Proračun toplinskih karakteristika toplovodnog kotla na pelete

Ivanišević, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:323506

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Karlo Ivanišević

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

PRORAČUN TOPLINSKIH KARAKTERISTIKA TOPLOVODNOG KOTLA NA PELETE

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Student:

Karlo Ivanišević

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Damiru Doviću na prihvaćanju mentorstva, potpori i savjetima.

Zahvaljujem svima koji su mi bili podrška tijekom ovog dijela studija.

Karlo Ivanišević

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 19 -09- 2016 Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1703-16-330

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Karlo Ivanišević** Mat. br.: 0035186549

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun toplinskih karakteristika toplovodnog kotla na pelete**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Thermal characteristics calculation of the hot water boiler burning pellets**

Opis zadatka:

Potrebno je provesti proračun toplinskog učinka i stupnja djelovanja toplovodnog kotla na pelete koji se nalazi na ispitivanju u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje. Proračun je potrebno provesti prema normi HRN EN 303-5 za temperaturu polaza i povrata vode iz kotla 90°C i 70°C i radni tlak 2,5 bar, i to na 100% i 30% toplinskog opterećenja kotla. Rezultate proračuna usporediti s rezultatima mjerenja navedenih toplinskih karakteristika na predmetnom kotlu. Temeljem dobivenih podataka, potrebno je odrediti godišnji stupanj djelovanja kotla koristeći normu prEN 15316-4-1.
U proračunu koristiti podatke iz tehničke dokumentacije kotla.

Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
25. studenog 2015.

Rok predaje rada:
1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABILCA IV
POPIS OZNKA V
SAŽETAK IX
1. UVOD 1
1.1. Biomasa 1
1.1.1 Peleti 2
1.2. Kotao na biomasu 3
2. PRORAČUN TOPLINSKIH KARAKTERISTIKA PREMA NORMI EN 303-5. 5
2.1. Proračun toplinskih karakteristika kotla pri punom opterećenju 5
2.1.1. Zadani parametri i ulazni podaci dobiveni mjerenjem u laboratoriju 5
2.1.2. Maseni sastav goriva 6
2.1.3. Proračun izgaranja goriva [2] 8
2.1.4. Potrebna količina zraka za izgaranje 9
2.1.5. Sastav dimnih plinova [2] 9
2.1.6. Adijabatska temperatura izgaranja [3] 12
2.1.7 Toplinski gubici i efikasnost kotla 13
2.1.8 Potrebna količina goriva 17
2.1.9. Volumen ložišta 17
2.1.10. Određivanje stvarne temperature izgaranja u ložištu 18
2.1.11. Izmjena topline konvekcijom u prolazima 20
2.1.12. Ukupno ostvareni toplinski tok i stupanj djelovanja 26
2.2 Proračun karakteristika kotla pri opterećenju od 30 % 27
2.2.1. Ulazni podaci 27
2.2.2. Produkti izgaranja i njihov sastav 27
2.2.3. Toplinski gubici 29
2.2.4. Određivanje stvarne temperature izgaranja u ložištu 31
2.3. Usporedba najvažnijih parametara dobivenih proračunom i mjerenjima 32
3. PRORAČUN GODIŠNJEG STUPNJA DJELOVANJA KOTLA PREMA NORMI prEN15316 4-1 34
3.1. Područje djelovanja 34
3.2. Postupak proračuna 35

3.3. Tijek proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti podsustava proizvodnje energije (kotla) . 35
3.3.1. Ulazni podaci ... 36
2.3.2. Toplinski gubici kotla ... 37
2.3.3. Ukupna potrebna pomoćna energija podsustava proizvodnje ... 39
2.3.4. Proračun vraćene i iskoristive pomoćne energije ... 39
2.3.5. Iskoristivi toplinski gubitak kroz ovojnicu kotla ... 40
2.3.6. Ekvivalentna toplinska energija koju je potrebno gorivom isporučiti podsustavu proizvodnje ... 40
2.3.7. Godišnji stupanj djelovanja kotla ... 40
4. ZAKLJUČAK ... 41
PRILOZI ... 42
LITERATURA ... 43

POPIS SLIKA

Slika 1. Drvni peleti 2
Slika 2. Usporedba peleta i ostalih goriva [7] 2
Slika 3. Usporedba cijena toplinske energije za različita goriva [7] 3
Slika 4. Kotao Tip 32D i njegov presjek 3
Slika 5. Osnovne dimenzije kotla 4
Slika 6. Tehnički podaci kotla 4
Slika 7. Određivanje minimalnog stupnja djelovanja prema normi [6] 13
Slika 8. Razdioba toplinskih tokova 26
Slika 9. Razdioba toplinskih tokova kotla pri djelomičnom opterećenju 32
Slika 10. Shematski prikaz podjele termotehničkog sustava grijanja [8] 35

POPIS TABILCA

Tablica 1. Sastav krutog goriva sveden na suho stanje bez pepela [4] 6
Tablica 2. Sastav pojedinih sudionika izražen po kilogramu goriva..... 7
Tablica 3. Dimenzije prolaza 20
Tablica 4. Izmijenjena toplina konvekcijom po prolazima 31
Tablica 5. Usporedba rezultata pri punom opterećenju..... 32
Tablica 6. Usporedba rezultata mjerenja i proračuna pri djelomičnom opterećenju..... 33
Tablica 7. Parametri za proračun potrebne energije za pogon pomoćnih uređaja 39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm	Površina poprečnog presjeka strujanja
A_d	%	Sadržaj pepela sveden na suho stanje
a	kg/kg	Maseni udio pepela u gorivu
B	mm	Dubina kanala
B	kg/s	Maseni protok goriva
B_τ	kg	Količina goriva za traženi period gorenja
C	%	Sastav ugljika
C_c	$W/m^2(100K^4)$	Konstanta zračenja crnog tijela
C_{daf}	kg/kg	Sadržaj ugljika sveden na suho stanje bez pepela
C_{mpi}	$kJ/kmol\ K$	Molarni toplinski kapacitet pojedinog sudionika
C_{mpdp}	$kJ/kmol\ K$	Molarni toplinski kapacitet dimnih plinova
$C_{mp,sdp}$	$kJ/kmol\ K$	Molarni toplinski kapacitet suhih dimnih plinova
C_r	%	Sadržaj ugljika u neizgorivim ostacima
c	kg/kg	Maseni udio ugljika u gorivu
c_1 ; c_2	-	Koeficjenti za proračun učinkovitosti kotla
D	mm	Širina kanala
f_{brm}	-	Faktor smanjenja temperature u ovisnosti o lokaciji kotla
$f_{corr;Pint}$	-	Faktor korekcije za djelomično opterećenj
$f_{corr;Pn}$	-	Faktor korekcije za potpuno opterećenje
$f_{gen;ls;P0}$	-	Faktor korekcije za stand-by
$f_{Hs/Hi}$	-	Faktor korekcije
H	%	Sastav vodika

$H_{d,i}$	kJ/kg	Donja ogrjevna vrijednost goriva
H_{daf}	%	Sadržaj vodika sveden na suho stanje bez pepela
h	mm	Visina kanala
h_u	-	Gubici kemijski nepotpunog izgaranja
h_{opl}	-	Toplinski gubici oplate
M_w		Sadržaj vlage u gorivu
M_C	$kg/kmol$	Molarna masa ugljika
M_{dp}	$kg/kmol$	Molarna masa dimnih plinova
l_{min}	kg/kg	Minimalna potrebna masa kisika
l_{stv}	kg/kg	Stvarna potrebna masa kisika
N	%	Sastav dušika
N_{daf}	%	Sadržaj dušika sveden na suho stanje bez pepela
n	kg/kg	Maseni udio dušika u gorivu
n_{dp}	$kmol/kg$	Količina dimnih plinova
O	%	Sastav kisika
O_{daf}	%	Sadržaj kisika sveden na suho stanje bez pepela
o	kg/kg	Maseni udio kisika u gorivu
o_{min}	kg/kg	Minimalna potrebna masa kisika
$P_{aux;Pn}$	W	Standardna vrijednost pričuvne energije pri punim opterećenju
$P_{aux;Pint}$	W	Standardna vrijednost pričuvne energije pri djelomičnom opterećenju
$P_{aux;P0}$	W	Standardna vrijednost pričuvne energije na stand-by-u
P_{dj}	W	Snaga kotla pri djelomičnom opterećenju

$P_{H;gen;ls;Pint;corr}$	W	Korigirani toplinski gubici kotla pri djelomičnom opterećenju
$P_{H;gen;ls;Pn;corr}$		Korigirani toplinski gubici kotla pri punom opterećenju
$P_{H;gen;ls;P0;corr}$	W	Korigirani toplinski gubici kotla na stand-by-u
$P_{H;gen;ls;Px}$	W	Toplinskih gubitaka generatora pri specifičnom omjeru kapaciteta
P_N	W	Nazivna snaga kotla
Q	W	Toplinski tok predan vodi
$Q_{1\ldots3}$	W	Toplinski tok izmijenjen konvekcijom u prolazima
$Q_{H;gen;ls;env;rbl}$		Iskoristivi toplinski gubici kroz ovojnicu kotla
Q_{dp}	W	Toplinski gubici dimnih plinova
Q_{opl}	W	Toplinski gubici oplate
q_v	m^3/s	Volumni protok dimnih plinova
$t_{H;use}$	h/mth	Broj sati grijanja u mjesecu
V_{dp}	m^3/kg	Volumni protok dimnih plinova
V_{sdp}	m^3/kg	Volumni protok suhih dimnih plinova
v_{dp}	m^3/kg	Specifični volumen dimnih plinova
$V_{lož}$	m^3	Volumen ložišta
w	kg/kg	Udio vlage u gorivu

