

# Proračun nadkritičnog generatora pare

---

**Džepina, Goran**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2011**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:454084>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-05**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Džepina Goran

Zagreb, 2011

Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:  
prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Džepina Goran

Zagreb, 2011

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danielu Rolphu Schneideru na pomoći pri izradi rada.

Goran Džepina

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	4
POPIS SLIKA .....	8
POPIS TABLICA.....	8
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	8
POPIS OZNAKA.....	9
SAŽETAK .....	12
1. UVOD .....	13
1.1) NADKRITIČNI GENERATORI PARE .....	13
1.1.1 Osnove .....	13
1.1.2 Karakteristike nadkritičnog procesa .....	13
1.1.3 Parametri procesa .....	14
1.1.4 Razvoj nadkritičnih kotlova .....	14
1.1.5 Prednosti nadkritičnih postrojenja .....	15
1.1.6 Tipovi nadkritičnih kotlova.....	15
2. TERMODINAMIČKI PRORAČUN.....	16
2.1) GORIVO I IZGARANJE .....	17
2.1.1 Količina ugljika koji stvarno izgara .....	17
2.1.2 Teorijska količina kisika i zraka potrebnog za izgaranje .....	17
2.1.3 Stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje .....	17
2.1.4 Teorijska količina suhих dimnih plinova.....	17
2.1.5 Stvarna količina suhих dimnih plinova .....	17
2.1.6 Količina vlažnih dimnih plinova .....	18
2.1.7 Ukupni volumen dimnih plinova .....	18
2.1.8 Udjeli dimnih plinova .....	18
2.1.9 Prirast pretička zraka .....	19
2.1.10 Entalpija plinova izgaranja .....	19
2.2) TOPLINSKA BILANCA GENERATORA PARE .....	22
2.2.1 Gubici na neizgorenom.....	22
2.2.2 Gubici zračenja na okolinu.....	22
2.2.3 Stupnjevi djelovanja ložišta i zračenja.....	22
2.2.4 Gubitak osjetne topline u dimnim plinovima.....	22
2.2.5 Stupanj djelovanja generatora pare .....	22
2.2.6 Veličine stanja.....	23
2.2.7 Količina vode za hlađenje .....	25
2.2.8 Količina goriva .....	25

2.2.9	Izmjenjena toplina u zagrijaču vode .....	25
2.2.10	Izmjenjena toplina u ložištu .....	25
2.2.11	Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 1 .....	26
2.2.12	Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 2 .....	26
2.2.13	Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 1 .....	26
2.2.14	Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 2 .....	26
2.2.15	Izmjenjena toplina u zagrijaču zraka .....	26
2.2.16	Ukupna izmjenjena toplina .....	27
2.2.17	Teorijska entalpija i temperatura plinova izgaranja .....	27
2.2.18	Izlazna temperatura dimnih plinova .....	27
2.3)	PRORAČUN LOŽIŠTA .....	28
2.3.1	Skica ložišta .....	28
2.3.2	Površina ekrana .....	28
2.3.3	Stupanj ekranizacije .....	29
2.3.4	Efektivna površina ekrana .....	29
2.3.5	Proračun efektivne površine po normativnoj metodi .....	29
2.3.5.1	Distribucija temperature u ložištu .....	29
2.3.5.2	Efektivni stupanj crnoće plamena .....	29
2.3.5.3	Stupanj crnoće ložišta .....	30
2.3.5.4	Efektivna površina ekrana .....	31
2.4)	PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2 .....	32
2.4.1	Ogrjevna površina .....	32
2.4.2	Minimalni presjek .....	32
2.4.3	Srednja temperatura dimnih plinova .....	32
2.4.4	Brzina dimnih plinova .....	32
2.4.5	Koeficijent prijelaza topline konvekcijom .....	33
2.4.6	Koeficijent prijelaza topline zračenjem .....	34
2.4.7	Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova .....	34
2.4.8	Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija .....	35
2.4.9	Koeficijent prolaza topline .....	35
2.4.10	Srednja logaritamska temperaturna razlika .....	36
2.4.11	Potrebna ogrjevna površina .....	36
2.5)	PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2 .....	37
2.5.1	Ogrjevna površina .....	37
2.5.2	Minimalni presjek .....	37
2.5.3	Srednja temperatura dimnih plinova .....	37
2.5.4	Brzina dimnih plinova .....	37
2.5.5	Koeficijent prijelaza topline konvekcijom .....	38
2.5.6	Koeficijent prijelaza topline zračenjem .....	39
2.5.7	Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova .....	39
2.5.8	Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija .....	40
2.5.9	Koeficijent prolaza topline .....	40
2.5.10	Srednja logaritamska temperaturna razlika .....	41
2.5.11	Potrebna ogrjevna površina .....	41

2.6) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1 .....	42
2.6.1 Ogrjevna površina.....	42
2.6.2 Minimalni presjek .....	42
2.6.3 Srednja temperatura dimnih plinova .....	42
2.6.4 Brzina dimnih plinova.....	42
2.6.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom.....	43
2.6.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem.....	44
2.6.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova .....	44
2.6.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija .....	45
2.6.9 Koeficijent prolaza topline .....	45
2.6.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	46
2.6.11 Potrebna ogrjevna površina .....	46
2.7) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1 .....	47
2.7.1 Ogrjevna površina.....	47
2.7.2 Minimalni presjek .....	47
2.7.3 Srednja temperatura dimnih plinova .....	47
2.7.4 Brzina dimnih plinova.....	47
2.7.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom.....	48
2.7.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem.....	49
2.7.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova .....	49
2.7.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija .....	50
2.7.9 Koeficijent prolaza topline .....	50
2.7.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	51
2.7.11 Potrebna ogrjevna površina .....	51
2.8) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE .....	52
2.8.1 Ogrjevna površina.....	52
2.8.2 Minimalni presjek .....	52
2.8.3 Srednja temperatura dimnih plinova .....	52
2.8.4 Brzina dimnih plinova.....	52
2.8.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom.....	53
2.8.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem.....	54
2.8.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova .....	54
2.8.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija .....	55
2.8.9 Koeficijent prolaza topline .....	55
2.8.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	55
2.8.11 Potrebna ogrjevna površina .....	56
2.9) PRORAČUN ZAGRIJAČA ZRAKA .....	57
2.9.1 Ogrjevna površina.....	57
2.9.2 Temperature radnih medija i toplina koju je potrebno izmjeniti .....	57
2.9.3 Srednja logaritamska temperaturna razlika.....	57
2.9.4 Srednje temperature zraka i dimnih plinova.....	58
2.9.5 Temperature lima.....	58
2.9.6 Srednje brzine dimnih plinova i zraka .....	58
2.9.7 Koeficijent prolaza topline .....	58
2.9.8 Potrebna ogrjevna površina .....	59

3. HIDRODINAMIČKI PRORAČUN .....	60
3.1) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE .....	60
3.1.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi .....	60
3.1.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi) .....	60
3.1.3 Ukupni pad tlaka .....	60
3.2) PRORAČUN EKRANA LOŽIŠTA .....	61
3.2.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi .....	61
3.2.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi) .....	61
3.2.3 Ukupni pad tlaka .....	61
3.3) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1 .....	62
3.3.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi .....	62
3.3.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi) .....	62
3.3.3 Ukupni pad tlaka .....	62
3.4) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2 .....	63
3.4.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi .....	63
3.4.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi) .....	63
3.4.3 Ukupni pad tlaka .....	63
3.5) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1 .....	64
3.5.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi .....	64
3.5.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi) .....	64
3.5.3 Ukupni pad tlaka .....	64
3.6) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2 .....	65
3.6.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi .....	65
3.6.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi) .....	65
3.6.3 Ukupni pad tlaka .....	65
4. PRORAČUN ČVRSTOĆE .....	66
5. OBRADA DIMNIH PLINOVA .....	67
5.1) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE DUŠIKOVIH OKSIDA (De-NO <sub>x</sub> ) .....	67
5.2) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE PRAŠINE .....	67
5.3) SUSTAV ODSUMPORAVANJA DIMNIH PLINOVA .....	68
6. ZAKLJUČAK .....	69
PRILOZI .....	70
LITERATURA .....	70



## POPIS SLIKA

- Slika 1 Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o  $\lambda$
- Slika 2 Shema generatora pare
- Slika 3 T-s dijagram (skica)
- Slika 4 T-s dijagram (stvarne vrijednosti)
- Slika 5 Skica ložišta
- Slika 6 Pregrijač pare 2
- Slika 7 Međupregrijač pare 2
- Slika 8 Pregrijač pare 1
- Slika 9 Međupregrijač pare 1
- Slika 10 Zagrijač vode
- Slika 11 Zagrijač zraka
- Slika 12 Dijagram temperature dimnih plinova i vode/zraka

## POPIS TABLICA

- Tabela 1 Entalpije dimnih plinova (komponente)
- Tabela 2 Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o  $\lambda$
- Tabela 3 Veličine stanja
- Tabela 4 Svojstva dimnih plinova

## POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 1 Generator pare

## POPIS OZNAKA

oznaka	jedinica	opis
$D$	$kg / s$	količina proizvedene pare
$D_1$	$kg / s$	količina međupregrijane pare
$t$	$^{\circ}C$	temperatura
$T$	$K$	temperatura
$p$	$bar$	tlak
$p$	$Pa$	tlak
$V_{O_2 \min}$	$\frac{m^3}{kg_B}$	teorijska količina kisika potrebnog za izgaranje
$V_{zr \min}$	$\frac{m^3}{kg_B}$	teorijska količina zraka potrebnog za izgaranje
$V_{zr}$	$\frac{m^3}{kg_B}$	stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje
$V_{pl,s}^t$	$\frac{m^3}{kg_B}$	teorijska količina suhih dimnih plinova
$V_{H_2O}$	$\frac{m^3}{kg_B}$	količina vlažnih dimnih plinova
$V_{pl}$	$\frac{m^3}{kg_B}$	ukupni volumen dimnih plinova
$r_{CO_2}$		udio $CO_2$ u dimnim plinovima
$r_{SO_2}$		udio $SO_2$ u dimnim plinovima
$h$	$\frac{kJ}{kg_B}$	entalpija
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	gustoća
$h_L$	%	gubici na neizgorenom
$h_Z$	%	gubici zračenja na okolinu
$\eta_L$		stupanj djelovanja ložišta
$\eta_Z$		stupanj djelovanja zračenja
$h_A$	%	gubitak osjetne topline u dimnim plinovima
$\eta_K$		stupanj djelovanja generatora pare
$B$	$\frac{kg_B}{s}$	količina goriva

$Q$	$kW$	izmjenjena toplina
$q$	$\frac{kJ}{kg_B}$	izmjenjena toplina
$a$	m	duljina ekrana
$b$	m	širina ekrana
$c$	m	visina ekrana
$F$	$m^2$	površina
$\psi_L$		stupanj ekranizacije
$F_{ef}$	$m^2$	efektivna površina ekrana
$x$		bezdimenzijski položaj maksimalne temperature
$\varepsilon_F$		efektivni stupanj crnoće plamena
$\varepsilon_L$		stupanj crnoće ložišta
$d$	m	vanjski promjer cijevi
$s$	m	debljina stijenke cijevi
$d_u$	m	unutarnji promjer cijevi
$L$	m	duljina konvektivnog izmjenjivača topline
$n_1$		broj cijevi u jednom redu
$n_2$		broj redova cijevi
$t_p$	m	poprečni korak cijevi
$t_u$	m	uzdužni korak cijevi
$f$	$m^2$	minimalni presjek
$w$	$\frac{m}{s}$	brzina
$\sigma_1$		odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi
$\sigma_2$		odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi
$\sigma_{sr}$		srednji relativni dijagonalni korak cijevi
$Pr$		Prandtlova značajka
$\lambda$	$\frac{W}{mK}$	koeficijent toplinske vodljivosti
$\nu$	$\frac{m^2}{s}$	kinematička viskoznost
$\alpha$	$\frac{W}{m^2K}$	koeficijent prijelaza topline
$C_C$	$\frac{W}{m^2K^4}$	koeficijent zračenja crnog tijela
$k$	$\frac{W}{m^2K}$	koeficijent prolaza topline
$\Delta t_m$	$^{\circ}C$	srednja logaritamska temperaturna razlika
$\delta$	mm	debljina lima zagrijača zraka
$m_s$		broj segmenata zagrijača zraka
$z$		broj limova u jednom segmentu
$b$	m	širina limova zagrijača zraka

$l$	m	dužina limova zagrijača zraka
$F_o$	$m^2$	poprečni presjek otvora zagrijača zraka
$F_l$	$m^2$	površina limova na poprečnom presjeku
$\lambda$		koeficijent trenja
$\zeta$		koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi

## SAŽETAK

Tema diplomskog rada je proračun nadkritičnog generatora pare.

Ovaj rad sastoji se od termodinamičkog i hidrodinamičkog proračuna, te tehničkog crteža kotla.

Termodinamički proračun obuhvaća dimenzioniranje ložišta i konvektivnih površina.

Hidrodinamički proračun predstavlja izračunavanje otpora strujanja, odnosno padova tlaka u svim izmjenjivačima topline.

Tehnički crtež prikazuje tip kotla, te raspored i smještaj izmjenjivačkih površina i ostalih dijelova generatora pare.

## 1. UVOD

### 1.1) NADKRITIČNI GENERATORI PARE

#### 1.1.1 Osnove

Kod nadkritičnih kotlova voda se zagrijava na konstantnom tlaku većem od kritičnog tlaka (22.1 MPa), pa nema podjele na plin i tekućinu (gustoća obje faze je jednaka).

To je osnovna razlika u odnosu na podkritične kotlove gdje kod isparavanja vode postoje dvije faze (tekuća i plinovita) koje imaju različiti specifični volumen, i ostaju na istoj temperaturi (temperaturi zasićenja) tokom isparavanja.

Kod podkritičnih kotlova, nakon što je sva tekućina isparila, temperatura pregrijane pare se zagrijavanjem povećava pri konstantnom tlaku.

Zbog toga podkritični kotlovi obično imaju bubanj za odvajanje tekućine i pare gdje se tekućina odvodi na recirkulaciju kroz isparivač, a para odlazi u pregrijački dio.

U nadkritičnom kotlu svojstva vode kontinuirano se mijenjaju iz tekućeg u plinovito stanje (temperatura zagrijavanjem kontinuirano raste).

Budući da voda niti u jednom dijelu kotla nije podjeljena na dvije faze, konstrukcija kotla je bez bubnja.

Tipični nadkritični generatori pare su kotlovi sa jednim prolazom, gdje voda pumpana napojnom pumpom prolazi kroz izmjenjivačke elemente generatora pare i predaje se turbini na konačnoj temperaturi bez recirkulacije.

