ogrjevnoj vrijednosti goriva i iskoristivosti kotla.

### 8.1 Analiza Rankineovog ciklusa

#### 8.1.1 Matematički model Rankineovog ciklusa

Model je napravljen za nazivne parametre postrojenja. Za potrebe određivanja stanja radnog medija u pojedinim točkama procesa korišten je dodatak programskom paketu MATLAB™ u kojem su sadržane toplinske tablice sa svojstvima za najčešće korištene radne medije u inženjerskoj praksi, CoolProp™ [16].

U Tablici 8.11 prikazani su ulazni podatci za proračun.

Tablica 8.1. Ulazni podatci

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica	Opis
$m_1$	48	t/h	Ukupni maseni protok vode
$m_3$	31	t/h	Maseni protok vode prema tvornici papira
$\eta_p$	85	%	Iskoristivost pumpe
$\eta_t$	86,2	%	Iskoristivost turbine
$p_5$	44	bar	Tlak isparavanja
$T_5$	400	°C	Temperatura nakon pregrijavanja
$p_6$	5,6	bar	Tlak oduzimanja
$p_7$	0,25	bar	Tlak kondenzacije
$p_9$	9	bar	Tlak miješanja

U slijedećih nekoliko stranica može se vidjeti skripta napisana u programskom paketu MATLAB™.

```

clc
clear

m1=48/3.6; %Ukupni maseni tok
m3=31/3.6; %Maseni tok - industrija papira
m2=m1-m3; %Maseni tok - NT turbina
etap=0.85; %Iskoristivost pumpe
etat=0.862; %Iskoristivost turbine

%3 nakon ekonomajzera
p3=44*10^5; %Pa
T3=CoolProp.PropsSI('T','P',p3,'Q',0,'Water'); %K
h3=CoolProp.PropsSI('T','P',p3,'Q',0,'Water'); %J/(kg K)
s3=CoolProp.PropsSI('T','P',p3,'Q',0,'Water'); %J/(kg K)

%4 nakon ispariva#a
p4=p3; %Pa
T4=CoolProp.PropsSI('T','P',p4,'Q',1,'Water'); %K
h4=CoolProp.PropsSI('H','T',T4,'Q',1,'Water'); %J/(kg K)
s4=CoolProp.PropsSI('S','T',T4,'Q',1,'Water'); %J/(kg K)

%5 nakon pregrija#a
T5=273.15+400; %K
p5=p4; %Pa
h5=CoolProp.PropsSI('H','T',T5,'P',p5,'Water'); %J/(kg K)
s5=CoolProp.PropsSI('S','T',T5,'P',p5,'Water'); %J/(kg K)

%6 nakon VT dijela turbine
s6iz=s5;
p6=5.6*10^5; %Pa
T6iz=CoolProp.PropsSI('T','S',s6iz,'P',p6,'Water'); %K
h6iz=CoolProp.PropsSI('H','S',s6iz,'P',p6,'Water'); %J/(kg K)
h6=h5+(h6iz-h5)*etat; %J/(kg K)
T6=CoolProp.PropsSI('T','H',h6,'P',p6,'Water'); %K
s6=CoolProp.PropsSI('S','H',h6,'P',p6,'Water'); %J/(kg K)

%7 nakon NT dijela turbine
s7iz=s6; %J/(kg K)
p7=0.25*10^5; %Pa
T7iz=CoolProp.PropsSI('T','S',s7iz,'P',p7,'Water'); %K
h7iz=CoolProp.PropsSI('H','S',s7iz,'P',p7,'Water'); %J/(kg K)
h7=h6+(h7iz-h6)*etat; %J/(kg K)
s7=CoolProp.PropsSI('S','H',h7,'P',p7,'Water'); %J/(kg K)
T7=CoolProp.PropsSI('T','S',s7,'P',p7,'Water'); %K

%8 nakon kondenzacije
p8=p7; %Pa
T8=CoolProp.PropsSI('T','Q',0,'P',p8,'Water'); %K
h8=CoolProp.PropsSI('H','Q',0,'P',p8,'Water'); %J/(kg K)
s8=CoolProp.PropsSI('S','Q',0,'P',p8,'Water'); %J/(kg K)

%9 nakon NT pumpe kondenzata (NT Pumpa 1)

```



```

s9iz=s8; %J/ (kg K)
p9=9*10^5; %Pa
T9iz=CoolProp.PropsSI('T','S',s9iz,'P',p9,'Water'); %K
h9iz=CoolProp.PropsSI('H','S',s9iz,'P',p9,'Water'); %J/ (kg K)
h9=h8+(h9iz-h8)/etap; %J/ (kg K)
s9=CoolProp.PropsSI('S','H',h9,'P',p9,'Water'); %J/ (kg K)
T9=CoolProp.PropsSI('T','S',s9,'P',p9,'Water'); %K

%7a povrat iz industrije papira
p7a=p6; %Pa
T7a=CoolProp.PropsSI('T','Q',0,'P',p7a,'Water'); %K
h7a=CoolProp.PropsSI('H','Q',0,'P',p7a,'Water'); %J/ (kg K)
s7a=CoolProp.PropsSI('S','Q',0,'P',p7a,'Water'); %J/ (kg K)

%8a nakon NT pumpe industrije papira (NT Pumpa 2)
p8a=p9; %Pa
T8aiz=60+273.15; %K
s8aiz=s7a; %J/ (kg K)
h8aiz=CoolProp.PropsSI('H','S',s8aiz,'P',p8a,'Water'); %J/ (kg K)
h8a=h7a+(h8aiz-h7a)/etap; %J/ (kg K)
s8a=CoolProp.PropsSI('S','H',h8a,'P',p8a,'Water'); %J/ (kg K)
T8a=CoolProp.PropsSI('T','S',s8a,'P',p8a,'Water'); %K

%1 nakon otplinja#a
h1=(h8a*m3+h9*m2)/(m1); %J/ (kg K)
p1=9*10^5; %Pa
T1=CoolProp.PropsSI('T','H',h1,'P',p1,'Water'); %K
s1=CoolProp.PropsSI('S','H',h1,'P',p1,'Water'); %J/ (kg K)

%2 nakon VT pumpe
s2iz=s1; %J/ (kg K)
p2=p3; %Pa
T2iz=CoolProp.PropsSI('T','S',s2iz,'P',p2,'Water'); %K
h2iz=CoolProp.PropsSI('H','S',s2iz,'P',p2,'Water'); %J/ (kg K)
h2=h1+(h2iz-h1)/etap; %J/ (kg K)
s2=CoolProp.PropsSI('S','H',h2,'P',p2,'Water'); %J/ (kg K)
T2=CoolProp.PropsSI('T','S',s2,'P',p2,'Water'); %K

% Toplina dovedena u kotlu
Qh=m1*(h5-h2); %W

% VT ekspanzija
P1=m1*(h6-h5); %W

% NT ekspanzija
P2=m2*(h7-h6); %W

% Pumpa kondenzata
Pp1=m2*(h9-h8); %W

% Pumpa industrija papira
Pp2=m3*(h8a-h7a); %W

