

Analiza promjene uvjeta u generatoru pare kod uvođenja recirkulacije dimnih plinova

Šestan, Stipe

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:528573>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Stipe Šestan

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Stipe Šestan

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Danielu Rolphu Schneideru, na svim korisnim savjetima i udijeljenom znanju kako bi ovaj rad bio uspješno napravljen.

Posebno hvala mojoj obitelji na neizmjernoj podršci tijekom cijelog studija.

Za kraj se želim zahvaliti najboljim prijateljima s kojima sam proživio sve čari studentskog života.

Stipe Šestan



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Stipe Šestan** JMBAG: 0035221285

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza promjene uvjeta u generatoru pare kod uvođenja recirkulacije dimnih plinova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of changes in conditions in the steam generator when introducing flue gas recirculation**

Opis zadatka:

Potrebno je analizirati uvjete u generatoru pare kod uvođenja recirkulacije dimnih plinova u tok zraka za izgaranje, odnosno ispitati kako će se takva strategija vođenja kotla odraziti na izmjenu topline pojedinih ogrjevnih površina, te preraspodjelu toplinskih tokova unutar izmjenjivačkih površina generatora pare (zagrijač vode, isparivač, pregrijačke površine), kao i na emisije dimnih plinova.

U radu je potrebno napraviti termodinamički, hidrodinamički i aerodinamički proračun strmočijevnog generatora pare s prirodnom cirkulacijom s izgaranjem na prirodni plin. Termodinamički proračun treba napraviti prema normativnoj (CKTI) metodi i odrediti stupanj iskoristivosti kotla. Hidrodinamički proračun treba napraviti za vodenu stranu kotla i izračunati padove tlaka te brzine strujanja vode u cijevima. Aerodinamički proračun uključuje proračun dimnog trakta kotla, s izračunom pada tlaka i brzine strujanja dimnih plinova. Sve analize provoditi pri punom opterećenju (100%) generatora pare.

Analizu treba provesti za temeljni slučaj bez uvođenja recirkulacije dimnih plinova, te zatim za nekoliko slučajeva do maksimalno 20% recirkulacije dimnih plinova u ulaznom toku zraka za izgaranje.

Nakon toga treba donijeti zaključak o prednostima i nedostacima takve strategije za tip generatora pare koji se razmatra, te predložiti optimalnu vrijednost udjela (%) recirkulacije dimnih plinova za analizirani kotao.

Također treba napraviti dispozicijski nacrt generatora pare s najmanje dva presjeka.

Osnovni podaci za generator pare:

- Kapacitet: 107 MW (toplinske snage)
- Proizvodnja pare: 125 t/h
- Radni tlak (svježe) pare: 87,3 bar
- Temperatura napojne vode: 155 °C
- Temperatura pregrijane pare: 515 °C

Potrebni podaci i literatura mogu se dobiti kod mentora. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:

16. studenoga 2023. 18. siječnja 2024. 22. – 26. siječnja 2024.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Daniel R. Schneider

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
1.1. Generator pare.....	1
1.2. Gorivo	1
2. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA.....	2
2.1. Ložište – isparivač	3
2.2. Pregrijač pare	3
2.3. Ekonomajzer	4
2.4. Izgaranje.....	4
3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN	5
3.1. Gorivo i izgaranje.....	5
3.2. Toplinska bilanca generatora pare	9
3.3. Proračun ložišta.....	14
3.4. Proračun isparivača 1	17
3.5. Proračun pregrijača pare 2	20
3.6. Proračun pregrijača pare 1b	24
3.7. Proračun pregrijača pare 1a.....	28
3.8. Proračun zagrijača vode 2	32
3.9. Proračun isparivača 5	35
3.10. Proračun zagrijača vode 1b	38
3.11. Proračun zagrijača vode 1a	41
4. HIDRODINAMIČKI PRORAČUN	44
4.1. Proračun zagrijača vode 1a	44
4.2. Proračun zagrijača vode 1b	44
4.3. Proračun zagrijača vode 2	45
4.4. Proračun pregrijača pare 1a.....	46

4.5.	Proračun pregrijača pare 1b	47
4.6.	Proračun pregrijača pare 2	47
4.7.	Proračun cirkulacije	48
5.	AERODINAMIČKI PRORAČUN	59
5.1.	Proračun isparivača 1	59
5.2.	Proračun pregrijača pare 2	59
5.3.	Proračun pregrijača pare 1b	59
5.4.	Proračun pregrijača pare 1a.....	60
5.5.	Proračun zagrijača vode 2	60
5.6.	Proračun isparivača 5	60
5.7.	Proračun zagrijača vode 1b	61
5.8.	Proračun zagrijača vode 1a	61
5.9.	Pad tlaka pri promjeni smjera strujanja za 180°	61
5.10.	Pad tlaka zbog strujanja dimnih plinova prema dolje	62
6.	RECIRKULACIJA DIMNIH PLINOVA	63
6.1.	Rezultati uvođenja recirkulacije i njihova analiza	63
6.2.	Izračun vrijednosti emisija dušikovih oksida (NOx) [7].....	66
7.	ZAKLJUČAK	68
	LITERATURA	69
	PRILOZI.....	70

POPIS SLIKA

Slika 1. Poprečni presjek generatora pare	2
Slika 2. Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ	9
Slika 3. Shema generatora pare	10
Slika 4. T-s dijagram skica	11
Slika 5. Skica ložišta	14
Slika 6. Ukupni pad tlaka za silazne cijevi.....	51
Slika 7. Ukupni pad tlaka za uzlazne cijevi	57
Slika 8. Radna točka generatora pare	57
Slika 9. Promjena topline predane u ložištu ovisno o udjelu recirkulacije	64
Slika 10. Promjena temperature na izlazu iz ložišta ovisno o udjelu recirkulacije	65
Slika 11. Promjena topline predane u ekonomajzeru 2 ovisno o udjelu recirkulacije	65
Slika 12. Promjena temperature na izlazu iz ekonomajzera 2 ovisno o udjelu recirkulacije ...	66
Slika 13. Prikaz količine dušikovih oksida ovisno o udjelu recirkulacije.....	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav goriva	5
Tablica 2. Entalpije dimnih plinova (komponente).....	8
Tablica 3. Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ	8
Tablica 4. Veličine stanja	10
Tablica 5. Dimni plinovi srednjeg sastava	18
Tablica 6. Rezultati uvođenja recikulacije	63

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
D	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Količina proizvedene pare
D_1	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Količina pare do pregrijača pare 2
t	$^{\circ}\text{C}$	Temperatura
T	K	Temperatura
p	bar	Tlak
p	Pa	Tlak
O_{min}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Teoretska količina kisika potrebnog za izgaranje
Z_{min}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Teoretska količina zraka potrebnog za izgaranje
Z_{stv}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje
n_{CO_2}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Količina CO ₂ u dimnim plinovima
n_{H_2O}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Količina H ₂ O u dimnim plinovima
n_{O_2}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Količina O ₂ u dimnim plinovima
n_{N_2}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Količina N ₂ u dimnim plinovima
n_{vdp}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Količina vlažnih dimnih plinova
n_{sdp}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Količina suhih dimnih plinova
n_{dp}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Ukupni volumen dimnih plinova
r_{CO_2}	%	Udio CO ₂ u dimnim plinovima
r_{H_2O}	%	Udio H ₂ O u dimnim plinovima
r_{N_2}	%	Udio N ₂ u dimnim plinovima
r_{O_2}	%	Udio O ₂ u dimnim plinovima
h	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$	Entalpija

h_L	%	Gubici na neizgorenom
h_Z	%	Gubici zračenja na okolinu
η_L		Stupanj djelovanja ložišta
η_Z		Stupanj djelovanja zračenja
h_A	%	Gubici osjetne topline u dimnim plinovima
η_K		Stupanj djelovanja generatora pare
B	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Količina goriva
W	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Količina vode za hlađenje
Q	kW	Izmijenjena topline
q	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$	Izmijenjena topline
F	m^2	Površina
ψ		Stupanj ekranizacije
F_{ef}	m^2	Efektivna površina ekrana
x		Bezdimenzijski položaj maksimalne temperature
ε_F		Efektivni stupanj crnoće plamena
ε_L		Stupanj crnoće ložišta
d_v	m	Vanjski promjer cijevi
s	m	Debljina stijenke cijevi
d_u	m	Unutarnji promjer cijevi
L	m	Duljina cijevi
t_p	m	Poprečni korak cijevi
t_u	m	Uzdužni korak cijevi
n_1		Broj cijevi u jednom redu
n_2		Broj redova cijevi
a	m	Širina kanala
b	m	Visina kanala
F_m	m^2	Minimalni presjek
V_{pl}	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B}$	Volumen dimnih plinova
w	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Brzina
σ_1		Odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi
σ_2		Odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi
λ	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Koeficijent toplinske vodljivosti
ν	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Kinematička viskoznost

Pr		Prandtlova značajka
α	$\frac{W}{m^2K}$	Koeficijent prijelaza topline
ε		Stupanj crnoće dimnih plinova
ε_s		Stupanj crnoće stijenke
C_c	$\frac{W}{m^2K^4}$	Koeficijent zračenja crnog tijela
ξ		Koeficijent zaprljanja
k	$\frac{W}{m^2K}$	Koeficijent prolaza topline
Δt_m	$^{\circ}C$	Srednja logaritamska temperaturna razlika
λ		Koeficijent trenja
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Gustoća
ζ		Koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi
O_{br}		Približni optični broj
G	$\frac{kg}{s}$	Količina vode u opticaju
m	$\frac{kg}{s}$	Maseni protok
H	m	Visina
x_{isp}		Maseni sadržaj pare
r_2		Akceleracijski množitelj
r_3		Množitelj zbog trenja
r_4		Gravitacijski množitelj
M_{NOx}	$\frac{kg}{h}$	Količina dušikovih oksida

SAŽETAK

Rad se sastoji od termodinamičkog, hidrodinamičkog i aerodinamičkog proračuna generatora pare u osnovnom režimu (načinu) rada te potom uvođenja recirkulacije dimnih plinova u tok zraka za izgaranje kod istoga. Termodinamički proračun obuhvaća dimenzioniranje ložišta i konvektivnih površina. Hidrodinamički proračun obuhvaća izračun otpora strujanja radnog medija, odnosno padova tlaka u svim izmjenjivačima topline. Aerodinamički proračun predstavlja izračun otpora strujanja dimnih plinova kroz konvektivni kanal. Na kraju se uvodi recirkulacija dimnih plinova za tri slučaja te se analiziraju promjene uvjeta u proračunatom generatoru pare poput promjene temperature ložišta, preraspodjele toplinskih tokova i promjene količine dušikovih oksida.

Ključne riječi: Generator pare; Termodinamički proračun; Hidrodinamički proračun; Aerodinamički proračun; Recirkulacija dimnih plinova

SUMMARY

The thesis consists of thermodynamic, hydrodynamic and aerodynamic calculation of the steam generator in the basic mode of operation and then introducing the recirculation of flue gases into the air flow for combustion. The thermodynamic calculation includes the dimensioning of the combustion chamber and convective surfaces. The hydrodynamic calculation includes the calculation of the flow resistance of the working medium, i.e. pressure drops in all heat exchangers. The aerodynamic calculation represents the calculation of the resistance to the flow of flue gases through the convective channel. At the end, flue gas recirculation is introduced for three cases, and changes in conditions in the calculated steam generator are analyzed, such as changes in the temperature of the combustion chamber, redistribution of heat flows and changes in the amount of nitrogen oxides.

Key words: Steam generator; Thermodynamic calculation; Hydrodynamic calculation; Aerodynamic calculation; Flue gas recirculation

1. UVOD

Visoka temperatura izgaranja u mješavini sa zrakom, uvedenim kroz plamenike, uzrokuje visoku koncentraciju dušikovih oksida (NO_x). Zbog usklađivanja s novonastalim normama o emisijama dimnih plinova iz Uredbe o graničnim vrijednostima emisija onečišćujućih tvari u zrak iz nepokretnih izvora (NN 87/2017), ukazala se potreba za smanjenjem NO_x-a. Jedan od načina za postizanje smanjenja koncentracije dušikovih oksida jest kroz povrat dijela ispušnih plinova u komoru izgaranja, odnosno uvođenjem recirkulacije. Ono će dovesti do smanjenja vršne temperature plamena što rezultira boljim emisijskim značajkama kotla.

1.1. Generator pare

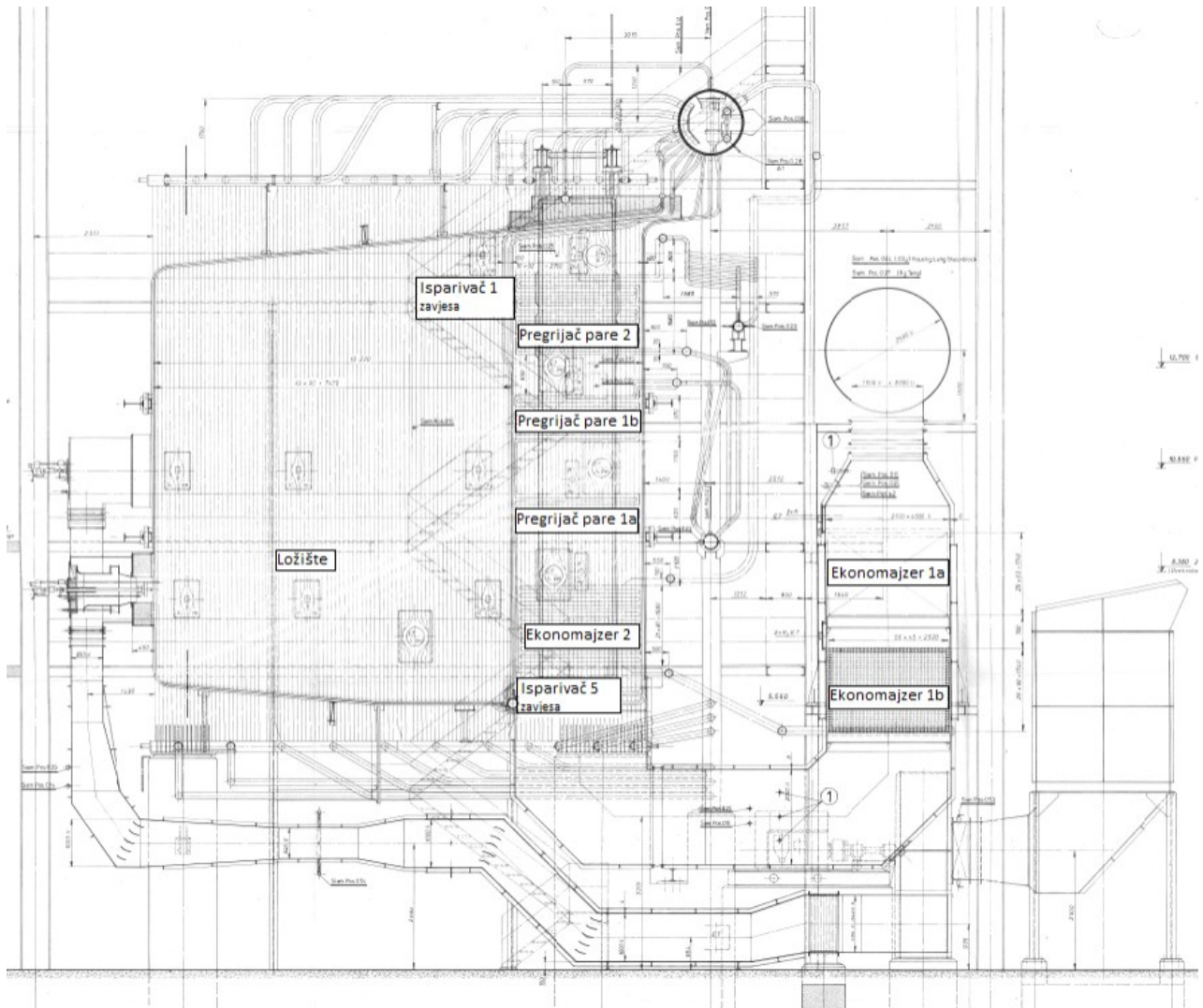
Generator pare ili parni kotao je kotao koji služi za proizvodnju vodene pare određenog tlaka i temperature, koja služi kao radni fluid za pogon parnih turbina, za proizvodnju električne energije u termoelektranama, te za prijenos toplinske energije za razne pomoćne uređaje. Glavni sastavni dijelovi generatora pare su ložište, ogrjevne površine, tlačni dijelovi, priključci za cijevi i ventile, sustav za kontrolu i automatsku regulaciju, ozid i toplinska izolacija, te pomoćni uređaji [1].