Stvarna lokacija prijelaza iz tekućine u paru u kotlu se slobodno pomiče za različite uvijete, pa je moguće postići dobar stupanj iskoristivosti za različita opterećenja.

#### 1.1.2 Karakteristike nadkritičnog procesa

U procesu nadkritičnog generatora pare kondenzatna i napojna pumpa podižu tlak iznad kritičnog tlaka.

U T,s-dijagramu za nadkritično postrojenje linija procesa ne prelazi liniju zasićenja, a para na konačnoj temperaturi ekspandira u visokotlačnoj turbini.

Za paru koja izlazi iz visokotlačne turbine vrši se međupregrijanje prije ekspanzije u niskotlačnoj turbini čime se povećava učinkovitost postrojenja.

### 1.1.3 Parametri procesa

tipični parametri za podkritično postrojenje:

temperatura pregrijane pare	540 °C
tlak pregrijane pare	16.5 do 18 MPa
temperatura međupregrijane pare	540 do 560 °C
neto stupanj iskoristivosti postrojenja	36%

tipični parametri za nadkritično postrojenje:

temperatura pregrijane pare	540 °C
tlak pregrijane pare	25 MPa
temperatura međupregrijane pare	565 °C
neto stupanj iskoristivosti postrojenja	37.5%

### 1.1.4 Razvoj nadkritičnih kotlova

Porast u gradnji nadkritičnih kotlova baziran je na iskustvu u radu s tim kotlovima.

Prvi takvi kotlovi bili su instalirani 1960-tih u SAD-u, a od tada su napravljena mnoga poboljšanja.

U Sjedinjenim Američkim Državama postrojenja ovog tipa imaju ukupno 86 GW električne snage.

Većina od njih bila su izgrađena tokom 60-tih i 70-tih i rade s parametrima pare koji su tek malo iznad kritičnih.

U Japanu se dogodio najveći porast izgradnje nadkritičnih elektrana.

Europa također povećava korištenje postrojenja s nadkritičnim pritiskom pare kod ugljenom loženih kotlova.

Nova postrojenja na crni ugljen u fazi planiranja imaju temperature pare od oko 600 °C na tlaku od 30 MPa, što odgovara zadanim parametrima pare u ovom proračunu.

### 1.1.5 Prednosti nadkritičnih postrojenja

prednosti nadkritičnih kotlova u odnosu na podkritične kotlove:

- veća učinkovitost postrojenja što rezultira manjom emisijom CO<sub>2</sub> po MWh električne energije
- veća učinkovitost postrojenja u širem području djelomičnih opterećenja nego kod podkritičnih kotlova
- brže vrijeme pokretanja nego kod podkritičnih kotlova s bubnjem

ostale prednosti korištenja nadkritičnih kotlova:

- iskustvo stečeno radom s nadkritičnim kotlovima pokazuje da su pouzdani u radu
- korištenjem čelika proizvedenih modernim tehnologijama, cijene postrojenja s nadkritičnim kotlovima su konkurentne podkritičnim postrojenjima

### 1.1.6 Tipovi nadkritičnih kotlova

- 1.) Generator pare s jednim prolazom
- 2.) Generator pare s dva prolaza
- 3.) Horizontalni generator pare

Ekonomska procjena sva tri tipa pokazala je da je generator pare s jednim prolazom (toranjski tip) najbolje rješenje.

Proračun u nastavku izvršen je za toranjski tip generatora pare.



## 2. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

Zadano:

proizvodnja pare:  $D = 364 \text{ kg/s}$

temperatura napojne vode:  $t_1 = 298 \text{ }^\circ\text{C}$

temperatura pregrijane pare:  $t_6 = 603 \text{ }^\circ\text{C}$

tlak pregrijane pare:  $p_6 = 308 \text{ bar}$

temperatura međupregrijane pare na ulazu u gen. pare:  $t_7 = 320.7 \text{ }^\circ\text{C}$

tlak međupregrijane pare na ulazu u gen. pare:  $p_7 = 50 \text{ bar}$

temperatura međupregrijane pare na izlazu iz gen. pare:  $t_{10} = 611.5 \text{ }^\circ\text{C}$

tlak međupregrijane pare na izlazu iz gen. pare:  $p_{10} = 48 \text{ bar}$

toplinska vrijednost goriva:  $H_d = 26300 \text{ kJ/kg}$

Sastav goriva (ugljen):

c	0.6548
h	0.0427
s	0.01017
o	0.08
n	0.01423
w	0.07626
a	0.12184

## 2.1) GORIVO I IZGARANJE

### 2.1.1 Količina ugljika koji stvarno izgara

$$c_0 = c \cdot \left(1 - \frac{h_L}{100}\right) = 0.6548 \cdot \left(1 - \frac{1}{100}\right) = 0.6483$$

gubici na neizgorenom:  $h_L = 1 \%$

### 2.1.2 Teorijska količina kisika i zraka potrebnog za izgaranje

$$\begin{aligned} V_{O_2 \min} &= 1.87 \cdot c_0 + 5.5 \cdot h + 0.7 \cdot s - 0.7 \cdot o = \\ &= 1.87 \cdot 0.6483 + 5.5 \cdot 0.0427 + 0.7 \cdot 0.01017 - 0.7 \cdot 0.08 = 1.402 \frac{m^3}{kg_B} \end{aligned}$$

$$V_{zr \min} = \frac{V_{O_2 \min}}{0.21} = \frac{1.402}{0.21} = 6.678 \frac{m^3}{kg_B}$$

### 2.1.3 Stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje

$$V_{zr} = \lambda \cdot V_{zr \min} = 1.25 \cdot 6.678 = 8.348 \frac{m^3}{kg_B}$$

### 2.1.4 Teorijska količina suhih dimnih plinova

$$\begin{aligned} V_{pl,s}^t &= 1.87 \cdot c_0 + 0.7 \cdot s + 0.8 \cdot n + 0.79 \cdot V_{zr \min} = \\ &= 1.87 \cdot 0.6483 + 0.7 \cdot 0.01017 + 0.8 \cdot 0.01423 + 0.79 \cdot 6.678 = 6.507 \frac{m^3}{kg_B} \end{aligned}$$

### 2.1.5 Stvarna količina suhih dimnih plinova

$$V_{pl,s} = V_{pl,s}^t + (\lambda - 1) \cdot V_{zr \min} = 6.507 + (1.25 - 1) \cdot 6.678 = 8.176 \frac{m^3}{kg_B}$$

## 2.1.6 Količina vlažnih dimnih plinova

$$V_{H_2O} = 11.2 \cdot h + 1.24 \cdot w = 11.2 \cdot 0.0427 + 1.24 \cdot 0.07626 = 0.573 \frac{m^3}{kg_B}$$

## 2.1.7 Ukupni volumen dimnih plinova

$$V_{pl} = V_{pl,s} + V_{H_2O} = 8.176 + 0.572 = 8.749 \frac{m^3}{kg_B}$$

## 2.1.8 Udjeli dimnih plinova

$$V_{CO_2} = 1.87 \cdot c_0 = 1.87 \cdot 0.6483 = 1.212 \frac{m^3}{kg_B}$$
$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{pl}} = \frac{1.212}{8.749} = 0.139$$

$$V_{SO_2} = 0.7 \cdot s = 0.7 \cdot 0.01017 = 0.0071 \frac{m^3}{kg_B}$$
$$r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{pl}} = \frac{0.0071}{8.749} = 0.0008$$

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1.212 + 0.0071 = 1.219 \frac{m^3}{kg_B}$$

$$V_{N_2 \min} = 0.8 \cdot n + 0.79 \cdot V_{zr \min} = 0.8 \cdot 0.01423 + 0.79 \cdot 6.6784 = 5.287 \frac{m^3}{kg_B}$$

$r_{CO_2}$	0.138555
$r_{SO_2}$	0.000814
$r_{O_2}$	0.040075
$r_{N_2}$	0.755087
$r_{H_2O}$	0.06547
$\Sigma$	1

## 2.1.9 Prirast pretička zraka

po pregrijaču pare:  $\Delta\lambda_1 = 0.02$

po zagrijaču vode:  $\Delta\lambda_2 = 0.02$

po zagrijaču zraka:  $\Delta\lambda_3 = 0.02$

na izlazu iz pregrijača pare 2:  $\lambda_1 = \lambda + \Delta\lambda_1 = 1.25 + 0.02 = 1.27$

na izlazu iz međupregrijača pare 2:  $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda_1 = 1.27 + 0.02 = 1.29$

na izlazu iz pregrijača pare 1:  $\lambda_3 = \lambda_2 + \Delta\lambda_1 = 1.29 + 0.02 = 1.31$

na izlazu iz međupregrijača pare 1:  $\lambda_4 = \lambda_3 + \Delta\lambda_1 = 1.31 + 0.02 = 1.33$

na izlazu iz zagrijača vode:  $\lambda_5 = \lambda_4 + \Delta\lambda_2 = 1.33 + 0.02 = 1.35$

na izlazu iz zagrijača zraka:  $\lambda_6 = \lambda_5 + \Delta\lambda_3 = 1.35 + 0.02 = 1.37$

## 2.1.10 Entalpija plinova izgaranja

$$h_{pl\ n} \left[ \frac{kJ}{kg_B} \right] = V_{RO_2} \cdot h_{CO_2\ n} + V_{N_2\ min} \cdot h_{N_2\ n} + V_{H_2O} \cdot h_{H_2O\ n} + (\lambda - 1) \cdot V_{zr\ min} \cdot h_{zr\ n}$$

$$h_{pl\ n} \left[ \frac{kJ}{kg_G} \right] = \frac{h_{pl\ n} \left[ \frac{kJ}{kg_B} \right]}{V_{pl} \cdot \rho_{pl}}$$

$$\rho_{pl} = \frac{V_{RO_2} \cdot 44 + V_{N_2\ min} \cdot 28 + V_{H_2O} \cdot 18 + (\lambda - 1) \cdot V_{zr\ min} \cdot 29}{V_{pl} \cdot 22.41} =$$

$$= \frac{1.2193 \cdot 44 + 5.2873 \cdot 28 + 0.5728 \cdot 18 + (1.25 - 1) \cdot 6.6784 \cdot 29}{8.7491 \cdot 22.41} = 1.328 \frac{kg}{m^3}$$

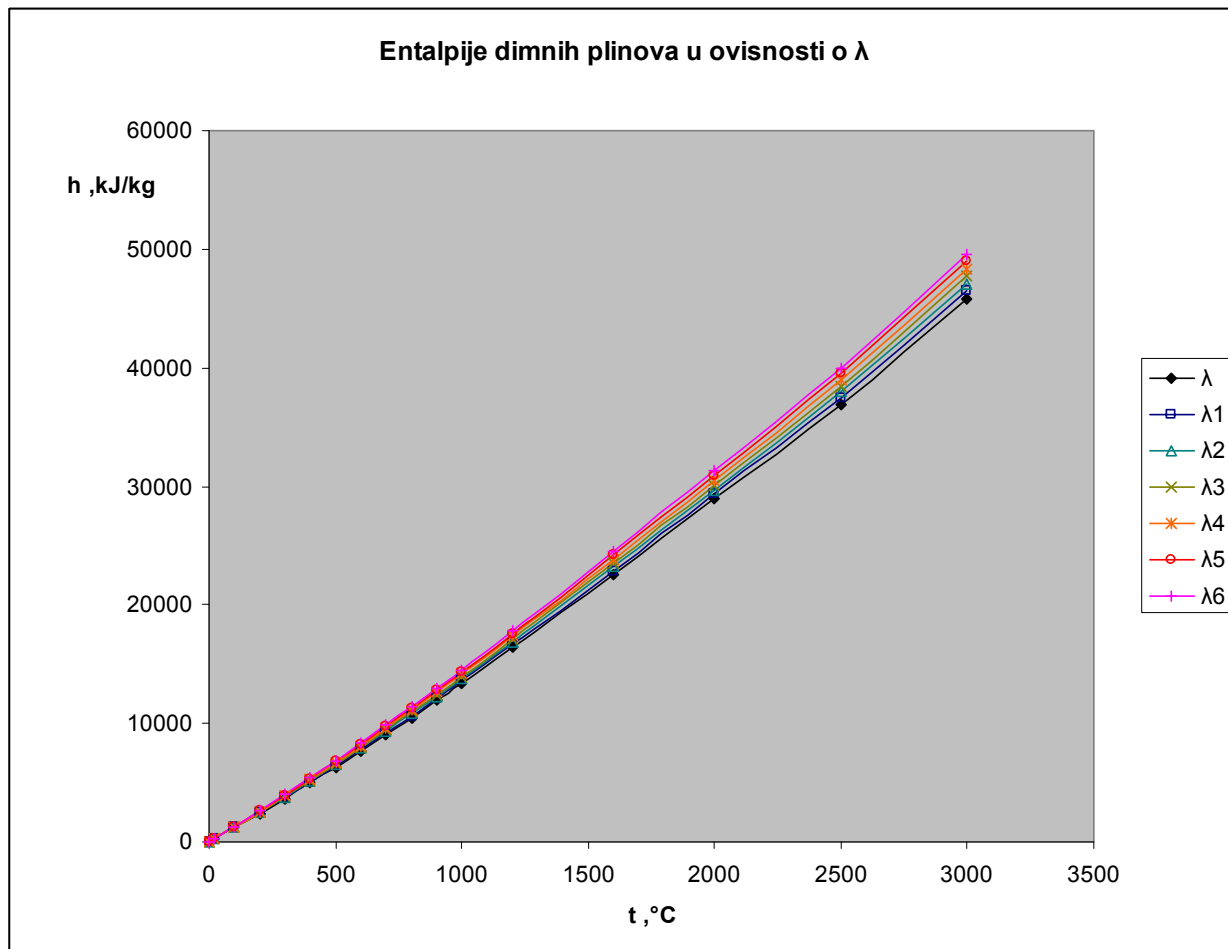
$\rho_{pl}$ , kg/m <sup>3</sup>	1.328248
$\rho_{pl1}$ , kg/m <sup>3</sup>	1.348004
$\rho_{pl2}$ , kg/m <sup>3</sup>	1.36776
$\rho_{pl3}$ , kg/m <sup>3</sup>	1.387515
$\rho_{pl4}$ , kg/m <sup>3</sup>	1.407271
$\rho_{pl5}$ , kg/m <sup>3</sup>	1.427027
$\rho_{pl6}$ , kg/m <sup>3</sup>	1.446783

Tabela 1 Entalpije dimnih plinova (komponente)