```

```

%   Visokotla#na pumpa
Pp3=m1*(h2-h1);                                     %W

P=P1+P2+Pp1+Pp2+Pp3;                               %W

%   kondenzacija
Qc=m2*(h8-h7);                                     %W

%   Toplina odvedena prema papirnoj industriji
Qk=m3*(h7a-h6);                                     %W

%   Elektri#na iskoristivost
etaE=P/Qh;

%   Toplinska iskoristivost
etaT=Qk/Qh;

%   Ukupna iskoristivost
etaUK=(P+Qk)/Qh;

%   Sadržaj pare
X=CoolProp.PropsSI('Q','S',s7,'P',p7,'Water');     %kg/kg

pp1=p1*10^-5;   %tlak bar
TT1=T1-273.15; %temp °C
ss1=s1*10^-3;  %entropija kJ/(kg K)
hh1=h1*10^-3;  %entalpija kJ/(kg K)

pp2=p2*10^-5;   %tlak bar
TT2=T2-273.15; %temp °C
ss2=s2*10^-3;  %entropija kJ/(kg K)
hh2=h2*10^-3;  %entalpija kJ/(kg K)

pp3=p3*10^-5;   %tlak bar
TT3=T3-273.15; %temp °C
ss3=s3*10^-3;  %entropija kJ/(kg K)
hh3=h3*10^-3;  %entalpija kJ/(kg K)

pp4=p4*10^-5;   %tlak bar
TT4=T4-273.15; %temp °C
ss4=s4*10^-3;  %entropija kJ/(kg K)
hh4=h4*10^-3;  %entalpija kJ/(kg K)

pp5=p5*10^-5;   %tlak bar
TT5=T5-273.15; %temp °C
ss5=s5*10^-3;  %entropija kJ/(kg K)
hh5=h5*10^-3;  %entalpija kJ/(kg K)

pp6=p6*10^-5;   %tlak bar
TT6=T6-273.15; %temp °C
ss6=s6*10^-3;  %entropija kJ/(kg K)
hh6=h6*10^-3;  %entalpija kJ/(kg K)

pp7=p7*10^-5;   %tlak bar

```

```
TT7=T7-273.15; %temp °C
ss7=s7*10^-3; %entropija kJ/(kg K)
hh7=h7*10^-3; %entalpija kJ/(kg K)

pp8=p8*10^-5; %tlak bar
TT8=T8-273.15; %temp °C
ss8=s8*10^-3; %entropija kJ/(kg K)
hh8=h8*10^-3; %entalpija kJ/(kg K)

pp9=p9*10^-5; %tlak bar
TT9=T9-273.15; %temp °C
ss9=s9*10^-3; %entropija kJ/(kg K)
hh9=h9*10^-3; %entalpija kJ/(kg K)

pp7a=p7a*10^-5; %tlak bar
TT7a=T7a-273.15; %temp °C
ss7a=s7a*10^-3; %entropija kJ/(kg K)
hh7a=h7a*10^-3; %entalpija kJ/(kg K)

pp8a=p8a*10^-5; %tlak bar
TT8a=T8a-273.15; %temp °C
ss8a=s8a*10^-3; %entropija kJ/(kg K)
hh8a=h8a*10^-3; %entalpija kJ/(kg K)

% Matrica svojstava po točkama
tocke=[pp1 TT1 hh1 ss1;pp2 TT2 hh2 ss2;pp3 TT3 hh3 ss3;pp4 TT4 hh4 ss4;
pp5 TT5 hh5 ss5;pp6 TT6 hh6 ss6;pp7 TT7 hh7 ss7;pp8 TT8 hh8 ss8;...
pp9 TT9 hh9 ss9;pp7a TT7a hh7a ss7a;pp8a TT8a hh8a ss8a];
```

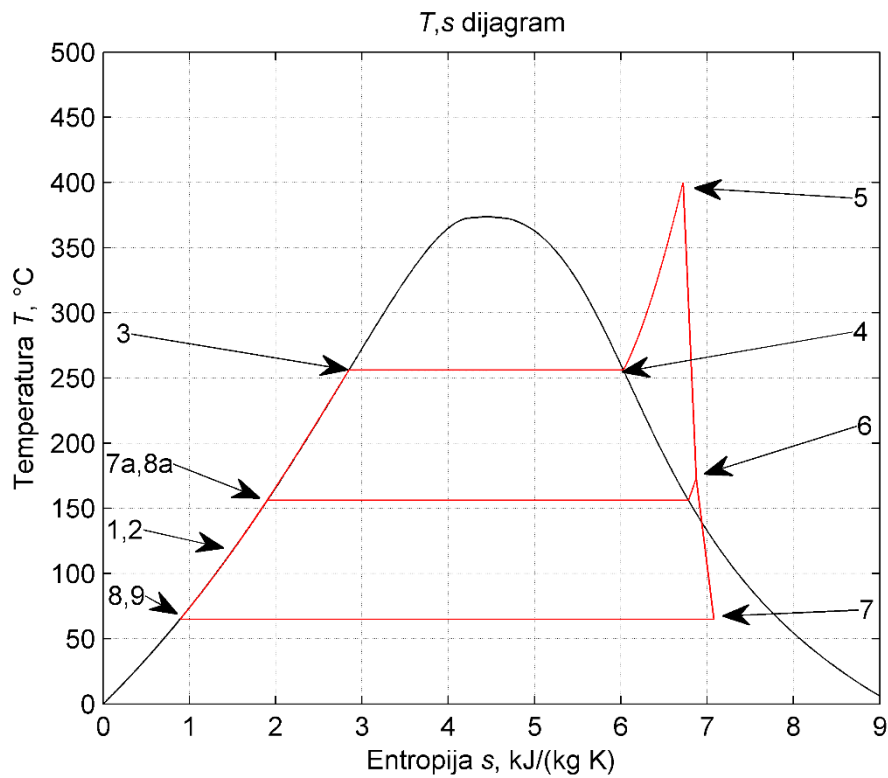
U Tablici 8.2 prikazani su rezultati proračuna za nazivno stanje.

Tablica 8.2. Rezultati proračuna

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica	Opis
$\Phi_h$	35742	kW	Toplinski tok doveden u kotlu
$\Phi_c$	18374	kW	Toplinski tok odveden u kondenzatoru
$\Phi_{ip}$	9872	kW	Toplinski tok odveden u grijalici
$P_{UK}$	7496	kW	Ukupna snaga
$P_{VT}$	5533	kW	Snaga dobivena na VT turbini
$P_{NT}$	3780	kW	Snaga dobivena na NT turbini
$P_{P1}$	4,96	kW	Snaga dovedena na pumpi kondenzata
$P_{P2}$	3,78	kW	Snaga dovedena na pumpi grijalice
$P_{P3}$	58,36	kW	Snaga dovedena na VT pumpi
$x$	0,891	kg/kg	Maseni sadržaj pare
$\eta_E$	20,97	%	Električna iskoristivost
$\eta_T$	51,41	%	Toplinska iskoristivost
$\eta_{UK}$	72,38	%	Ukupna iskoristivost

Prilikom proračuna Rankineovog ciklusa, kontroliran je sadržaj pare  $x$  na izlazu iz niskotlačnog dijela turbine. Sadržaj pare ne smije biti niži od 85 % [13] da ne dođe do intenzivne erozije i korozije zadnjih stupnjeva turbinskih lopatica. Utvrđeno je da u nazivnim uvjetima sadržaj pare zadovoljava uvjete.

Sljedeća slika prikazuje  $T,s$  dijagram desnokretnog Rankineovog procesa prema kojem radi opisana kogeneracija. Zajedno sa stanjima u pojedinim točkama.



Slika 8.1. T,s dijagram

Tablica 8.3. Rezultati proračuna u točkama Rankineovog ciklusa

Točka	Tlak $p$ , bar	Temperatura $\vartheta$ , °C	Entalpija $h$ , kJ/ (kg K)	Entropija $s$ , kJ/(kg K)
1	9	124,2689	522,4276	1,573119
2	44	124,7288	526,8047	1,57477
3	44	256,0701	1115,5	2,8490
4	44	256,0701	2798,596	6,029349
5	44	400	3207,425	6,719423
6	5,6	172,8662	2792,469	6,872447
7	0,25	64,96283	2362,464	7,07605
8	0,25	64,96283	271,9603	0,893192
9	9	65,04035	273,01	0,893658
7a	5,6	156,1491	658,7661	1,903965
8a	9	156,2037	659,205	1,904118

### 8.1.2 Simulacija Rankineovog ciklusa između 60% i 100% nazivnog masenog protoka svježe pare

Zbog linearne ovisnosti opterećenja generatora pare i masenog protoka svježe pare pri konstantnoj vrijednosti donje ogrjevne vrijednosti goriva i temperature kondenzacije, režim rada kotla između 60% i 100% opterećenja direktno je određen masenim protokom svježe pare između 60% i 100%.