1.2. Gorivo

Zemni ili prirodni plin je fosilno gorivo koje se najvećim dijelom (85 do 95 posto) sastoji od metana (CH₄), koji je najjednostavniji ugljikovodik bez mirisa i okusa. Lako je zapaljiv i eksplozivan. Preostali udio (5 do 15 posto) su složeniji ugljikovodici, dušik i ugljik dioksid [2]. Prednosti plinovitih goriva u odnosu na kruta i tekuća su: vrlo lagan transport do generatora pare plinovodima, vrlo lako miješanje sa zrakom za izgaranje uz vrlo mali pretičak zraka te potpuno izgaranje s visokim temperaturama izgaranja [3].

2. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA

Referentno postrojenje za koje su napravljeni proračuni u nastavku rada prikazano je na slici 1.



Slika 1. Poprečni presjek generatora pare

Osnovne tehničke značajke kotla:

- Tip kotla – strmocijevni kotao s prirodnom cirkulacijom
- Toplinska snaga – 107 MW
- Proizvodnja pare – 125 t/h
- Temperatura pregrijane pare – 515 °C
- Radni tlak (svježe) pare – 87,3 bar
- Gorivo – prirodni plin
- Temperatura napojne vode – 155 °C

2.1. Ložište – isparivač

Ložište

U ložištu se kemijska energija goriva pretvara u toplinsku energiju dimnih plinova. Veličina i oblik ložišta i ostale karakteristike ovise u najvećoj mjeri o upotrijebljenom gorivu, o veličini jedinice, o dovodu goriva i zraka za izgaranje itd. Osnovni zadatak ložišta jest osiguranje pravilnog i potpunog izgaranja goriva u optimalnim uvjetima, tj. s minimalnim pretičkom zraka. Proces izgaranja goriva mora završiti u ložištu [3].

Prijelaz topline odvija se uglavnom zračenjem preko snopova isparivačkih cijevi koji sačinjavaju zidove ložišta. Na osnovi razlike gustoća vode u negrijanim, silaznim cijevima koje spajaju bubanj s donjim kolektorima i gustoće vodeno-parne smjese u grijanim isparivačkim cijevima, membranskim zidovima koje opet vode od donjih kolektora kroz ložište do bubnja, nastaje prirodna cirkulacija. Ovakav način strujanja je karakterističan za isparivačke površine [4].

Isparivač

Osnovni dio generatora pare je ogrjevna površina isparivača vode gdje se događa prijelaz vode iz kapljevito u parovito agregatno stanje. To je površina koja je s jedne strane u dodiru s dimnim plinovima, a s druge strane s vodom i mješavinom vode i vodene pare. Veličina te površine računa se kod stabilnih generatora pare na strani dimnih plinova. Kod generatora pare s prirodnom cirkulacijom moraju do određene visine bubnja (50 do 70% visine) bubanj i cijevni sustav isparivača i zagrijača vode biti ispunjeni vodom (vodeni prostor), a iznad toga dijela bubnja nalazi se parni prostor [3].

2.2. Pregrijač pare

Pregrijač pare je sklop ogrjevnih površina izmjenjivača topline u kojem se pregrijava vodena para iz zasićenog stanja do određene temperature pregrijanja. U pregrijaču se, osim toga, suši para koja na ulazu u pregrijač sadrži određeni postotak vodenih čestica (od 1 do 5%). Ogrjevne površine pregrijača pare izvode se u obliku snopova čeličnih bešavnih cijevi, a prema potrebi i od legirnog čelika smještenih bilo u ložištu bilo u vodovima dimnih plinova. Kod suvremenih velikih jedinica visokog pregrijanja pare ogrjevne površine pregrijača podijeljene su na više

dijelova. Toplina se konvektivnim prolazom i izmjenom zračenjem prenosi od dimnih plinova na vodenu paru koja struji cijevima pregrijača [3].

2.3. Ekonomajzer

Zagrijač vode ili ekonomajzer je ogrjevna površina u kojem se zagrijava napojna voda prije ulaza u parni bubanj, odnosno u isparivački dio generatora pare [4]. Za visoke tlakove i novije izvedbe izveden je od čeličnih bešavnih cijevi savijenih u obliku cijevnih zmijsa [3]. Izlazna temperatura napojne vode iz ekonomajzera je najčešće 20 do 60 °C ispod temperature isparavanja, iako se zna zagrijavati i do temperature isparavanja. Smješta se na izlaznom dijelu generatora pare čime snizuje izlaznu temperaturu dimnih plinova. Time se ostvaruje poboljšanje stupnja iskoristivosti generatora pare. Prijelaz topline je uglavnom konvekcijom [4].

2.4. Izgaranje

Izgaranje je kemijski proces spajanja goriva s kisikom uz intenzivno oslobađanje unutarnje kemijske energije koja se prenosi na molekule povećavajući njihovu kinetičku energiju. Time se povećava unutarnja energija radne tvari, a zbog toga i temperatura. Po završetku procesa izgaranja goriva i zraka dobiju se produkti izgaranja (dimni plinovi) koji se mogu odrediti jednostavnim stehiometrijskim jednadžbama, koje će prikazati konačno stanje produkata izgaranja [4].

3. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

3.1. Gorivo i izgaranje

Sastav goriva (prirodni plin)

Tablica 1. Kemijski sastav goriva

CH ₄	0,85
C ₂ H ₆	0,07
C ₃ H ₈	0,06
N ₂	0,01
CO ₂	0,01

Teoretska količina kisika i zraka potrebnog za izgaranje

Teoretska količina kisika:

$$O_{min} = \frac{1}{2} \cdot (CO^B + H_2^B) + 2 \cdot CH_4^B + \sum (x + \frac{y}{4}) \cdot C_xH_y^B + \sum (u + \frac{v}{4} - \frac{z}{2}) \cdot C_uH_vO_z^B - O_2^B =$$

$$2 \cdot 0,85 + 3,5 \cdot 0,07 + 5 \cdot 0,06 = 2,245 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 2,6539 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.1)$$

Teoretska količina zraka:

$$Z_{min} = \frac{O_{min}}{0,21} = \frac{2,245}{0,21} = 10,69 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 12,6376 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.2)$$

Stvarna količina zraka:

$$Z_{stv} = Z_{min} \cdot \lambda = 10,69 \cdot 1,197 = 12,797 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 15,1272 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.3)$$

Količina plinova koji nastaju izgaranjem

Količina ugljikovog dioksida u dimnim plinovima:

$$n_{CO_2} = CO^B + CH_4^B + \sum (xC_xH_y^B) + \sum (uC_uH_vO_z^B) + CO_2^B =$$

$$= 0,85 + 2 \cdot 0,07 + 3 \cdot 0,06 + 0,01 = 1,18 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 1,3949 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.4)$$

Količina vodene pare u dimnim plinovima:

$$n_{H_2O} = H_2^B + 2 \cdot CH_4^B + \sum (\frac{y}{2} C_xH_y^B) + \sum (\frac{v}{2} C_uH_vO_z^B) =$$

$$= 2 \cdot 0,85 + 3 \cdot 0,07 + 4 \cdot 0,06 = 2,15 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 2,5416 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.5)$$

Količina slobodnog kisika u dimnim plinovima:

$$n_{O_2} = (\lambda - 1) \cdot O_{min} = (1,197 - 1) \cdot 2,245 = 0,44 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 0,5228 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.6)$$

Količina dušika u dimnim plinovima:

$$n_{N_2} = 0,79 \cdot Z_{stv} + N_2^B = 0,79 \cdot 12,797 + 0,01 = 10,1 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 11,9623 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.7)$$

Vlažni i suhi dimni plinovi te udjeli dimnih plinova

Količina vlažnih dimnih plinova:

$$n_{vdp} = n_{H_2O} = 2,15 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 2,5416 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.8)$$

Količina suhih dimnih plinova:

$$n_{sdp} = n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} = 11,742 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 13,8801 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.9)$$

Ukupni volumen dimnih plinova:

$$n_{dp} = n_{H_2O} + n_{N_2} + n_{O_2} + n_{CO_2} = 13,892 \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} = 16,4217 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}_B} \quad (3.10)$$

Udio ugljičnog dioksida (CO₂) u dimnim plinovima:

$$r_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{dp}} \cdot 100 [\%] = \frac{1,3949}{16,4217} \cdot 100 [\%] = 8,5 \% \quad (3.11)$$

Udio vodene pare (H₂O) u dimnim plinovima:

$$r_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_{dp}} \cdot 100 [\%] = \frac{2,5416}{16,4217} \cdot 100 [\%] = 15,5 \% \quad (3.12)$$

Udio dušika (N₂) u dimnim plinovima:

$$r_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_{dp}} \cdot 100 [\%] = \frac{11,9623}{16,4217} \cdot 100 [\%] = 72,8 \% \quad (3.13)$$

Udio kisika (O₂) u dimnim plinovima:

$$r_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{dp}} \cdot 100 [\%] = \frac{0,5228}{16,4217} \cdot 100 [\%] = 3,2 \% \quad (3.14)$$

Prirast pretička zraka

- po pregrijaču pare: $\Delta\lambda_1 = 0,03$
- po zagrijaču vode: $\Delta\lambda_2 = 0,03$

$$\text{Na izlazu iz pregrijača pare 2: } \lambda_1 = \lambda + \Delta\lambda_1 = 1,197 + 0,03 = 1,227 \quad (3.15)$$

$$\text{Na izlazu iz pregrijača pare 1b: } \lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda_1 = 1,227 + 0,03 = 1,257 \quad (3.16)$$

$$\text{Na izlazu iz pregrijača pare 1a: } \lambda_3 = \lambda_2 + \Delta\lambda_1 = 1,257 + 0,03 = 1,287 \quad (3.17)$$

$$\text{Na izlazu iz zagrijača vode 2: } \lambda_4 = \lambda_3 + \Delta\lambda_2 = 1,287 + 0,03 = 1,317 \quad (3.18)$$

$$\text{Na izlazu iz zagrijača vode 1b: } \lambda_5 = \lambda_4 + \Delta\lambda_2 = 1,317 + 0,03 = 1,347 \quad (3.19)$$

$$\text{Na izlazu iz zagrijača vode 1a: } \lambda_6 = \lambda_5 + \Delta\lambda_2 = 1,347 + 0,03 = 1,377 \quad (3.20)$$

Entalpija plinova izgaranja

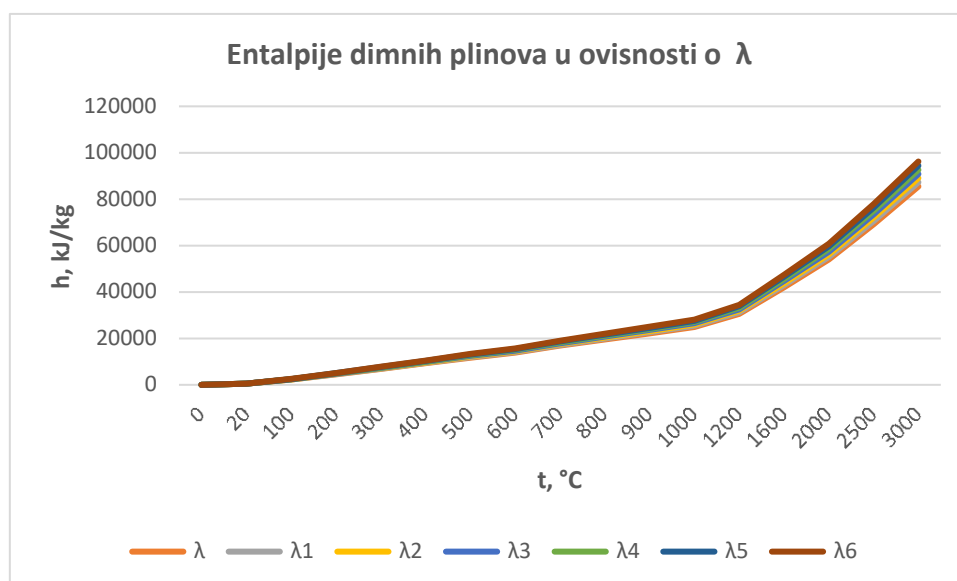
$$h_{pln} = n_{CO_2} \cdot h_{CO_2n} + n_{N_2min} \cdot h_{N_2n} + n_{H_2O} \cdot h_{H_2On} + (\lambda - 1) \cdot Z_{min} \cdot h_{zrn} \quad (3.21)$$

Tablica 2. Entalpije dimnih plinova (komponente)

	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Zrak
T	kJ/m ³	kJ/m ³	kJ/m ³	kJ/m ³
0	0	0	0	0
20	32,45	25,96	29,94	25,96
100	170,03	130,04	150,52	130,04
200	357,47	260,75	304,46	261,42
300	558,94	393,27	462,64	395,15
400	772,05	528,37	626,35	531,72
500	994,37	666,12	795,07	671,56
600	1224,64	807,22	968,83	813,91
700	1462,03	951,24	1148,86	959,61
800	1704,86	1097,36	1334,33	1107,41
900	1952,30	1245,99	1526,09	1257,71
1000	2203,51	1397,14	1722,87	1409,70
1200	2716,40	1704,03	2132,34	1719,10
1600	3768,54	2333,72	3001,94	2353,40
2000	4844,13	2977,65	3925,54	3001,94
2500	6204,84	3794,50	5132,60	3825,90
3000	7932,95	4655,41	6339,59	4725,06

Tablica 3. Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ

	hpl, λ	hpl, λ_1	hpl, λ_2	hpl, λ_3	hpl, λ_4	hpl, λ_5	hpl, λ_6
t	kJ/kgB	kJ/kgB	kJ/kgB	kJ/kgB	kJ/kgB	kJ/kgB	kJ/kgB
0	0	0	0	0	0	0	0
20	445,4753	455,3175	465,1597	475,0019	484,8441	494,6862	504,5284
100	2243,3097	2292,6116	2341,9135	2391,2154	2440,5173	2489,8192	2539,1211
200	4529,6304	4628,7423	4727,8541	4826,9659	4926,0777	5025,1896	5124,3014
300	6870,2408	7020,0535	7169,8662	7319,6789	7469,4916	7619,3043	7769,1170
400	9274,0021	9475,5925	9677,1828	9878,7731	10080,3634	10281,9537	10483,5440
500	11737,9733	11992,5810	12247,1887	12501,7963	12756,4040	13011,0117	13265,6193
600	13823,9498	14132,5264	14441,1031	14749,6797	15058,2563	15366,8330	15675,4096
700	16856,5772	17220,3929	17584,2085	17948,0242	18311,8399	18675,6556	19039,4713
800	19495,2100	19915,0609	20334,9118	20754,7627	21174,6136	21594,4646	22014,3155
900	22187,5729	22664,4069	23141,2408	23618,0748	24094,9088	24571,7427	25048,5767
1000	24927,3498	25461,8075	25996,2652	26530,7229	27065,1807	27599,6384	28134,0961
1200	30584,0899	31235,8500	31887,6102	32539,3703	33191,1305	33842,8906	34494,6507
1600	42072,4011	42964,6426	43856,8840	44749,1255	45641,3670	46533,6085	47425,8499
2000	53971,2297	55109,3513	56247,4729	57385,5945	58523,7161	59661,8377	60799,9593
2500	69153,3772	70603,8857	72054,3942	73504,9027	74955,4112	76405,9196	77856,4281
3000	85475,4642	87266,8700	89058,2759	90849,6817	92641,0875	94432,4934	96223,8992