Grčke oznake

Oznaka	**Jedinica**	**Opis**
α	W/m^2K	Koeficjent prijelaza topline s oplate na okoliš
α_{kdp}	W/m^2K	Koeficjent prijelaza topline dimnih plinova

ε_{pl}	-	Emisijski faktor plamena
ε_{stj}	-	Emisijski faktor stjenke ložišta
η_K	-	Stupanj djelovanja kotla
η_L	-	Stupanj djelovanja ložišta
ρ_{nas}	kg/m^3	Nasipna gustoća goriva
ϑ_0	°C	Vanjska temperatura zraka
ϑ_{ad}	°C	Adijabatska temperatura izgaranja u ložištu
ϑ_{iz}	°C	Temperatura na izlazu iz prolaza
ϑ_{opl}	°C	Temperatura površine oplate
ϑ_{sr}	°C	Srednja temperatura dimnih plinova
ϑ_{stv}	°C	Stvarna temperatura izgaranja u ložištu
ϑ_{ul}	°C	Temperatura na ulazu u prolaz
τ	-	Vrijeme loženja

SAŽETAK

Završni rad ″ Proračun toplinskih karakteristika toplovodnog kotla na pelete ″ temelji se na proračunu toplinskog učinka i stupnja djelovanja prema normi HRN EN 303-5.

U prvom dijelu napravljen je proračun stupnja djelovanja kotla i toplinskog učinka, a dobiveni rezultati uspoređuju se s rezultatima mjerenja.

U drugom dijelu napravljen je proračun godišnjeg stupnja djelovanja kotla prema normi prEN 15316-4-1.

1. UVOD

Toplovodni kotlovi u kojima se održava temperatura kotlovske vode u režimu polaz 90°C, povrat 70°C te tlak do 3 bara najčešće se koriste za zagrijavanje vode koja se upotrebljava za stambeno centralno grijanje i proizvodnju potrošne tople vode.

Općenito, toplovodni kotlovi se razvrstavaju u tri glavne skupine:
1. standardni kotlovi
2. niskotemperaturni kotlovi
3. kondenzacijski kotlovi

Definicije pojedinog tipa kotla:
1. Standardni kotao − toplovodni kotao kod kojeg se prosječna pogonska temperatura, zbog same konstrukcije kotla sa svrhom sprječavanja kondenzacije vodene pare sadržane u dimnim plinovima, održava na temperaturi 70 do 80 °C.
2. Niskotemperaturni kotao − toplovodni kotao koji može kontinuirano raditi s temperaturom povratne vode do 35 °C i kod kojeg u određenim uvjetima može nastupiti kondenzacija vodene pare sadržane u dimnim plinovima.
3. Kondenzacijski kotao − toplovodni kotao konstruiran upravo za kondenzaciju većeg dijela vodene pare sadržane u dimnim plinovima u svrhu iskorištenja latentne topline, tj. gornje ogrjevne moći.

1.1. Biomasa

Pojam biomase odnosi se na materiju biljnog ili životinjskog podrijetla koja se može kao gorivo iskoristit u proizvodnji energije. Biomasa spada u obnovljive izvore energije te se smatra ugljično neutralnim gorivom. Ugljikov dioksid apsorbiran procesom fotosinteze vraća se u jednakoj količini u atmosferu nakon procesa izgaranja biogoriva. Cjelokupni potencijal korištenja biomase, uz pridržavanje načela održivog razvoja, može značajno doprinijeti poboljšanju iskorištenja obnovljivih izvora energije i očuvanju okoliša.

1.1.1 Peleti

Drvni peleti su prešano cilindrično biogorivo. Obično su načinjeni od ostataka iz drvne industrije poput piljevine, iverja, šumskih ostataka, recikliranog drveta u koje spadaju drvno-kompozitni materijali s većinskim udjelom drveta. Klasifikacija i dimenzije peleta standardizirane su normom CEN/TS 14961:2005.



Slika 1. Drvni peleti

Peleti se prešaju pod toplinom i visokim tlakom, a prirodni biljni lignin ih drži na okupu, tako da se peleti proizvode bez umjetnih ljepila i aditiva. Ovakav način obrade drvnih ostataka omogućuje proizvodnju goriva s vrlo malim udjelom vlage, ispod 10 %, te velikom ogrjevnom vrijednošću.

Osim bioloških i ekoloških pogodnosti, peleti omogućuju i razvoj gospodarstva u vidu stvaranja novih radnih mjesta, posebno u ruralnim područjima. Također, drvni peleti su i ekonomski isplativije gorivo što se može vidjeti i na sljedećim slikama.

2 kg peleta	≈	1 lit ulja za loženje
1,85 kg peleta	≈	1 m3 zemnog plina
650 kg peleta zauzima 1 m3 prostora		
3 m3 peleta	≈	1000 lit ulja za loženje
Potrošnja peleta 1 kg/h	≈	5 kW snage

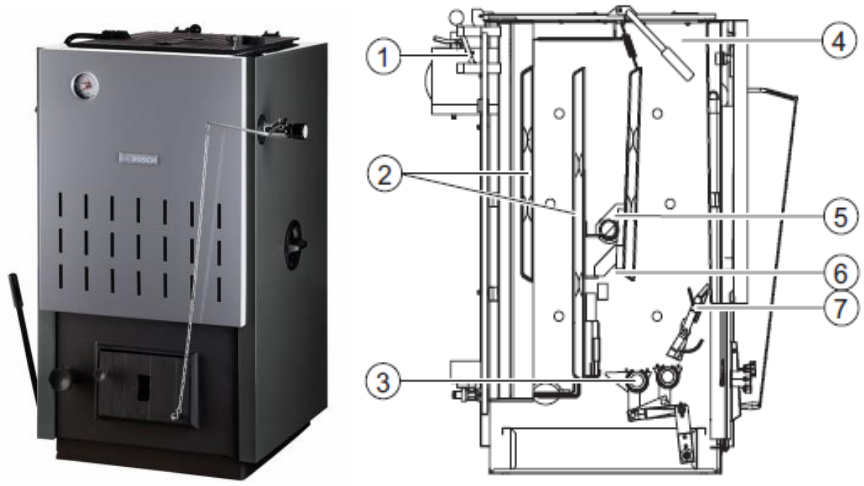
Slika 2. Usporedba peleta i ostalih goriva [10]

	kn/kWh	Eur/kWh
Drveni pelet	0,370	0,049
CTS-HEP	0,410	0,055
Prirodni plin	0,608	0,081
UNP	0,806	0,107
Lož ulje	0,826	0,110

Slika 3. Usporedba cijena toplinske energije za različita goriva [10]

1.2. Kotao na biomasu

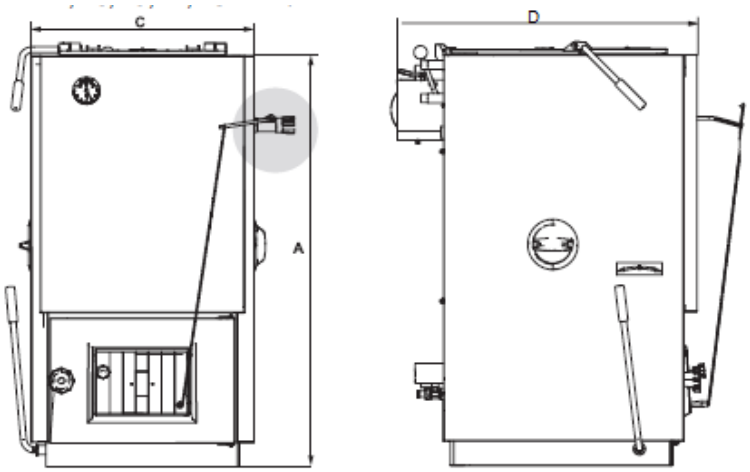
Kotao na biomasu na kojemu su provedena mjerenja u laboratoriju i koji se proračunava u ovom radu, Tip 32D , dio je serije kotlova BOSCH SOLID 2000 B. Namijenjen je za ugradnju u kuće s jednom ili više obitelji. Kotlovi BOSCH SOLID 2000 B, ovisno o stupnjevima djelovanja, mogu se ložiti na ugljen ili drva. Troprolazni su i trajno žareći kotlovi koji se jednostavno instaliraju i imaju dugi vijek trajanja. Mogu se koristiti kao samostalni generator topline ili se mogu integrirati u postojeći sustav.