Tablica: Entalpije dimnih plinova (kJ/m <sup>3</sup> )				
T	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Zrak
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	1,224.64	807.22	968.83	813.91
700	1,462.03	951.24	1,148.86	959.61
800	1,704.86	1,097.36	1,334.33	1,107.41
900	1,952.30	1,245.99	1,526.09	1,257.71
1000	2,203.51	1,397.14	1,722.87	1,409.70
1200	2,716.40	1,704.03	2,132.34	1,719.10
1600	3,768.54	2,333.72	3,001.94	2,353.40
2000	4,844.13	2,977.65	3,925.54	3,001.94
2500	6,204.84	3,794.50	5,132.60	3,825.90
3000	7,932.95	4,655.41	6,339.59	4,725.06

Tabela 2 Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o  $\lambda$ 

	$h_{pl,\lambda}$	$h_{pl,\lambda 1}$	$h_{pl,\lambda 2}$	$h_{pl,\lambda 3}$	$h_{pl,\lambda 4}$	$h_{pl,\lambda 5}$	$h_{pl,\lambda 6}$
T	kJ/kg <sub>B</sub>	kJ/kg <sub>B</sub>	kJ/kg <sub>B</sub>	kJ/kg <sub>B</sub>	kJ/kg <sub>B</sub>	kJ/kg <sub>B</sub>	kJ/kg <sub>B</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0
20	237.3201	240.7875	244.2549	247.7224	251.1898	254.6573	258.1247
100	1198.226	1215.595	1232.965	1250.334	1267.703	1285.073	1302.442
200	2425.42	2460.338	2495.255	2530.173	2565.09	2600.008	2634.925
300	3685.644	3738.423	3791.203	3843.983	3896.762	3949.542	4002.322
400	4981.611	5052.633	5123.654	5194.675	5265.696	5336.717	5407.738
500	6311.15	6400.849	6490.549	6580.248	6669.947	6759.647	6849.346
600	7675.173	7783.886	7892.598	8001.311	8110.024	8218.737	8327.45
700	9072.501	9200.675	9328.849	9457.022	9585.196	9713.37	9841.544
800	10494.19	10642.1	10790.02	10937.93	11085.85	11233.76	11381.68
900	11942.54	12110.54	12278.53	12446.52	12614.51	12782.5	12950.49
1000	13414.52	13602.81	13791.1	13979.39	14167.69	14355.98	14544.27
1200	16413.67	16643.28	16872.9	17102.52	17332.14	17561.76	17791.37
1600	22583.12	22897.46	23211.8	23526.14	23840.48	24154.82	24469.16
2000	28911.17	29312.13	29713.1	30114.06	30515.03	30915.99	31316.96
2500	36956.41	37467.43	37978.45	38489.47	39000.49	39511.52	40022.54
3000	45808.12	46439.24	47070.36	47701.48	48332.6	48963.72	49594.84



Slika 1 Entalpije dimnih plinova u ovisnosti o  $\lambda$

## 2.2) TOPLINSKA BILANCA GENERATORA PARE

### 2.2.1 Gubici na neizgorenom

$$h_L = 1 \%$$

### 2.2.2 Gubici zračenja na okolinu

$$h_Z = 0.3 \%$$

### 2.2.3 Stupnjevi djelovanja ložišta i zračenja

$$\eta_L = 1 - \frac{h_L}{100} = 1 - \frac{1}{100} = 0.99$$

$$\eta_Z = 1 - \frac{h_Z}{100} = 1 - \frac{0.3}{100} = 0.997$$

### 2.2.4 Gubitak osjetne topline u dimnim plinovima

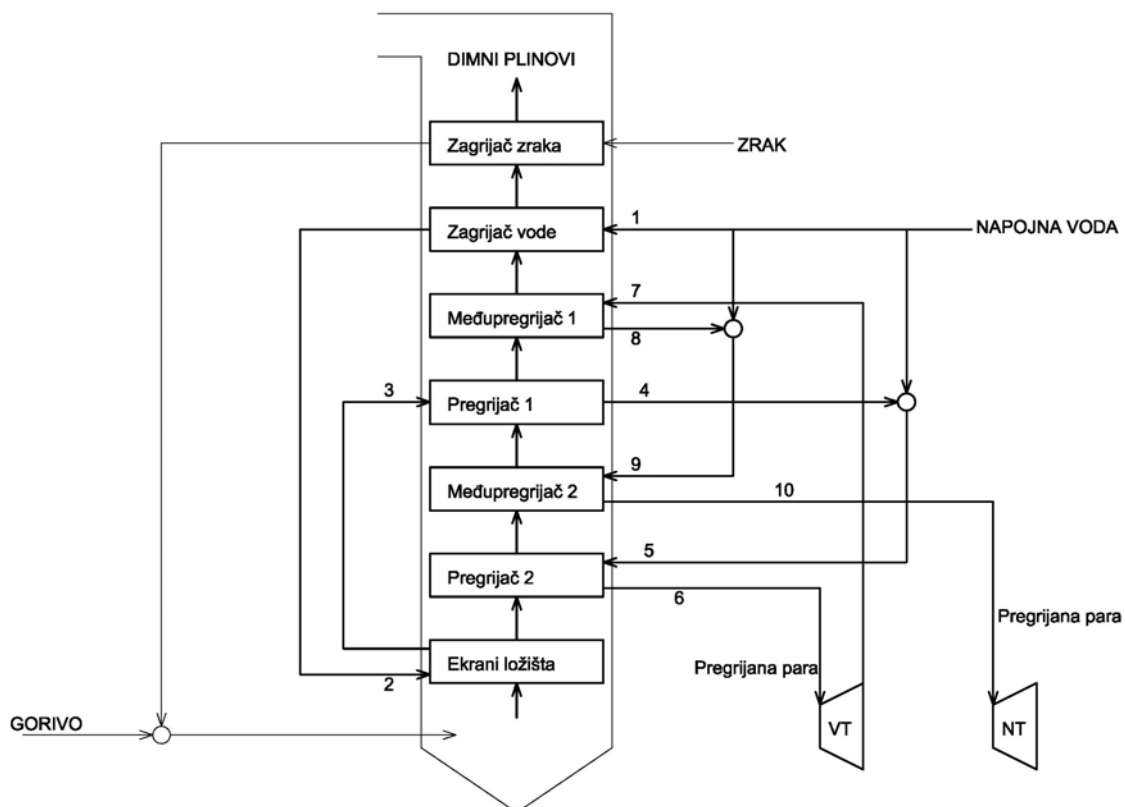
za pretpostavljenu izlaznu temperaturu  $t_{izl} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$   $\rightarrow h_{pl\ iz} = 1702.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$

$$h_A = \frac{h_{pl\ iz}}{H_d + V_{zr} \cdot h_{zr_2}} = \frac{1702.2}{26300 + 8.348 \cdot 314.91} = 0.05884 = 5.884 \%$$

### 2.2.5 Stupanj djelovanja generatora pare

$$\eta_K = 1 - \frac{h_L + h_Z + h_A}{100} = 1 - \frac{1 + 0.3 + 5.884}{100} = 0.928$$

## 2.2.6 Veličine stanja

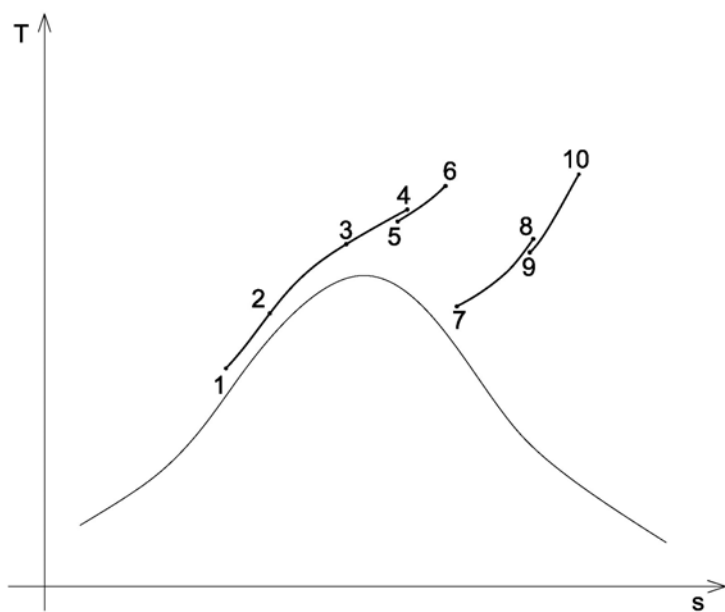


Slika 2 Shema generatora pare

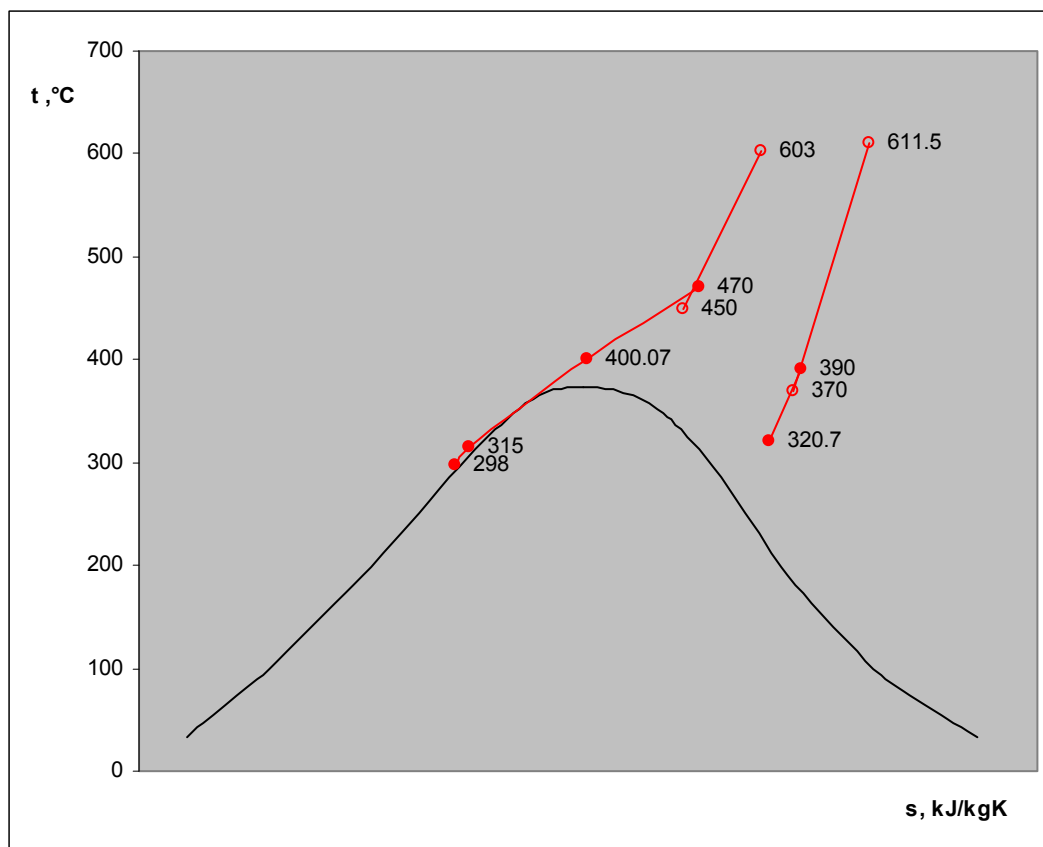
Tabela 3 Veličine stanja

stanje	t, °C	p, bar	h, kJ/kg
1	298	338	1319.96
2	315	334	1407.986
3	400.07	333	2163.146
4	470	317	2940.38
5	450	317	2825.406
6	603	308	3451.885
7	320.7	50	2988.925
8	390	49	3175.373
9	370	49	3125.527
10	611.5	48	3692.939





Slika 3 T-s dijagram (skica)



Slika 4 T-s dijagram (stvarne vrijednosti)

## 2.2.7 Količina vode za hlađenje

količina vode za hlađenje između pregrijača 1 i pregrijača 2:

$$w_a = \frac{D \cdot (h_4 - h_5)}{h_4 - h_1} = \frac{364 \cdot (2940.38 - 2825.406)}{2940.38 - 1319.96} = 25.82 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$D_a = D - w_a = 364 - 25.82 = 338.17 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

količina vode za hlađenje između međupregrijača 1 i međupregrijača 2:

$$w_{1a} = \frac{D_1 \cdot (h_8 - h_9)}{h_8 - h_1} = \frac{308 \cdot (3175.37 - 3125.52)}{3175.37 - 1319.96} = 8.27 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$D_{1a} = D_1 - w_{1a} = 308 - 8.27 = 299.72 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

količina međupregrijane pare:  $D_1 = 308 \text{ kg/s}$

## 2.2.8 Količina goriva

$$B = \frac{D \cdot (h_4 - h_1) + D_a \cdot (h_6 - h_5) + D_1 \cdot (h_8 - h_7) + D_{1a} \cdot (h_{10} - h_9) + Q_{zz}}{\eta_K \cdot (H_d + V_{zr} \cdot h_{zr2})} =$$

$$= \frac{364 \cdot (2940.3 - 1319.9) + 338.17 \cdot (3451.8 - 2825.4) + 308 \cdot (3175.3 - 2988.9) + 299.72 \cdot (3692.9 - 3125.5) + 99360}{0.92816 \cdot (26300 + 8.348 \cdot 314.91)} =$$

$$= 41.192 \frac{\text{kg}_B}{\text{s}}$$

## 2.2.9 Izmjenjena toplina u zagrijaču vode

$$Q_{zv} = D_a \cdot (h_2 - h_1) = 338.17 \cdot (1407.98 - 1319.96) = 29.77 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{zv} = \frac{Q_{zv}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{29.77 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 724.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

## 2.2.10 Izmjenjena toplina u ložištu

$$Q_L = D_a \cdot (h_3 - h_2) = 338.17 \cdot (2163.14 - 1407.98) = 255.37 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_L = \frac{Q_L}{\eta_Z \cdot B} = \frac{255.37 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 6218.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

## 2.2.11 Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 1

$$Q_{pr1} = D_a \cdot (h_4 - h_3) = 338.17 \cdot (2940.38 - 2163.14) = 262.83 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{pr1} = \frac{Q_{pr1}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{262.83 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 6400.07 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

## 2.2.12 Izmjenjena toplina u pregrijaču pare 2

$$Q_{pr2} = D \cdot (h_6 - h_5) = 364 \cdot (3451.88 - 2825.41) = 228.03 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{pr2} = \frac{Q_{pr2}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{228.03 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 5552.66 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

## 2.2.13 Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 1

$$Q_{mp1} = D_{1a} \cdot (h_8 - h_7) = 299.72 \cdot (3175.37 - 2988.92) = 55.88 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{mp1} = \frac{Q_{mp1}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{55.88 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 1360.74 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