Slika 2. Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o λ

3.2. Toplinska bilanca generatora pare

Gubici na neizgorenom

$$h_L = 0,2 \%$$

Gubici zračenja na okolinu

$$h_Z = 0,4 \%$$

Stupnjevi djelovanja ložišta i zračenja

$$\eta_L = 1 - \frac{h_L}{100} = 1 - \frac{0,2}{100} = 0,998 \quad (3.22)$$

$$\eta_Z = 1 - \frac{h_Z}{100} = 1 - \frac{0,4}{100} = 0,996 \quad (3.23)$$

Gubitak osjetne topline u dimnim plinovima

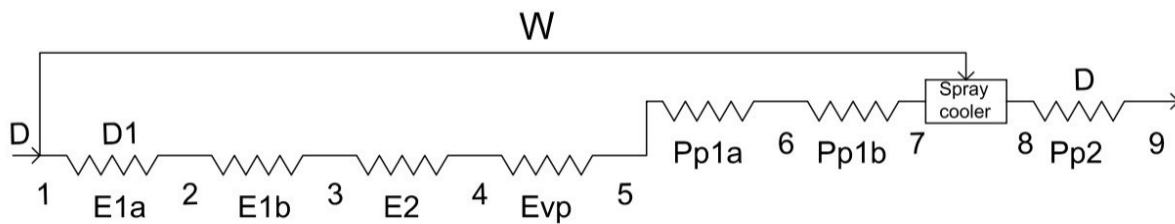
$$\text{Za pretpostavljenu izlaznu temperaturu } t_{izl} = 200 \text{ °C} \quad \rightarrow \quad h_{pl\ izl} = 5124,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$h_A = \frac{h_{pl\ izl}}{H_d + Z_{stv} \cdot h_{zr}} = \frac{5124,3}{47925 + 15,1272 \cdot 135,16} = 0,10254 = 10,25 \% \quad (3.24)$$

Stupanj djelovanja generatora pare

$$\eta_K = 1 - \frac{h_L + h_Z + h_A}{100} = 1 - \frac{0,2 + 0,4 + 10,25}{100} = 0,892 = 89,2\% \quad (3.25)$$

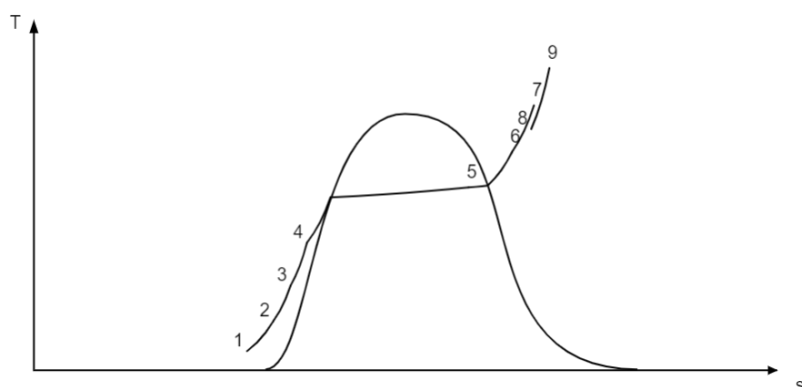
Veličine stanja



Slika 3. Shema generatora pare

Tablica 4. Veličine stanja

stanje	t, °C	p, bar	h, kJ/kg
1	155	107	659,96
2	215	105	923,27
3	275	104	1209,13
4	304	94	1367,15
5	306,37	94	2709,08
6	380	92	3053,23
7	460	90	3284,46
8	390	90	3088,96
9	515	87,3	3428,21



Slika 4. T-s dijagram skica

Količina vode za hlađenje

$$D_1 \cdot h_7 + W \cdot h_1 = D \cdot h_8 \quad (3.26)$$

$$D_1 = D - W \quad (3.27)$$

$$W = \frac{D \cdot (h_8 - h_7)}{h_1 - h_7} = \frac{34,72 \cdot (3088,96 - 3284,46)}{659,96 - 3284,46} = 2,59 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.28)$$

$$D_1 = 32,13 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.29)$$

Količina goriva

$$B = \frac{D \cdot (h_9 - h_1)}{\eta_k \cdot (H_d + Z_{stv} \cdot h_{zr})} = \frac{34,72 \cdot (3428,21 - 659,96)}{0,892 \cdot (47925 + 15,1272 \cdot 135,16)} = 2,158 \frac{\text{kg}_B}{\text{s}} \quad (3.30)$$

Izmijenjena toplina u zagrijaču vode 1a

$$Q_{zv1a} = D_1 \cdot (h_2 - h_1) = 32,13 \cdot (923,27 - 659,96) = 8461,295 \text{ kW} \quad (3.31)$$

$$q_{zv1a} = \frac{Q_{zv1a}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{8461,295}{0,996 \cdot 2,158} = 3937,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.32)$$

Izmijenjena toplina u zagrijaču vode 1b

$$Q_{zv1b} = D_1 \cdot (h_3 - h_2) = 32,13 \cdot (1209,13 - 932,27) = 9185,59 \text{ kW} \quad (3.33)$$

$$q_{zv1b} = \frac{Q_{zv1b}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{9185,59}{0,996 \cdot 2,158} = 4274,303 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.34)$$

Izmijenjena toplina u zagrijaču vode 2

$$Q_{zv2} = D_1 \cdot (h_4 - h_3) = 32,13 \cdot (1367,15 - 1209,13) = 5077,79 \text{ kW} \quad (3.35)$$

$$q_{zv2} = \frac{Q_{zv2}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{5077,79}{0,996 \cdot 2,158} = 2362,833 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.36)$$

Izmijenjena toplina u isparivaču

$$Q_{is} = D_1 \cdot (h_5 - h_4) = 32,13 \cdot (2709,08 - 1367,15) = 43120,96 \text{ kW} \quad (3.37)$$

$$q_{is} = \frac{Q_{is}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{43120,96}{0,996 \cdot 2,158} = 20065 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.38)$$

Izmijenjena toplina u pregrijaču pare 1a

$$Q_{pp1a} = D_1 \cdot (h_6 - h_5) = 32,13 \cdot (3053,23 - 2709,08) = 11058,9 \text{ kW} \quad (3.39)$$

$$q_{pp1a} = \frac{Q_{pp1a}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{11058,9}{0,996 \cdot 2,158} = 5146 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.40)$$

Izmijenjena toplina u pregrijaču pare 1b

$$Q_{pp1b} = D_1 \cdot (h_7 - h_6) = 32,13 \cdot (3284,46 - 3053,23) = 7430,36 \text{ kW} \quad (3.41)$$

$$q_{pp1b} = \frac{Q_{pp1b}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{7430,36}{0,996 \cdot 2,158} = 3457,548 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.42)$$

Izmijenjena toplina u pregrijaču pare 2

$$Q_{pp2} = D_1 \cdot (h_9 - h_8) = 32,13 \cdot (3428,21 - 3088,96) = 11778,96 \text{ kW} \quad (3.43)$$

$$q_{pp2} = \frac{Q_{pp2}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{11778,96}{0,996 \cdot 2,158} = 5481,07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.44)$$

Ukupna izmijenjena toplina

$$\begin{aligned} q &= q_{zv1a} + q_{zv1b} + q_{zv2} + q_{is} + q_{pp1a} + q_{pp1b} + q_{pp2} = \\ &= 3937,27 + 4274,303 + 2362,833 + 20065 + 5146 + 3457,548 + 5481,07 = \\ &= 44724,376 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Teoretska entalpija i temperatura plinova izgaranja

$$\text{Za } t_{zr} = 103,9 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \rightarrow \quad h_{zr} = 135,16 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$h_{pl t} = \eta_L \cdot H_d + Z_{stv} \cdot h_{zr} = 0,998 \cdot 47925 + 15,1272 \cdot 135,16 = 49873,747 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.46)$$

$$\text{Za } h_{pl t} = 49873,747 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad \rightarrow \quad t_{pl t} = 1862,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{pl t} = t_{pl t} + 273,15 = 1862,26 + 273,15 = 2135,41 \text{ K} \quad (3.47)$$

Izlazna temperatura dimnih plinova

$$h_{pl izl} = h_{pl t} - q = 49873,747 - 44724,376 = 5149,371 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.48)$$

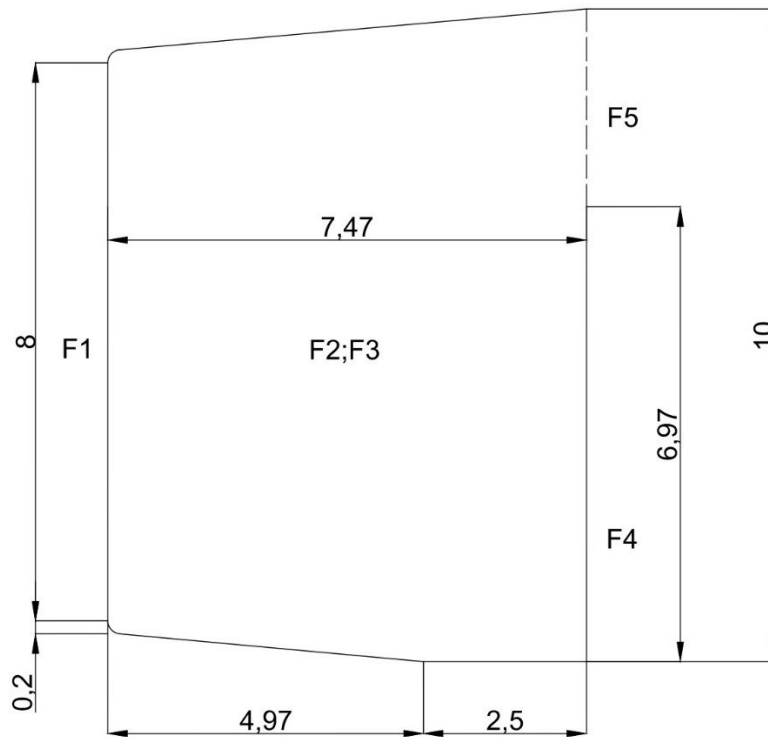
$$\text{Za } h_{pl izl} = 5149,371 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad \rightarrow \quad t_{pl izl} = 200,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Provjera pogreške u pretpostavljenoj izlaznoj temperaturi dimnih plinova:

$$\frac{t_{pl izl} - t_{izl}}{t_{pl izl}} \cdot 100 = \frac{200,95 - 200}{200,95} \cdot 100 = 0,47 \% \quad (3.49)$$

3.3. Proračun ložišta

Skica ložišta



Slika 5. Skica ložišta

Površine ekrana

Širina = 4,77 m

$$F_1 = 8,4 \cdot 4,77 + 7,6 \cdot 4,77 + 5,1 \cdot 4,77 + 2,5 \cdot 4,77 = 112,6 \text{ m}^2 \quad (3.50)$$

$$F_2 = 8,4 \cdot 7,47 + \frac{1 \cdot 7,47}{2} + \frac{4,97 \cdot 0,8}{2} + 2,5 \cdot 0,8 = 70,5 \text{ m}^2 \quad (3.51)$$

$$F_3 = 8,4 \cdot 7,47 + \frac{1 \cdot 7,47}{2} + \frac{4,97 \cdot 0,8}{2} + 2,5 \cdot 0,8 = 70,5 \text{ m}^2$$

$$F_4 = 6,97 \cdot 4,77 = 33,25 \text{ m}^2 \quad (3.52)$$

$$F_L = \sum F_i = 112,6 + 70,5 + 70,5 + 33,25 = 286,76 \text{ m}^2 \quad (3.53)$$

Stupanj ekranizacije

Jednoredni ekran:

$$\text{korak: } t_L = 92,16 \text{ mm}$$

$$\text{promjer cijevi: } d_L = 70 \text{ mm}$$

očitano iz sl. 4.26/1 (Kreuh: Generatori pare)

$$\text{za } \frac{t_L}{d_L} = \frac{92,16}{70} = 1,32 \rightarrow \psi_L = 0,98$$

Efektivna površina ekrana

$$F_{ef} = F_L \cdot \psi_L = 286,76 \cdot 0,98 = 281,03 \text{ m}^2 \quad (3.54)$$

Proračun efektivne površine po normativnoj metodi

Distribucija temperature u ložištu:

$$\text{za plinsko gorivo: } M = 0,52 - 0,3x = 0,52 - 0,3 \cdot 0,1768 = 0,4670 \quad (3.55)$$

$$\text{bezdimenzijski položaj maksimalne temperature: } x = \frac{h_1}{h_2} = \frac{1,5}{8,485} = 0,1768 \quad (3.56)$$

udaljenost od dna ložišta do sredine polja maksimalnih temperatura: $h_1 = 1,5 \text{ m}$

udaljenost od dna ložišta do sredine izlaznog otvora ložišta: $h_2 = 8,485 \text{ m}$

Efektivni stupanj crnoće plamena:

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{sv} \cdot m + \varepsilon_{nsv} \cdot (1 - m) = 0,9 \cdot 0,1 + 0,3214 \cdot (1 - 0,1) = 0,3792 \quad (3.57)$$

stupanj crnoće svjetlećeg plamena:

$$\text{za } s > 2,5 \text{ m} \rightarrow \varepsilon_{sv} = 0,9$$

efektivna debljina sloja dimnih plinova:

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_L}{F_L + F_5} = 3,6 \cdot \frac{336,15}{286,76 + 14,45} = 4,02 \text{ m} > 2,5 \text{ m} \quad (3.58)$$

$$V_L = 8,4 \cdot 7,47 \cdot 4,77 + \frac{4,97 \cdot 0,8}{2} \cdot 4,77 + 2,5 \cdot 0,8 \cdot 4,77 + \frac{1 \cdot 7,47}{2} \cdot 4,77 = 336,15 \text{ m}^3 \quad (3.59)$$

$$F_5 = 3,03 \cdot 4,77 = 14,45 \text{ m}^2 \quad (3.60)$$

$$\text{za } q_l < 400 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \rightarrow m = 0,1$$

$$q_l = \frac{B \cdot h_{pl t}}{V_L} = \frac{2,158 \cdot 49873,747}{336,15} = 320,13 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3} \quad (3.61)$$

stupanj crnoće nesvjetlećeg plamena:

$$\varepsilon_{nsv} = 1 - e^{-k_{nsv} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,0965 \cdot 1 \cdot 4,02} = 0,3214 \quad (3.62)$$

$$k_{nsv} = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_n \cdot s}} - 0,1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{T_{stv}}{1000} \right) \cdot r_n =$$

$$= \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot 0,155}{\sqrt{0,2397 \cdot 4,02}} - 0,1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1513,15}{1000} \right) \cdot 0,2397 = 0,0965 \quad (3.63)$$

$$r_n = r_{CO_2} + r_{H_2O} = 0,085 + 0,155 = 0,2397 \quad (3.64)$$

$$p_n = p \cdot r_n = 1 \cdot 0,2397 = 0,2397 \text{ bar} \quad (3.65)$$

$$p \approx 1 \text{ bar}$$

$$\text{pretpostavka: } T_{stv} = t_{stv} + 273,15 = 1240 + 273,15 = 1513,15 \text{ K} \quad (3.66)$$