Slika 4. Kotao Tip 32D i njegov presjek [11]

1 Zaklopka za potpalu
2 Ogrjevne površine
3 Rešetka na treskanje
4 Prostor za punjenje
5 Šamotna opeka
6 Komora izgaranja
7 Preklopna rešetka

Osnovne dimenzije kotla prikazane su na slici



Slika 5. Osnovne dimenzije kotla [11]

$A = 1060\ mm$ - visina kotla

$C = 700\ mm$ -širina kotla

$D = 850\ mm$ -dubina kotla

Karakteristike kotla dane od strane proizvođača

Veličina kotla	Tip	12	16	20	24	25 Max/27	32	32D	45D
Nazivni toplinski učinak	kW	13,5	16	20	24	27	32	28	45
Stupanj djelovanja	%	> 76						82	82
Klasa kotla prema EN 303-5	-	3						2	
Predviđeno gorivo[1)]	-	Mrki ugljen (veličine oraha 1)						Drvo	
Potrošnja goriva u satu	kg/h	5,3	6,4	8,5	10,0	11,2	12,9	8,8	13,8
Zamjensko gorivo [1)]	-	A, B, C, D, E, F[2)]						B, C, D, E, F[2)]	
Zapremina komore sagorijevanja	l	26		46		61		63	115
Sadržaj vode	l	46	46	56	57	63	64	64	73
Područje temperature kotlovske vode	°C	65 do 95							
Temperatura ispušnih plinova	°C	260							
Maseni protok dimnih plinova (minimalni/nazivni učinak)	g/sek.	6,4/ 12,4	5,5/ 13,2	6,1/ 20,5	7,0/ 24	6,0/23,2	7,6/ 26,9	7,1/ 22,1	15,0/ 37,7
Potreban transportni tlak (propuh)	Pa	18	18	30	30	30	30	26	36
Ogrjevna površina kotla	m^2	1,1	1,1	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0	3,0
Dopušteni radni pretlak	bar	2							
Maksimalni ispitni tlak	bar	4							

Slika 6. Tehnički podaci kotla [11]

2. PRORAČUN TOPLINSKIH KARAKTERISTIKA PREMA NORMI EN 303-5.

Norma HRN EN 303-5:2012 primjenjuje se za kotlove uključujući i sigurnosne uređaje do nazivne snage 500 kW koji su konstruirani za izgaranje samo krutih goriva i koji rade prema uputama danim od strane proizvođača.

Kotlovi mogu raditi s prirodnim ili prisilnim strujanjem, a punjenje može biti ručno ili automatsko.
Ovaj Europski Standard sadrži zahtjeve i ispitne metode za sigurno i kvalitetno izgaranje, radne karakteristike, oznake i održavanje kotlova. Također obuhvaća i svu vanjsku opremu koja utječe na siguran rad kotla.

Kotlovi u suglasnosti s ovom normom konstruirani su za centralno grijanje gdje se toplina prenosi vodom i gdje je maksimalna dozvoljena temperatura vode 110 °C, te koji mogu raditi pri maksimalnom radnom tlaku 6 bara.

2.1. Proračun toplinskih karakteristika kotla pri punom opterećenju

2.1.1. Zadani parametri i ulazni podaci dobiveni mjerenjem u laboratoriju

Gorivo	Drvni peleti
Tlak vode	2,5 bar
Temperaturni režim	90/70 °C
$B = 0{,}00190746\ \frac{kg_G}{s}$	-maseni protok goriva
$H_{d,i} = 17690\ \frac{kJ}{kg_G}$	-ogrjevna vrijednost goriva
$\lambda = 1{,}55$	-faktor pretička zraka
$CO = 0{,}02588\ \%$	-sadržaj ugljika u suhim dimnim plinovima
$M_w = 6\%$	-sadržaj vlage goriva
$C_r = 0{,}0610376$	-sadržaj ugljika u neizgorivim ostacima
$\vartheta_0 = 23{,}9°C$	-temperatura okoliša

2.1.2. Maseni sastav goriva

Sadržaj vlage goriva

$$M_w = 6\%$$

Udio vlage izražen po kilogramu goriva

$$w = 0{,}06 \frac{kgH2O}{kgG}$$

Sadržaj pepela sveden na suho stanje

$$A_d = 0{,}3\%$$

Sastav peleta određuje se prema vrijednostima danim u Tablici 1.

Tablica 1. Sastav krutog goriva sveden na suho stanje bez pepela [4]

Sudionici	Udio	Mjerna jedinica
Ugljik (C_{daf})	0,50	$\frac{kgC}{kgG_{daf}}$
Vodik (H_{daf})	0,06	$\frac{kgH}{kgG_{daf}}$
Kisik (O_{daf})	0,439	$\frac{kgO}{kgG_{daf}}$
Dušik (N_{daf})	0,001	$\frac{kgN}{kgG_{daf}}$

Sastav goriva koje se isporučuje te s kojim se ulazi u daljnji proračun [7]

Sastav pepela

$$\mathrm{A} = A_d \cdot \frac{100 - M_w}{100} = 0{,}3 \cdot \frac{100 - 6}{100} = \ 0{,}3\%$$

Sastav ugljika

$$\mathrm{C} = C_{daf} \cdot \frac{100 - M_w \ - \mathrm{A}}{100} = 50{,}5 \cdot \frac{100 - 6 - 0{,}3}{100} = \ 47{,}32\%$$

Sastav vodika

$$\mathrm{H} = H_{daf} \cdot \frac{100 - M_w - \mathrm{A}}{100} = 5{,}9 \cdot \frac{100 - 6 - 0{,}3}{100} = 5{,}53\%$$

Sastav kisika

$$\mathrm{O} = O_{daf} \cdot \frac{100 - M_w - \mathrm{A}}{100} = 43{,}5 \cdot \frac{100 - 6 - 0{,}3}{100} = 40{,}76\%$$

Sastav dušika

$$\mathrm{N} = N_{daf} \cdot \frac{100 - M_w - \mathrm{A}}{100} = = 0{,}1 \cdot \frac{100 - 6 - 0{,}3}{100} = 0{,}09\%$$

Maseni udjeli pepela, vlage, ugljika, vodika, kisika, dušika izraženi po kilogramu goriva

Tablica 2. Sastav pojedinih sudionika izražen po kilogramu goriva

a	0,003	$\frac{kg_a}{kg_G}$
w	0,06	$\frac{kg_w}{kg_G}$
c	0,4732	$\frac{kg_C}{kg_G}$
h	0,0553	$\frac{kg_H}{kg_G}$
n	0,0009	$\frac{kg_N}{kg_G}$
o	0,4076	$\frac{kg_O}{kg_G}$
Σ	1	

Donja ogrjevna vrijednost goriva računa se prema izrazu

$$H_d = \left(q_{p,net,daf} \cdot \frac{100 - A_d}{100}\right) \cdot \frac{100 - M_w}{100} - 24{,}43 \cdot M_w$$

$$H_d = \left(19000 \cdot \frac{100 - 0{,}3}{100}\right) \cdot \frac{100 - 6}{100} - 24{,}43 \cdot 6 = 17659{,}8 \frac{kJ}{kg_G}$$

Prema prethodno provedenom proračunu dobiven je isti sastav goriva i približno ista ogrjevna vrijednost goriva kao i gorivo koje se koristilo pri ispitivanju.
U daljnji proračun ulazi se sa ogrjevnom vrijednošću ispitnog goriva koja iznosi

$$H_{d,i} = 17690\ \frac{kJ}{kg_G}$$

2.1.3. Proračun izgaranja goriva [2]

Maseni proračun izgaranja izvodi se pomoću stehiometrijskih jednadžbi reakcija izgorivih elemenata s kisikom.

Izgaranje ugljika

$C + O_2 \rightarrow CO_2$ - stehiometrijska jednadžba izgaranja ugljika

$1kmol\ C + 1\ kmol\ O_2 \rightarrow 1kmol\ CO_2$ -molarna (količinska) jednadžba

$M_C = 12\ \frac{kg}{kmol}$ -molarna masa ugljika

$M_{O2} = 32\ \frac{kg}{kmol}$ -molarna masa kisika

Uvrštavanjem molarnih masa ugljika i kisika u stehiometrijsku jednadžbu izgaranja ugljika dobije se masena bilanca izgaranja

$12kg\ C + 32kg\ O_2 \rightarrow 44kg\ CO_2$ / :12

$1kg\ C + 2{,}666kg\ O_2 \rightarrow 3{,}666kg\ CO_2$

Izgaranje vodika

$H_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow H_2O$ -stehiometrijska jednadžba izgaranja vodika

$1kmol\ H_2 + 0{,}5kmol\ O_2 \rightarrow 1\ kmol\ H_2O$ -molarna (količinska) jednadžba

$M_{H2} = 2\ \frac{kg}{kmol}$ -molarna masa vodika

Uvrštavanjem molarnih masa vodika i kisika u stehiometrijsku jednadžbu izgaranja vodika dobije se masena bilanca izgaranja

$2kg\ H_2 + 16kg\ O_2 \rightarrow 18kg\ H_2O$ /: 2

$1kg\ H_2 + 8kg\ O_2 \rightarrow 9kg\ H_2O$

2.1.4. Potrebna količina zraka za izgaranje

Potrebna količina zraka za izgaranje računa se prema izrazu [2]

Minimalna potrebna masa kisika

$$o_{min} = 2{,}666\text{c} + 8\text{h} - \text{o}$$

$$o_{min} = 2{,}666 \cdot 0{,}4732 + 8 \cdot 0{,}0553 - 0{,}4076$$

$$o_{min} = 1{,}29635 \frac{kgO2}{kgG}$$

Minimalna potrebna masa zraka

$$l_{min} = \frac{o_{min}}{0{,}232} = \frac{1{,}29635}{0{,}232} = 5{,}5877 \frac{kg_{zr}}{kg_G}$$

Stvarna masa zraka za izgaranje

$\lambda = 1{,}55$ -faktor pretička zraka preuzet iz mjerenja

$$l_{stv} = \lambda \cdot l_{min}$$

$$l_{stv} = 1{,}55 \cdot 5{,}5877 = 8{,}661 \frac{kg_{zr}}{kg_G}$$

2.1.5. Sastav dimnih plinova [2]

Pri proračunu izgaranja u obzir se uzima potpuno izgaranje.