$$\Phi_G = \frac{\Phi_h}{\eta_K} \quad (8.1)$$

$$\Phi_G = \frac{(h_5 - h_2)}{\eta_K} \cdot q_{m1} \quad (8.2)$$

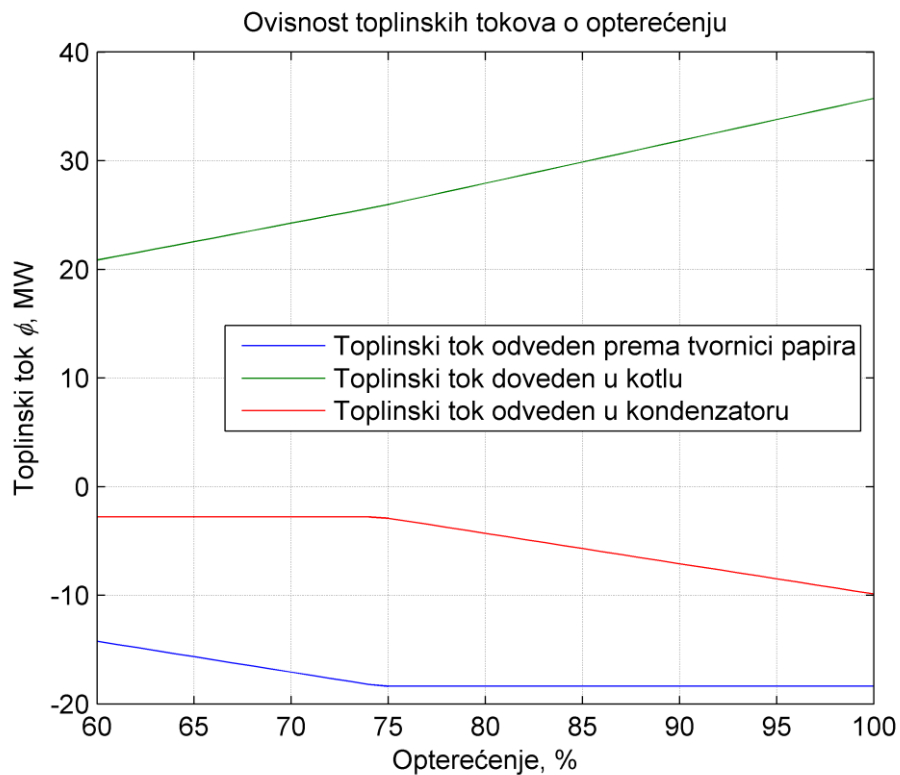
U tablici 8.4 je prikazana ogrjevna vrijednost i pripadajuća efikasnost kotla pri kojoj postrojenje radi u ovom režimu

Tablica 8.4. Parametri rada kotla pri različitim opterećenjima

	60 %	100 %		Opterećenje
$\Phi_G$	24	40	MW	Toplinski tok goriva
$q_{m1}$	28,8	48	t/h	Maseni tok svježe pare
$\eta_k$	89,35		%	Iskoristivost kotla
$H_d$	8,7		MJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost

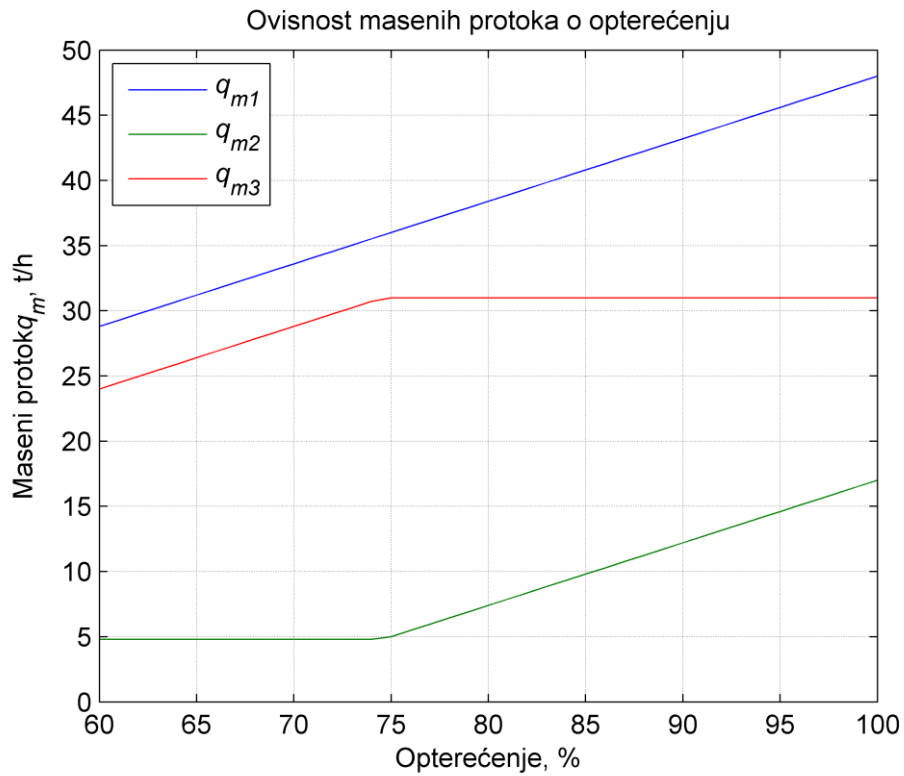
Tehnički minimum rada postrojenja postavljen je na 60% a određen je karakteristikama kotla. Simulacija rada Rankineovog ciklusa prikazana je s konstantnim veličinama stanja u točkama ciklusa, što znači da se snaga postrojenja mijenja isključivo promjenom protoka napojne vode. Valja napomenuti da je pri normalnom radu postrojenja, a time i samog Rankineovog ciklusa, isporuka topline prema tvornici papira uvijek konstantna.

Na sljedećoj slici (Slika 8.2) prikazan je dijagram toplinskih tokova u ovisnosti o masenom protoku svježe pare.

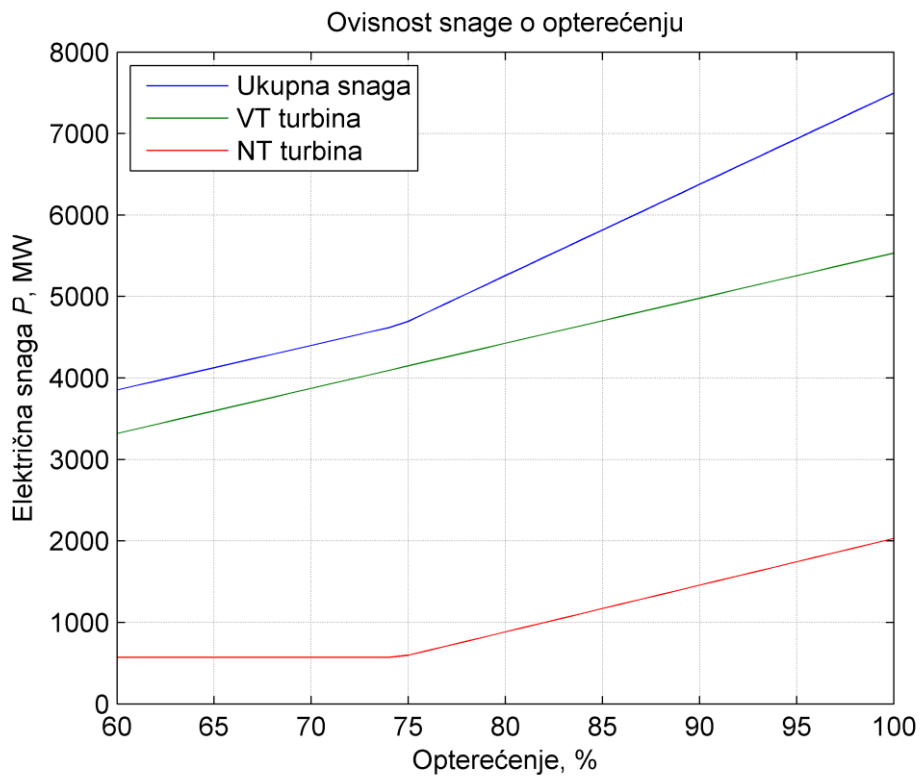


Slika 8.2. Ovisnost toplinskih tokova o opterećenju

Iz slike 8.2 se vidi da postrojenje ne može isporučiti nazivni protok pare prema tvornici papira ako radi u režimu ispod 75%. razlog tome je to što kroz niskotlačni dio turbine protok pare ne smije biti niži od 10% nazivnog protoka (Slika 8.3) kako bi se spriječilo pregrijavanje diskova i lopatica, tj. osiguralo njihovo hlađenje [13].