## 2.2.14 Izmjenjena toplina u međupregrijaču pare 2

$$Q_{mp2} = D_1 \cdot (h_{10} - h_9) = 308 \cdot (3692.93 - 3125.52) = 174.76 \cdot 10^3 \text{ kW}$$

$$q_{mp2} = \frac{Q_{mp2}}{\eta_Z \cdot B} = \frac{174.76 \cdot 10^3}{0.997 \cdot 41.192} = 4255.42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

## 2.2.15 Izmjenjena toplina u zagrijaču zraka

$$q_{zz} = \frac{V_{zr} \cdot (h_{zr2} - h_{zr1})}{\eta_Z} = \frac{8.348 \cdot (314.91 - 25.96)}{0.997} = 2419.44 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

zrak	t, °C	h <sub>zr</sub> , kJ/m <sup>3</sup>
1	20	25.96
2	240	314.912

### 2.2.16 Ukupna izmjenjena toplina

$$q = q_L + q_{pr1} + q_{pr2} + q_{mp1} + q_{mp2} + q_{zv} + q_{zz} =$$
$$= 6218.3 + 6400.07 + 5552.66 + 1360.74 + 4255.42 + 724.84 + 2419.44 = 26931.48 \frac{kJ}{kg_B}$$

### 2.2.17 Teorijska entalpija i temperatura plinova izgaranja

$$\text{za } t_{zr2} = 240^\circ C \rightarrow h_{zr2} = 314.91 \frac{kJ}{m^3}$$

$$h_{pl t} = \eta_L \cdot H_d + V_{zr} \cdot h_{zr2} = 0.99 \cdot 26300 + 8.348 \cdot 314.91 = 28665.9 \frac{kJ}{kg_B}$$

$$\text{za } h_{pl t} = 28665.9 \rightarrow t_{pl t} = 1984.49^\circ C$$

$$T_{pl t} = t_{pl t} + 273.15 = 1984.49 + 273.15 = 2257.64 K$$

### 2.2.18 Izlazna temperatura dimnih plinova

$$h_{pl iz} = h_{pl t} - q = 28665.9 - 26931.48 = 1734.41 \frac{kJ}{kg_B}$$

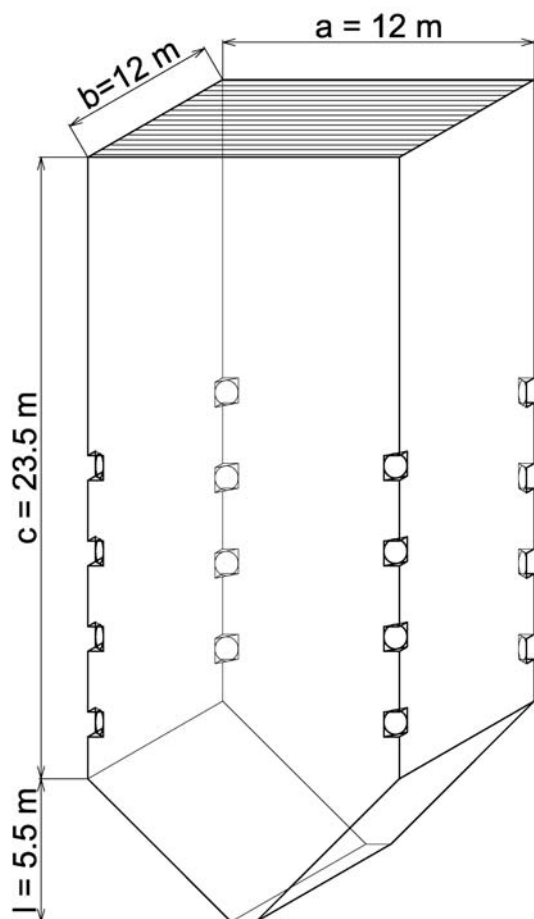
$$\text{za } h_{pl iz} = 1734.41 \frac{kJ}{kg_B} \rightarrow t_{pl iz} = 132.41^\circ C$$

provjera pogreške u pretpostavljenoj izlaznoj temperaturi dimnih plinova:

$$\frac{t_{pl iz} - t_{izl}}{t_{pl iz}} \cdot 100 = \frac{132.41 - 130}{132.41} \cdot 100 = 1.826 \% \quad \text{zadovoljava}$$

## 2.3) PRORAČUN LOŽIŠTA

### 2.3.1 Skica ložišta



Slika 5 Skica ložišta

### 2.3.2 Površina ekrana

$$a = 12\text{ m} \quad b = 12\text{ m} \quad c = 23.5\text{ m} \quad l = 5.5\text{ m} \quad d = 1\text{ m}$$

$$\begin{aligned} F_L &= 2 \cdot a \cdot (c + l) + 2 \cdot b \cdot c + 2\sqrt{2} \cdot b \cdot l - 2 \cdot l^2 - 16 \cdot d^2 \cdot \pi = \\ &= 2 \cdot 12 \cdot (23.5 + 5.5) + 2 \cdot 12 \cdot 23.5 + 2\sqrt{2} \cdot 12 \cdot 5.5 - 2 \cdot 5.5^2 - 16 \cdot 1^2 \cdot \pi = 1335.91\text{ m}^2 \end{aligned}$$

### 2.3.3 Stupanj ekranizacije

jednoredni ekran:

debljina stijenke cijevi:  $s_L = 5 \text{ mm}$

korak:  $t_L = 40 \text{ mm}$

promjer cijevi:  $d_L = 30 \text{ mm}$

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

$$\text{za } \frac{t_L}{d_L} = \frac{40}{30} = 1.333 \rightarrow \psi_L = 0.97$$

### 2.3.4 Efektivna površina ekrana

$$F_{ef} = F_L \cdot \psi_L = 1335.91 \cdot 0.97 = 1295.83 \text{ m}^2$$

### 2.3.5 Proračun efektivne površine po normativnoj metodi

#### 2.3.5.1 Distribucija temperature u ložištu

za izgaranje krutog goriva u prostoru:  $M = 0.59 - 0.5x = 0.59 - 0.5 \cdot 0.4827 = 0.3486$

bezdimenzijski položaj maksimalne temperature:  $x = \frac{h_1}{h_2} = \frac{14}{29} = 0.4827$

udaljenost od dna ložišta do sredine polja maksimalnih temperatura:  $h_1 = 14 \text{ m}$

udaljenost od dna ložišta do sredine izlaznog otvora ložišta:  $h_2 = 29 \text{ m}$

#### 2.3.5.2 Efektivni stupanj crnoće plamena

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{sv} \cdot m + \varepsilon_{nsv} \cdot (1 - m) = 0.8 \cdot 0.55 + 0.2737 \cdot (1 - 0.55) = 0.5631$$

stupanj crnoće svjetlećeg plamena:

za  $s > 2.5 \text{ m} \rightarrow \varepsilon_{sv} = 0.8$

efektivna debljina sloja dimnih plinova:

$$s = 3.6 \cdot \frac{V_L}{F} = 3.6 \cdot \frac{3813}{1479.91} = 9.275 \text{ m} > 2.5 \text{ m}$$

$$V_L = a \cdot b \cdot (c + l) - l^2 \cdot b = 12 \cdot 12 \cdot (23.5 + 5.5) - 5.5^2 \cdot 12 = 3813 \text{ m}^3$$

$$F = F_L + F_{CZ} = 1335.91 + 144 = 1479.91 \text{ m}^2$$

$$F_{CZ} = a \cdot b = 12 \cdot 12 = 144 \text{ m}^2$$

za  $q_l < 400 \text{ kW/m}^3 \rightarrow m = 0.55$

$$q_l = \frac{B \cdot h_{pl,t}}{V_L} = \frac{41.192 \cdot 28665.9}{3813} = 309.677 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$$

stupanj crnoće nesvjetlećeg plamena:

$$\varepsilon_{nsv} = 1 - e^{-k_{nsv} \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0.03447 \cdot 1.9 \cdot 275} = 0.2737$$

$$\begin{aligned} k_{nsv} &= \left( \frac{0.78 + 1.6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_n \cdot s}} - 0.1 \right) \cdot \left( 1 - 0.37 \cdot \frac{T_{stv}}{1000} \right) \cdot r_n = \\ &= \left( \frac{0.78 + 1.6 \cdot 0.0654}{\sqrt{0.2048 \cdot 9.275}} - 0.1 \right) \cdot \left( 1 - 0.37 \cdot \frac{1863.15}{1000} \right) \cdot 0.2048 = 0.03447 \end{aligned}$$

$$r_n = r_{CO_2} + r_{SO_2} + r_{H_2O} = 0.1385 + 0.00081 + 0.0654 = 0.2048$$

$$p_n = p \cdot r_n = 1 \cdot 0.2048 = 0.2048 \text{ bar}$$

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

$$\text{pretpostavka: } T_{stv} = t_{stv} + 273.15 = 1590 + 273.15 = 1863.15 \text{ K}$$

### 2.3.5.3 Stupanj crnoće ložišta

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_F + (1 - \varepsilon_F) \cdot \psi_L \cdot \xi} = \frac{0.5631}{0.5631 + (1 - 0.5631) \cdot 0.97 \cdot 0.45} = 0.747$$

očitano iz tablice. 4.11 (Kreuh: Generatori pare)

za slobodne površine ekranskih cijevi i ugljeni prah kao gorivo:  $\xi = 0.45$

## 2.3.5.4 Efektivna površina ekrana

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

$$= \frac{6218.3 \cdot 10^3 \cdot 41.192 \cdot 10^8}{5.67 \cdot 0.3486 \cdot 0.45 \cdot 0.747 \cdot 1863.15 \cdot 2257.64^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{0.3486^2} \cdot \left( \frac{2257.64}{1863.15} - 1 \right)^2} = 1289.41 \text{ m}^2$$

$$q_L = \eta_L \cdot (h_{pl t} - h_{pl stv}) = 0.99 \cdot (28665.9 - 22428.89) = 6218.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$\text{za } t_{stv} = 1590 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow h_{pl stv} = 22428.89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

$$T_{stv} = t_{stv} + 273.15 = 1590 + 273.15 = 1863.15 \text{ K}$$

$$\text{odstupanje: } \frac{1289.41 - 1295.83}{1289.41} \cdot 100 = -0.498 \%$$

$$\text{ukupni broj cijevi u ekranima ložišta: } n = \frac{2a + 2b}{s_L} = \frac{2 \cdot 12 + 2 \cdot 12}{0.04} = 1200$$

brzina medija u cijevima ekrana ložišta:

$$w = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{338.17 \cdot 0.002108 \cdot 4}{0.02^2 \cdot \pi \cdot 1200} = 1.891 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$v_2, \text{ m}^3/\text{kg}$	0.001382
$v_3, \text{ m}^3/\text{kg}$	0.002835
$v_{sr}, \text{ m}^3/\text{kg}$	0.002108



## 2.4) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2

### 2.4.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi:  $d_{pp2} = 0.058 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi:  $s_{pp2} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi:  $d_u = d_{pp2} - 2s_{pp2} = 0.046 \text{ m}$

duljina pregrijača pare:  $L_{pp2} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu:  $n_1 = 100$

broj redova cijevi:  $n_2 = 8$

poprečni korak cijevi:  $t_p = 0.118 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi:  $t_u = 0.1 \text{ m}$

$$F_{pp2} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{pp2} \cdot \pi \cdot L_{pp2} = 100 \cdot 8 \cdot 0.058 \cdot \pi \cdot 12 = 1749.23 \text{ m}^2$$

### 2.4.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{pp2} \cdot L_{pp2} \cdot n_1 = 12 \cdot 11.918 - 0.058 \cdot 12 \cdot 100 = 73.41 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = (100 + 1) \cdot 0.118 = 11.918 \text{ m}$$

### 2.4.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = \frac{1863.15 + 1488.04}{2} = 1675.59 \text{ K}$$

$$T_{ul} = T_{stv} = 1863.15 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz pp2:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 16876.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 1214.89 \text{ }^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 1488.04 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{pp2} = 22428.8 - 5552.6 = 16876.22 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

### 2.4.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = \frac{41.192 \cdot 8.749 \cdot 1675.59}{273 \cdot 73.41} = 30.129 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 2.4.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 1079.21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{pp2}} = \frac{0.118}{0.058} = 2.034$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{pp2}} = \frac{0.1}{0.058} = 1.724$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 2.034^2 + 1.724^2} = 2.001$$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = \frac{2.034 - 1}{2.001 - 1} = 1.0325$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_\sigma < 1.7 \rightarrow C_s = 0.34 \cdot \phi_\sigma^{0.1} = 0.34 \cdot 1.0325^{0.1} = 0.341$$

$$\text{za } n_2 < 10 \text{ i } \sigma_1 < 3 \rightarrow C_z = 3.12 \cdot n_2^{0.05} - 2.5 = 3.12 \cdot 8^{0.05} - 2.5 = 0.9618$$

Tabela 4 Svojstva dimnih plinova

T	Ni, m <sup>2</sup> /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

za  $t_{sr} = 1402.44 \text{ } ^\circ\text{C}$  :

$$\text{Pr} = 0.5397 \quad \lambda = 0.1448 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad \nu = 0.000259 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} \alpha_k &= C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{pp2}} \cdot \left( \frac{w \cdot d_{pp2}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = \\ &= 0.9618 \cdot 0.341 \cdot \frac{0.1448}{0.058} \cdot \left( \frac{30.12 \cdot 0.058}{0.000259} \right)^{0.6} \cdot 0.5397^{0.33} = 132.414 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned}$$

## 2.4.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

$$\text{temperatura stijenke: } t_s = \frac{t_5 + t_6}{2} + 30 = \frac{450 + 603}{2} + 30 = 556.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_s = 829.65 \text{ K}$$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

$$\text{očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi): } p = 1 \text{ bar} \quad a = 1.08$$

$$\text{debljina sloja plina: } s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{pp2}}{2} = \frac{0.1 + 0.118}{2} - \frac{0.058}{2} = 0.08 \text{ m}$$

$$\text{stupanj crnoće dimnih plinova: } \varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 1 - e^{(-1.08 \cdot 1 \cdot 0.08)} = 0.0827$$

stupanj crnoće stijenke:  $\varepsilon_s = 0.8$

$$\text{koeficijent zračenja crnog tijela: } C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{zr} &= C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = \\ &= 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.8 + 1}{2} \cdot 0.0827 \cdot 799.65^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{829.65}{799.65}\right)^4}{1 - \left(\frac{829.65}{799.65}\right)} = 36.99 \frac{W}{m^2 K} \end{aligned}$$