Stupanj crnoće ložišta:

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_F + (1 - \varepsilon_F) \cdot \psi_L \cdot \xi} = \frac{0,3792}{0,3792 + (1 - 0,3792) \cdot 0,98 \cdot 0,65} = 0,49 \quad (3.67)$$

očitano iz tablice 4.11 (Kreuh: Generatori pare)

za slobodne površine ekranskih cijevi i prirodni plin kao gorivo: $\xi = 0,65$

Efektivna površina ekrana:

$$F_{ef} = \frac{q_L \cdot B \cdot 10^8}{C_c \cdot M \cdot \xi \cdot \varepsilon_L \cdot T_{stv} \cdot T_{pl t}^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{M^2} \cdot \left(\frac{T_{pl t}}{T_{stv}} - 1 \right)^2} =$$

$$= \frac{18068,26 \cdot 10^3 \cdot 2,158 \cdot 10^8}{5,67 \cdot 0,467 \cdot 0,65 \cdot 0,49 \cdot 1513,15 \cdot 2135,41^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{0,467^2} \cdot \left(\frac{2135,41}{1513,15} - 1 \right)^2} = 288,04 \text{ m}^2 \quad (3.68)$$

$$q_L = \eta_L \cdot (h_{pl t} - h_{pl stv}) = 0,998 \cdot (49873,747 - 31732,92) = 18068,26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \quad (3.69)$$

$$\text{za } t_{stv} = 1240 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rightarrow \quad h_{pl stv} = 31732,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$T_{stv} = t_{stv} + 273,15 = 1240 + 273,15 = 1513,15 \text{ K}$$

$$\text{Odstupanje: } \frac{288,04 - 281,03}{288,04} \cdot 100 = 2,44 \%$$

3.4. Proračun isparivača 1

Ogrjevna površina

$$\text{pretpostavljena količina topline: } q_{pretp} = 1110 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{vanjski promjer cijevi: } d_{evap1} = 0,07 \text{ m}$$

$$\text{debljina stijenke cijevi: } s_{evap1} = 0,0056 \text{ m}$$

$$\text{unutarnji promjer cijevi: } d_u = d_{evap1} - 2s_{evap1} = 0,0588 \text{ m}$$

$$\text{duljina cijevi: } L_{evap1} = 3,02 \text{ m}$$

$$\text{poprečni korak cijevi: } t_p = 0,18 \text{ m}$$

$$\text{uzdužni korak cijevi: } t_u = 0,16 \text{ m}$$

$$\text{broj cijevi u jednom redu: } n_1 = 26$$

$$\text{broj redova cijevi: } n_2 = 2$$

$$\text{širina kanala: } a = 4,77 \text{ m}$$

$$\text{visina kanala: } b = 3,02 \text{ m}$$

$$F_{evap1} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{evap1} \cdot \pi \cdot L_{evap1} = 26 \cdot 2 \cdot 0,07 \cdot \pi \cdot 3,02 = 34,53 \text{ m}^2 \quad (3.70)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{evap1} \cdot L_{evap1} \cdot n_1 = 4,77 \cdot 3,02 - 0,07 \cdot 3,02 \cdot 26 = 8,91 \text{ m}^2 \quad (3.71)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = \frac{1513,15 + 1474,5}{2} = 1493,825 \text{ K} \quad (3.72)$$

$$T_{ul} = T_{stv} = 1513,15 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz evaporatora 1:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 30622,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \rightarrow \quad t_{izl} = 1201,35 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 1474,5 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{evap} = 31732,92 - 1110 = 30622,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.73)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = \frac{2.158 \cdot 16,4217 \cdot 1493,825}{273 \cdot 8,91} = 21,762 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.74)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 1220,68 \text{ °C} \quad (3.75)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{evap1}} = 2,57 \quad (3.76)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{evap1}} = 2,29 \quad (3.77)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \quad \rightarrow \quad C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 < 10 \quad \rightarrow \quad C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_2 - 2) = 0,91 \quad (3.78)$$

Tablica 5. Dimni plinovi srednjeg sastava

t °C	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	$\lambda \cdot 10^2$ W/mK	Pr
0	11,9	2,28	0,74
100	20,8	3,13	0,70
200	31,6	4,01	0,67
300	43,9	4,84	0,65
400	57,8	5,70	0,64
500	73,0	6,56	0,62
600	89,4	7,42	0,61
700	107	8,27	0,60
800	126	9,15	0,59
900	146	10,0	0,58
1000	167	10,9	0,58
1100	188	11,7	0,57
1200	211	12,6	0,56
1300	234	13,5	0,55
1400	258	14,4	0,54
1500	282	15,4	0,53
1600	307	16,3	0,52
1700	333	17,3	0,51
1800	361	18,1	0,50
1900	389	19,0	0,49
2000	419	19,9	0,49
2100	450	20,7	0,48
2200	482	21,6	0,47

za $t_{sr} = 1220,68 \text{ }^\circ\text{C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,557932$$

$$\lambda = 0,127860 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,00021576 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{evap}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{evap}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = \\ &= 0,2 \cdot 0,91 \cdot 1 \cdot \frac{0,127860}{0,07} \cdot \left(\frac{21,762 \cdot 0,07}{0,00021576} \right)^{0,65} \cdot 0,557932^{0,33} = 87,062 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned} \quad (3.79)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenke: } t_s = t_5 + 49,7 = 306,37 + 49,7 = 356,07 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.80)$$

$$T_s = 620,22 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

$$\text{očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): } p = 1 \text{ bar } a = 0,45$$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{evap1}}{2} = \frac{0,16 + 0,18}{2} - \frac{0,07}{2} = 0,135 \text{ m} \quad (3.81)$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 1 - e^{(-0,45 \cdot 1 \cdot 0,135)} = 0,0589 \quad (3.82)$$

$$\text{stupanj crnoće stijenke: } \varepsilon_s = 0,8$$

$$\text{koeficijent zračenja crnog tijela: } C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{zr} &= C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}} \right)} = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,0589 \cdot 1493,825^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{620,22}{1493,825} \right)^4}{1 - \left(\frac{620,22}{1493,825} \right)} = 16,705 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned} \quad (3.83)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 87,062 + 16,706 = 103,7669 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.84)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

$$\alpha_w = 15000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - \text{preporučeno}$$

Koeficijent prolaza topline

$$\text{koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: } \lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\text{koeficijent zaprljanja: } \xi = 0,75$$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = \frac{0,75}{\frac{1}{103,7669} + \frac{0,0056}{52} + \frac{1}{15000}} = 76,4421 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.85)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

$$\text{temperatura pare u evaporatoru 1: } t_5 = 306,37 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ulazna temperatura dimnih plinova u evaporator 1: } t_{pl\ ul} = 1240 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{izlazna temperatura dimnih plinova iz evaporatora 1: } t_{pl\ izl} = 1201,35 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_5 = 1240 - 306,37 = 933,63 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.86)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_5 = 1201,35 - 306,37 = 894,98 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.87)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{933,63 - 894,98}{\ln\left(\frac{933,63}{894,98}\right)} = 914,169 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.88)$$

Potrebna izmijenjena toplina

$$q_{evap1} = \frac{F \cdot k \cdot \Delta t_m \cdot \eta_z}{B} = \frac{34,53 \cdot 76,4421 \cdot 914,169 \cdot 0,996}{2,158 \cdot 1000} = 1114,02 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.89)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{q_{evap1} - q_{pret p}}{q_{pret p}} \cdot 100 = \frac{1114,02 - 1110}{1110} \cdot 100 = 0,36 \% \quad (3.90)$$

3.5. Proračun pregrijača pare 2**Ogrjevna površina**

$$\text{vanjski promjer cijevi: } d_{pp2} = 0,0318 \text{ m}$$

$$\text{debljina stijenke cijevi: } s_{pp2} = 0,004 \text{ m}$$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{pp2} - 2s_{pp2} = 0,0238 \text{ m}$

duljina cijevi: $L_{pp2} = 2,76 \text{ m}$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0,125 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,072 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 36$

broj redova cijevi: $n_2 = 24$

širina kanala: $a = 4,77 \text{ m}$

visina kanala: $b = 2,76 \text{ m}$

$$F_{pp2} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{pp2} \cdot \pi \cdot L_{pp2} = 238,23 \text{ m}^2 \quad (3.91)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{pp2} \cdot L_{pp2} \cdot n_1 = 10,01 \text{ m}^2 \quad (3.92)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 1368,11 \text{ K} \quad (3.93)$$

$$T_{ul} = 1474,5 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz pregrijača pare 2:

$$\text{za } h_{pl \text{ izl}} = 25141,849 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow t_{izl} = 988,56 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 1261,71 \text{ K}$$

$$h_{pl \text{ izl}} = h_{pl \text{ ul}} - q_{pp2} = 25141,849 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.94)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = 17,806 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.95)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 1094,96 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.96)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{pp2}} = 3,93 \quad (3.97)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{pp2}} = 2,26 \quad (3.98)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \quad \rightarrow \quad C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 > 10 \quad \rightarrow \quad C_z = 1$$

za $t_{sr} = 1094,96 \text{ }^\circ\text{C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,570504$$

$$\lambda = 0,116597 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,00018694 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{pp2}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{pp2}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = 111,607 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.99)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenke: } t_s = \frac{t_8 + t_9}{2} + 49,7 = 502,2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.100)$$

$$T_s = 775,35 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

$$\text{očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): } p = 1 \text{ bar} \quad a = 0,46$$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{pp2}}{2} = 0,083 \text{ m} \quad (3.101)$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0,0373 \quad (3.102)$$

$$\text{stupanj crnoće stijenke: } \varepsilon_s = 0,8$$

$$\text{koeficijent zračenja crnog tijela: } C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 7,713 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.103)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 119,320 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.104)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u pregrijaču 2:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_8 + t_9}{2} = 452,5\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{p\ sr} = 725,65\text{ K} \quad (3.105)$$

srednji specifični volumen u pregrijaču 2:

$$v_{sr} = \frac{v_8 + v_9}{2} = 0,03409\text{ } \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (3.106)$$

$v_8, \text{ m}^3/\text{kg}$	0,029192
$v_9, \text{ m}^3/\text{kg}$	0,038990

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \pi \cdot n_1} = 24,635\text{ } \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.107)$$

za $t_{pr} = 452,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $p_{sr} = 88,65\text{ bar}$:

Pr	1,010139
$\lambda, \text{ W/mK}$	0,070225
$\nu, \text{ m}^2/\text{s}$	9,197E-07

$$\alpha_w = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 2998,623\text{ } \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.108)$$

Koeficijent prolaza toplinekoeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52\text{ } \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ koeficijent zaprljanja: $\xi = 0,715$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{pp2} + 1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 81,3310\text{ } \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.109)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u pregrijač 2: $t_8 = 390 \text{ °C}$

izlazna temperatura pare iz pregrijača 2: $t_9 = 515 \text{ °C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u pregrijač 2: $t_{pl\ ul} = 1201,35 \text{ °C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz pregrijača 2: $t_{pl\ izl} = 988,56 \text{ °C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_9 = 686,35 \text{ °C} \quad (3.110)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_8 = 598,56 \text{ °C} \quad (3.111)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 641,454 \text{ °C} \quad (3.112)$$

Potrebna ogrjevnna površina

$$F_{pp2} = \frac{B \cdot q_{pp2}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 227,597 \text{ m}^2 \quad (3.113)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{pp2} - F}{F} \cdot 100 = -4,46 \% \quad (3.114)$$

3.6. Proračun pregrijača pare 1b**Ogrjevnna površina**

vanjski promjer cijevi: $d_{pp1b} = 0,0318 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi: $s_{pp1b} = 0,004 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{pp1b} - 2s_{pp1b} = 0,0238 \text{ m}$

duljina cijevi: $L_{pp1b} = 2,76 \text{ m}$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0,0625 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,075 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 73$

broj redova cijevi: $n_2 = 14$

širina kanala: $a = 4,77 \text{ m}$

visina kanala: $b = 2,76 \text{ m}$

$$F_{pp1b} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{pp1b} \cdot \pi \cdot L_{pp1b} = 281,8 \text{ m}^2 \quad (3.115)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{pp1b} \cdot L_{pp1b} \cdot n_1 = 6,758 \text{ m}^2 \quad (3.116)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 1191,47 \text{ K} \quad (3.117)$$

$$T_{ul} = 1261,71 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz pregrijača pare 1b:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 21684,301 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow t_{izl} = 848,08 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 1121,23 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{pp1b} = 21684,301 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.118)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = 23,104 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.119)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 918,32 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.120)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{pp1b}} = 1,97 \quad (3.121)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{pp1b}} = 2,36 \quad (3.122)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \rightarrow C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 > 10 \rightarrow C_z = 1$$

za $t_{sr} = 918,32 \text{ }^\circ\text{C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,58$$

$$\lambda = 0,101649 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,00014985 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{pp1b}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{pp1b}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = 133,794 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.123)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke: $t_s = \frac{t_6+t_7}{2} + 49,7 = 469,7 \text{ }^\circ\text{C}$ (3.124)

$$T_s = 742,85\text{K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): $p = 1 \text{ bar}$ $a = 0,47$

debljina sloja plina: $s = \frac{t_u+t_p}{2} - \frac{d_{pp1b}}{2} = 0,053 \text{ m}$ (3.125)

stupanj crnoće dimnih plinova: $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0,0245$ (3.126)

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0,8$

koeficijent zračenja crnog tijela: $C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s+1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 5,66 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.127)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 139,454 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.128)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u pregrijaču 1b:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_6+t_7}{2} = 420 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{p\ sr} = 693,15 \text{ K} \quad (3.129)$$

srednji specifični volumen u pregrijaču 1b:

$$v_{sr} = \frac{v_6+v_7}{2} = 0,0309 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (3.130)$$

$v_6, \text{ m}^3/\text{kg}$	0,027652
$v_7, \text{ m}^3/\text{kg}$	0,034197

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \pi \cdot n_1} = 15,299 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.131)$$

za $t_{pr} = 420 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_{sr} = 91 \text{ bar}$:

Pr	1,049827
$\lambda, \text{ W/mK}$	0,068143
$\nu, \text{ m}^2/\text{s}$	7,889E-07

$$\alpha_w = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 2282,534 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.132)$$

Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 0,41$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 53,3447 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.133)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u pregrijač 1b: $t_6 = 380 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz pregrijača 1b: $t_7 = 460 \text{ }^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u pregrijač 1b: $t_{pl ul} = 988,56 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz pregrijača 1b: $t_{pl izl} = 848,08 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl ul} - t_7 = 528,56 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.134)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl izl} - t_6 = 468,08 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.135)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 497,71 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.136)$$

Potrebna ogrjevnna površina

$$F_{pp1b} = \frac{B \cdot q_{pp1b}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 282,114 \text{ m}^2 \quad (3.137)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{pp1b} - F}{F} \cdot 100 = 0,113 \text{ \%} \quad (3.138)$$