Slika 8.3. Ovisnost masenih protoka o opterećenju



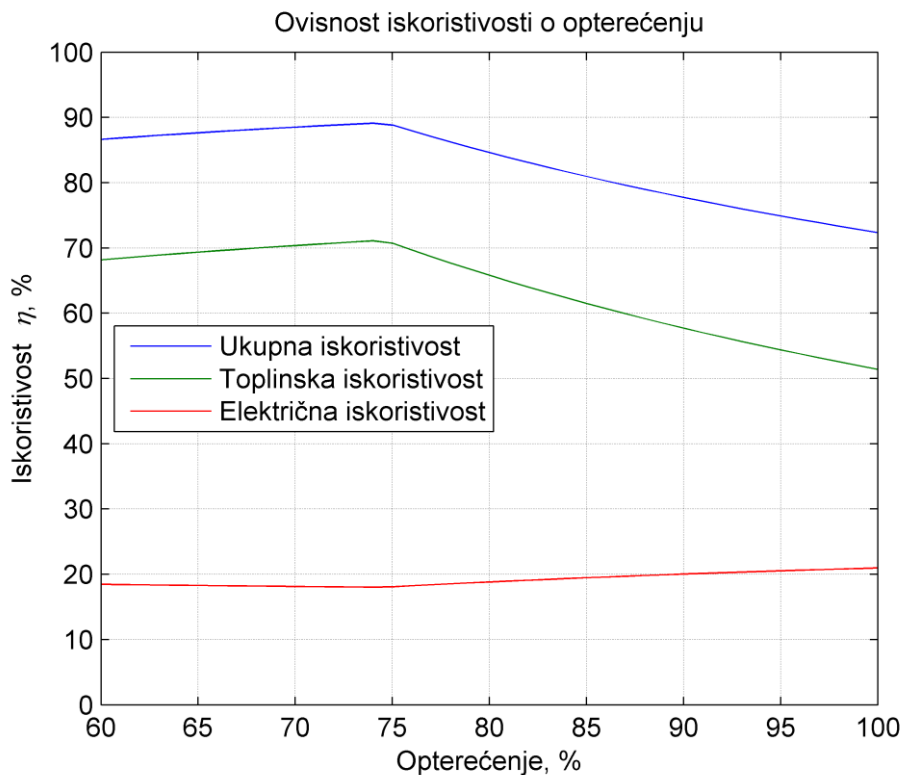
Slika 8.4. Ovisnost snage o opterećenju



### 8.1.3 Stupnjevi iskorištenja Rankineovog ciklusa u ovisnosti o masenom protoku svježe pare

Slika 8.5 prikazuje iskoristivosti postrojenja. Ukupna iskoristivost postrojenja pada sa povećanjem opterećenja iznad 75%, ukupna iskoristivost najveća je u točki u kojoj je zadovoljen uvjet da 10% nazivnog protoka pare prolazi kroz niskotlačni dio turbine i zahtjev od tvornice papira za 31 t/h pare.

Približno jednako kao krivulja ukupne iskoristivosti, proteže se krivulja toplinske iskoristivosti, dok se električna iskoristivost povećava od 75% do 100% opterećenja.



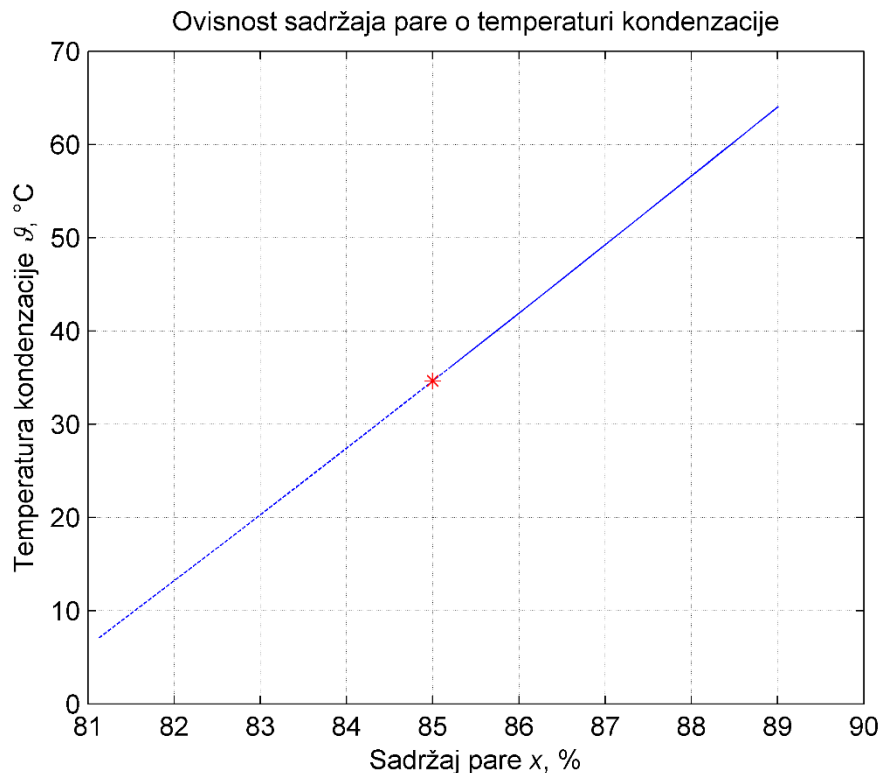
Slika 8.5. Ovisnost iskoristivosti o opterećenju

### 8.1.4 Simulacija Rankineovog ciklusa pri različitim temperaturama kondenzacije

#### Minimalna temperatura kondenzacije

Smanjenjem temperature kondenzacije sadržaj pare na izlazu iz niskotlačnog dijela turbine također se smanjuje. Kao što je prije naglašeno, sadržaj pare mora biti veći od 85 % kako ne bi došlo do erozije na lopaticama posljednjih stupnjeva NT turbine. Iz tog razloga određena je minimalna temperatura kondenzacije za ovaj proces pri sadržaju pare od 85 %. [13]

Slika 8.6 prikazuje ovisnost sadržaja pare o temperaturi kondenzacije, a u Tablici 8.5 su prikazane vrijednosti minimalne dozvoljene temperature kondenzacije i pripadajućeg tlaka



Slika 8.6. Ovisnost sadržaja pare o temperaturi kondenzacije

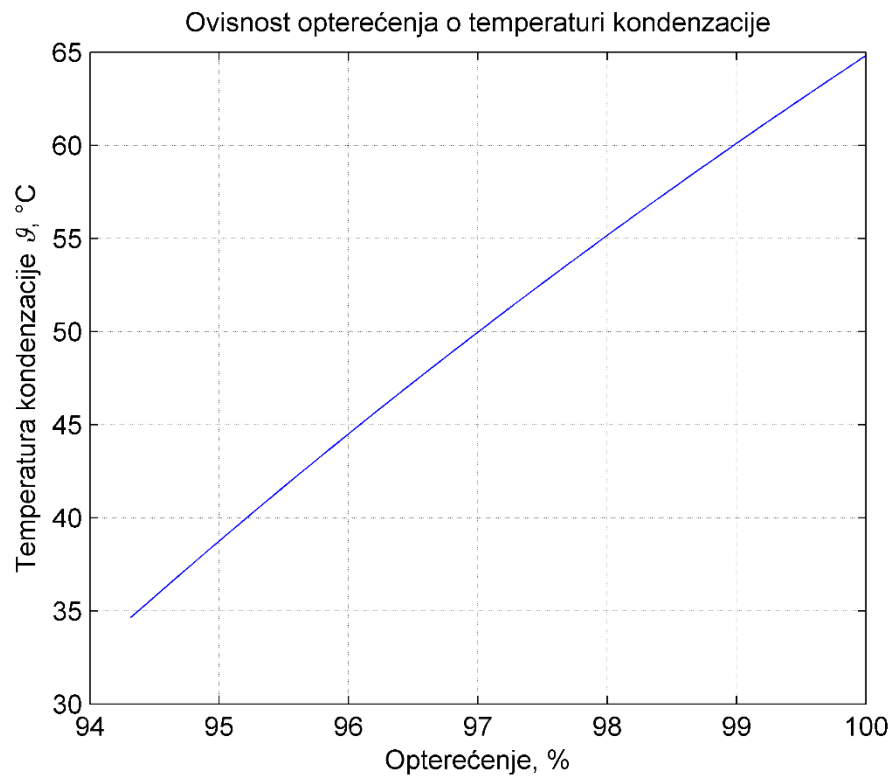
Tablica 8.5. Minimalna temperatura kondenzacije