## 2.4.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 132.41 + 36.99 = 169.408 \frac{W}{m^2 K}$$

## 2.4.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u pregrijaču 2:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_5 + t_6}{2} = \frac{450 + 603}{2} = 526.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{p\ sr} = 799.65 \text{ } K$$

srednji specifični volumen u pregrijaču 2:

$$v_{sr} = \frac{v_5 + v_6}{2} = \frac{0.00673 + 0.01149}{2} = 0.00911 \frac{m^3}{kg}$$

$v_5, m^3/kg$	0.006734
$v_6, m^3/kg$	0.011492

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = \frac{364 \cdot 0.00911 \cdot 4}{0.046^2 \cdot \pi \cdot 100} = 19.9604 \frac{m}{s}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 0.023 \cdot \frac{0.0956}{0.046} \cdot \left( \frac{19.96 \cdot 0.046}{2.97 \cdot 10^{-7}} \right)^{0.8} \cdot 1.066^{0.4} = 7646.369 \frac{W}{m^2 K}$$

za  $t_{p\ sr} = 526.5 \text{ } ^\circ\text{C}$   $p_{p\ sr} = 312.5 \text{ } bar$  :

Pr	1.06695
$\lambda, W/mK$	0.095683
$\nu, m^2/s$	2.97E-07

## 2.4.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi:  $\lambda_{st} = 52 \frac{W}{mK}$ koeficijent zaprljanja:  $\xi = 0.9$ 

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{pp2}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = \frac{0.9}{\frac{1}{169.408} + \frac{0.006}{52} + \frac{1}{7646.36}} = 146.364 \frac{W}{m^2 K}$$

## 2.4.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u pregrijač:  $t_5 = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz pregrijača:  $t_6 = 603 \text{ } ^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u pregrijač:  $t_{pl\ ul} = 1590 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz pregrijača:  $t_{pl\ izl} = 1214.9 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_6 = 1590 - 603 = 987 \text{ } ^\circ\text{C}$$

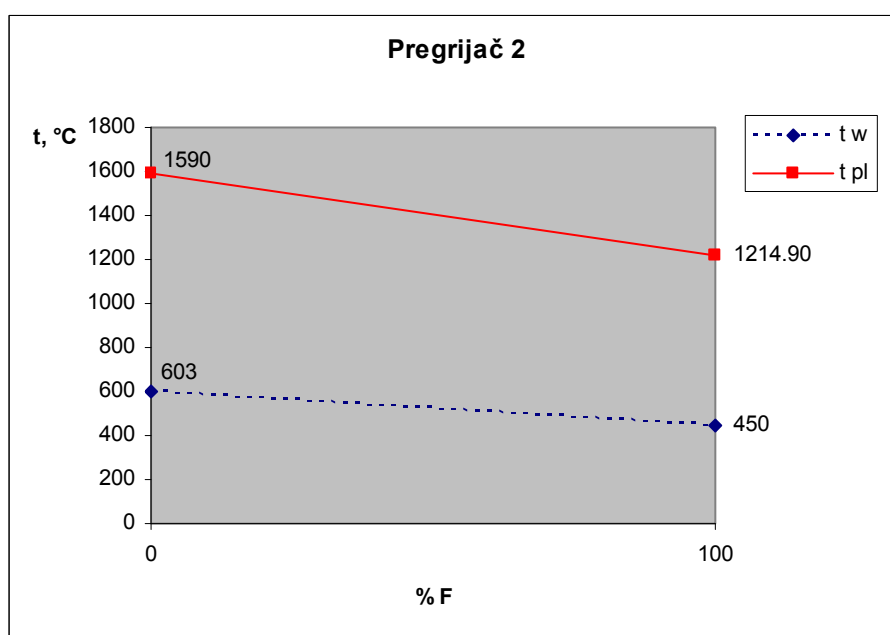
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_5 = 1214.9 - 450 = 764.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = \frac{987 - 764.9}{\ln\left(\frac{987}{764.9}\right)} = 871.23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 2.4.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{pp2}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = \frac{41.192 \cdot 5552.66}{0.997 \cdot 146.36 \cdot 871.23} = 1799.06 \text{ } m^2$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{pp2} - F}{F_{pp2}} \cdot 100 = \frac{1749.23 - 1799.06}{1749.23} \cdot 100 = -2.848 \%$$



Slika 6 Pregrijač pare 2

## 2.5) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2

### 2.5.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi:  $d_{mp2} = 0.132 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi:  $s_{mp2} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi:  $d_u = d_{mp2} - 2s_{mp2} = 0.12 \text{ m}$

duljina pregrijača pare:  $L_{mp2} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu:  $n_1 = 70$

broj redova cijevi:  $n_2 = 7$

poprečni korak cijevi:  $t_p = 0.168 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi:  $t_u = 0.16 \text{ m}$

$$F_{mp2} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{mp2} \cdot \pi \cdot L_{mp2} = 2438.37 \text{ m}^2$$

### 2.5.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{mp2} \cdot L_{mp2} \cdot n_1 = 32.25 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.928 \text{ m}$$

### 2.5.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 1341.91 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 1488.04 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz mp2:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 12620.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 922.62 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 1195.77 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{mp2} = 12620.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

### 2.5.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 54.919 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 2.5.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 1068.76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{mp2}} = 1.272$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{mp2}} = 1.212$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.369$$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 0.739$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_\sigma < 1.7 \rightarrow C_s = 0.34 \cdot \phi_\sigma^{0.1} = 0.349$$

$$\text{za } n_2 < 10 \text{ i } \sigma_1 < 3 \rightarrow C_z = 3.12 \cdot n_2^{0.05} - 2.5 = 0.938$$

T	Ni, m <sup>2</sup> /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

za  $t_{sr} = 1068.76 \text{ } ^\circ\text{C}$  :

$$\text{Pr} = 0.5731$$

$$\lambda = 0.11509 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0.000182 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda}{d_{mp2}} \cdot \left( \frac{w \cdot d_{mp2}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 129.007 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

### 2.5.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke:  $t_s = \frac{t_9 + t_{10}}{2} + 30 = 520.75 \text{ } ^\circ\text{C}$      $T_s = 793.9 \text{ K}$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi):  $p = 1 \text{ bar}$      $a = 1.08$

debljina sloja plina:  $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{mp2}}{2} = 0.098 \text{ m}$

stupanj crnoće dimnih plinova:  $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.1004$

stupanj crnoće stijenke:  $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela:  $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 26.61 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.5.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 155.617 \frac{W}{m^2 K}$$



## 2.5.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u međupregrijaču 2:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_9 + t_{10}}{2} = 490.75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{p\ sr} = 763.9 \text{ K}$$

srednji specifični volumen u međupregrijaču 2:

$$v_{sr} = \frac{v_9 + v_{10}}{2} = 0.0692 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$v_9, \text{m}^3/\text{kg}$	0.055542
$v_{10}, \text{m}^3/\text{kg}$	0.083017

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 26.953 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4} = 1225.079 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

za  $t_{p\ sr} = 490.75 \text{ } ^\circ\text{C}$   $p_{p\ sr} = 48.5 \text{ bar}$  :

Pr	0.949064
$\lambda, \text{W/mK}$	0.069571
$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	1.97E-06

## 2.5.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi:  $\lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ koeficijent zaprljanja:  $\xi = 0.9$ 

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{mp2}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 122.321 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

## 2.5.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u međupregrijač:  $t_9 = 370 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz međupregrijača:  $t_{10} = 611.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u međupregrijač:  $t_{pl\ ul} = 1214.9 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz međupregrijača:  $t_{pl\ izl} = 922.63 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_{10} = 603.39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

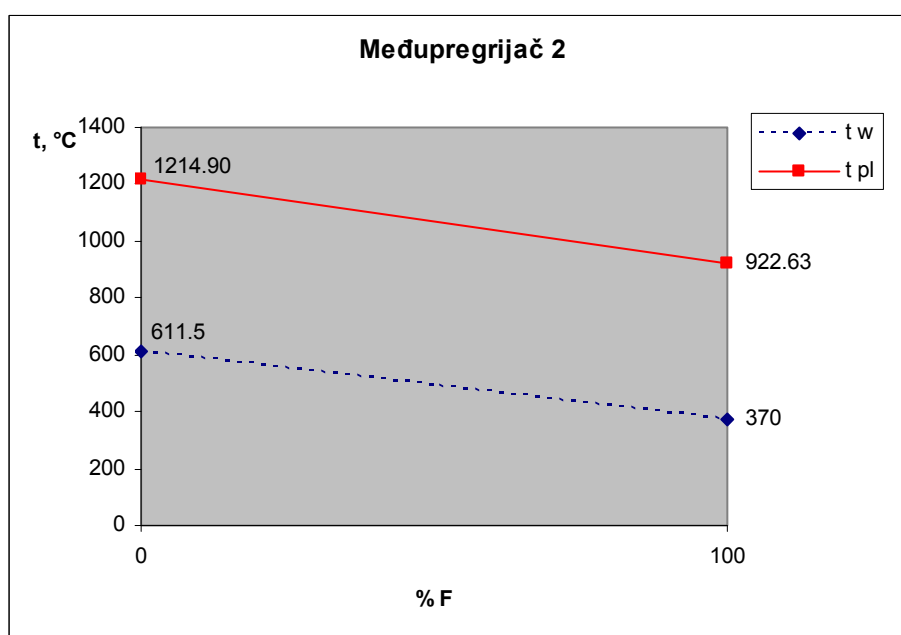
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_9 = 552.63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 577.64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 2.5.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{mp2}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 2488.27 \text{ } m^2$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{mp2} - F}{F_{mp2}} \cdot 100 = -2.046 \%$$



Slika 7 Međupregrijač pare 2

## 2.6) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1

### 2.6.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi:  $d_{pp1} = 0.064 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi:  $s_{pp1} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi:  $d_u = d_{pp1} - 2s_{pp1} = 0.052 \text{ m}$

duljina pregrijača pare:  $L_{pp1} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu:  $n_1 = 100$

broj redova cijevi:  $n_2 = 54$

poprečni korak cijevi:  $t_p = 0.118 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi:  $t_u = 0.1 \text{ m}$

$$F_{pp1} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{pp1} \cdot \pi \cdot L_{pp1} = 13028.81 \text{ m}^2$$

### 2.6.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{pp1} \cdot L_{pp1} \cdot n_1 = 66.216 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.918 \text{ m}$$

### 2.6.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 971.49 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 1195.77 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz pp1:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 6220.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 474.05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 747.2 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{pp1} = 6220.73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

### 2.6.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 19.368 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 2.6.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 698.34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{pp1}} = 1.843$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{pp1}} = 1.562$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.814$$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 1.036$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_\sigma < 1.7 \rightarrow C_S = 0.34 \cdot \phi_\sigma^{0.1} = 0.341$$

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

T	Ni, m <sup>2</sup> /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

za  $t_{sr} = 698.34 \text{ } ^\circ\text{C}$  :

$$\text{Pr} = 0.6001$$

$$\lambda = 0.0825 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\nu = 0.000107 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha_k = C_Z \cdot C_S \cdot \frac{\lambda}{d_{pp1}} \cdot \left( \frac{w \cdot d_{pp1}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 102.18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

### 2.6.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke:  $t_s = \frac{t_3 + t_4}{2} + 30 = 465.03 \text{ } ^\circ\text{C}$     $T_s = 738.18 \text{ K}$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi):  $p = 1 \text{ bar}$     $a = 1.08$

debljina sloja plina:  $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{pp1}}{2} = 0.077 \text{ m}$

stupanj crnoće dimnih plinova:  $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.0797$

stupanj crnoće stijenke:  $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela:  $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 10.364 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.6.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 112.552 \frac{W}{m^2 K}$$

## 2.6.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u pregrijaču 1:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_3 + t_4}{2} = 435.03 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{p\ sr} = 708.18 \text{ K}$$

srednji specifični volumen u pregrijaču 1:

$$v_{sr} = \frac{v_3 + v_4}{2} = 0.005196 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$v_3, \text{m}^3/\text{kg}$	0.0028347
$v_4, \text{m}^3/\text{kg}$	0.0075584

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 8.274 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4} = 7607.494 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

za  $t_{p\ sr} = 435.03 \text{ } ^\circ\text{C}$   $p_{p\ sr} = 325 \text{ bar}$  :

Pr	1.4343122
$\lambda, \text{W/mK}$	0.1078657
$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	1.617E-07

## 2.6.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi:  $\lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ koeficijent zaprljanja:  $\xi = 0.9$ 

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{pp1}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 98.559 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

## 2.6.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u pregrijač:  $t_3 = 400.07 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz pregrijača:  $t_4 = 470 \text{ } ^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u pregrijač:  $t_{pl\ ul} = 922.63 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz pregrijača:  $t_{pl\ izl} = 474.05 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_4 = 452.62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

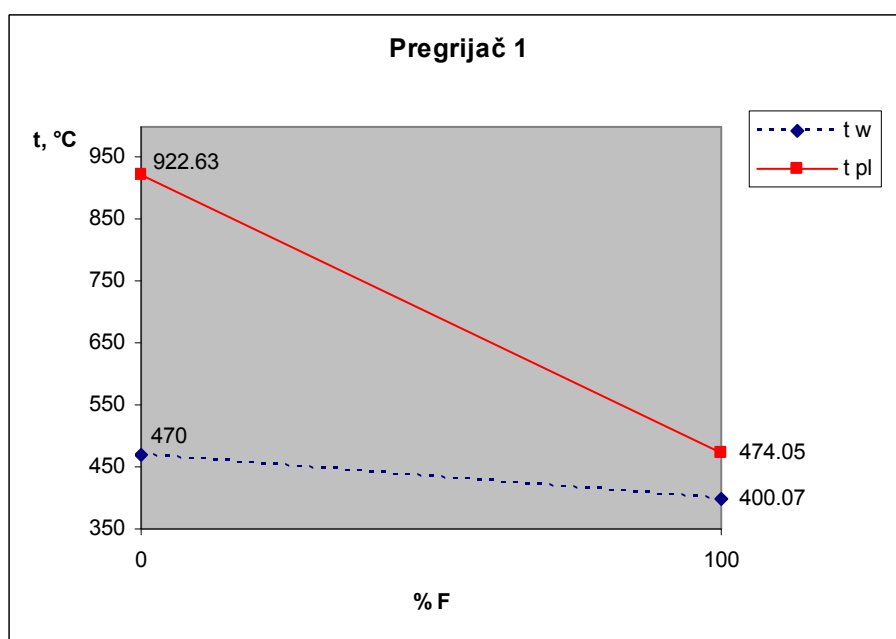
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_3 = 73.98 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 209.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 2.6.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{pp1}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 12833.61 \text{ } m^2$$

$$\text{odstupanje: } \frac{F_{pp1} - F}{F_{pp1}} \cdot 100 = 1.498 \text{ } \%$$