Masa ugljikovog dioksida u dimnim plinovima izražena po jedinci goriva

$$m_{CO2} = 3{,}666 \cdot c = 3{,}666 \cdot 0{,}4732 = 1{,}7348 \frac{kg_{CO2}}{kg_G}$$

Masa vode (vodene pare) u dimnim plinovima izražena po jedinici goriva

$$m_{H2O} = 9 \cdot h + w = 9 \cdot 0{,}0553 + 0{,}06 = 0{,}5577 \frac{kg_{H2O}}{kg_G}$$

Masa dušika u dimnim plinovima izražena po jedinici goriva

$$m_{N2} = n + 0{,}768 \cdot l_{stv} = 0{,}0009 + 0{,}768 \cdot 8{,}661 = 6{,}6525 \frac{kg_{N2}}{kg_G}$$

Masa kisika u dimnim plinovima izražena po jedinici goriva

$$m_{O2} = (\lambda - 1) \cdot o_{min} = (1{,}55 - 1) \cdot 1{,}29635 = 0{,}713 \frac{kg_{O2}}{kg_G}$$

Ukupna masa dimnih plinova

$$m_{dp} = m_{CO2} + m_{H2O} + m_{N2} + m_{O2} = 9{,}658 \frac{kg_{dp}}{kg_G}$$

Molarne mase sastojaka dimnih plinova [4]

$M_{CO2} = 44{,}01$

$M_{H2O} = 18$

$M_{N2} = 28{,}016$

$M_{O2} = 32$

Količina ugljikovog dioksida po kilogramu goriva

$$n_{CO2} = \frac{m_{CO2}}{M_{CO2}} = \frac{1{,}7348}{44{,}01} = 0{,}03942 \frac{kmol_{CO2}}{kg_G}$$

Količina vode po kilogramu goriva

$$n_{H2O} = \frac{m_{H2O}}{M_{H2O}} = \frac{0{,}5577}{18} = 0{,}03098 \frac{kmol_{H2O}}{kg_G}$$

Količina dušika po kilogramu goriva

$$n_{N2} = \frac{m_{N2}}{M_{N2}} = \frac{6{,}6525}{28{,}016} = 0{,}23745 \frac{kmol_{N2}}{kgG}$$

Količina kisika po kilogramu goriva

$$n_{O2} = \frac{m_{O2}}{M_{O2}} = \frac{0{,}713}{32} = 0{,}02228 \frac{kmol_{O2}}{kgG}$$

Količina dimnih plinova

$$n_{dp} = n_{CO2} + n_{H2O} + n_{N2} + n_{O2} = 0{,}33013 \frac{kmoldp}{kgG}$$

Volumeni pojedinih sudionika izraženi po kilogramu goriva pri normalnom stanju 0°C i 1,01325 bar.

$$V_{CO2} = 0{,}8835 \frac{m^3_{CO2}}{kg_G}$$

$$V_{H2O} = 0{,}6938 \frac{m^3_{H2O}}{kg_G}$$

$$V_{N2} = 5{,}2942 \frac{m^3_{N2}}{kg_G}$$

$$V_{O2} = 0{,}4993 \frac{m^3_{O2}}{kg_G}$$

Volumen suhih dimnih plinova izražen po kilogramu goriva

$$V_{sdp} = V_{CO2} + V_{N2} + V_{O2} = 6{,}677 \frac{m^3_{sdp}}{kg_G}$$

Volumen vlažnih dimnih plinova izražen po kilogramu goriva

$$V_{dp} = V_{CO2} + V_{N2} + V_{O2} + V_{H2O} = 7{,}3708 \frac{m^3_{dp}}{kg_G}$$

Udio pojedinog sudionika u suhim dimnim plinova

$$v_{CO2} = 0{,}13232 \frac{m^3_{CO2}}{m^3_{sdp}}$$

$$v_{H2O} = 0{,}10391 \frac{m^3_{H2O}}{m^3_{sdp}}$$

$$v_{N2} = 0{,}79290 \frac{m^3_{N2}}{m^3_{sdp}}$$

$$v_{O2} = 0{,}07478 \frac{m^3_{O2}}{m^3_{sdp}}$$

2.1.6. Adijabatska temperatura izgaranja [3]

Proračun adijabatske temperature izgaranja izvodi se tako da se prvo pretpostavi neka adijabatska temperatura izgaranja, a potom se iterativnim postupkom dobije prava adijabatska temperatura izgaranja. Razlika između pretpostavljene i dobivene temperature ne smije prelaziti 10°C.

$$\vartheta_{ad} = \frac{\eta_L \cdot H_{d,i}}{(1 - hu) \cdot n_{dp} \left[C_{mpdp}\right]_0^{\vartheta_{ad}}} + \vartheta_0$$

Zrak i gorivo ulaze u ložište s temperaturom okoliša 23,9°C

Pretpostavljena teorijska temperatura izgaranja $\vartheta'_{ad} = 1300°C$

$\eta_L = 0{,}98$ - pretpostavljena korisnost ložišta (0,95-0,99) [3]

$hu = 0{,}002$ - pretpostavljeni gubici mehanički nepotpunog izgaranja

Srednji molarni toplinski kapaciteti pojedinih sudionika dimnih plinova pri pretpostavljenoj adijabatskoj temperaturi izgaranja [4].

$$[Cmp_{CO2}]_0^{1300} = 51{,}322 \frac{kJ}{kmolK}$$

$$[Cmp_{H2O}]_0^{1300} = 40{,}407 \frac{kJ}{kmolK}$$

$$[Cmp_{N2}]_0^{1300} = 32{,}067 \frac{kJ}{kmol}$$

$$[Cmp_{O2}]_0^{1300} = 33{,}863 \frac{kJ}{kmol}$$

$$\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{1300} = [Cmp_{CO2}]_0^{1300} \cdot n_{CO2} + [Cmp_{H2O}]_0^{1300} \cdot n_{H2O} + [Cmp_{N2}]_0^{1300} \cdot n_{N2} + [Cmp_{O2}]_0^{1300} \cdot n_{O2}$$

$$\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{1300} = 51{,}322 \cdot 0{,}03942 + 40{,}407 \cdot 0{,}03098 + 32{,}067 \cdot 0{,}23745 + 33{,}863 \cdot 0{,}02228$$

$$\sum n_i [C_{mp,i}]_0^{1300} = 11{,}6437 \frac{kJ}{kmol}$$

$$\vartheta''_{ad} = \frac{0{,}98 \cdot 17690}{(1 - 0{,}011) \cdot 11{,}6437} + 23{,}9 = 1514\,°C$$

Dobivena temperatura se razlikuje za više od deset stupnjeva od pretpostavljene. Zbog toga se ponavlja proračun s dobivenom temperaturom. Nakon nekoliko iteracija dobije se tražena adijabatska temperatura izgaranja u ložištu i iznosi:

$$\vartheta_{ad} = 1493°C$$

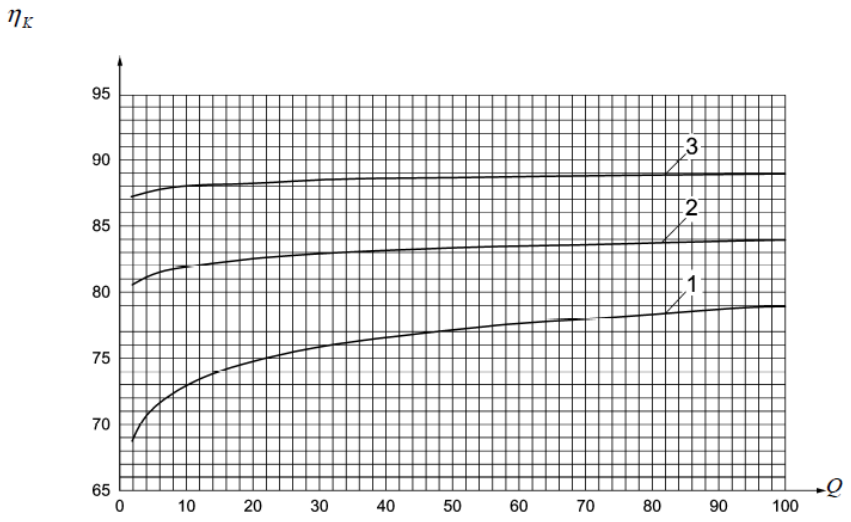
2.1.7 Toplinski gubici i efikasnost kotla

Toplinski gubici kotla određuju se na temelju pretpostavke i uz pomoć podataka iz mjerenja. Stupanj djelovanja kotla ne smije biti manji od danog na slici prema normi EN 303-5 ili izrazima za kotlove koji imaju Q < 100kW [5].