3.7. Proračun pregrijača pare 1a

Ogrjevnna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{pp1a} = 0,0318 \text{ m}$
 debljina stijenke cijevi: $s_{pp1a} = 0,004 \text{ m}$
 unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{pp1a} - 2s_{pp1a} = 0,0238 \text{ m}$
 duljina cijevi: $L_{pp1a} = 2,76 \text{ m}$
 poprečni korak cijevi: $t_p = 0,0625 \text{ m}$
 uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,075 \text{ m}$
 broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 73$
 broj redova cijevi: $n_2 = 12$
 širina kanala: $a = 4,77 \text{ m}$
 visina kanala: $b = 2,76 \text{ m}$

$$F_{pp1a} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{pp1a} \cdot \pi \cdot L_{pp1a} = 241,54 \text{ m}^2 \quad (3.139)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{pp1a} \cdot L_{pp1a} \cdot n_1 = 6,758 \text{ m}^2 \quad (3.140)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 1025,15 \text{ K} \quad (3.141)$$

$$T_{ul} = 1121,23 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz pregrijača pare 1a:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 16538,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \rightarrow \quad t_{izl} = 655,92 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 929,07 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{pp1a} = 16538,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.142)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = 19,974 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.143)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 752 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.144)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{pp1a}} = 1,97 \quad (3.145)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{pp1a}} = 2,36 \quad (3.146)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \quad \rightarrow \quad C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 > 10 \quad \rightarrow \quad C_z = 1$$

za $t_{sr} = 752 \text{ }^\circ\text{C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,5948$$

$$\lambda = 0,087276 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,00011688 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{pp1a}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{pp1a}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = 123,846 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.147)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenke: } t_s = \frac{t_5 + t_6}{2} + 49,7 = 392,9 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.148)$$

$$T_s = 666 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): $p = 1 \text{ bar}$ $a = 0,51$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{pp1a}}{2} = 0,053 \text{ m} \quad (3.149)$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0,0266 \quad (3.150)$$

stupanj crnoće stijenke: $\varepsilon_s = 0,8$

koeficijent zračenja crnog tijela: $C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 3,43 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.151)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 127,277 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.152)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u pregrijaču 1a:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_5 + t_6}{2} = 343,19 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{p\ sr} = 616,34 \text{ K} \quad (3.153)$$

srednji specifični volumen u pregrijaču 1a:

$$v_{sr} = \frac{v_5 + v_6}{2} = 0,0234 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad (3.154)$$

$v_5, \text{ m}^3/\text{kg}$	0,019087
$v_6, \text{ m}^3/\text{kg}$	0,027652

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \pi \cdot n_1} = 11,561 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.155)$$

za $t_{pr} = 343,19 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_{sr} = 93 \text{ bar}$:

Pr	1,276827
λ , W/mK	0,067185
ν , m ² /s	5,255E-07

$$\alpha_w = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left(\frac{w_p \cdot d_u}{\nu}\right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 2691,948 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.156)$$

Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 0,91$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{pp1a}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 109,569 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.157)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u pregrijač 1a: $t_5 = 306,37 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz pregrijača 1a: $t_6 = 380 \text{ }^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u pregrijač 1a: $t_{pl\ ul} = 848,08 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz pregrijača 1a: $t_{pl\ izl} = 655,92 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_6 = 468,08 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.158)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_5 = 349,55 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.159)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 405,94 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.160)$$

Potrebna ogrjevna površina

$$F_{pp1a} = \frac{B \cdot q_{pp1a}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 250,638 \text{ m}^2 \quad (3.161)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{pp1a} - F}{F} \cdot 100 = 3,766 \% \quad (3.162)$$

3.8. Proračun zagrijača vode 2

Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{zv2} = 0,0318$ m
 debljina stijenke cijevi: $s_{zv2} = 0,0032$ m
 unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{zv2} - 2s_{zv2} = 0,0254$ m
 duljina cijevi: $L_{zv2} = 2,76$ m
 poprečni korak cijevi: $t_p = 0,125$ m
 uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,08$ m
 broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 37$
 broj redova cijevi: $n_2 = 22$
 širina kanala: $a = 4,77$ m
 visina kanala: $b = 2,76$ m

$$F_{zv2} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{zv2} \cdot \pi \cdot L_{zv2} = 224,45 \text{ m}^2 \quad (3.163)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{zv2} \cdot L_{zv2} \cdot n_1 = 9,918 \text{ m}^2 \quad (3.164)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 881,94 \text{ K} \quad (3.165)$$

$$T_{ul} = 929,07 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz zagrijača vode 2:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 14175,464 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow t_{izl} = 561,65 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 834,8 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{zv2} = 14175,464 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.166)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = 11,765 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.167)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 608,79 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.168)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{zv2}} = 3,93 \quad (3.169)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{zv2}} = 2,52 \quad (3.170)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \quad \rightarrow \quad C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 > 10 \quad \rightarrow \quad C_z = 1$$

za $t_{sr} = 608,79 \text{ } ^\circ\text{C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,6091$$

$$\lambda = 0,074947 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,00009095 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{zv2}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{zv2}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = 89,446 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.171)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenske: } t_s = \frac{t_3 + t_4}{2} + 49,7 = 339,2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.172)$$

$$T_s = 612,35 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

$$\text{očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): } p = 1 \text{ bar} \quad a = 0,55$$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{zv2}}{2} = 0,087 \text{ m} \quad (3.173)$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0,0465 \quad (3.174)$$

$$\text{stupanj crnoće stijenske: } \varepsilon_s = 0,8$$

$$\text{koeficijent zračenja crnog tijela: } C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 4,09 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.175)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 93,534 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.176)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

$$\alpha_w = 15000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - \text{preporučeno}$$

Koeficijent prolaza topline

$$\text{koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: } \lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\text{koeficijent zaprljanja: } \xi = 0,8$$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{\xi}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 73,941 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.177)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

$$\text{ulazna temperatura pare u zagrijač 2: } t_3 = 275 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{izlazna temperatura pare iz zagrijača 2: } t_4 = 304 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ulazna temperatura dimnih plinova u zagrijač 2: } t_{pl\ ul} = 655,92 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{izlazna temperatura dimnih plinova iz zagrijača 2: } t_{pl\ izl} = 561,65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_4 = 351,92 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.178)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_3 = 286,65 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.179)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 318,17 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.180)$$

Potrebna ogrjevna površina

$$F_{zv2} = \frac{B \cdot q_{zv2}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 217,577 \text{ m}^2 \quad (3.181)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{zv2} - F}{F} \cdot 100 = -3,06 \text{ \%} \quad (3.182)$$

3.9. Proračun isparivača 5

Ogrjevna površina

pretpostavljena količina topline: $q_{pretp} = 240 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

vanjski promjer cijevi: $d_{evap5} = 0,07 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi: $s_{evap5} = 0,0056 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{evap5} - 2s_{evap5} = 0,0588 \text{ m}$

duljina cijevi: $L_{evap5} = 2,76 \text{ m}$

poprečni korak cijevi: $t_p = 0,125 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi: $t_u = 1 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 37$

broj redova cijevi: $n_2 = 1$

širina kanala: $a = 4,77 \text{ m}$

visina kanala: $b = 2,76 \text{ m}$

$$F_{evap5} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{evap5} \cdot \pi \cdot L_{evap5} = 22,46 \text{ m}^2 \quad (3.183)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{evap5} \cdot L_{evap5} \cdot n_1 = 6,017 \text{ m}^2 \quad (3.184)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 829,59 \text{ K} \quad (3.185)$$

$$T_{ul} = 834,8 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz evaporatora 5:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 13935,464 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow t_{izl} = 551,22 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 824,37 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{evap5} = 13935,464 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.186)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = 18,242 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.187)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 556,44 \text{ °C} \quad (3.188)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{evap5}} = 1,79 \quad (3.189)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{evap5}} = 14,29 \quad (3.190)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \quad \rightarrow \quad C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 < 10 \quad \rightarrow \quad C_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (n_2 - 2) = 0,9 \quad (3.191)$$

za $t_{sr} = 556,44 \text{ °C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,61436$$

$$\lambda = 0,070454 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,0000822 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{evap5}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{evap5}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = 82,66 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.192)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenke: } t_s = t_5 + 49,7 = 356,07 \text{ °C} \quad (3.193)$$

$$T_s = 629,22 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

$$\text{očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): } p = 1 \text{ bar} \quad a = 0,57$$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{evap5}}{2} = 0,5275 \text{ m} \quad (3.194)$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0,2597 \quad (3.195)$$

$$\text{stupanj crnoće stijenke: } \varepsilon_s = 0,8$$

$$\text{koeficijent zračenja crnog tijela: } C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 20,96 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.196)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 103,62 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.197)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

$$\alpha_w = 15000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - \text{preporučeno}$$

Koeficijent prolaza topline

$$\text{koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: } \lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\text{koeficijent zaprljanja: } \xi = 0,9$$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{evap5}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 91,603 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.198)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

$$\text{temperatura pare u evaporatoru 5: } t_5 = 306,37 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ulazna temperatura dimnih plinova u evaporator 5: } t_{pl\ ul} = 561,65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{izlazna temperatura dimnih plinova iz evaporatora 5: } t_{pl\ izl} = 551,22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_5 = 255,28 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.199)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_5 = 244,85 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.200)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 250,03 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.201)$$

Potrebna izmijenjena toplina

$$q_{evap5} = \frac{F \cdot k \cdot \Delta t_m \cdot \eta_z}{B} = 237,431 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.202)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{q_{evap5} - q_{pret p}}{q_{pret p}} \cdot 100 = -1,07 \% \quad (3.203)$$

3.10. Proračun zagrijača vode 1b

Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{zv1b} = 0,025$ m
 debljina stijenke cijevi: $s_{zv1b} = 0,0032$ m
 unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{zv1b} - 2s_{zv1b} = 0,0186$ m
 duljina cijevi: $L_{zv1b} = 4,5$ m
 poprečni korak cijevi: $t_p = 0,045$ m
 uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,06$ m
 broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 57$
 broj redova cijevi: $n_2 = 30$
 širina kanala: $a = 2,6$ m
 visina kanala: $b = 4,5$ m

$$F_{zv1b} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{zv1b} \cdot \pi \cdot L_{zv1b} = 604,364 \text{ m}^2 \quad (3.204)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{zv1b} \cdot L_{zv1b} \cdot n_1 = 5,288 \text{ m}^2 \quad (3.205)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 737,1 \text{ K} \quad (3.206)$$

$$T_{ul} = 824,37 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz zagrijača vode 1b:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 9661,161 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow t_{izl} = 376,69 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 649,84 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{zv1b} = 9661,161 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.207)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = 18,532 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.208)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 463,95 \text{ °C} \quad (3.209)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{zv1b}} = 1,8 \quad (3.210)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{zv1b}} = 2,4 \quad (3.211)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \quad \rightarrow \quad C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 > 10 \quad \rightarrow \quad C_z = 1$$

za $t_{sr} = 463,95 \text{ °C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,62721$$

$$\lambda = 0,0625 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,00006752 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{zv1b}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{zv1b}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = 133,597 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.212)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenske: } t_s = \frac{t_2 + t_3}{2} + 49,7 = 294,7 \text{ °C} \quad (3.213)$$

$$T_s = 567,85 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

$$\text{očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): } p = 1 \text{ bar} \quad a = 0,65$$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{zv1b}}{2} = 0,04 \text{ m} \quad (3.214)$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0,0257 \quad (3.215)$$

$$\text{stupanj crnoće stijenske: } \varepsilon_s = 0,8$$

$$\text{koeficijent zračenja crnog tijela: } C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 0,8516 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.216)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 134,449 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.217)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

$$\alpha_w = 15000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - \text{preporučeno}$$

Koeficijent prolaza topline

$$\text{koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: } \lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\text{koeficijent zaprljanja: } \xi = 0,55$$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{\xi}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 72,694 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.218)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

$$\text{ulazna temperatura pare u zagrijač 1b: } t_2 = 215 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{izlazna temperatura pare iz zagrijača 1b: } t_3 = 275 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ulazna temperatura dimnih plinova u zagrijač 1b: } t_{pl\ ul} = 551,22 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{izlazna temperatura dimnih plinova iz zagrijača 1b: } t_{pl\ izl} = 376,69 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_3 = 276,22 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.219)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_2 = 161,69 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.220)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 213,87 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.221)$$

Potrebna ogrjevna površina

$$F_{zv1b} = \frac{B \cdot q_{zv1b}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 595,596 \text{ m}^2 \quad (3.222)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{zv1b} - F}{F} \cdot 100 = -1,45 \% \quad (3.223)$$

3.11. Proračun zagrijača vode 1a

Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi: $d_{zv1a} = 0,025$ m
 debljina stijenke cijevi: $s_{zv1a} = 0,0032$ m
 unutarnji promjer cijevi: $d_u = d_{zv1a} - 2s_{zv1a} = 0,0186$ m
 duljina cijevi: $L_{zv1a} = 4,5$ m
 poprečni korak cijevi: $t_p = 0,045$ m
 uzdužni korak cijevi: $t_u = 0,06$ m
 broj cijevi u jednom redu: $n_1 = 57$
 broj redova cijevi: $n_2 = 30$
 širina kanala: $a = 2,6$ m
 visina kanala: $b = 4,5$ m

$$F_{zv1a} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{zv1a} \cdot \pi \cdot L_{zv1a} = 604,364 \text{ m}^2 \quad (3.224)$$

Minimalni presjek

$$F_m = a \cdot b - d_{zv1a} \cdot L_{zv1a} \cdot n_1 = 5,288 \text{ m}^2 \quad (3.225)$$

Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 572,83 \text{ K} \quad (3.226)$$

$$T_{ul} = 649,84 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz zagrijača vode 1a:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 5723,891 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \rightarrow t_{izl} = 222,67 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 495,82 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{zv1a} = 5723,891 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (3.227)$$

Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_m} = 14,470 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.228)$$

Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273,15 = 299,68 \text{ °C} \quad (3.229)$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{zv1a}} = 1,8 \quad (3.230)$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{zv1a}} = 2,4 \quad (3.231)$$

$$\text{za } \sigma_2 \geq 2 \quad \rightarrow \quad C_s = 1$$

$$\text{za } n_2 > 10 \quad \rightarrow \quad C_z = 1$$

za $t_{sr} = 299,68 \text{ °C}$ iz tablice 5. slijedi:

$$Pr = 0,65$$

$$\lambda = 0,0484 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0,0000439 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{zv1a}} \cdot \left(\frac{w \cdot d_{zv1a}}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} = 117,91 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.232)$$

Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenke: } t_s = \frac{t_1 + t_2}{2} + 49,7 = 234,7 \text{ °C} \quad (3.233)$$

$$T_s = 507,85 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

$$\text{očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): } p = 1 \text{ bar} \quad a = 0,7$$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{zv1a}}{2} = 0,04 \text{ m} \quad (3.234)$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0,0276 \quad (3.235)$$

$$\text{stupanj crnoće stijenke: } \varepsilon_s = 0,8$$

$$\text{koeficijent zračenja crnog tijela: } C_C = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 0,8924 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.236)$$

Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 118,803 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.237)$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

$$\alpha_w = 15000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - \text{preporučeno}$$

Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi: $\lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

koeficijent zaprljanja: $\xi = 1,1$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{zvl1a}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 128,722 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (3.238)$$

Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u zagrijač 1a: $t_1 = 155 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz zagrijača 1a: $t_2 = 215 \text{ }^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u zagrijač 1a: $t_{pl\ ul} = 376,69 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz zagrijača 1a: $t_{pl\ izl} = 222,67 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_2 = 161,69 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.239)$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_1 = 67,67 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.240)$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 107,94 \text{ }^\circ\text{C} \quad (3.241)$$