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica	Opis
$x_{\min}$	85	%	Minimalan dozvoljen sadržaj pare
$p_{\text{kond min}}$	0,055	bar	Minimalan dozvoljen tlak kondenzacije
$T_{\text{kond min}}$	34,64	°C	Minimalna dozvoljena temperatura kond.

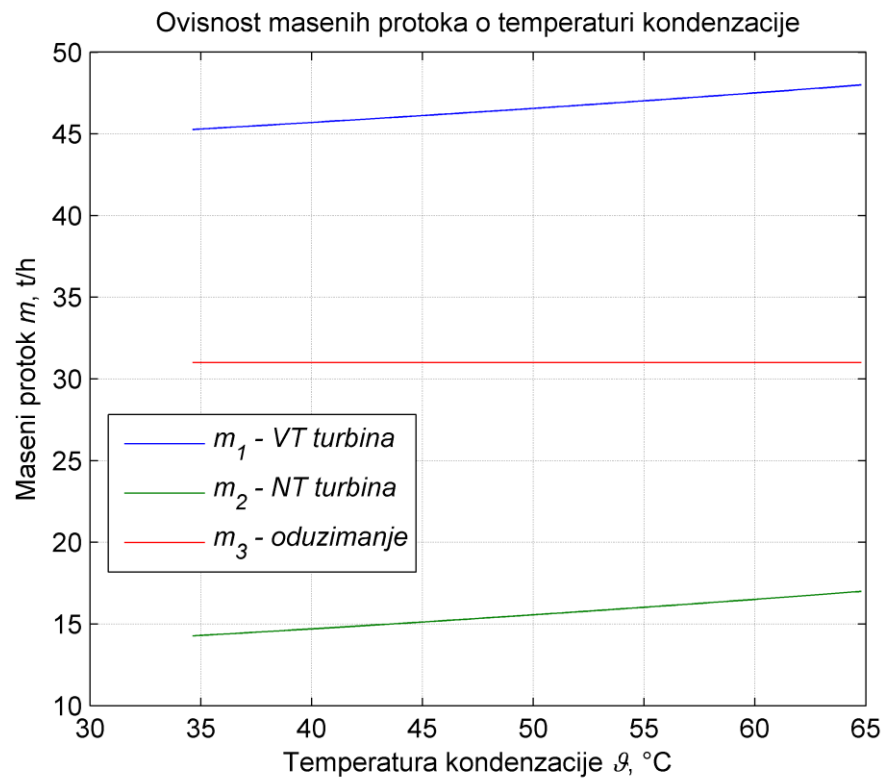
### 8.1.5 Promjena masenog protoka svježeg pare uslijed promjene temperature kondenzacije

Kada je maseni protok pare kroz kotao maksimalan  $m_{1\max} = 48$  t/h i kada je ukupna snaga maksimalna  $P_{\max} = 7,50$  MW temperatura kondenzacije je  $T_{\text{kond}} = 64,96$  °C. Kada bi se temperatura kondenzacije smanjivala, a maseni protoci ostali nepromijenjeni došlo bi do povećanja snage na niskotlačnom dijelu turbine što bi dovelo do povećanja ukupne snage iznad maksimalne dozvoljene vrijednosti. Kako bi se snaga turbine pri sniženim temperaturama kondenzacije održala

na maksimalnoj dozvoljenoj razini potrebno je smanjivati maseni protok pare kroz turbinu. Protok pare kroz turbinu može se smanjiti samo promjenom protoka pare kroz kotao, tj. smanjenjem opterećenja kotla (ako je donja ogrijevna vrijednost  $H_d$  konstantna), budući da je protok oduzimanja pare prema tvornici papira konstantan.