Klasa 5: $\eta_K = 87 + logQ$

Klasa 4: $\eta_K = 80 + 2logQ$

Klasa3: $\eta_K = 67 + 6logQ$



Slika 7. Određivanje minimalnog stupnja djelovanja prema normi [5]

Toplinski gubici sastoje se od gubitaka osjetne topline dimnim plinovima, gubitaka topline dimnim plinovima zbog nepotpunog izgaranja, gubitaka topline kroz ovojnicu kotla te gubitaka zbog neizgorivog goriva u pepelu. Pretpostavljeni stupanj djelovanja kotla računa se indirektnom metodom prema slijedećem izrazu:

$$\eta_{ko} = (1 - h_{out} + h_{opl} + h_u + h_k) \cdot 100\ [\%]$$

h_{out} -relativni osjetni toplinski gubitak dimnih plinova

h_{opl} -relativni gubitak prijenosa topline s oplate na okoliš

h_u -gubitak zbog mehanički nepotpunog izgaranja

h_k -gubitak zbog kemijski nepotpunog izgaranja

2.1.7. 1. Osjetni toplinski gubici dimnih plinova

Dimni plinovi na izlazu iz generatora pare imaju višu temperaturu ϑ_{dp} od okolišne ϑ_{dp0}. To je najveći toplinski gubitak generatora pare.

$\vartheta_{dp} = 195°C$ -pretpostavljena temperatura dimnih plinova na izlazu u okoliš

$\vartheta_{dp0} = 23{,}9°C$ -okolišna temperatura

$\vartheta_{dp,sr} = 109{,}45°C$ -srednja temperatura dimnih plinova

$\mathrm{CO_2} = 13{,}23\%$ -sadržaj ugljičnog dioksida u suhim dimnim plinovima

$C_r = 0{,}0610376$ -sadržaj ugljika u neizgorivim ostacima

Specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova pri standardnim uvjetima određuje se prema sljedećoj formuli [8] :

$$C_{mp,sdp} = 0{,}361 + 0{,}008 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right) + 0{,}034 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right)^2 + \left\{\left[0{,}085 + 0{,}19 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right) - 0{,}14 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right)^2\right]\right\} \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%}\right) + \left\{\left[0{,}03 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right) - 0{,}2 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right)^2\right]\right\} \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%}\right)$$

$$C_{mp,sdp} = 0{,}376 \frac{Wh}{m_n^3 K} = 1{,}354 \frac{kJ}{m_n^3 K}$$

Specifični toplinski kapacitet vodene pare u produktima izgaranja određuje se prema sljedećoj formuli [8]:

$$C_{mpH2O} = 0{,}414 + 0{,}038 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right) + 0{,}034 \cdot \left(\frac{\vartheta_{dp,sr}}{1000°C}\right)^2$$

$$C_{mpH2O} = 0{,}419\frac{Wh}{m_n^3K} = 1{,}508\frac{kJ}{m_n^3K}$$

Toplina koja se gubi zbog hlađenja dimnih plinova na temperaturu okoliša računa se prema izrazu [8] :

$$Q_{dp} = \left[\frac{C_{mp,sdp} \cdot (C - C_r)}{0{,}536 \cdot (\mathrm{CO} + CO_2)} + \frac{C_{mpH2O} \cdot 1{,}92 \cdot (9 \cdot \mathrm{H} + \mathrm{W})}{100}\right] \cdot \left(\vartheta_{dp} - \vartheta_{dp0}\right)$$

$$Q_{dp} = 1823{,}97\frac{kJ}{kg_G}$$

$$h_{out} = \frac{Q_{dp}}{H_{d,i}} = \frac{1823{,}97}{17690} = 0{,}1031 = 10{,}31\%$$

2.1.7.2. Toplinski gubici oplate

Pretpostavljena temperatura oplate ne bi smjela biti veća od 35°C plus temperatura okoliša.

Toplinski tok prema okolišu računa se prema sljedećem izrazu

$$Q_{opl} = A_{opl} \cdot \alpha \cdot \left(\vartheta_{opl} - \vartheta_0\right)[W]$$

$A_{opl} = 2{,}941m^2$ -površina polate iste prosječne temperaure

$\alpha = 9\frac{W}{m^2K}$ -koeficjent prijelaza topline s površine oplate na okoliš

$\vartheta_{opl} = 60°C$ -pretpostavljena temperatura površine oplate

$\vartheta_0 = 23{,}9°C$ -temperatura okoliša

$$Q_{opl} = 2{,}941 \cdot 9 \cdot (60 - 23{,}9)[W]$$

$$Q_{opl} = 955{,}53W = 0{,}95553kW$$

$$h_{opl} = \frac{Q_{opl}}{B \cdot H_{d,i}} = \frac{0{,}95553}{0{,}00190746 \cdot 17690} = 0{,}0283 = 2{,}83\%$$

2.1.7.3. Gubici zbog mehanički nepotpunog izgaranja

Cjelokupna količina goriva koja se unosi u kotao ne sudjeluje u izgaranju jer zbog mehaničkih razloga, ponajviše kod kotlova s rešetkom, dolazi do propadanja određene količine goriva kroz rešetku. Uz to, jedan se dio goriva prenosi dimnim plinovima iz ložišta u konvektivni kanal, a na kraju ostaje jedan dio neizgorenog goriva zarobljen u šljaki.

Pretpostavljeni mehanički gubici nepotpunog izgaranja

$$h_u = 0{,}002 = 0{,}2\%$$

2.1.7.4. Gubici zbog kemijski nepotpunog izgaranja

Ovi gubici se pojavljuje kada se u dimnim plinovima nalaze produkti nepotpunog izgaranja (CO, H_2, CH_4, C_mH_n). Do njih najčešće dolazi zbog nedovoljne količine zraka za izgaranje ili slabog miješanja goriva i zraka.

Vrijednost sadržaja CO u dimnim plinovima izražava se u ppm-ima ili mg/m^3

Maksimalna dozvoljena vrijednost CO 500 mgCO/m3sdp pri udjelu kisika u suhim dimnim plinovima od 10% prema normi 303-5 . Ta vrijednost preračunata u ppm-e iznosi

$$v_{COst} = 400\ ppm = 0{,}0004\frac{m^3_{CO}}{m^3_{sdp}}$$

$$v_{O2st} = 10\%$$

$$v_{O2} = 7{,}03\%$$

$$v_{CO} = v_{COst} \cdot \frac{21 - v_{O2}}{21 - v_{O2st}} = 400 \cdot \frac{21 - 7{,}03}{21 - 10} = 492\ ppm = 0{,}000492\frac{m^3_{CO}}{m^3_{sdp}}$$

Za izračun gubitaka potrebno je v_{CO} preračunati u

$$V_{CO} = v_{CO} \cdot V_{sdp} = 0{,}000492 \cdot 6{,}677 = 0{,}003285\frac{m^3_{CO}}{kg_G}$$

Gubici kemijski nepotpunog izgaranja računaju se prema sljedećoj formuli

$$h_k = \frac{12644 \cdot V_{CO}}{H_{d,i}} \cdot \frac{c}{0{,}536 \cdot V_{CO2}} = \frac{12644 \cdot 0{,}003285}{17690} \cdot \frac{0{,}4732}{0{,}536 \cdot 0{,}8835} = 0{,}0023 = 0{,}23\%$$

Efikasnost kotla

$$\eta_{ko} = 100 - h_{out} - h_{opl} - h_u - h_k = 100 - 10{,}31 - 2{,}83 - 0{,}2 - 0{,}23$$

$$\eta_{ko} = 86{,}43\%$$

2.1.8 Potrebna količina goriva

Maseni protok goriva prema ispitivanjima

$$B = 0{,}00190746\,\frac{kg}{s} = 6{,}86686\,\frac{kg}{h}$$

Vrijeme gorenja za ručno ložene kotlove kod nazivne toplinske snage za prirodno gorivo mora iznositi 2 h.

$$\tau = 2h$$

Masa goriva potrebna za traženi period gorenja

$$B_\tau = \mathrm{B} \cdot \tau = 6{,}86686 \cdot 2 = 13{,}7337\ \mathrm{kg}$$

ρ_{nas} = 650 kg/m3 nasipna gustoća goriva [9]

Volumen goriva za period gorenja

$$V_\tau = \frac{B_\tau}{\rho_{nas}} = \frac{13{,}7337}{650} = 0{,}02113\ m^3 = 21{,}13\ \mathrm{l}$$

2.1.9. Volumen ložišta

Dubina ložišta određena je prema duljini cjepanice (330mm)
Odabrana dubina ložišta

b = 500 mm

Odabrana širina ložišta

d = 560 mm

Visina volumena goriva

$$h_g = \frac{V_\tau}{b \cdot d} = \frac{0{,}02113}{0{,}5 \cdot 0{,}56} = 0{,}075m = 75mm$$

Visina žara preostala od prethodnog loženja

$$h_{\check{z}} = 50\ mm$$

Minimalna potrebna visina ložišta

$$h_{min} = h_g + h_{\check{z}} = 79 + 50 = 125mm$$

Pretpostavljena visina ložišta

$$h = 310\ \text{mm}$$

Volumen ložišta

$$V_{lo\check{z}} = b \cdot d \cdot h = 0{,}5 \cdot 0{,}56 \cdot 0{,}31 = 0{,}0868\ m^3 = 86{,}8l$$

Površina ložišta

$$A_{lo\check{z}} = 2 \cdot b \cdot h + 2 \cdot d \cdot h = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}31 + 2 \cdot 0{,}56 \cdot 0{,}31 = 0{,}6572m^2$$

2.1.10. Određivanje stvarne temperature izgaranja u ložištu

Stvarna temperature izgaranja mora biti niža od teoretske zbog predaje topline, oslobođene izgaranjem, stjenkama ložišta.