Slika 8 Pregrijač pare 1

## 2.7) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1

### 2.7.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi:  $d_{mp1} = 0.124 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi:  $s_{mp1} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi:  $d_u = d_{mp1} - 2s_{mp1} = 0.112 \text{ m}$

duljina pregrijača pare:  $L_{mp1} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu:  $n_1 = 70$

broj redova cijevi:  $n_2 = 34$

poprečni korak cijevi:  $t_p = 0.168 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi:  $t_u = 0.16 \text{ m}$

$$F_{mp1} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{mp1} \cdot \pi \cdot L_{mp1} = 11125.76 \text{ m}^2$$

### 2.7.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{mp1} \cdot L_{mp1} \cdot n_1 = 38.976 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.928 \text{ m}$$

### 2.7.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 695.35 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 747.2 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz mp1:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 4859.99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 370.36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 643.51 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{mp1} = 4859.99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

### 2.7.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 23.551 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



## 2.7.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 422.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{mp1}} = 1.354$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{mp1}} = 1.2903$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.457$$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 0.7758$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_\sigma < 1.7 \rightarrow C_S = 0.34 \cdot \phi_\sigma^{0.1} = 0.3314$$

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

T	Ni, m <sup>2</sup> /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

za  $t_{sr} = 422.2 \text{ } ^\circ\text{C}$  :

$$\text{Pr} = 0.6316$$

$$\lambda = 0.05886 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 6.168 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha_k = C_Z \cdot C_S \cdot \frac{\lambda}{d_{pp}} \cdot \left( \frac{w \cdot d_{pp}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 86.343 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.7.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke:  $t_s = \frac{t_7 + t_8}{2} + 30 = 385.35 \text{ } ^\circ\text{C}$      $T_s = 658.5 \text{ } \text{K}$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi):  $p = 1 \text{ } \text{bar}$      $a = 1.08$

debljina sloja plina:  $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{mpl}}{2} = 0.102 \text{ } \text{m}$

stupanj crnoće dimnih plinova:  $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.1043$

stupanj crnoće stijenke:  $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela:  $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 6.609 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

### 2.7.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 92.952 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

## 2.7.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

srednja temperatura pare u međupregrijaču 1:

$$t_{p\ sr} = \frac{t_7 + t_8}{2} = 355.35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{p\ sr} = 628.5 \text{ } \text{K}$$

srednji specifični volumen u međupregrijaču 1:

$$v_{sr} = \frac{v_7 + v_8}{2} = 0.053 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$v_7, \text{m}^3/\text{kg}$	0.048159
$v_8, \text{m}^3/\text{kg}$	0.057863

srednja brzina pare u cijevima:

$$w_p = \frac{D_{1a} \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 23.039 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\alpha_w = 0.023 \cdot \frac{\lambda}{d_u} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d_u}{\nu} \right)^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.4} = 1380.84 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

za  $t_{p\ sr} = 355.35 \text{ } ^\circ\text{C}$   $p_{p\ sr} = 49.5 \text{ bar}$  :

Pr	1.048733
$\lambda, \text{W/mK}$	0.056316
$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	1.19E-06

## 2.7.9 Koeficijent prolaza topline

koeficijent toplinske vodljivosti cijevi:  $\lambda_{st} = 52 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ koeficijent zaprljanja:  $\xi = 0.9$ 

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{mp1}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 77.601 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

### 2.7.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u međupregrijač:  $t_7 = 320.7 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura pare iz međupregrijača:  $t_8 = 390 \text{ } ^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u međupregrijač:  $t_{pl\ ul} = 474.05 \text{ } ^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz međupregrijača:  $t_{pl\ izl} = 370.36 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_8 = 84.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

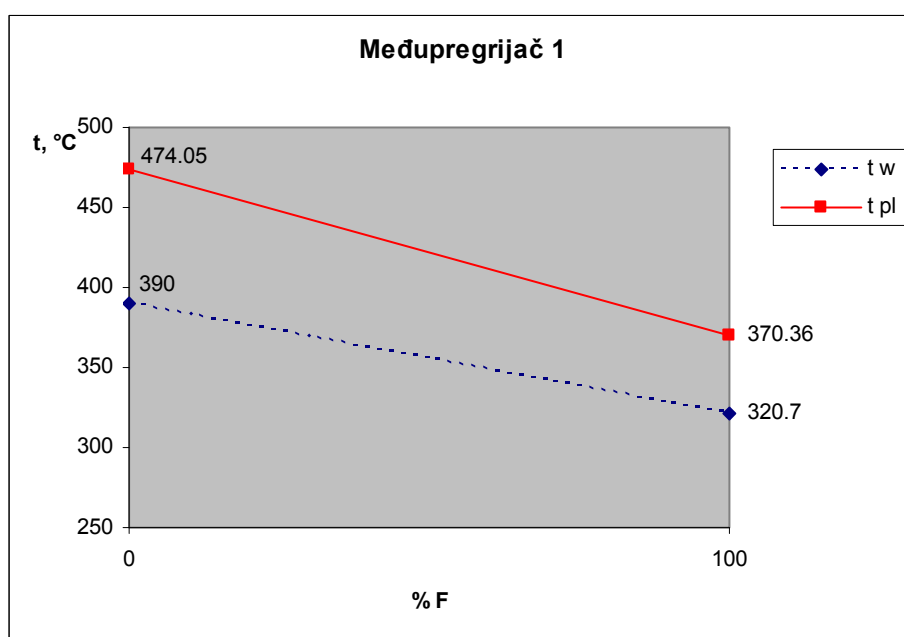
$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_7 = 49.66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 65.35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 2.7.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{mp1}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 11084.81 \text{ } m^2$$

odstupanje:  $\frac{F_{mp2} - F}{F_{mp2}} \cdot 100 = 0.368 \text{ } \%$



Slika 9 Međupregrijač pare 1

## 2.8) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE

### 2.8.1 Ogrjevna površina

vanjski promjer cijevi:  $d_{zv} = 0.064 \text{ m}$

debljina stijenke cijevi:  $s_{zv} = 0.006 \text{ m}$

unutarnji promjer cijevi:  $d_u = d_{zv} - 2s_{zv} = 0.062 - 2 \cdot 0.006 = 0.052 \text{ m}$

duljina pregrijača pare:  $L_{zv} = 12 \text{ m}$

broj cijevi u jednom redu:  $n_1 = 100$

broj redova cijevi:  $n_2 = 54$

poprečni korak cijevi:  $t_p = 0.118 \text{ m}$

uzdužni korak cijevi:  $t_u = 0.1 \text{ m}$

$$F_{zv} = n_1 \cdot n_2 \cdot d_{zv} \cdot \pi \cdot L_{zv} = 13028.81 \text{ m}^2$$

### 2.8.2 Minimalni presjek

$$f = a \cdot b - d_{pp1} \cdot L_{zv} \cdot n_1 = 66.216 \text{ m}^2$$

$$b = (n_1 + 1) \cdot t_p = 11.918 \text{ m}$$

### 2.8.3 Srednja temperatura dimnih plinova

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{izl}}{2} = 615.02 \text{ K}$$

$$T_{ul} = 643.51 \text{ K}$$

temperatura na izlazu iz zv:

$$\text{za } h_{pl\ izl} = 4135.14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B} \rightarrow t_{izl} = 313.37 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{izl} = 586.52 \text{ K}$$

$$h_{pl\ izl} = h_{pl\ ul} - q_{zv} = 4135.14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_B}$$

### 2.8.4 Brzina dimnih plinova

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot f} = 12.261 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## 2.8.5 Koeficijent prijelaza topline konvekcijom

paralelni raspored cijevi

$$t_{sr} = T_{sr} - 273.15 = 341.87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{odnos poprečnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_1 = \frac{t_p}{d_{zv}} = 1.843$$

$$\text{odnos uzdužnog koraka cijevi i vanjskog promjera cijevi: } \sigma_2 = \frac{t_u}{d_{zv}} = 1.562$$

$$\text{srednji relativni dijagonalni korak cijevi: } \sigma_{sr} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 1.814$$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_{sr} - 1} = 1.036$$

$$\text{za } 0.1 < \phi_\sigma < 1.7 \rightarrow C_S = 0.34 \cdot \phi_\sigma^{0.1} = 0.3412$$

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

T	Ni, m <sup>2</sup> /s	Lambda, W/mK	Pr
100	2.08E-05	0.03128	0.7
300	4.39E-05	0.0483	0.65
500	7.30E-05	0.06559	0.62
700	1.07E-04	0.08269	0.6
1000	1.67E-04	0.10897	0.58
1500	2.82E-04	0.15352	0.53
2000	4.19E-04	0.19887	0.49
2200	4.82E-04	0.216	0.47

za  $t_{sr} = 341.87 \text{ } ^\circ\text{C}$  :

$$\text{Pr} = 0.6437$$

$$\lambda = 0.0519 \frac{W}{mK}$$

$$\nu = 5 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\alpha_k = C_Z \cdot C_S \cdot \frac{\lambda}{d_{zv}} \cdot \left( \frac{w \cdot d_{zv}}{\nu} \right)^{0.6} \cdot \text{Pr}^{0.33} = 78.802 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.8.6 Koeficijent prijelaza topline zračenjem

temperatura stijenke:  $t_s = \frac{t_1 + t_2}{2} + 30 = 336.5 \text{ } ^\circ\text{C}$      $T_s = 609.65 \text{ K}$

koeficijent slabljenja zraka troatomnih plinova

očitano iz sl. 4.50 (Đurić: Parni kotlovi):  $p = 1 \text{ bar}$      $a = 1.08$

debljina sloja plina:  $s = \frac{t_u + t_p}{2} - \frac{d_{zv}}{2} = 0.077 \text{ m}$

stupanj crnoće dimnih plinova:  $\varepsilon = 1 - e^{(-a \cdot p \cdot s)} = 0.0797$

stupanj crnoće stijenke:  $\varepsilon_s = 0.8$

koeficijent zračenja crnog tijela:  $C_C = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

$$\alpha_{zr} = C_C \cdot \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \cdot \varepsilon \cdot T_{sr}^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)^4}{1 - \left(\frac{T_s}{T_{sr}}\right)} = 3.739 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.8.7 Ukupni koeficijent prijelaza topline na strani dimnih plinova

$$\alpha_{pl} = \alpha_k + \alpha_{zr} = 82.542 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.8.8 Koeficijent prijelaza topline na strani radnog medija

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

### 2.8.9 Koeficijent prolaza topline

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

koeficijent zaprljanja:  $\xi = 0.9$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_{pl}} + \frac{s_{zv}}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\alpha_w}} = 73.188 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.8.10 Srednja logaritamska temperaturna razlika

ulazna temperatura pare u zagrijač vode:  $t_1 = 298 \text{ } ^\circ C$

izlazna temperatura pare iz zagrijača vode:  $t_2 = 315 \text{ } ^\circ C$

ulazna temperatura dimnih plinova u zagrijač vode:  $t_{pl\ ul} = 370.36 \text{ } ^\circ C$

izlazna temperatura dimnih plinova iz zagrijača vode:  $t_{pl\ izl} = 313.38 \text{ } ^\circ C$

$$\Delta t_1 = t_{pl\ ul} - t_2 = 55.36 \text{ } ^\circ C$$

$$\Delta t_2 = t_{pl\ izl} - t_1 = 15.38 \text{ } ^\circ C$$

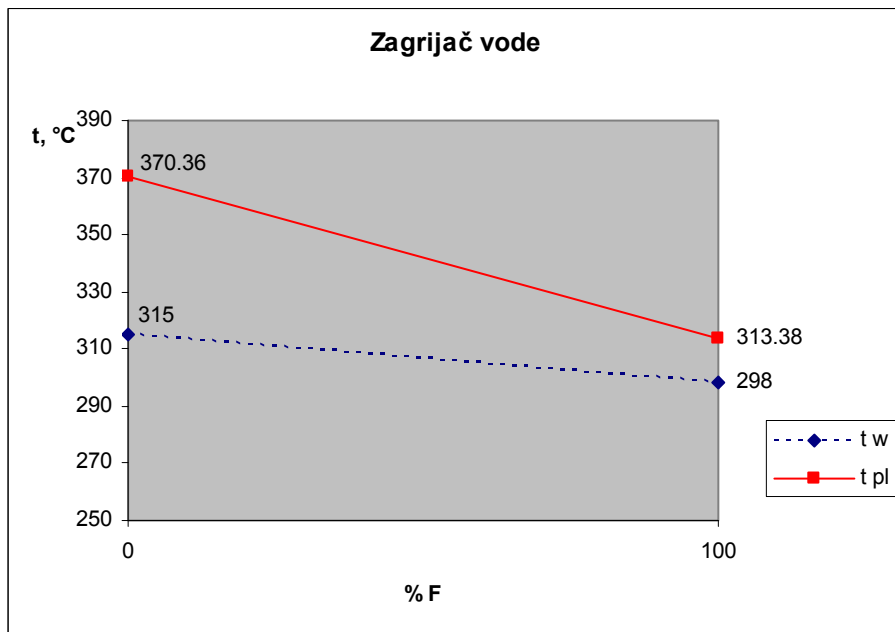
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 31.21 \text{ } ^\circ C$$



### 2.8.11 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{zv}}{\eta_z \cdot k \cdot \Delta t_m} = 13108.09 \text{ m}^2$$

odstupanje:  $\frac{F_{zv} - F}{F_{zv}} \cdot 100 = -0.608 \%$



Slika 10 Zagrijač vode

## 2.9) PRORAČUN ZAGRIJAČA ZRAKA

### Ljungstromov regenerativni zagrijač

#### 2.9.1 Ogrjevna površina

debljina lima:  $\delta = 0.6 \text{ mm}$

broj segmenata:  $m_s = 12$

broj limova u jednom segmentu:  $z = 100$

širina limova:  $b = 5 \text{ m}$

dužina limova:  $l = 4.4 \text{ m}$

poprečni presjek otvora:  $F_o = \frac{(d^2 - d_1^2) \cdot \pi}{4} = \frac{(17^2 - 1^2) \cdot \pi}{4} = 94.247 \text{ m}^2$

površina limova na poprečnom presjeku:  $F_l = \delta \cdot m_s \cdot z = 3.6 \text{ m}^2$

slobodni presjek za dimne plinove:  $F_{pl} = 0.6 \cdot (F_o - F_l) = 54.38 \text{ m}^2$

slobodni presjek za zrak:  $F_z = 0.4 \cdot (F_o - F_l) = 36.25 \text{ m}^2$

$$F_{zz} = b \cdot l \cdot m_s \cdot z = 26400 \text{ m}^2$$

#### 2.9.2 Temperature radnih medija i toplina koju je potrebno izmjeniti

ulazna temperatura zraka u zagrijač:  $t_{zr1} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura zraka iz zagrijača:  $t_{zr2} = 240 \text{ }^\circ\text{C}$

ulazna temperatura dimnih plinova u zagrijač:  $t_{pl ul} = 313.38 \text{ }^\circ\text{C}$

izlazna temperatura dimnih plinova iz zagrijača:  $t_{pl izl} = 131.01 \text{ }^\circ\text{C}$

toplina koju je potrebno izmjeniti:

$q_{zz}$ , kJ/kg <sub>B</sub>	2419.44
-------------------------------	---------

#### 2.9.3 Srednja logaritamska temperaturna razlika

$$\Delta t_1 = t_{pl ul} - t_{zr3} = 73.38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_{pl izl} - t_{zr2} = 111.01 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} = 90.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

### 2.9.4 Srednje temperature zraka i dimnih plinova

$$t_{pl\ sr} = \frac{t_{pl\ ul} + t_{pl\ izl}}{2} = 222.19\ ^\circ C \quad T_{pl\ sr} = 495.34\ K$$

$$t_{zr\ sr} = \frac{t_{zr\ 2} + t_{zr\ 3}}{2} = 130\ ^\circ C \quad T_{zr\ sr} = 403.15\ K$$

### 2.9.5 Temperature lima

$$t_{L\ pl} = t_{pl\ sr} - 3 = 219.19\ ^\circ C$$

$$t_{L\ zr} = t_{zr\ sr} - 3 = 127\ ^\circ C$$

### 2.9.6 Srednje brzine dimnih plinova i zraka

$$w = \frac{B \cdot V_{pl} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_{pl}} = 12.023\ \frac{m}{s}$$

$$w_{zr} = \frac{B \cdot V_{zr} \cdot T_{sr}}{273 \cdot F_z} = 14.004\ \frac{m}{s}$$

### 2.9.7 Koeficijent prolaza topline

očitano iz sl. 4.106 (Đurić: Parni kotlovi):

$$\alpha_1' = 76 \frac{W}{m^2 K}, \quad \alpha_2' = 66 \frac{W}{m^2 K}$$

$$C_H = 1.15, \quad C_\Phi = 1.15, \quad C_\Phi' = 1.1, \quad C_l = 1$$

korekcija uz očitane koeficijente:

$$\text{na strani dimnih plinova: } \alpha_1 = C_H \cdot C_\Phi \cdot C_l \cdot \alpha_1' = 100.51 \frac{W}{m^2 K}$$

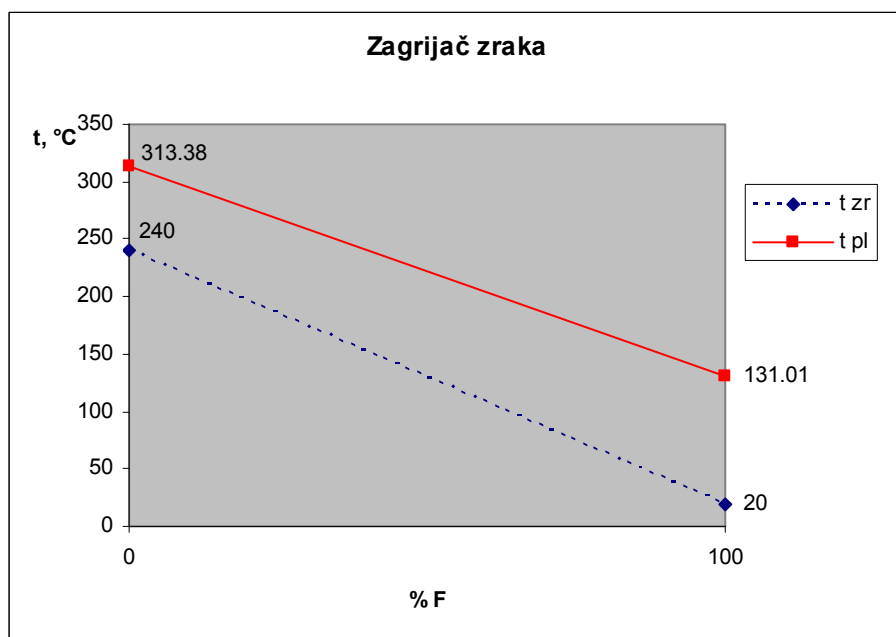
$$\text{na strani zraka: } \alpha_2 = C_H \cdot C_\Phi' \cdot C_l \cdot \alpha_2' = 83.49 \frac{W}{m^2 K}$$

$$k = \frac{\xi}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 41.04 \frac{W}{m^2 K}$$

### 2.9.8 Potrebna ogrjevna površina

$$F = \frac{B \cdot q_{zz}}{k \cdot \Delta t_m} = 26710.49 \text{ m}^2$$

odstupanje:  $\frac{F_{zz2} - F}{F_{zz2}} \cdot 100 = -1.176 \%$



Slika 11 Zagrijač zraka

### 3. HIDRODINAMIČKI PRORAČUN

#### 3.1) PRORAČUN ZAGRIJAČA VODE

##### 3.1.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 3.957 \cdot 10^5 Pa$$

ukupna duljina jedne cijevi:  $L = 648 m$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare)  $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 2.156 \frac{m}{s}$$

gustoća:  $\rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 738.55 \frac{kg}{m^3}$

##### 3.1.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.3639 \cdot 10^5 Pa$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 21.2$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare)  $\zeta = 0.4$

##### 3.1.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{zv} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 4.321 bar$$

## 3.2) PRORAČUN EKRANA LOŽIŠTA

### 3.2.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.2275 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi:  $L = 29 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare)  $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 1.8912 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 474.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### 3.2.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 0$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare)  $\zeta = 0.4$

### 3.2.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_L = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0.2275 \text{ bar}$$

### 3.3) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 1

#### 3.3.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 15.188 \cdot 10^5 Pa$$

ukupna duljina jedne cijevi:  $L = 648 m$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare)  $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_a \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 8.274 \frac{m}{s}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 192.43 \frac{kg}{m^3}$$

#### 3.3.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 1.396 \cdot 10^5 Pa$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 21.2$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare)  $\zeta = 0.4$

#### 3.3.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{pr1} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 16.585 bar$$

### 3.4) PRORAČUN PREGRIJAČA PARE 2

#### 3.4.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 8.439 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi:  $L = 96 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare)  $\lambda = 0.0185$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 19.9604 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 109.72 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 3.4.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.612 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 2.8$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare)  $\zeta = 0.4$

#### 3.4.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{pr2} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 9.051 \text{ bar}$$



### 3.5) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 1

#### 3.5.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 2.553 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi:  $L = 408 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare)  $\lambda = 0.014$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_{1a} \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 23.039 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 18.864 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 3.5.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.6608 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 13.2$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare)  $\zeta = 0.4$

#### 3.5.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{mp1} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 3.214 \text{ bar}$$

### 3.6) PRORAČUN MEĐUPREGRIJAČA PARE 2

#### 3.6.1 Pad tlaka usljed trenja na ravnom dijelu cijevi

$$\Delta p_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d_u} \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.513 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

ukupna duljina jedne cijevi:  $L = 84 \text{ m}$

koeficijent trenja:

očitano iz tablice 5.4 (Kreuh: Generatori pare)  $\lambda = 0.014$

srednja brzina:

$$w_{sr} = \frac{D_1 \cdot v_{sr} \cdot 4}{d_u^2 \cdot \pi \cdot n_1} = 26.953 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{gustoća: } \rho_{sr} = \frac{1}{v_{sr}} = 14.434 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 3.6.2 Lokalni pad tlaka (pad tlaka zbog zakrivljenosti cijevi)

$$\Delta p_l = \Sigma \zeta \cdot \frac{w_{sr}^2}{2} \cdot \rho_{sr} = 0.125 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Sigma \zeta = i \cdot \zeta = 2.4$$

koeficijent otpora strujanja zbog zakrivljenosti cijevi:

očitano iz tablice 5.3 (Kreuh: Generatori pare)  $\zeta = 0.4$

#### 3.6.3 Ukupni pad tlaka

$$\Delta p_{mp2} = \Delta p_{tr} + \Delta p_l = 0.639 \text{ bar}$$

#### 4. PRORAČUN ČVRSTOĆE

materijal cijevi izmjenjivača topline: čelik 13CrMo45  $\sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$

naprezanje u poprečnom presjeku za:

1.) zagrijač vode

$$\sigma_{p_{zv}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{zv}} = 145.6 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

2.) cijevi ekrana ložišta:

$$\sigma_{p_L} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_L} = 66.7 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

3.) pregrijač pare 1

$$\sigma_{p_{pp1}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{pp1}} = 140.83 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

4.) pregrijač pare 2

$$\sigma_{p_{pp2}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{pp2}} = 119.79 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

5.) međupregrijač pare 1

$$\sigma_{p_{mp1}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{mp1}} = 46.2 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

6.) međupregrijač pare 2

$$\sigma_{p_{mp2}} = \frac{p_{sr} \cdot d_u}{2 \cdot s_{mp2}} = 48.5 \frac{N}{mm^2} < \sigma_{dop} = 300 \frac{N}{mm^2}$$

## 5. OBRADA DIMNIH PLINOVA

Emisije CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> i prašine smanjuju se postizanjem većeg stupnja djelovanja postrojenja, ali također se koristi i niz postupaka za pročišćavanje dimnih plinova.

### 5.1) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE DUŠIKOVIH OKSIDA (De-NO<sub>x</sub>)

Tokom procesa izgaranja ugljena stvaraju se dušični oksidi (NO<sub>x</sub>). Nakon izgaranja u kotlu koncentracija NO<sub>x</sub> iznosi približno 400 mg/Nm<sup>3</sup>. Procesom selektivne katalitičke redukcije (SCR) koncentracija NO<sub>x</sub> se snižava na manje od 80 mg/Nm<sup>3</sup>.

Selektivnom katalitičkom redukcijom dušični oksidi pretvaraju se u dušik i vodu pri kontaktu sa amonijakom kao redukcijским sredstvom u prisutnosti odgovarajućeg katalizatora.

Redukcijsko sredstvo ubacuje se u dimne plinove prije katalizatora u količinama temeljenim na traženim vrijednostima redukcije.

Dijelovi SCR sustava:

- 1) katalitički reaktor
- 2) sustav za skladištenje i rukovanje ureom
- 3) sustav za proizvodnju plinovitog amonijaka
- 4) sustav miješanja isparenog amonijaka sa zrakom

### 5.2) SUSTAV ZA SMANJENJE EMISIJE PRAŠINE

U dimnim plinovima koji su produkt izgaranja ugljena nalaze se čestice prašine koje se moraju ukloniti prije ispuštanja dimnih plinova u okoliš.

Emisiju prašine potrbno je smanjiti ispod dozvoljene količine koja iznosi 10 mg/m<sup>3</sup>.

Filteri koji se koriste za uklanjanje prašine su elektrostatski filteri (ESP). To su uređaji u kojima se za izdvajanje prašine koriste električne sile i sila gravitacije. Veće čestice se izdvajaju gravitacijskom silom, a manje električnim silama.

Dimni plin struji duž više paralelnih prolaza (taložnih elektroda) između kojih su smještene emisijske elektrode.

Emisijske elektrode su spojene na negativni pol visokonaponskog reguliranog ispravljača, a taložne elektrode su uzemljene. Visoki napon između emisijskih i taložnih elektroda uzrokuje ionizaciju plinova, tako proizvedeni negativni ioni sudaraju se s česticama prašine.

Čestice prašine koje su sada nabijene kreću se pod utjecajem električnog polja prema taložnim elektrodama gdje se talože.

Nataložena prašina se preko sustava otresača kontinuirano otresa i pada u bunkere prašine.

Fizikalne veličine koje utječu na ESP:

- 1) specifični otpor prašine
  - najbolji učinci postižu se sa specifičnim otporom  $10^4$  do  $10^{10}$   $\Omega/\text{cm}$
- 2) temperatura dimnih plinova
  - viša temperatura je povoljnija
- 3) sadržaj vlage u dimnim plinovima
  - viši sadržaj vlage poboljšava rad ESP
- 4) sadržaj  $\text{SO}_3$  u plinovima
  - uz istovremeno prisustvo vlage poboljšava rad ESP

### 5.3) SUSTAV ODSUMPORAVANJA DIMNIH PLINOVA

Emisija  $\text{SO}_2$  smanjuje se mokrim postupkom odsumporavanja dodatkom vapna, gdje se neutralizacija kiselih sumpornih spojeva vrši dodavanjem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a kao konačni produkt nastaje gips.

Za dani pretičak zraka ( $\lambda = 1.25 - 1.37$ ) koristi se kiseli postupak odsumporavanja kod kojeg su pH vrijedosti 3.7 - 5.4.

Prednosti kiselog postupka (u odnosu na neutralni):

- stupanj odstranjivanja sumpora je veći od 95%
- dobiveni gips ima manje onečišćenja
- manja potrošnja vapna

Kod postupka odsumporavanja vrši se i obrada otpadnih voda iz postrojenja za odsumporavanje (fizikalno-kemijska obrada koja se sastoji iz neutralizacije, taloženja i filtracije).