Potrebna ogrjevna površina

$$F_{zvl1a} = \frac{B \cdot q_{zvl1a}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 613,888 \text{ m}^2 \quad (3.242)$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{zvl1a} - F}{F} \cdot 100 = 1,576 \% \quad (3.243)$$

4. HIDRODINAMIČKI PRORAČUN

4.1. Proračun zagrijača vode 1a

Pad tlaka uslijed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,4856 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.1)$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 67,5 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0,022$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 1,173 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.2)$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 884,61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.3)$$

Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,05292 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.4)$$

$$\sum \zeta = i \cdot \zeta = 8,7 \quad (4.5)$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,3$

Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{zv1a} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0,54 \text{ bar} \quad (4.6)$$

4.2. Proračun zagrijača vode 1b

Pad tlaka uslijed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,5322 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.7)$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 67,5 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0,022$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 1,285 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.8)$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 807,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.9)$$

Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,05799 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.10)$$

$$\sum \zeta = i \cdot \zeta = 8,7 \quad (4.11)$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,3$

Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{zv1b} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0,59 \text{ bar} \quad (4.12)$$

4.3. Proračun zagrijača vode 2

Pad tlaka uslijed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 1,052 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.13)$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 60,72 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0,022$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 2,336 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.14)$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 733,86 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.15)$$

Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,12609 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.16)$$

$$\sum \zeta = i \cdot \zeta = 6,3 \quad (4.17)$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,3$

Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{zv2} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 1,18 \text{ bar} \quad (4.18)$$

4.4. Proračun pregrijača pare 1a

Pad tlaka uslijed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,43777 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.19)$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 16,56 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0,022$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 11,561 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.20)$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 42,79 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.21)$$

Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,09437 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.22)$$

$$\sum \zeta = i \cdot \zeta = 3,3 \quad (4.23)$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,3$

Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{pp1a} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0,53 \text{ bar} \quad (4.24)$$

4.5. Proračun pregrijača pare 1b

Pad tlaka uslijed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,67584 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.25)$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 19,32 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0,022$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot A}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 15,299 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.26)$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 32,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.27)$$

Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,14759 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.28)$$

$$\sum \zeta = i \cdot \zeta = 3,9 \quad (4.29)$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,3$

Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{pp1b} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0,82 \text{ bar} \quad (4.30)$$

4.6. Proračun pregrijača pare 2

Pad tlaka uslijed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 1,8167 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.31)$$

ukupna duljina jedne cijevi: $L = 22,08 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare) $\lambda = 0,022$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 24,635 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.32)$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 29,33 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.33)$$

Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \sum \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0,61416 \cdot 10^5 \text{ Pa} \quad (4.34)$$

$$\sum \zeta = i \cdot \zeta = 6,9 \quad (4.35)$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,3$

Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{pp2} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 2,43 \text{ bar} \quad (4.36)$$

4.7. Proračun cirkulacije

Parametri pregrijane pare i učin generatora:

$$D_1 = 32,13 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$p_{pp} = 87,3 \text{ bar}$$

$$t_{pp} = 515 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tlak u bubnju i parametri vrele vode / zasićene pare:

$$p_{zp} = 94 \text{ bar}$$

$$t_{zp} = 306,37 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$v' = 0,001432 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$v'' = 0,019447 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h' = 1381,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h'' = 2736,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Silazne cijevi generatora pare

Maseni protok kroz silazne cijevi

približni optočni broj:

$$O_{br} = \frac{1000}{p_{zp}} = 10,638 \quad (4.37)$$

količina vode u opticaju:

$$G := O \cdot D = 341,847 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.38)$$

$$i := 0,1, \dots, 10 \quad m_{sil} := \left(200 + \frac{500-200}{10} \cdot i\right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (4.39)$$

$$m_{sil} = \begin{matrix} 200 \\ 230 \\ 260 \\ 290 \\ 320 \\ 350 \\ 380 \\ 410 \\ 440 \\ 470 \\ [500] \end{matrix} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Stanje vode u silaznim cijevima i na ulazu uzlaznih cijevi

$$\text{temperatura napojne vode na ulazu u bubanj: } t_2 = 304 \text{ }^\circ\text{C} \quad h_2 = 1367,15 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

entalpija vode u silaznim cijevima:

$$h_{sil} := h' - \frac{D_1 \cdot (h' - h_2)}{m_{sil}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] \quad (4.40)$$

	1379,446	306,0852	0,00142974
	1379,752	306,1369	0,00143000
	1379,989	306,1766	0,00143020
	1380,176	306,2081	0,00143036
	1380,328	306,2337	0,00143049
$h_{sil} =$	1380,454 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$t_{sil} =$ 306,2549 °C	$v_{sil} =$ 0,00143060 $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$
	1380,560	306,2728	0,00143069
	1380,651	306,2880	0,00143077
	1380,729	306,3012	0,00143084
	1380,798	306,3127	0,00143090
	[1380,858]	[306,3228]	[0,00143095]

Geometrija silaznih cijevi

$$d_{sil} = 0,12 \text{ m}$$

$$n_{sil} = 2$$

$$H_{sil} = 12,3 \text{ m}$$

$$l_{sil} = 16,65 \text{ m}$$

$$A_{sil} = \frac{d_{sil}^2 \cdot \pi}{4} = 0,0113 \text{ m}^2 \quad (4.41)$$

Pad tlaka uslijed trenja

koeficijent linijskih gubitaka:

$$k_{tr.sil} = 0,09 \text{ - za cijevi isparivača i pregrijača}$$

$$f_{tr.sil} = \frac{1}{4} \cdot \left(0,0061 + \frac{k_{tr.sil} \cdot 0,0061}{d_{sil}^{0,33333}} \right) = 0,044 \quad (4.42)$$

koeficijent lokalnih gubitaka:

$$k_{ul} = 0,8 \quad k_{iz} = 0,9 \quad k_{kolj} = 0,21$$

$$k_{sil} = \begin{bmatrix} k_{ul} \\ k_{iz} \\ k_{kolj} \end{bmatrix}$$

brzina strujanja u silaznim cijevima:

$$w_{sil_i} := \frac{m_{sil}}{(v_{sil})^{-1} \cdot n_{sil} \cdot A_{sil}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (4.43)$$

pad tlaka uslijed trenja:

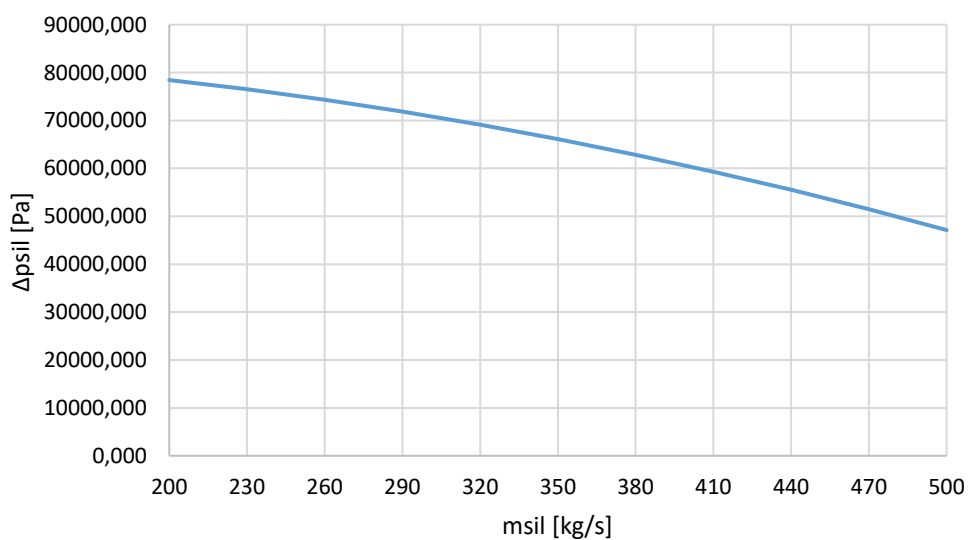
$$\Delta p_{tr_i} := \left(4 \cdot f_{tr,sil} \cdot \frac{l_{sil}}{d_{sil}} + \sum_j k_{sil_j} \right) \cdot \frac{v_{sil_i}}{2} \cdot \left(\frac{m_{sil_i}}{A_{sil} \cdot n_{sil}} \right)^2 \quad (4.44)$$

Gravitacijski pad tlaka

$$\Delta p_{gr_i} := 9,807 \cdot \frac{H_{sil}}{v_{sil_i}} \quad (4.45)$$

Ukupni pad tlaka za silazne cijevi

$$\Delta p_{sil_i} = \Delta p_{gr_i} + \Delta p_{tr_i} \quad \Delta p_{sil} = \begin{matrix} 78437,236 \\ 76504,224 \\ 74306,708 \\ 71843,576 \\ 69114,135 \\ 66117,929 \text{ Pa} \\ 62854,644 \\ 59324,061 \\ 55526,018 \\ 51460,395 \\ [47127,103] \end{matrix} \quad (4.46)$$



Slika 6. Ukupni pad tlaka za silazne cijevi

Entalpija vode na ulazu u uzlazne cijevi utječe na karakteristiku istih, te se radi pojednostavljenja usvaja fiksna vrijednost, na osnovu pretpostavljenog protoka, koja se prema potrebi korigira, nakon što se utvrdi stvarni protok

$$m_{sil.pretp} = 450 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$h_u = h' - \frac{D_1 \cdot (h' - h_2)}{m_{sil.pretp}} = 1380,753 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (4.47)$$

$$t_u = 306,301 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$v_u = 0,001431 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Uzlazne cijevi generatora pare

Toplina dovedena isparivaču

$$Q_L = q_L \cdot B \cdot \eta_Z = 38829,17 \text{ kW} \quad (4.48)$$

$$Q_{CZ} = q_{CZ} \cdot B \cdot \eta_Z = 2904,31 \text{ kW} \quad (4.49)$$

Dioba uzlaznih cijevi na grupe $j := 0 \dots 2$

- prednja cijevna stijena ložišta: $p := 0$
- stražnja cijevna stijena ložišta: $s := 1$
- bočne cijevne stijene ložišta: $b := 2$

Geometrija uzlaznih cijevi

promjer cijevi:	broj cijevi u grupi:	visina od donjeg kolektora do bubnja:
0,07	52	12,3
$d_{uzl} = [0,07] \text{ m}$	$n_{uzl} = [52]$	$H_{uzl} = [12,3] \text{ m}$
0,07	168	12,3
$A_{uzl} := \frac{(d_{uzl,j})^2 \cdot \pi}{4}$	$A_{uzl} = [0,0038] \text{ m}^2$	(4.50)
	0,0038	

Razdioba topline u ložištu pojedinim grupama cijevi

površine ekrana:

$$A_p = 112,57 \text{ m}^2$$

$$A_s = 33,25 \text{ m}^2$$

$$A_b = 140,94 \text{ m}^2$$

razdioba topline po grupama cijevi:

$$Q_{Lp} = Q_L \cdot \frac{A_p}{A_p + A_s + A_b} = 15242,9 \text{ kW} \quad (4.51)$$

$$Q_{Ls} = Q_L \cdot \frac{A_s}{A_p + A_s + A_b} = 4501,8 \text{ kW} \quad (4.52)$$

$$Q_{Lb} = Q_L \cdot \frac{A_b}{A_p + A_s + A_b} = 19084,4 \text{ kW} \quad (4.53)$$

Odabir ranga protoka u svrhu određivanja karakteristike isparivačkih površina

$$m_{uzlj} := \left(30 + \frac{180-30}{10} \cdot j\right) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad m_{uzl} = \begin{matrix} 30 \\ 45 \\ 60 \\ 75 \\ 90 \\ 105 \\ 120 \\ 135 \\ 150 \\ 165 \\ [180] \end{matrix} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.54)$$

Maseni sadržaj pare na izlazu isparivačkih cijevi

$$Q := \begin{matrix} Q_{Lp} \\ [Q_{Ls} + Q_{CZ}] \text{ kW} \\ Q_{Lb} \end{matrix} \quad Q = \begin{matrix} 15242,9 \\ [7406,1] \text{ kW} \\ 19084,4 \end{matrix}$$

$$x_{ispj,i} := \frac{Q_j}{m_{uzlj} \cdot (h'' - h')} + \frac{h_u - h'}{h'' - h'} \quad (4.55)$$

$$x_{isp} = \begin{bmatrix} 0,374 & 0,249 & 0,187 & 0,149 & 0,124 & 0,106 & 0,093 & 0,083 & 0,074 & 0,067 & 0,062 \\ 0,182 & 0,121 & 0,090 & 0,072 & 0,060 & 0,051 & 0,045 & 0,040 & 0,036 & 0,032 & 0,030 \\ 0,469 & 0,312 & 0,234 & 0,187 & 0,156 & 0,133 & 0,117 & 0,104 & 0,093 & 0,085 & 0,078 \end{bmatrix}$$

Visina jednofaznog i dvofaznog strujanja

prednja cijevna stijena:

duljina cijevi: $L_{uzl_p} = 23,6$ m

visina cijevi: $H_{uzl_p} = 10$ m

$$\text{duljina 1F: } L_{uzl1F_{p,j}} := L_{uzl_p} \cdot m_{uzl_j} \cdot \frac{h' - h_u}{Q_{Lp}} \quad (4.56)$$

$$\text{duljina 2F: } L_{uzl2F_{p,j}} := L_{uzl_p} - L_{uzl1F_{p,j}} \quad (4.57)$$

$$\text{visina 1F: } H_{uzl1F_{p,j}} := L_{uzl1F_{p,j}} \quad (4.58)$$

$$\text{visina 2F: } H_{uzl2F_{p,j}} = H_{uzl_p} - H_{uzl1F_{p,j}} \quad (4.59)$$

stražnja cijevna stijena:

duljina cijevi: $L_{uzl_s} = 6,97$ m

visina cijevi: $H_{uzl_s} = 6,97$ m

$$\text{duljina 1F: } L_{uzl1F_{s,j}} := L_{uzl_s} \cdot m_{uzl_j} \cdot \frac{h' - h_u}{Q_{Ls}} \quad (4.56)$$

$$\text{duljina 2F: } L_{uzl2F_{s,j}} := L_{uzl_s} - L_{uzl1F_{s,j}} \quad (4.57)$$

$$\text{visina 1F: } H_{uzl1F_{s,j}} := L_{uzl1F_{s,j}} \quad (4.58)$$

$$\text{visina 2F: } H_{uzl2F_{s,j}} = H_{uzl_s} - H_{uzl1F_{s,j}} \quad (4.59)$$

bočne cijevne stijene:

duljina cijevi: $L_{uzl_b} = 10$ m

visina cijevi: $H_{uzl_b} = 10$ m

$$\text{duljina 1F: } L_{uzl1F_{b,j}} := L_{uzl_b} \cdot m_{uzl_j} \cdot \frac{h' - h_u}{Q_{Lb}} \quad (4.56)$$

$$\text{duljina 2F: } L_{uzl2F_{b,j}} := L_{uzl_b} - L_{uzl1F_{b,j}} \quad (4.57)$$

$$\text{visina 1F: } H_{uzl1F_{b,j}} := L_{uzl1F_{b,j}} \quad (4.58)$$

$$\text{visina 2F: } H_{uzl2F_{b,j}} = H_{uzl_b} - H_{uzl1F_{b,j}} \quad (4.59)$$