Vidni faktor ložišta uzima se iskustveno

$$\omega = 0{,}667$$

Emisijski faktor plamena prema [3]

$$\varepsilon_{pl} = 0{,}8$$

Emisijski faktor stjenke ložišta prema [3]

$$\varepsilon_{st} = 0{,}8$$

Pretpostavljena stvarna temperature izgaranja

$$\vartheta_{pr} = 667°C$$

$$T_{pr} = 664 + 273{,}15 = 941{,}15K$$

Pretpostavljena temperature stjenke ložišta prema [3]

$$\vartheta_{st} = \frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2} + 50 = \frac{90 + 70}{2} + 50 = 130°C$$

$$T_{st} = 130 + 273{,}15 = 403{,}15\ K$$

Konstanta zračenja crnog tijela

$$C_c = 5{,}67\ \frac{W}{m^2(100K^4)}$$

Konstanta zračenja kombinacije stjenki

$$C_{12} = \frac{C_c}{\frac{1}{\varepsilon_{pl}} + \omega \cdot (\frac{1}{\varepsilon_{st}} - 1)} = \frac{5{,}67}{\frac{1}{0{,}8} + 0{,}667 \cdot (\frac{1}{0.8} - 1)} = 4{,}002\,\frac{W}{m^2K^4}$$

Specifična Toplina predana zračenjem u ložištu

$$q_{zr} = C_{12}\left[\left(\frac{Tpr}{100}\right)^4 + \left(\frac{Tst}{100}\right)^4\right] = 4{,}002\left[\left(\frac{941{,}15}{100}\right)^4 + \left(\frac{403{,}15}{100}\right)^4\right] = 30209{,}3\,\frac{W}{m^2}$$

Toplinski tok predan zračenjem u ložištu

$$Q_{zr} = A_{lož} \cdot q_{zr} = 0{,}6572 \cdot 30209{,}3 = 19854\ W$$

Pretpostavljene temperature provjeravaju se tako da toplinski tok zračenjem moram biti jednak toplini koju odaju dimni plinovi kojima se smanjuje temperatura sa teoretske temperature izgaranja ϑ_{ad} na stvarnu temperaturu izgaranja.

$$Q_{zr} = Q_{12} = B \cdot n_{dp} \cdot \left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{pr}}^{\vartheta_{ad}} \cdot (\vartheta_{ad} - \vartheta_{pr})$$

Vrijedi $\vartheta_{pr} = \vartheta_{stv}$, gdje je ϑ_{stv} stvarna temperature izgaranja koja se dobije iterativnim postupkom

$$\vartheta'_{stv} = \vartheta_{ad} - \frac{Q_{zr}}{B \cdot n_{dp} \cdot \left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{pr}}^{\vartheta_{ad}}} = 1493 - \frac{19854}{0{,}00190746 \cdot 0{,}33013 \cdot 38074{,}6} = 665°C$$

Temperatura se razlikuje za manje od 10 °C stoga se za daljnji proračun uzima

$$\vartheta_{stv} = 667°C$$

2.1.11. Izmjena topline konvekcijom u prolazima

Toplinska svojstva vode [4]

Tlak	p_w	2.5 bar
Srednja temperature	ϑ_{wsr}	80 °C
Gustoća	ρ_w	971.8 kg/m^3
specifični toplinski kapacitet	c_{pw}	4.1955 kJ/kgK
toplinska provodnost	λ_w	0.67003 W/mK
dinamička viskoznost	μ_w	0.00035445 Pas
Prandtlov broj	Pr	2.2188
Kinematička viskoznost	ν_w	$3.64633 \cdot 10^7$ m^2/s

Otpor prijenosa topline na vodu i kroz stjenku može se zanemariti.

2.1.11. 1.Parametri prolaza

Tablica 3. Dimenzije prolaza

Prolaz		1	2	3
Dubina kanala	b [mm]	55	30	11
Širina kanala	d [mm]	600	600	600
Visina kanala	h [mm]	330	860	860
Površina presjeka strujanja	A [m^2]	0,033	0,018	0,0066
Površina izmjene topline	A_i [m^2]	0,636	1,02	0,516

2.1.11. 2. Svojstva i veličine stanja dimnih plinova

Gustoća dimnih plinova pri normalnom stanju (101325 bar i 0°C)
ρ_{CO2} = 1,9768 kg/m^3

ρ_{H20} = 0,8036 kg/m^3

ρ_{N2} = 1,2505 kg/m^3

ρ_{O2} = 1,429 kg/m^3

Masa dimnih plinova svedena na kilogram goriva

$$m_{\mathrm{dp}} = 9{,}6579\,\frac{kg_{dp}}{kg_G}$$

Maseni udio pojedinog sudionika u dimnim plinovima

$$x_{CO2} = \frac{m_{CO2}}{m_{dp}} = \frac{1{,}7348}{9{,}6579} = 0{,}17960$$

$$x_{H2O} = \frac{m_{H2O}}{m_{dp}} = \frac{0{,}5577}{9{,}6579} = 0{,}05775$$

$$x_{N2} = \frac{m_{N2}}{m_{dp}} = \frac{6{,}6525}{9{,}6579} = 0{,}68881$$

$$x_{O2} = \frac{m_{O2}}{m_{dp}} = \frac{0{,}7130}{9{,}6579} = 0{,}07382$$

Specifični volumen dimnih plinova pri 0°C

$$v_{dp} = \frac{\rho_{CO2}}{x_{CO2}} + \frac{\rho_{H2O}}{x_{H2O}} + \frac{\rho_{N2}}{x_{N2}} + \frac{\rho_{O2}}{x_{O2}} = \frac{0{,}1850}{0{,}17960} + \frac{0{,}8036}{0{,}05775} + \frac{1{,}2505}{0{,}68881} + \frac{1{,}429}{0{,}0691}$$
$$= 0{,}7652\,\frac{m^3}{kg_{dp}}$$

v_0, p_0 Veličine stanja dimnih plinova pri 0°C

v_1, p_1 veličine stanja pri temperature dimnih plinova

Jednadžbe stanja idealnog plina

$v_0 \cdot p_0 = R \cdot T_0$

$v_1 \cdot p_1 = R \cdot T_1$

Iz jednadžbi stanja idealnog plina proizlazi

$$\frac{v_0}{v_1} = \frac{p_0}{p_1}$$

2.1.11.3. Prvi prolaz

$\vartheta_{1ul} = \vartheta_{stv} = 667°C \qquad T_{1ul} = 940.15\ K$

Pretpostavljena temperatura dimnih plinova na izlazu prvog prolaza

$\vartheta_{1iz} = 480°C \qquad \vartheta_{1iz} = 753{,}15\ K$

Srednja temperature dimnih plinova

$$\vartheta_{1sr} = \frac{\vartheta_{1ul} + \vartheta_{1iz}}{2} = \frac{667 + 480}{2} = 573{,}5°C$$

$$T_{1sr} = 846{,}65\ K$$

Pretpostavljeni toplinski tok

$$Q_1 = B \cdot n_{dp} \cdot \left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{iz1}}^{\vartheta_{ul1}} \cdot (\vartheta_{ul1} - \vartheta_{iz1})$$

$$\left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{iz1}}^{\vartheta_{ul1}} = \left[C_{mpdp}\right]_{480}^{667} = 34{,}9839 \frac{kJ}{kmolK}$$

$$Q_1 = 0{,}00190746 \cdot 0{,}33013 \cdot 34{,}9839 \cdot (667 - 480) = 4{,}12\ kW$$

Specifični volumen dimnih plinova na srednjoj temperaturi prvog prolaza

$$v_1 = v_{dp} \cdot \frac{T_{1sr}}{T_0} = 0{,}7652 \cdot \frac{846{,}65}{273{,}15} = 2{,}372 \frac{m^3}{kg_{dp}}$$

Volumen dimnih plinova pri srednjoj temperaturi prvog prolaza sveden na kilogram goriva

$$V_{1sr} = v_1 \cdot m_{dp} = 2{,}373 \cdot 9{,}6579 = 22{,}909 \frac{m_{dp}^3}{kg_G}$$

Volumni protok dimnih plinova

$$q_{v1} = V_{1sr} \cdot B = 22{,}909 \cdot 0{,}00190746 = 0{,}0437 \frac{m^3}{s}$$

Brzina strujanja dimnih plinova

$$w_1 = \frac{q_{v1}}{\mathrm{A1}} = \frac{0{,}0437}{0.033} = 1{,}324 \frac{m}{s}$$

Prijelaz topline na usporednu nastrujnu ploču [3]

$$\alpha_{kdp1} = 7{,}137 \cdot w_1^{0{,}775} + 5{,}129 \cdot e^{-0{,}6 \cdot w_1} = 7{,}137 \cdot 1{,}324^{0{,}775} + 5{,}129 \cdot e^{-0{,}6 \cdot 1{,}324}$$
$$= 11{,}19 \frac{W}{m^2 K}$$

Prividni koeficjent prijelaza topline zračenjem dimnih plinovima [3]

$$\alpha_{zrdp1} = 2 \frac{W}{m^2 K}$$

Ukupni koeficjent prijelaza topline na strani dimnih plinova u prvom prolazu

$$\alpha_{dp1} = \alpha_{kdp1} + \alpha_{zrdp1} = 11{,}19 + 2 = 13{,}19 \frac{W}{m^2 K}$$

Toplinski tok izmijenjen konvekcijom

$$Q_{k1} = \alpha_{dp1} \cdot A_{i1} \cdot (\vartheta_{1sr} - \vartheta_{wsr}) = 13{,}19 \cdot 0{,}636 \cdot (573{,}5 - 80) = 4140\ W$$

Toplinski tok predan konvekcijom mora biti približno jednak toplinskom toku kojeg oslobađaju dimni plinovi kojima se temperatura s kojom ulaze u prvi prolaz smanjuje na temperaturu na izlazu iz prvog prolaza. Toplinski tokovi se podudaraju pa su pretpostavljene vrijednosti točne.