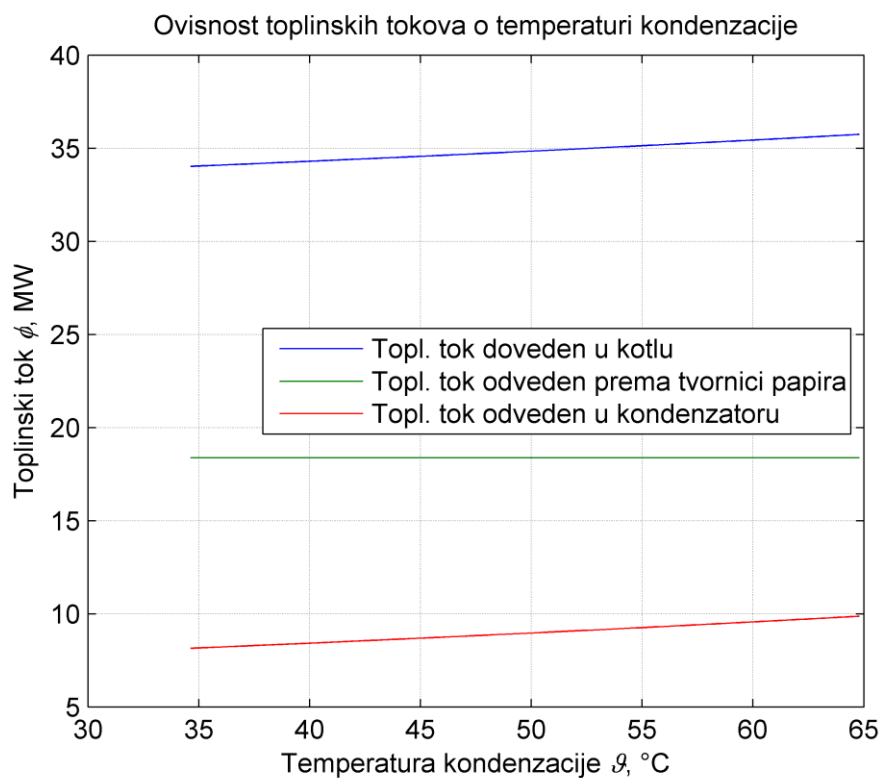


Slika 8.7. Ovisnost opterećenja o temperaturi kondenzacije

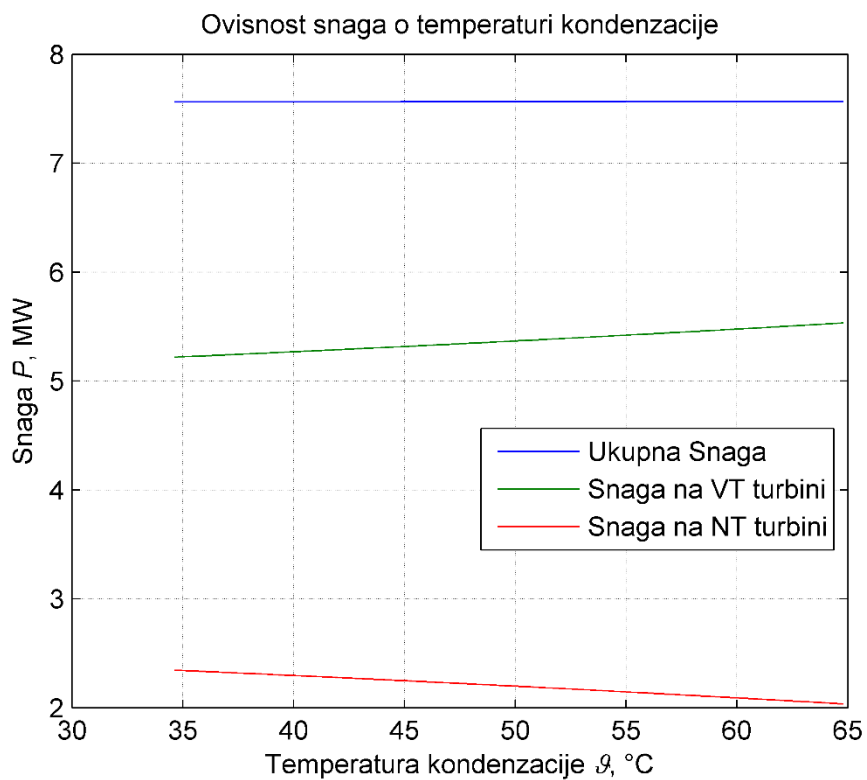


Slika 8.8. Ovisnost masenih protoka o temperaturi kondenzacije

Slika 8.9. prikazuje toplinske tokove u ovisnosti o promjeni temperature kondenzacije



Slika 8.9. Ovisnost toplinskih tokova o temperaturi kondenzacije

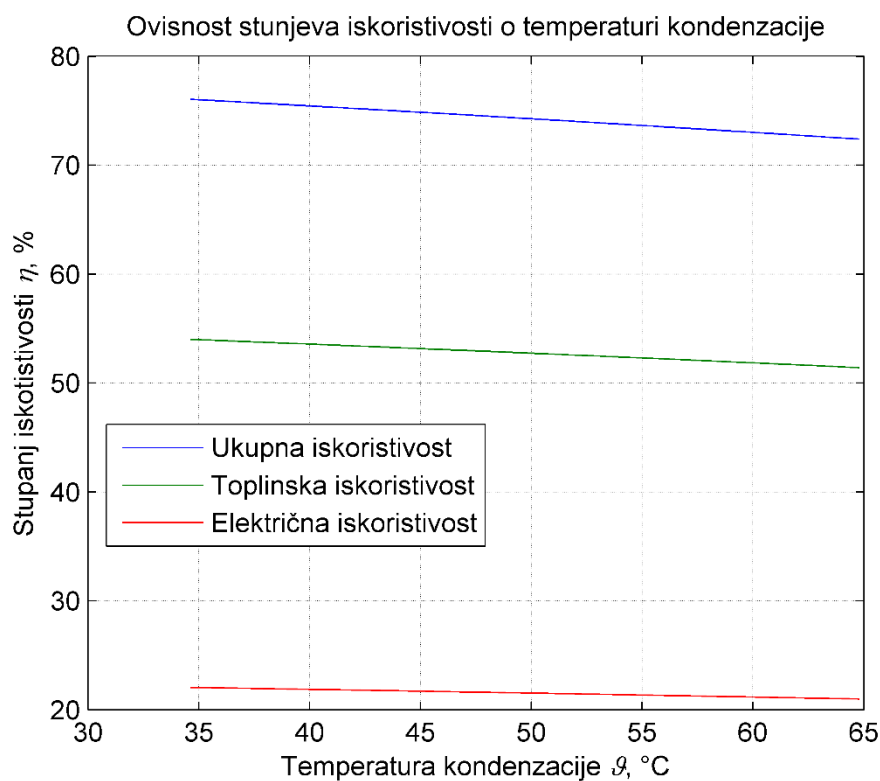


Slika 8.10. Ovisnost snaga o temperaturi kondenzacije

Na Slici 8.10 prikazane su snage u ovisnosti o temperaturi kondenzacije ukupna snaga je jednaka maksimalnoj snazi i konstantna je. Snaga na visokotlačnom dijelu turbine se smanjuje snižavanjem temperature kondenzacije zbog smanjenja protoka pare uslijed smanjenja opterećenja kotla.

Na niskotlačnom dijelu turbine dolazi do povećanja snage prilikom snižavanja temperature kondenzacije unatoč tome što se maseni protok kroz niskotlačni dio turbine smanjuje (Slika 8.8). Razlog tome je to što se razlika specifičnih entalpija u niskotlačnoj turbini povećava sa snižavanjem temperature kondenzacije u većoj mjeri nego što se maseni protok pare smanjuje.

### 8.1.6 Iskoristivosti Rankineovog ciklusa uslijed promjene temperature kondenzacije



Slika 8.11. Ovisnost stupnjeva iskoristivosti o temperaturi kondenzacije

Snižavanjem temperature kondenzacije povećavaju se sve iskoristivosti procesa, kako toplinska i električna tako i ukupna iskoristivost.

## 8.2 Analiza rada postrojenja

U ovom poglavlju analiziran je rad cijelog postrojenja uključujući utjecaje rada generatora pare i temperatura okoliša, te samog Rankineovog procesa.

Rad kotla opisan je u poglavlju 4.3. U Tablici 8.6 prikazane su vrijednosti i ograničenja kotla koja su potrebne za analizu rada postrojenja.

Tablica 8.6. Ograničenja rada kotla

Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica	Opis
$\Phi_{Gmax}$	40	MW	Maksimalan dozvoljeni toplinski tok goriva
$H_d$	8-18	MJ/kg	Raspon donjih ogrjevnih vrijednosti goriva
$q_G$	8-16	t/h	Raspon protoka goriva
$\Phi_{Gmin}$	24	MW	Minimalan dozvoljeni toplinski tok goriva
-	60-100	%	Raspon opterećenja kotla

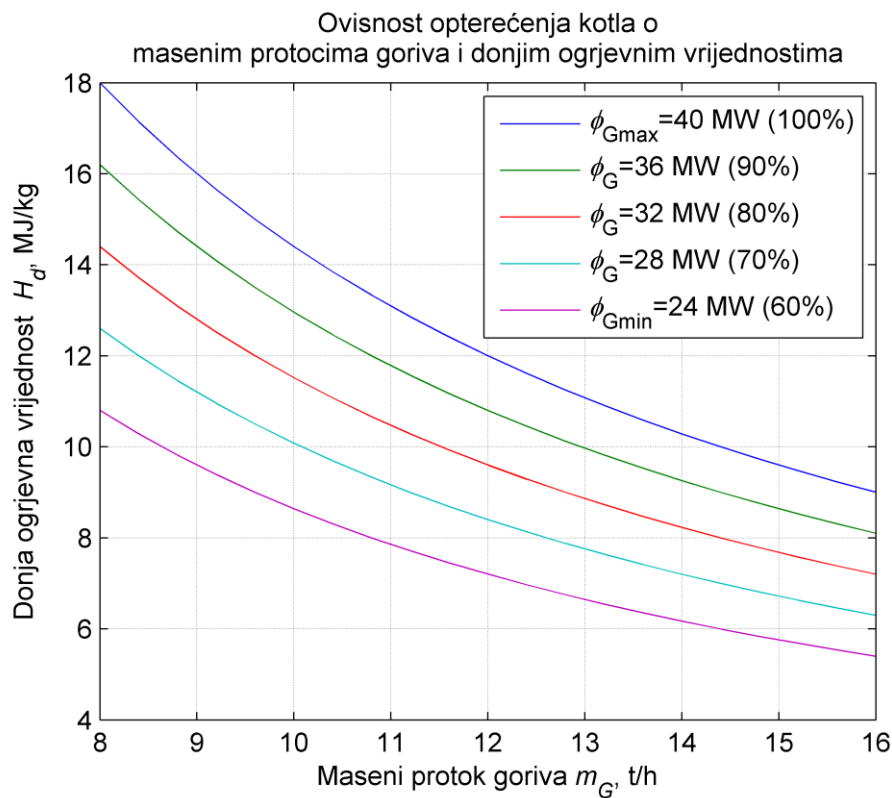
### 8.2.1 Područje rada kotla

Maksimalan dozvoljeni toplinski tok goriva  $\Phi_{Gmax}$  predstavlja potencijalni energetska tok goriva. Izražava se kao umnožak protoka goriva  $q_G$  i ogrjevne vrijednosti  $H_d$ .