Koeficijenti dvofaznog (2F) toka

pomoću tablice, za radni tlak $p_{zp} = 94$ bar, određeni su koeficijenti:

$$\alpha = 14,153 \quad \gamma = 9,142$$

koeficijent trenja:

$$k_{tr.uzl} = 0,09$$

$$f_{tr.uzl_i} := \frac{1}{4} \cdot \left(0,0061 + \frac{k_{tr.uzl}^{-0,0061}}{d_{uzl_i}^{0,33333}} \right) \quad (4.60)$$

$$f_{TP.uzl_{i,j}} := f_{tr.uzl_i} \cdot (1 - x_{isp_{i,j}})^{-0,25} \quad (4.61)$$

akceleracijski množitelj:

$$r_{2_{i,j}} := [1 + x_{isp_{i,j}} \cdot (\gamma - 1)] \cdot \left(1 + x_{isp_{i,j}} \cdot \frac{\alpha - \gamma}{\gamma} \right) - 1 \quad (4.62)$$

množitelj zbog trenja:

$$r_{3_{i,j}} := \frac{r_{2_{i,j}}^{+2}}{2 \cdot f_{tr.uzl_i}} \cdot f_{TP.uzl_{i,j}} \quad (4.63)$$

gravitacijski množitelj:

$$r_{4_{i,j}} := \frac{\gamma - 1}{\alpha - 1} + \frac{\gamma - \alpha}{(\gamma - 1)^2} \cdot \frac{\ln[1 + x_{isp_{i,j}} \cdot (\gamma - 1)]}{x_{isp_{i,j}}} \quad (4.64)$$

Pad tlaka uzlaznih cijevi

uslijed ubrzanja fluida, a zbog promjene gustoće:

$$\Delta p_{uzl.ak.1F_{j,i}} := \left(\frac{m_{uzl_j}}{A_{uzl_i} \cdot n_{uzl_i}} \right)^2 \cdot (v' - v_u) \quad (4.65)$$

$$\Delta p_{uzl.ak.2F_{j,i}} := \left(\frac{m_{uzlj}}{A_{uzli} \cdot n_{uzli}} \right)^2 \cdot v' \cdot r_{2i,j} \quad (4.66)$$

$$\Delta p_{uzl.ak} := \Delta p_{uzl.ak1F} + \Delta p_{uzl.ak2F} \quad (4.67)$$

uslijed trenja:

$$k_{uzl1F} = \begin{bmatrix} 1 \cdot k_{ul} & 0 \cdot k_{iz} & 1 \cdot k_{kolj} \\ 1 \cdot k_{ul} & 0 \cdot k_{iz} & 1 \cdot k_{kolj} \\ 1 \cdot k_{ul} & 0 \cdot k_{iz} & 1 \cdot k_{kolj} \end{bmatrix} \quad k_{uzl2F} = \begin{bmatrix} 0 \cdot k_{ul} & 1 \cdot k_{iz} & 2 \cdot k_{kolj} \\ 0 \cdot k_{ul} & 1 \cdot k_{iz} & 1 \cdot k_{kolj} \\ 0 \cdot k_{ul} & 1 \cdot k_{iz} & 1 \cdot k_{kolj} \end{bmatrix}$$

$$\Delta p_{uzl.tr.1F_{j,i}} := \left(4 \cdot f_{tr.uzli} \cdot \frac{L_{uzl1Fi,j}}{d_{uzli}} + \sum_{ik} k_{uzl1Fi,ik} \right) \cdot \frac{v' + v_u}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{m_{uzlj}}{A_{uzli} \cdot n_{uzli}} \right)^2 \quad (4.68)$$

$$\Delta p_{uzl.tr.2F_{j,i}} := \left(4 \cdot f_{TP.uzli,j} \cdot \frac{L_{uzl2Fi,j}}{d_{uzli}} + \sum_{ik} k_{uzl2Fi,ik} \right) \cdot \frac{v'}{2} \cdot \left(\frac{m_{uzlj}}{A_{uzli} \cdot n_{uzli}} \right)^2 \cdot r_{3i,j} \quad (4.69)$$

$$\Delta p_{uzl.tr} := \Delta p_{uzl.tr1F} + \Delta p_{uzl.tr2F} \quad (4.70)$$

uslijed težine stupca (gravitacijski):

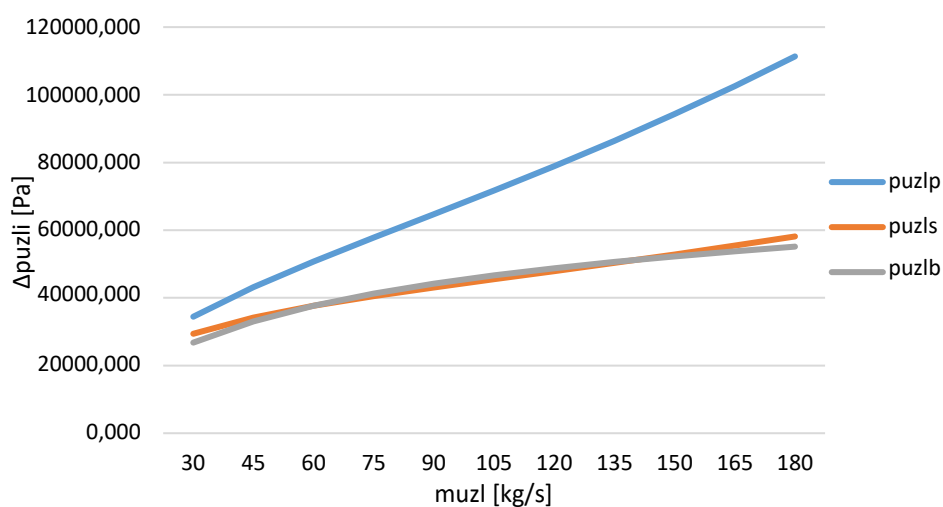
$$\Delta p_{uzl.gr.1F_{j,i}} := \frac{9,807 \cdot H_{uzl1Fi,j}}{\left(\frac{v_u + v'}{2} \right)} \quad (4.71)$$

$$\Delta p_{uzl.gr.2F_{j,i}} := \frac{9,807 \cdot H_{uzl2Fi,j}}{v'} \cdot r_{4i,j} \quad (4.72)$$

$$\Delta p_{uzl.gr} := \Delta p_{uzl.gr1F} + \Delta p_{uzl.gr2F} \quad (4.73)$$

Ukupni pad tlaka za uzlazne cijevi

$$\Delta p_{uzl} = \Delta p_{uzl.ak} + \Delta p_{uzl.tr} + \Delta p_{uzl.gr} \quad (4.74)$$

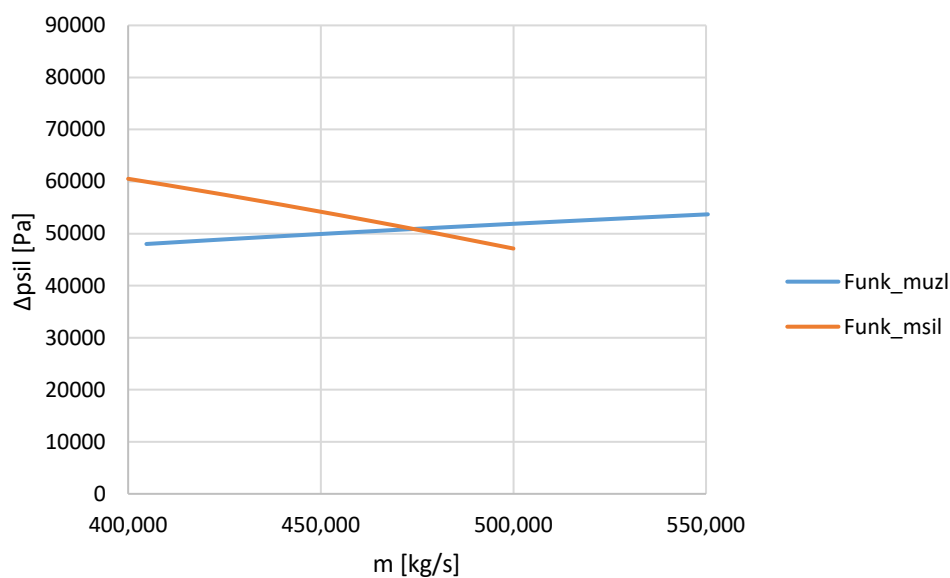


Slika 7. Ukupni pad tlaka za uzlazne cijevi

Ukupni maseni protok kroz sistem isparivača, pri čemu je pad tlaka jednak za sve grupe, možemo izraziti zajedničkom karakteristikom:

$$\sum_j Funk_m_{uzl}(j, \Delta p_{sil_i}) \quad (4.75)$$

Radna točka generatora pare



Slika 8. Radna točka generatora pare

iteracija:

$$\Delta p = 50886 \text{ Pa}$$

$$m_{uzl} := \sum_j Funk_m_{uzl}(j, \Delta p_{sil_i})$$

$$m_{uzl} = 473,97 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\Delta p := Funk_ \Delta p_{sil}(m_{uzl})$$

$$\Delta p = 50887 \text{ Pa}$$

Maseni protok, brzina strujanja te sadržaj pare u pojedinim grupama isparivača:

$$m_{uzl_j} := Funk_m_{uzl}(j, \Delta p) \qquad m_{uzl} = \begin{bmatrix} 60,35 \\ 138,28 \\ 275,34 \end{bmatrix} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (4.76)$$

$$w_{uzl_j} = \frac{m_{uzl_j}}{v_{sil}^{-1} \cdot n_{uzl_j} \cdot A_{uzl_j}} \qquad w_{uzl} = \begin{bmatrix} 0,432 \\ 0,989 \\ 0,609 \end{bmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.77)$$

$$x_j = \frac{Q_j}{m_{uzl_j} \cdot (h'' - h')} + \frac{h_u - h'}{h'' - h'} \qquad x = \begin{bmatrix} 18,571 \\ 3,877 \\ 5,041 \end{bmatrix} \% \quad (4.78)$$

U proračunu je radi jednostavnijeg računanja zanemaren utjecaj konvektivnog isparivača jer na njega otpada samo 3% ukupnog toplinskog toka cijelog isparivača što uzorkuje zanemarivu grešku manju od 5%.

5. AERODINAMIČKI PRORAČUN

5.1. Proračun isparivača 1

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 4,61 \text{ Pa} \quad (5.1)$$

brzina dimnih plinova: $w = 21,762 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0609 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 2$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/9. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,16$

5.2. Proračun pregrijača pare 2

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 46,18 \text{ Pa} \quad (5.2)$$

brzina dimnih plinova: $w = 17,806 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0607 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 24$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/9. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,2$

5.3. Proračun pregrijača pare 1b

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 63,1 \text{ Pa} \quad (5.3)$$

brzina dimnih plinova: $w = 23,104 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0603 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 14$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/6. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,28$

5.4. Proračun pregrijača pare 1a

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 40,23 \text{ Pa} \quad (5.4)$$

brzina dimnih plinova: $w = 19,974 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,06 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 12$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/6. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,28$

5.5. Proračun zagrijača vode 2

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 18,19 \text{ Pa} \quad (5.5)$$

brzina dimnih plinova: $w = 11,765 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0597 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 22$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/9. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,2$

5.6. Proračun isparivača 5

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 3,98 \text{ Pa} \quad (5.6)$$

brzina dimnih plinova: $w = 18,242 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0597 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 1$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/7. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,4$

5.7. Proračun zagrijača vode 1b

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 79,63 \text{ Pa} \quad (5.7)$$

brzina dimnih plinova: $w = 18,532 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0595 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 30$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/6. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,26$

5.8. Proračun zagrijača vode 1a

Pad tlaka pri poprečnom strujanju na snopove cijevi

$$\Delta p = n \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho = 46,46 \text{ Pa} \quad (5.8)$$

brzina dimnih plinova: $w = 14,470 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0592 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

broj redova cijevi: $n = 30$

koeficijent otpora strujanja:

očitano iz sl. 6.3/6. (Kreuh: Generatori pare) $\zeta = 0,25$

5.9. Pad tlaka pri promjeni smjera strujanja za 180°

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot (w_1^2 + w_2^2 + w_3^2) = 30,22 \text{ Pa} \quad (5.9)$$

gustoća dimnih plinova: $\rho = 0,0596 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

brzina dimnih plinova na početku skretanja: $w_1 = 18,242 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

brzina dimnih plinova na sredini skretanja: $w_2 = 18,387 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

brzina dimnih plinova na kraju skretanja: $w_3 = 18,532 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

5.10. Pad tlaka zbog strujanja dimnih plinova prema dolje

$$\Delta p = g \cdot H \cdot (\rho_u - \rho_{pl}) = 112,22 \text{ Pa} \quad (5.10.)$$

gustoća dimnih plinova: $\rho_{pl} = 0,0603 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

gustoća okolišnog zraka: $\rho_u = 1,2046 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

visina kanala u kojem postoji suprotno strujanje od prirodnog uzgona: $H = 10 \text{ m}$

6. RECIRKULACIJA DIMNIH PLINOVA

Recirkulacija dimnih plinova znači oduzimanje produkata izgaranja iz dimozračnog trakta kotla i njihovo vraćanje u dimozračni trakt na mjesto gdje plinovi imaju višu temperaturu nego prilikom oduzimanja. Recirkulacija dimnih plinova najčešće se primjenjuje kod generatora pare za zagrijavanje i sušenje goriva pri izgaranju u sloju (sustav rešetke) i pri izgaranju u prostoru (izgaranje ugljena u prahu). Također, kod manjih jedinica generatora pare s procesom izgaranja u sloju, gdje nema ugrađenog zagrijača zraka, provodi se recirkulacija dimnih plinova tako da se dio dimnih plinova oduzima iz toka dimnih plinova na kraju generatora pare ili iza zagrijača vode i uvodi u struju zraka za izgaranje [3]. Time se postiže regulacija temperature na ulazu.