2.1.11.4. Drugi prolaz

Temperatura dimnih plinova na ulazu u prolaz

$$\vartheta_{2ul} = \vartheta_{stv} = 480°C \qquad T_{2ul} = 753{,}15K$$

Pretpostavljena temperatura dimnih plinova na izlazu prvog prolaza

$$\vartheta_{2iz} = 283°C \qquad \vartheta_{2iz} = 556{,}15K$$

Srednja temperature dimnih plinova

$$\vartheta_{2sr} = \frac{\vartheta_{2ul} + \vartheta_{2iz}}{2} = \frac{480 + 283}{2} = 381{,}5°C$$

$$T_{2sr} = 654{,}65\ K$$

Pretpostavljeni toplinski tok

$$Q_2 = B \cdot n_{dp} \cdot \left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{iz2}}^{\vartheta_{ul2}} \cdot (\vartheta_{ul2} - \vartheta_{iz2})$$

$$\left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{iz2}}^{\vartheta_{ul2}} = \left[C_{mpdp}\right]_{283}^{480} = 32{,}9136\frac{kJ}{kmolK}$$

$$Q_2 = 0{,}00190746 \cdot 0{,}33013 \cdot 32{,}9136 \cdot (480 - 283) = 4{,}083kW$$

Specifični volumen dimnih plinova na srednjoj temperature prvog prolaza

$$v_2 = v_{dp} \cdot \frac{T_{2sr}}{T_0} = 0{,}7652 \cdot \frac{654{,}65}{273{,}15} = 1{,}834\frac{m^3}{kg_{dp}}$$

Volumen dimnih plinova sveden na kilogram goriva

$$V_{2sr} = v_2 \cdot m_{dp} = 1{,}834 \cdot 9{,}6579 = 17{,}713\frac{m_{dp}^3}{kg_G}$$

Volumni protok dimnih plinova

$$q_{v2} = V_{2sr} \cdot B = 17{,}713 \cdot 0{,}00190746 = 0{,}03379\frac{m^3}{s}$$

Brzina strujanja dimnih plinova

$$w_2 = \frac{q_{v2}}{\mathrm{A2}} = \frac{0{,}03379}{0{,}018} = 1{,}877\frac{m}{s}$$

Prijelaz topline na usporednu nastrujnu ploču

$$\alpha_{kdp2} = 7{,}137 \cdot w_2^{0{,}775} + 5{,}129 \cdot e^{-0{,}6 \cdot w_2} = 7{,}137 \cdot 1{,}877^{0{,}775} + 5{,}129 \cdot e^{-0{,}6 \cdot 1{,}877}$$
$$= 13{,}29\frac{W}{m^2K}$$

Toplinski tok izmijenjen konvekcijom

$$Q_{k2} = \alpha_{dp2} \cdot A_{i2} \cdot (\vartheta_{2sr} - \vartheta_{wsr}) = 13{,}29 \cdot 1{,}02 \cdot (381{,}5 - 80) = 4087W$$

Toplinski tok predan konvekcijom mora biti jednak toplinskom toku kojeg oslobađaju dimni plinovi kojima se temperature s kojom ulaze u prvi prolaz smanjuje na temperaturu na izlazu iz prvog prolaza. Toplinski tokovi se podudaraju pa su pretpostavljene vrijednosti točne.

2.1.11.5. Treći prolaz

Temperatura dimnih plinova na ulazu u prolaz

$\vartheta_{3ul} = 283°C \qquad T_{3ul} = 556{,}15K$

Temperatura dimnih plinova na izlazu iz trećeg prolaza

$\vartheta_{3iz} = 198°C \qquad \vartheta_{3iz} = 471{,}15K$

Srednja temperature dimnih plinova

$$\vartheta_{3sr} = \frac{\vartheta_{3ul} + \vartheta_{3iz}}{2} = \frac{283 + 198}{2} = 240{,}5°C$$

$$T_{3sr} = 513{,}65\ K$$

Pretpostavljeni toplinski tok

$$Q_3 = B \cdot n_{dp} \cdot \left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{iz3}}^{\vartheta_{ul3}} \cdot (\vartheta_{ul3} - \vartheta_{iz3})$$

$$\left[C_{mpdp}\right]_{\vartheta_{iz3}}^{\vartheta_{ul3}} = \left[C_{mpdp}\right]_{198}^{283} = 33{,}0536\frac{kJ}{kmolK}$$

$$Q_1 = 0{,}00190746 \cdot 0{,}33013 \cdot 33{,}0536 \cdot (283 - 198) = 1{,}769\ kW$$

Specifični volumen dimnih plinova na srednjoj temperature prvog prolaza

$$v_3 = v_{dp} \cdot \frac{T_{3sr}}{T_0} = 0{,}7652 \cdot \frac{513{,}65}{273{,}15} = 1{,}439\frac{m^3}{kg_{dp}}$$

Volumen dimnih plinova sveden na kilogram goriva

$$V_{3sr} = v_3 \cdot m_{dp} = 1{,}439 \cdot 9{,}6579 = 13{,}898\frac{m_{dp}^3}{kg_G}$$

Volumni protok dimnih plinova

$$q_{v3} = v_{3sr} \cdot B = 13{,}898 \cdot 0{,}00190746 = 0{,}0265\frac{5m^3}{s}$$

Brzina strujanja dimnih plinova

$$w_3 = \frac{q_{v3}}{\mathrm{A3}} = \frac{0{,}0265}{0{,}0066} = 4{,}015\frac{m}{s}$$

Prijelaz topline na usporednu nastrujnu ploču

$$\alpha_{kdp3} = 7{,}137 \cdot w_3^{0{,}775} + 5{,}129 \cdot e^{-0{,}6 \cdot w_3} = 7{,}137 \cdot 4{,}015^{0{,}775} + 5{,}129 \cdot e^{-0{,}6 \cdot 4{,}015}$$
$$= 21{,}428 \frac{W}{m^2 K}$$

Toplinski tok izmijenjen konvekcijom

$$Q_{k3} = \alpha_{dp3} \cdot A_{i3} \cdot (\vartheta_{3sr} - \vartheta_{wsr}) = 21{,}428 \cdot 0{,}516 \cdot (240{,}5 - 80) = 1775W$$

Toplinski tok predan konvekcijom mora biti jednak toplinskom toku kojeg oslobađaju dimni plinovi kojima se temperature s kojom ulaze u prvi prolaz smanjuje na temperaturu na izlazu iz prvog prolaza. Toplinski tokovi se podudaraju pa su pretpostavljene vrijednosti točne.

2.1.12. Ukupno ostvareni toplinski tok i stupanj djelovanja



Slika 8. Razdioba toplinskih tokova

$$Q_{uk} = Q_{lož} + Q_1 + Q_2 + Q_3 = 19{,}854 + 4{,}12 + 4{,}083 + 1{,}769 = 29{,}826\ kW$$

Stupanj djelovanja

$$\eta = \frac{Q_{uk}}{B \cdot H_{d,i}} = \frac{29{,}826}{0{,}00190746 \cdot 17690} = 88{,}39\%$$

2.2 Proračun karakteristika kotla pri opterećenju od 30 %

2.2.1. Ulazni podaci

Podaci s kojima se ulazi u proračun uzeti su prema mjerenjima provedenim u laboratoriju. Sastav goriva i ogrjevna vrijednost su ostale isti kao i kod proračuna pri punom opterećenju. Uz djelomično toplinsko opterećenje mijenja se faktor pretička te temperatura okoline.