$$\Phi_{Gmax} = H_d \cdot q_G \quad (8.3)$$

Minimalni dozvoljeni toplinski tok  $\Phi_{Gmin}$  određen je umnoškom maksimalnog dozvoljenog toplinskog toka goriva  $\Phi_{Gmax}$  i najnižeg dozvoljenog opterećenja kotla.

$$\Phi_{Gmin} = \Phi_{Gmax} \cdot 0,6 \quad (8.4)$$



Slika 8.12. Područje rada kotla

Na slici 8.12 prikazana je ovisnost masenih protoka goriva  $q_G$  i donjih ogrjevnih vrijednosti  $H_d$  o opterećenju kotla. Naime nije moguće voziti postrojenje na maksimalnom protoku goriva ako je to gorivo visoke donje ogrjevne vrijednosti  $H_d$ , jer bi tada toplinski tok goriva  $\Phi_G$  premašio maksimalan dozvoljeni toplinski tok goriva  $\Phi_{Gmax}$ . Isto tako nije moguće voziti postrojenje na minimalnom protoku goriva ako je to gorivo niske donje ogrjevne vrijednosti  $H_d$ , jer bi tada toplinski tok goriva  $\Phi_G$  bio niži od minimalnog dozvoljenog toplinskog toka goriva  $\Phi_{Gmin}$ . Dakle, područje rada kotla omeđeno je krivuljama minimalnog  $\Phi_{Gmin}=24$  MW (60%) i maksimalnog dozvoljenog toplinskog toka goriva  $\Phi_{Gmax}=40$  MW (100%).

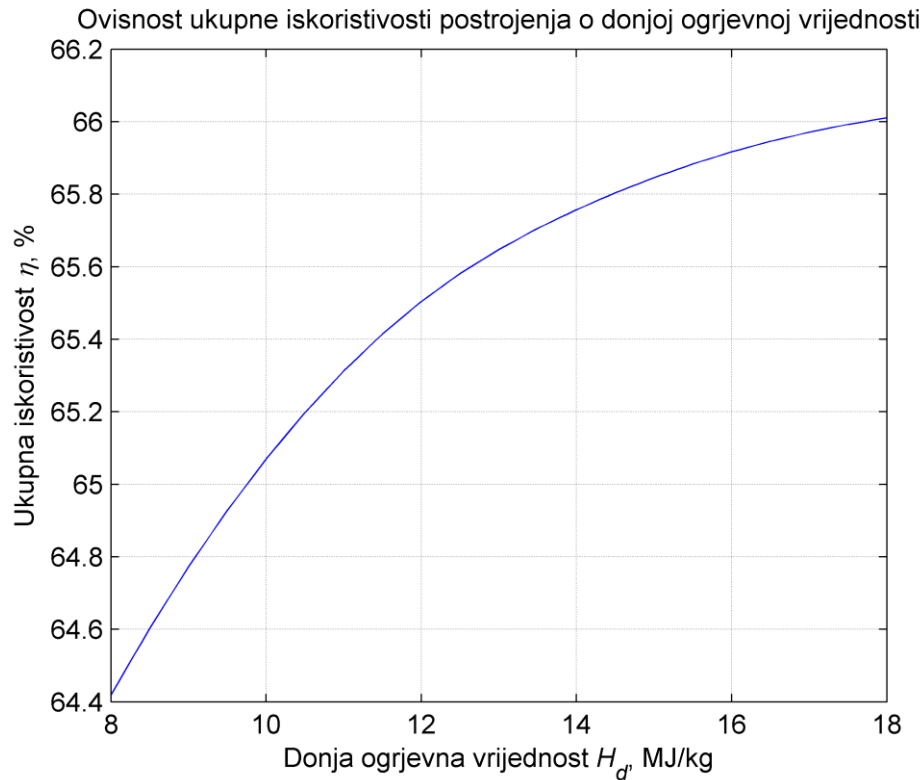
### 8.2.2 Simulacija rada kotla s gorivima različitih donjih ogrjevnih vrijednosti

Ova simulacija provedena je za nazivne uvjete rada postrojenja, opisane u poglavlju 8.1.1:

- $\Phi_G=\Phi_{Gmax}=40$  MW (100%),
- $\vartheta_{kond}=64,96^\circ\text{C}$ ,
- $P=7,5$  MW.



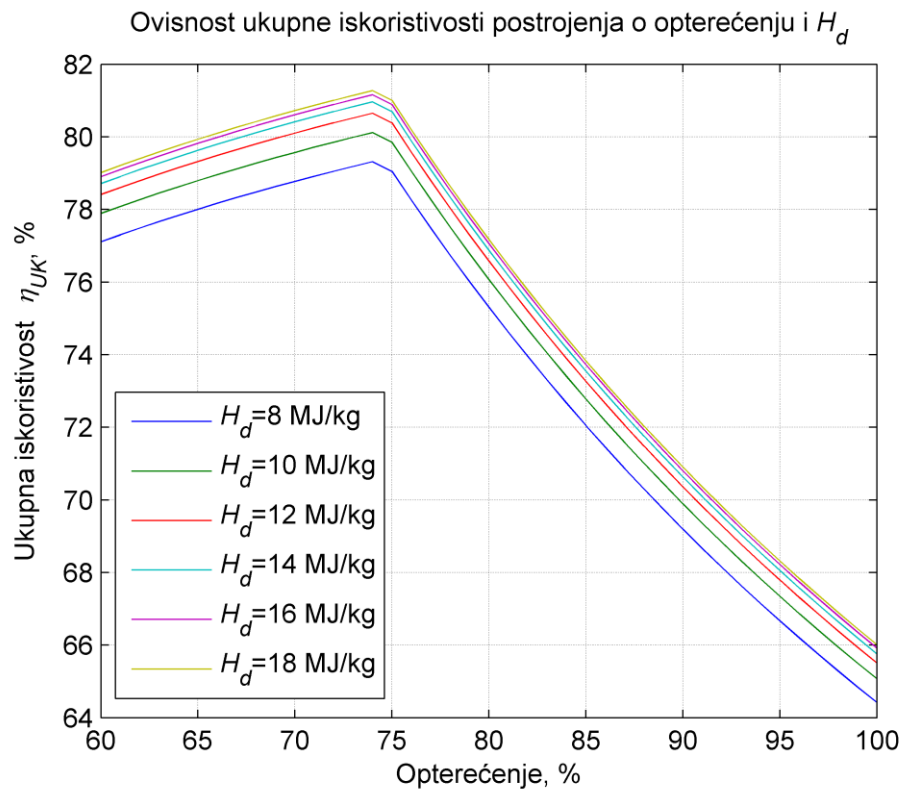
U poglavlju 4.3 opisana je ovisnost pretička zraka i iskoristivosti kotla o donjoj ogrjevnoj vrijednosti goriva  $H_d$ . Na slici 8.13 prikazana je ovisnost ukupne iskoristivosti postrojenja o donjoj ogrjevnoj vrijednosti pri nazivnom opterećenju (100%).



Slika 8.13. Ovisnost ukupne iskoristivosti postrojenja o donjoj ogrjevnoj vrijednosti  $H_d$

Ovdje prikazana ukupna iskoristivost predstavlja ukupnu iskoristivost cijelog postrojenja, tj. ovdje je uzeta u obzir i iskoristivost kotla, dok je u prijašnjim proračunima prikazana ukupna iskoristivost samog Rankineovog ciklusa (iskoristivost kotla nije uzimana u obzir).

Na slici 8.14 prikazane su ukupne iskoristivosti postrojenja u ovisnosti o donjim ogrjevnim vrijednostima i opterećenju kotla.