## 6. ZAKLJUČAK

Za traženu proizvodnju pare  $D = 364 \text{ kg/s}$ , te ostale zadane parametre, koristi se toranjski tip nadkritičnog generatora pare sljedećih karakteristika:

stupanj djelovanja :  $\eta_K = 0.928$

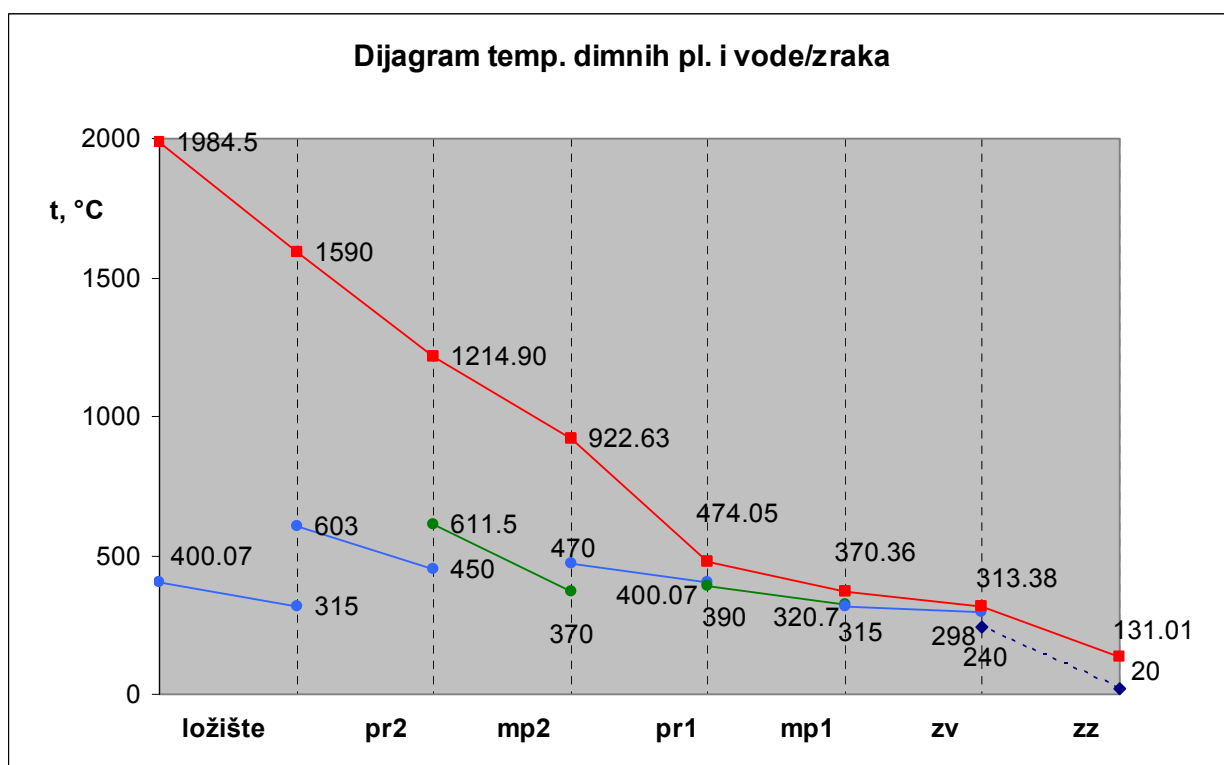
količina goriva :  $B = 41.192 \frac{\text{kg}_B}{\text{s}}$

izlazna temperatura dimnih plinova :  $t_{izl} \approx 130 \text{ }^\circ\text{C}$

dimenzije ložišta :  $12 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 23.5 \text{ m}$

izmjenjivačke površine : zagrijač vode  
2 pregrijača  
2 međupregrijača  
zagrijač zraka

plamenici : 4 nivoa, u svakom su 4 tangencijalno razmještena plamenika



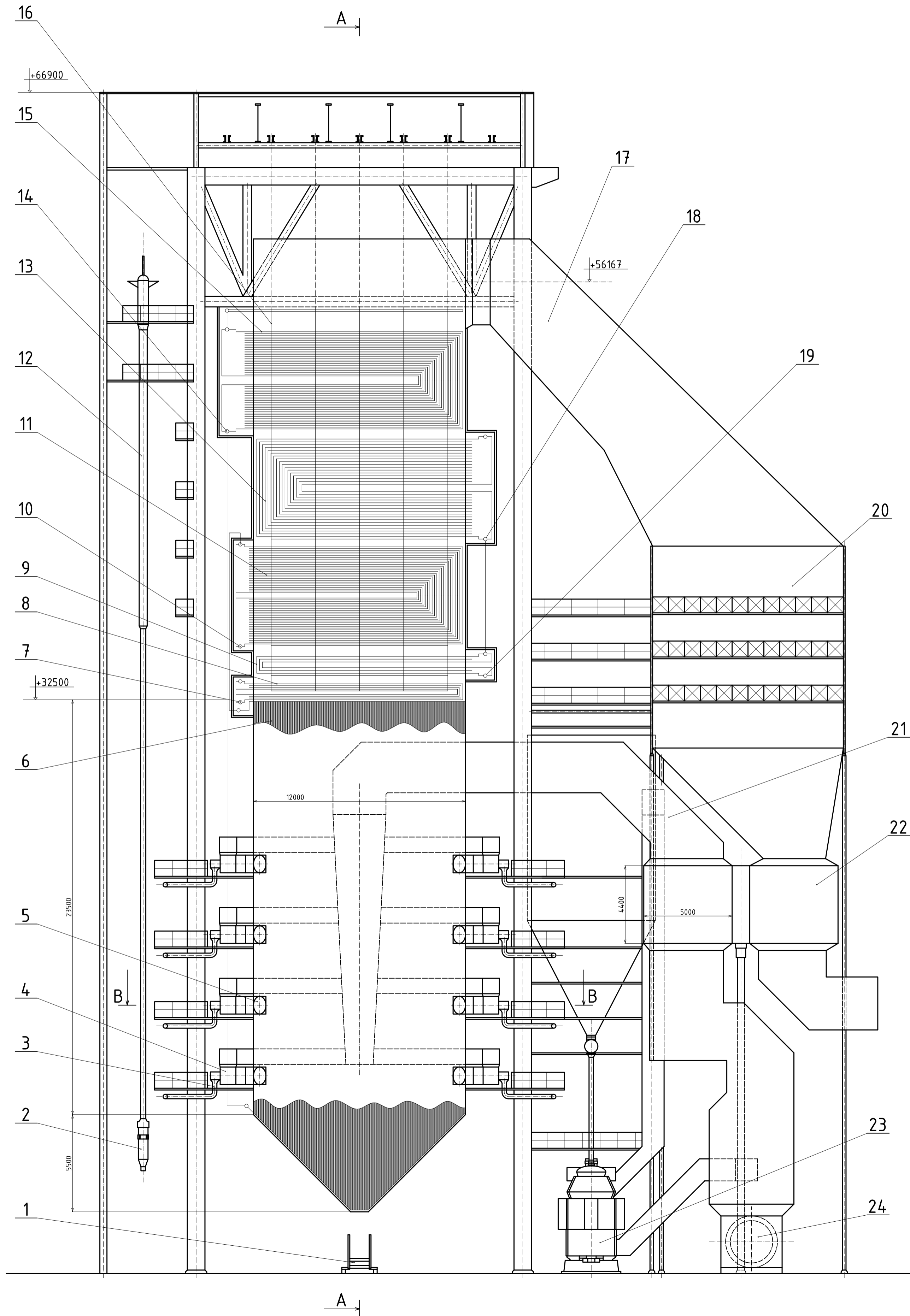
Slika 12 Dijagram temperature dimnih plinova i vode/zraka

## PRILOZI

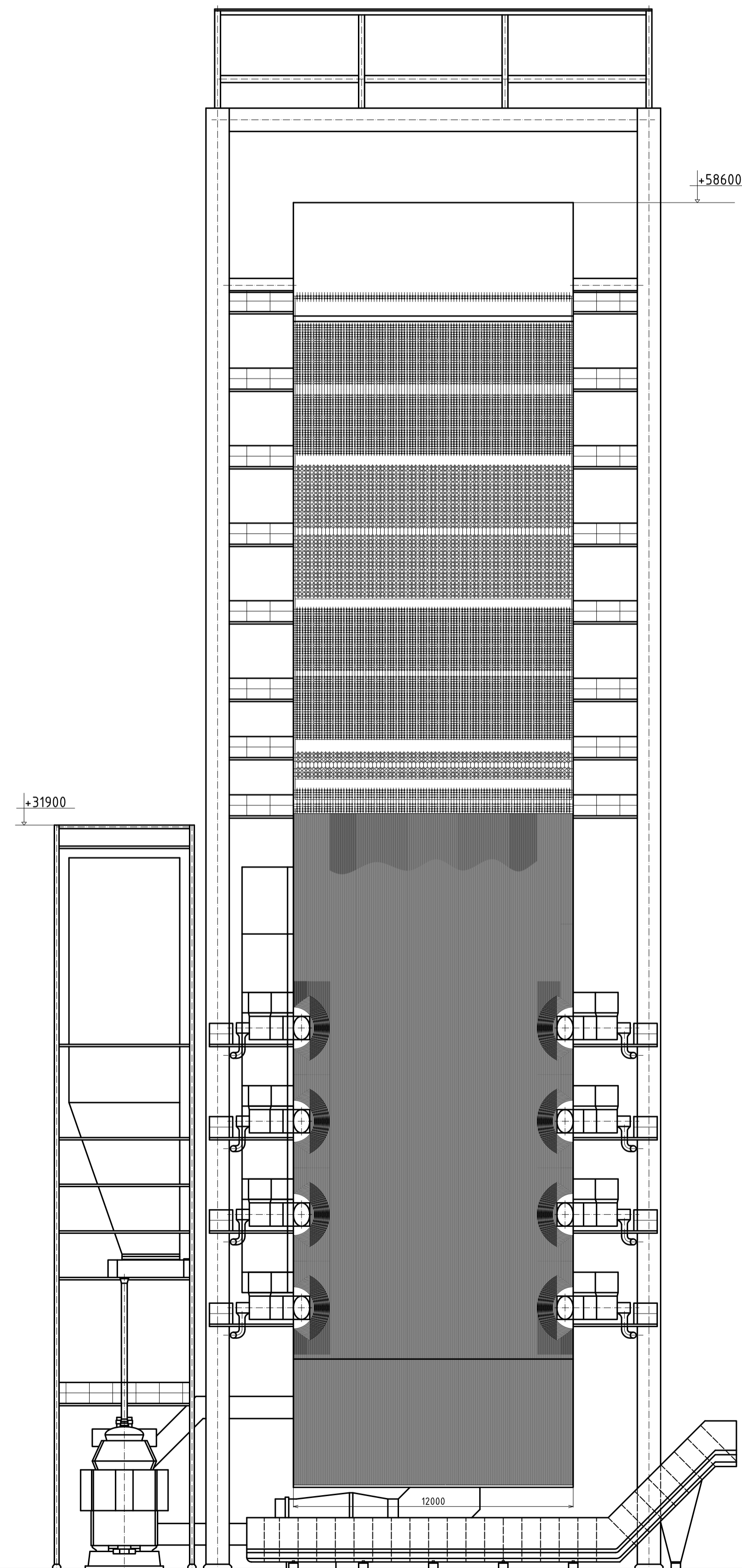
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

## LITERATURA

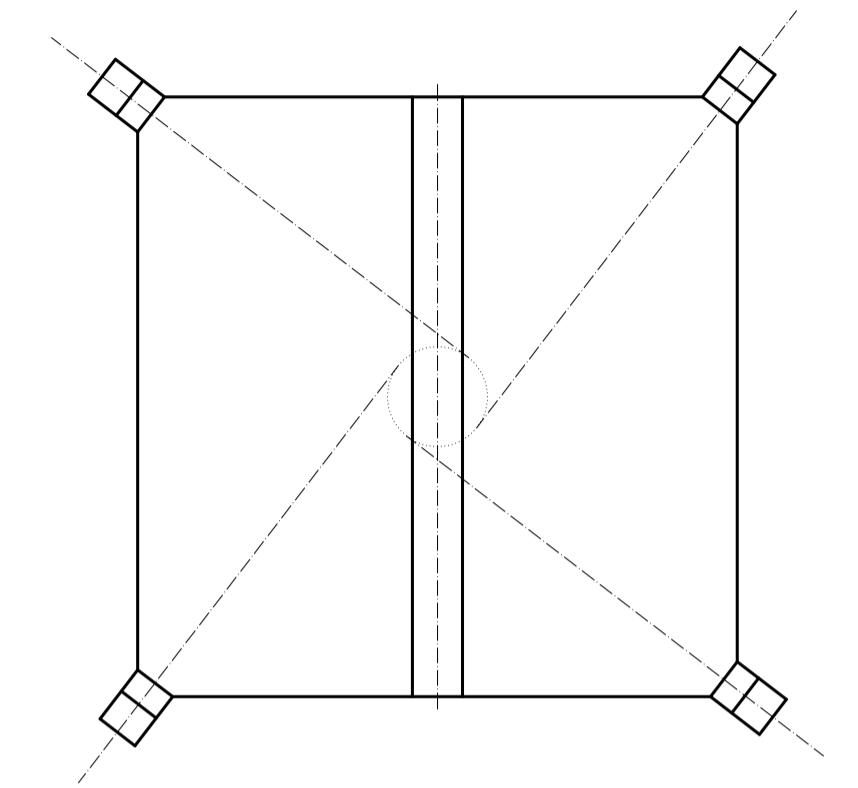
- [1] Kraut, B. : Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1988.
- [2] Kreuh, L. : Generatori pare, Školska knjiga Zagreb, 1978.
- [3] Đurić, B. : Parni kotlovi, Građevinska knjiga Beograd, 1969.
- [4] Susta, M. : Ultra-supercritical Pulverized Coal Fired Power Plants
- [5] Richardson, M. , Shimogori, Y. : Supercritical Boiler Technology Matures
- [6] Gulič, M. : Parni kotlovi, Mašinski fakultet Beograd, 1983.



Presjek A-A



Presjek B-B



24	Ventilator za dovod zraka	1				
23	Mlin za ugljen	1				
22	Zagrijatelj zraka (Ljungstrom)	1				
21	Kanal za dovod zraka	1				
20	DeNOx sistem	1				
19	Sabirna cijev međupregrijača pare 2	1				
18	Sabirna cijev međupregrijača pare 1	1				
17	Kanal za odvod dimnih plinova	1				
16	Noseće cijevi	1				
15	Zagrijatelj vode	1			Ø64x6x(5400)	
14	Sabirna cijev zagrijača vode	1				
13	Međupregrijač pare 1	1			Ø124x6x(2380)	
12	Sistem za pokretanje	1				
11	Pregrijač pare 1	1			Ø64x6x(5400)	
10	Sabirna cijev pregrijača pare 1	1				
9	Međupregrijač pare 2	1			Ø132x6x(490)	
8	Pregrijač pare 2	1			Ø58x6x(800)	
7	Sabirna cijev pregrijača pare 2	1				
6	Cijevi ekrana ložišta	1200			Ø30x5	
5	Gorionik	16				
4	Cijev za dovod zraka u gorionik	16				
3	Cijev za dovod goriva u gorionik	16				
2	Recirkulacijska pumpa	1				
1	Sistem za odvod pepela	1				
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Mat.rijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao			Goran Džepina			
Razradio			Goran Džepina			
Crtao			Goran Džepina			
Pregledao						
Mentor			prof. dr. sc. Daniel Ralph Schneider			
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:		
Napomena:		R. N. broj:		Kopija		
Mat.rijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD			
Mjerilo originala		Naziv:	GENERATOR PARE		Pozicija: Forma: A1	
		Crtež broj: 1		Listova: 1		
				List: 1		