Jednadžba recirkulacije se svodi na miješanje dvaju medija. U proračunavanom slučaju, hladnog dimnog plina uzetog s kraja dimozračnog trakta i zraka za izgaranje.

$$H = m_{dp} \cdot h_{dp} + m_{zr} \cdot h_{zr} \quad (6.1)$$

6.1. Rezultati uvođenja recirkulacije i njihova analiza

Recirkulacija		0%
Ložište	D (t/h)	125
	t (°C)	1240
	Q (MW)	39,8
Evaporator 1	t (°C)	1240
	Q (MW)	2,41
Pregrijač pare 2	t (°C)	1201
	Q (MW)	12,43
Pregrijač pare 1b	t (°C)	988
	Q (MW)	7,48
Pregrijač pare 1a	t (°C)	848
	Q (MW)	10,75
Ekonomajzer 2	t (°C)	656
	Q (MW)	5,28
Evaporator 5	t (°C)	562
	Q (MW)	0,51
Ekonomajzer 1b	t (°C)	551
	Q (MW)	9,4
Ekonomajzer 1a	t (°C)	377
	Q (MW)	8,4
Izlaz	t (°C)	222

Recirkulacija		5%
Ložište	D (t/h)	125
	t (°C)	1220
	Q (MW)	37,3
Evaporator 1	t (°C)	1220
	Q (MW)	2,39
Pregrijač pare 2	t (°C)	1184
	Q (MW)	12,37
Pregrijač pare 1b	t (°C)	980
	Q (MW)	7,54
Pregrijač pare 1a	t (°C)	846
	Q (MW)	11,1
Ekonomajzer 2	t (°C)	661
	Q (MW)	5,5
Evaporator 5	t (°C)	574
	Q (MW)	0,56
Ekonomajzer 1b	t (°C)	563
	Q (MW)	10,16
Ekonomajzer 1a	t (°C)	395
	Q (MW)	10,74
Izlaz	t (°C)	248

Recirkulacija		10%
Ložište	D (t/h)	125
	t (°C)	1200
	Q (MW)	35,9
Evaporator 1	t (°C)	1200
	Q (MW)	2,36
Pregrijač pare 2	t (°C)	1166
	Q (MW)	12,26
Pregrijač pare 1b	t (°C)	970
	Q (MW)	7,61
Pregrijač pare 1a	t (°C)	841
	Q (MW)	11,28
Ekonomajzer 2	t (°C)	665
	Q (MW)	5,81
Evaporator 5	t (°C)	583
	Q (MW)	0,59
Ekonomajzer 1b	t (°C)	573
	Q (MW)	10,88
Ekonomajzer 1a	t (°C)	410
	Q (MW)	12,72
Izlaz	t (°C)	270

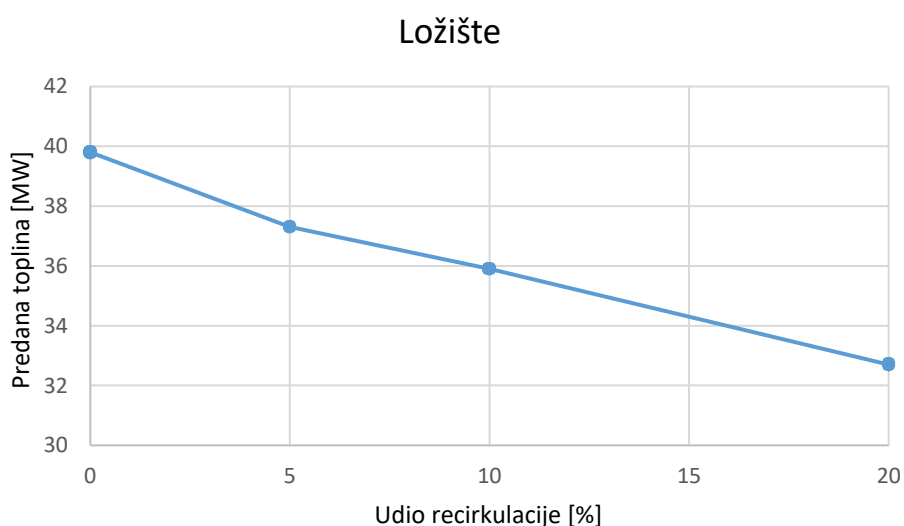
Isparavanje EKO2 12,10%

Recirkulacija		20%
Ložište	D (t/h)	125
	t (°C)	1170
	Q (MW)	32,7
Evaporator 1	t (°C)	1170
	Q (MW)	2,34
Pregrijač pare 2	t (°C)	1141
	Q (MW)	12,11
Pregrijač pare 1b	t (°C)	959
	Q (MW)	7,88
Pregrijač pare 1a	t (°C)	839
	Q (MW)	11,9
Ekonomajzer 2	t (°C)	675
	Q (MW)	6,4
Evaporator 5	t (°C)	604
	Q (MW)	0,64
Ekonomajzer 1b	t (°C)	595
	Q (MW)	11,5
Ekonomajzer 1a	t (°C)	440
	Q (MW)	14,11
Izlaz	t (°C)	313

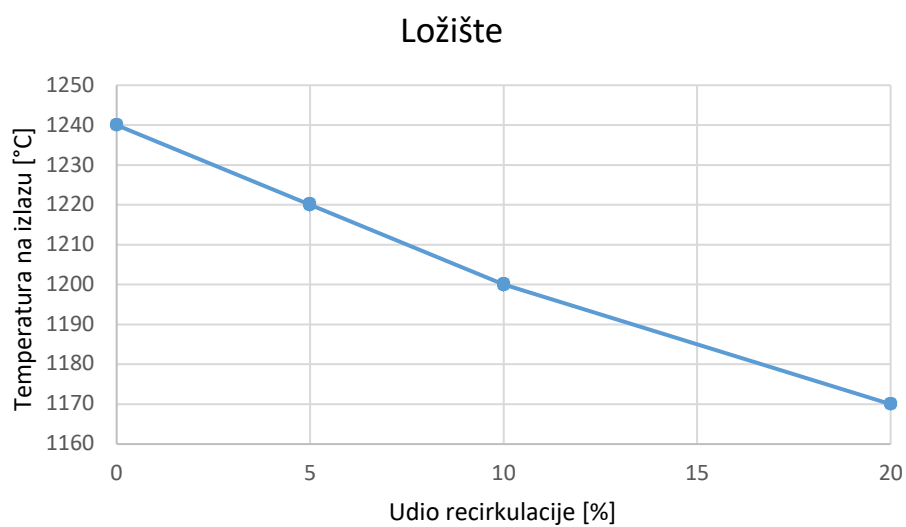
Isparavanje EKO2 18,20%

Tablica 6. Rezultati uvođenja reciklucije

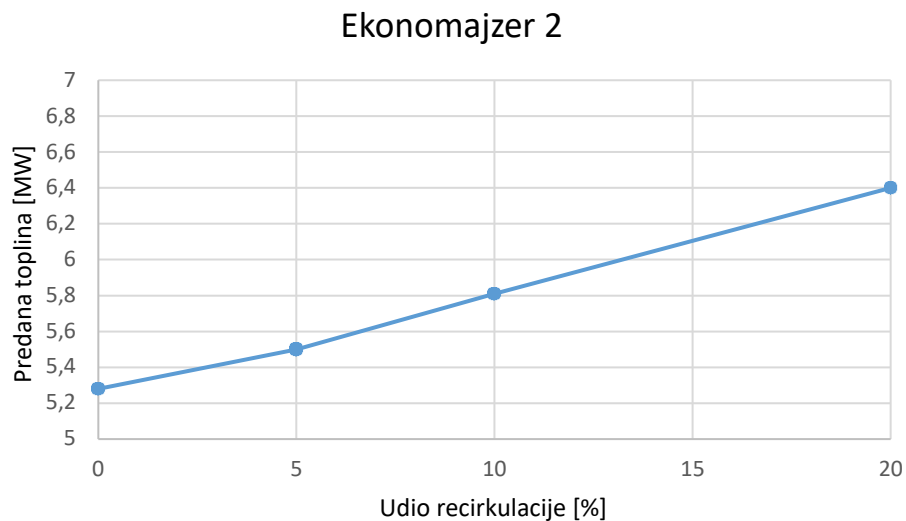
Slika 8. prikazuje rezultate uvođenja recirkulacije. Proračun je prvotno napravljen bez uvođenja recirkulacije, a zatim za slučajeve s 5%, 10% i 20% recirkulacije dimnih plinova u ulaznom toku zraka za izgaranje. Iz rezultata je jasno vidljivo da povećanje recirkulacije dimnih plinova djeluje na sniženje temperature ložišta te na povećani protok dimnih plinova u generatoru pare što dovodi do podizanja izlazne temperature dimnih plinova nakon ekonomajzera 2. Smanjuje se udio topline predan u ložištu, a povećava udio predan u konvektivnom dijelu generatora pare. Opisani rezultati vidljivi su i na grafovima ispod teksta. Povećanje udjela topline predane u konvektivnom dijelu uzrokuje povećanje proizvodnje pare u konvektivnom dijelu generatora pare te se stanje vode na izlazu iz ekonomajzera 2 približava stanju zasićenja, a u nekim slučajevima i ulazi u zasićeno područje. Stoga je mogućnost povećanja recirkulacije dimnih plinova ograničena prihvatljivim ulaskom u zasićeno područje na izlasku vode iz ekonomajzera 2. Iz dobivenih rezultata se vidi da je pri 10% recirkulacije dimnih plinova prisutno isparavanje vode u ekonomajzeru 2 od 12,10% što se već ne smatra poželjnim jer to može dovesti do oštećenja cijevi iznutra zbog kavitacije, vodenog udara, vibracija, itd. Isparavanje će, također, uzrokovati poremećaj i stagnaciju protoka te stvaranje naslaga koje će dovesti do neželjenog diferencijalnog širenja od cijevi do cijevi. S obzirom na taj podatak, veće udjele recirkulacije dimnih plinova za proračunati generator pare nije potrebno posebno razmatrati.



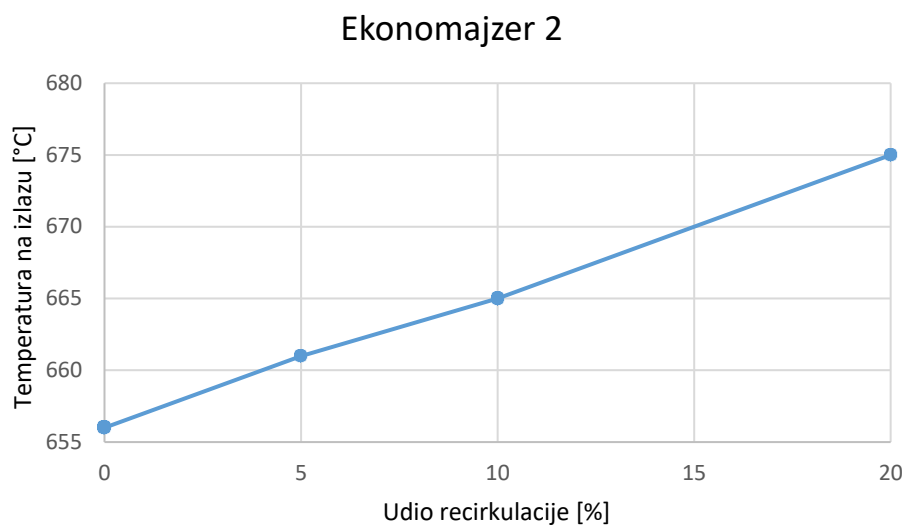
Slika 9. Promjena topline predane u ložištu ovisno o udjelu recirkulacije



Slika 10. Promjena temperature na izlazu iz ložišta ovisno o udjelu recirkulacije



Slika 11. Promjena topline predane u ekonomajzeru 2 ovisno o udjelu recirkulacije



Slika 12. Promjena temperature na izlazu iz ekonomajzera 2 ovisno o udjelu recirkulacije

6.2. Izračun vrijednosti emisija dušikovih oksida (NO_x) [7]

Količina NO u dimnim plinovima koji nastaje iz zraka:

$$C_{NO,zr} = 2500 \cdot \sqrt{\frac{(\lambda-1) \cdot Z_{min}}{n_{dp}}} \cdot e^{\left(\frac{-10800}{T_{stv}}\right)} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad (6.2)$$

Količina NO u dimnim plinovima koji nastaje iz dušika sadržanog u gorivu:

$$C_{NO,g} = 4 \cdot \frac{N_{red}}{V_{pl,red}} \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad (6.3)$$

$$N_{red} = \frac{m_{N(\%)}}{H_d} \left[\frac{\%}{\text{MJ}} \right] \quad (6.4)$$

$$V_{pl,red} = \frac{V_{pl}}{H_d} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{MJ}} \right] \quad (6.5)$$

Ukupna količina NO:

$$C_{NO} = C_{NO,zr} + C_{NO,g} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (6.6)$$

Ukupna količina dimnih plinova:

$$V_{pl,uk} = B \cdot V_{pl} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (6.7)$$

Ukupna količina emitiranog NO:

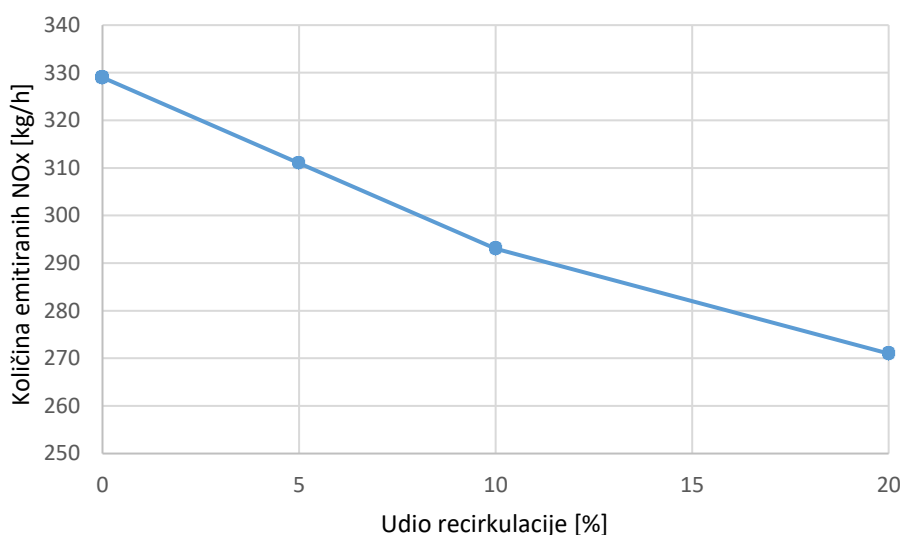
$$M_{NO} = C_{NO} \cdot V_{pl,uk} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (6.8)$$

Ukupna količina emitiranog NO₂:

$$M_{NO_2} = 1,53 \cdot M_{NO} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (6.9)$$

Ukupna količina emitiranih dušikovih oksida (NO_x):

$$M_{NO_x} = M_{NO} + M_{NO_2} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (6.10)$$



Slika 13. Prikaz količine dušikovih oksida ovisno o udjelu recirkulacije

Slika 9. prikazuje količinu dušikovih oksida (NO_x) ovisno o udjelu recirkulacije dimnih plinova. Iz slike je vidljivo da se količina emitiranih dušikovih oksida smanjuje s porastom udjela recirkulacije što je još jedna prednost kod uvođenja recirkulacije s obzirom da se radi o štetnim plinovima.

7. ZAKLJUČAK

Zaključno na analizirane slučajeve uvođenja recirkulacije mogu se izdvojiti prednosti i nedostaci takve strategije za proračunati tip generatora pare. Prednosti su: niža temperatura izgaranja, niža temperatura ložišta, smanjen udio topline predan u ložištu, a povećan udio predan u konvektivnom dijelu generatora pare te smanjena koncentracija dušikovih oksida (NO_x). Kao glavni i najveći nedostatak treba izdvojiti ograničenost povećanja recirkulacije dimnih plinova prihvatljivim ulaskom u zasićeno područje na izlasku vode iz ekonomajzera 2. Iz dobivenih rezultata se vidi da je pri 10% recirkulacije dimnih plinova prisutno isparavanje vode u ekonomajzeru 2 od 12,10% što se već ne smatra poželjnim. Prekoračenje graničnih prihvatljivih vrijednosti bi moglo dovesti do oštećenja cijevi zbog raznih uzročnika. Najbitniji za izdvojiti su: kavitacija, vodeni udar i vibracije.

LITERATURA

- [1] https://hr.wikipedia.org/wiki/Generator_pare
- [2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Prirodni_plin
- [3] Kreuh, L.: Generatori pare, Školska knjiga Zagreb, 1978.
- [4] Irsag, V.: Regulacija temperature u generatoru pare recirkulacijom dimnih plinova, Završni rad, Zagreb, 2019.
- [5] Đurić, V.: Parni kotlovi, Građevinska knjiga Beograd, 1969.
- [6] Halasz, B., Galović, A., Boras, I.: Toplinske tablice, FSB, Zagreb, 2017.
- [7] Raštegorac, L.: Projekt smanjenja emisija štetnih plinova iz generatora pare, Diplomski rad, Rijeka, 2023.

PRILOZI

- I. Tehnička dokumentacija
 - a) Dispozicija generatora pare