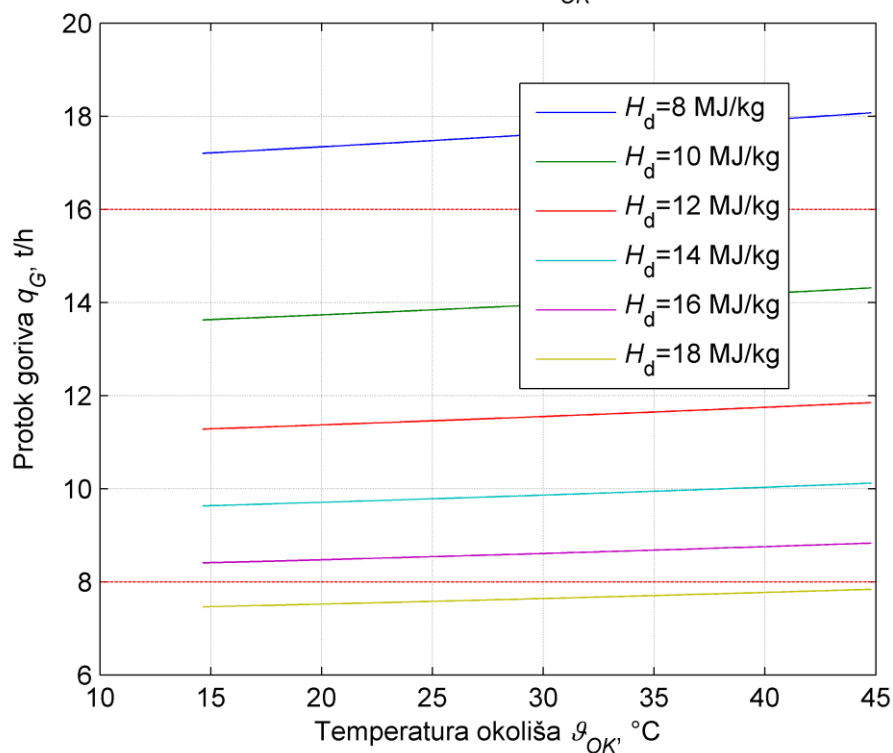
Slika 8.14. Ovisnost ukupne iskoristivosti o opterećenju i donjoj ogrjevnoj vrijednosti

### 8.2.3 Poveznica između temperature kondenzacije $\vartheta_{\text{kond}}$ i temperature okoliša $\vartheta_{\text{ok}}$

Kondenzacija pare nakon niskotlačne ekspanzije odvija se u zraku hlađenom rashladnom tornju. Zbog nepoznavanja radnih parametara rashladnog tornja, tj. temperature razlike između temperature kondenzacije i temperature okoliša, u prijašnjim proračunima prikazane su simulacije u ovisnosti o temperaturama kondenzacije a ne u ovisnosti o temperaturama okoliša.

Na sljedećoj slici prikazana je simulacija rada postrojenja pri različitim temperaturama okoliša uz uvjet da je temperaturna razlika između temperature kondenzacije i temperature okoliša  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ovisnost protoka goriva o temperaturi okoliša  $\vartheta_{OK}$  i donjim ogrjevnim vrijednostim:



Slika 8.15. Ovisnost protoka goriva o temperaturi okoliša

Područje rada postrojenja omeđeno je dvjema crvenim iscrtkanim linijama zbog ograničenja koja su objašnjena u poglavlju 8.2.1.

## 9 ZAKLJUČAK

Spalionice otpada su pretposljednja stepenica u hijerarhiji postupanja s otpadom. Tek kada se otpadni materijal više ne može reciklirati iz ekonomskih, tehničkih ili ekoloških razloga povoljnije ga je energetske oporabiti nego odložiti. Spalionice otpada koje rade u kogeneracijskom režimu još su kvalitetnije u smislu održivog razvoja; one kao nusprodukt spaljivanja otpada proizvode korisnu električnu i toplinsku energiju.

U ovom radu obrađen je Rankineov ciklus kogeneracijske spalionice otpada. Na temelju matematičkog modela napravljene su:

- Simulacija rada postrojenja pri smanjenom opterećenju kotla,
- Simulacija rada postrojenja pri različitim temperaturama kondenzacije,
- Simulacija rada postrojenja pri različitim ogrjevnim vrijednostima goriva.

Prikazani su dijagrami snaga, toplinskih tokova, masenih tokova, i iskoristivosti postrojenja. Određene su kritične točke bitne za pouzdan rad postrojenja; minimalni tlak i temperatura s obzirom na sadržaj pare i minimalni maseni protok kroz niskotlačni dio turbine, područje rada postrojenja.

Ukupna iskoristivost je najveća u radnoj točki u kojoj je protok kroz niskotlačnu turbinu minimalan, a isporuka toplinske energije prema tvornici papira zadovoljena. Tada je električna iskoristivost najniža.

Iz poglavlja 8.1.2 vidi se da kotao može isporučiti dovoljno topline za nominalan rad postrojenja i s otpadom vrlo niske donje ogrjevne vrijednosti. Fleksibilnost kotla je vrlo bitno svojstvo jer se u takvim kotlovima može spaljivati otpad različitih ogrjevnih vrijednosti bez bojazni za pouzdan rad postrojenja.

U daljnjem radu korisno bi bilo napraviti model izgaranja u kotlu i usporediti ga s eksperimentalnim rezultatima prikazanim u poglavlju 4.3. Također na temelju ovog modela može se napraviti ekonomska analiza s obzirom na kapitalno ulaganje, cijene goriva različitih ogrjevnih vrijednosti, te cijena električne i toplinske energije.

## 10 LITERATURA

- [1] *Gospodarenje otpadom*, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Gospodarenje\\_otpadom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Gospodarenje_otpadom), 20.09.2016.
- [2] *Gospodarenje otpadom*, [http://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje\\_otpadom](http://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje_otpadom), 20.09.2016.
- [3] *Odgovorno gospodarenje otpadom*, <http://www.bikarac.hr>, 20.09.2016.
- [4] *Proizvodnja energije iz otpada*, [https://hr.wikirpedia.org/wiki/Proizvodnja\\_energije\\_iz\\_otpada](https://hr.wikirpedia.org/wiki/Proizvodnja_energije_iz_otpada), 10.10.2016.
- [5] *Gorivo iz otpada*, <http://www.cemex.hr/GorivoizotpadaRDF/SRF>, 10.10.2016.
- [6] *The difference between RDF and SFR*, <http://resource.co/article/difference-between-rdf-and-srf-10156>, 21.11.2016.
- [7] *Spalionice otpada*, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Spalionice\\_otpada](https://hr.wikipedia.org/wiki/Spalionice_otpada), 08.09.2016.
- [8] *Energane na biomasu i otpad*, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektarne\\_na\\_biomasa\\_i\\_otpad](https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektarne_na_biomasa_i_otpad), 01.10.2016.
- [9] Bogdan, Ž.: *Podloge uz predavanja iz kolegija Generatori pare*
- [10] I. Tschanun, M.Mineur, *Biomass Combustion With State Of The Art Bubbling Bed Steam Generators*, Austrian Energy & Environment, Hamburg, 2003.
- [11] M. Bolhàr-Nordenkamp, F. Gartnar, I. Tschanun, S. Kaiser, *RESULTS FROM A NOVEL STAGED COMBUSTION TECHNOLOGY FOR THE CONVERSION OF VARIOUS BIOMASS FUELS WITH LOW ASH MELTING POINTS*, Austrian Energy & Environment, Beč, 2012.
- [12] *Direktiva o spaljivanju i suspaljivanju otpada*, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0076-direktiva>, 12.11.2016
- [13] Bogdan, Ž.: *Podloge uz predavanja iz kolegija Termoenergetska postrojenja*
- [14] Slunjski, M.: *Završni rad*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [15] *Rankineov ciklus*, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Rankineov\\_ciklus](https://hr.wikipedia.org/wiki/Rankineov_ciklus), 05.09.2016
- [16] *CoolProp<sup>TM</sup>*, <http://www.coolprop.org/>, 24.11.2016.