$B = 0{,}00057\ \frac{kg_G}{s}$ -maseni protok goriva

$H_{d,i} = 17690\ \frac{kJ}{kg_G}$ -ogrjevna vrijednost goriva

$\lambda = 2{,}7$ -faktor pretička zraka

$CO = 0{,}0228\ \%$ -sadržaj ugljika u suhim dimnim plinovima

$C_r = 0{,}16$ -sadržaj ugljika u neizgorivim ostacima

$\vartheta_0 = 25{,}2°C$ -temperatura okoliša

2.2.2. Produkti izgaranja i njihov sastav

Nakon provedenom proračuna u Excelu dobiju se sljedeći rezultati

Maseni sastav dimnih plinova

$$m_{CO2,dj} = 1{,}7347\ kg_{CO2}/kg_G$$

$$m_{H2O,dj} = 0{,}5575\ kg_{H2O}/kg_G$$

$$m_{N2,dj} = 11{,}5861\ kg_{N2}/kg_G$$

$$m_{O2,dj} = 2{,}2035 kg_{O2}/kg_G$$

Ukupna masa dimnih plinova

$$m_{dp,dj} = 16{,}082\ kg_{dp}/kg_G$$

Količinski sastav dimnih plinova

$$n_{CO2,dj} = 0{,}03942\ kmol_{CO2}/kg_G$$

$$n_{H2O,dj} = 0{,}03095\ kmol_{H2O}/kg_G$$

$$n_{N2,dj} = 0{,}41349\ kmol_{N2}/kg_G$$

$$n_{O2,dj} = 0{,}06886\ kmol_{O2}/kg_G$$

Ukupna količina dimnih plinova

$$n_{dp,dj} = 0{,}55272\ kmol_{dp}/kg_G$$

Volumni sastav dimnih plinova

$$V_{CO2,dj} = 0{,}88344\ m^3_{CO2}/kg_G$$

$$V_{H2O,dj} = 0{,}69357\ m^3_{H2O}/kg_G$$

$$V_{N2,dj} = 9{,}22044\ m^3_{N2}/kg_G$$

$$V_{O2,dj} = 1{,}54310\ m^3_{O2}/kg_G$$

Ukupni volumen suhih dimnih plinova

$$V_{sdp,dj} = 11{,}6470\ m^3_{sdp}/kg_G$$

Ukupni volumen vlažnih dimnih plinova

$$V_{sdp,dj} = 12{,}3405\ m^3_{dp}/kg_G$$

Molarni udio sudionika u dimnim plinovima

$$y_{CO2,dj} = 0{,}071\ kmol_{CO2}/kmol_{dp}$$

$$y_{H2O,dj} = 00{,}056\ kmol_{H2O}/kmol_{dp}$$

$$y_{N2,dj} = 0{,}748\ kmol_{N2}/kmol_{dp}$$

$$y_{O2,dj} = 0{,}135\ \ kmol_{O2}/kmol_{dp}$$

Udio sudionika u suhim dimnim plinovima

$CO_2 = 7{,}59\ \%$

$H_2O = 5{,}95\ \%$

$N_2 = 79{,}17\ \%$

$O_2 = 13{,}25\ \%$

Uz pretpostavljenu temperaturu 1000°C i nešto nižu korisnost ložišta $\eta_{L,dj} = 0{,}95$, dobivena je adijabatska temperatura izgaranja

$$\vartheta_{ad,dj} = 941°C$$

2.2.3. Toplinski gubici

Osjetni toplinski gubici dimnih plinova

$\vartheta_{dp,dj} = 118°C$ Pretpostavljena izlazna temperatura dimnih plinova

$\vartheta_{dp0,dj} = 25{,}2°C$ Temperatura okoliša

$\vartheta_{dp,sr,dj} = 71{,}6°C$ Srednja temperatura

$\mathrm{CO}_{2,dj} = 7{,}59\ \%$ Sadržaj ugljičnog dioksida u suhim dimnim plinovima

$C_r = 0{,}016$ Sadržaj ugljika u neizgorivim ostacima

$$C_{mp,sdp,dj} = 0{,}369\frac{Wh}{m_n^3K} = 1{,}328\frac{kJ}{m_n^3K}$$

$$C_{mpH2O,dj} = 0{,}417\frac{Wh}{m_n^3K} = 1{,}501\frac{kJ}{m_n^3K}$$

Toplina koja se gubi zbog hlađenja dimnih plinova na temperaturu okoliša računa se prema izrazu

$$Q_{dp,dj} = 1588{,}3\frac{kJ}{kg_G}$$

$$h_{out,dj} = 0{,}0898 = 8{,}98\%$$

Toplinski gubici kroz oplatu

Pri djelomičnom opterećenju kotla pretpostavljena je nešto niža srednja temperatura oplate te niži koeficjent prijelaza topline

$$\vartheta_{opl,dj} = 52\ °C$$

$$\alpha_{dj} = 7\ \frac{W}{m^2K}$$

$$Q_{opl,dj} = 545 = 0{,}545\ kW$$

$$h_{opl,dj} = 0{,}054 = 5{,}4\ \%$$

Gubici zbog mehanički nepotpunog izgaranja

$$h_{u,dj} = 0{,}002 = 0{,}2\%$$

Gubici zbog kemijski nepotpunog izgaranja

$$v_{COst,dj} = 400\ ppm = 0{,}0004\frac{m^3_{CO}}{m^3_{sdp}}$$

$$v_{O2st,dj} = 10\%$$

$$O_{2,dj} = 7{,}59\ \%$$

$$v_{CO,dj} = 0{,}000225\frac{m^3_{CO}}{m^3_{sdp}}$$

$$V_{CO,dj} = 0{,}00262\frac{m^3_{CO}}{kg_G}$$

$$h_{k,dj} = 0{,}0019 = 0{,}19\%$$

Efikasnost kotla

$$\eta_{uk,dj} = 100 - h_{out,dj} - h_{opl,dj} - h_{u,dj} - h_{k,dj} = 100 - 8{,}98 - 5{,}4 - 0{,}2 - 0{,}19$$

$$\eta_k = 85{,}23$$

Maseni protok goriva prema ispitivanjima

$$B = 0{,}00057\frac{kgG}{s} = 2{,}052\frac{kgG}{h}$$

2.2.4. Određivanje stvarne temperature izgaranja u ložištu

Prilikom određivanja stvarne temperature izgaranja u ložištu, zbog niže adijabatske temperature izgaranja pretpostavljeni su i niži faktori emisivnosti plamene i stjenke ložišta.

$\varepsilon_{pl} = 0{,}65$ - emisijski faktor plamena

$\varepsilon_{st} = 0{,}65$ - emisijski faktor stjenke ložišta

$C_{12,dj} = 2{,}988 \frac{W}{m^2 K^4}$ - konstanta zračenja kombinacije stjenki

$$\vartheta_{stv,dj} = 465\ °C$$

$$Q_{zr,dj} = 5311\ W$$

2.2.5. Izmjena topline konvekcijom u prolazima

Tablica 4. Izmijenjena toplina konvekcijom po prolazima

Prvi prolaz		
$\vartheta_{1,dj,ul}$	465	$°C$
$\vartheta_{1,dj,iz}$	295	$°C$
$w_{1,dj}$	0,512	m/s
$Q_{1,dj}$	1722	W
$Q_{1k,dj}$	1721	W
Drugi prolaz		
$\vartheta_{2,dj,ul}$	295	$°C$
$\vartheta_{2,dj,iz}$	161	$°C$
$w_{2,dj}$	0,719	m/s
$Q_{2,dj}$	1326	W
$Q_{2k,dj}$	1329	W
Treći prolaz		
$\vartheta_{3,dj,ul}$	161	$°C$
$\vartheta_{3,dj,iz}$	121	$°C$
$w_{3,dj}$	1,621	m/s
$Q_{3,dj}$	385	W
$Q_{3k,dj}$	383	W

Ukupni toplinski tok i stupanj djelovanja ostvaren pri djelomičnom opterećenju



Slika 9. Razdioba toplinskih tokova kotla pri djelomičnom opterećenju

$$Q_{uk,dj} = 8{,}744\text{kW}$$

$$\eta_{dj} = 86{,}7\%$$

2.3. Usporedba najvažnijih parametara dobivenih proračunom i mjerenjima

Usporedba prikazanih rezultata pokazuje da postoje određene odstupanja vrijednosti pojedinih parametara koja su posljedica zaokruživanja vrijednosti i računskih formula.

Tablica 5. Usporedba rezultata pri punom opterećenju

REZULTATI PRI PUNOM OPTEREĆENJU			Proračun	Mjerenja
ULAZNI PODACI				
Maseni protok goriva	B	kg_G/h	6,86686	6,86686
Donja ogrjevna vrijednost goriva	H_u	kJ/kg_G	17690	17690
Sadržaj CO u suhim dimnim plinovima	CO	%	0,0259	0,0259
DOBIVENE VRIJEDNOSTI				
Temperatura izlaza dimnih plinova	ϑ_{dp}	°C	198,5	193
Sadržaj CO_2 u suhim dimnim plinovima	CO_2	%	13,232	13,171
Sadržaj O_2 u suhim dimnim plinovima	O_2	%	7,479	7,339
Osjetni toplinski gubici dimnih plinova	G_{dp}	kJ/kg_G	1824	1819
Relativni osjetni toplinski gubitak dimnih plinova	h_{dp}	%	10,29	10,31
Toplinski gubitak oplate kotla	G_{opl}	W	955	1000

Relativni osjetni toplinski gubitak oplate kotla	h_{dp}	%	2,8	2,96
Stupanj djelovanja indirektnom metodom	η_{uk}	%	86,43	86,5
Toplinski tok predan vodi	Q	kW	29,83	29,4
Stupanj djelovanja direktnom metodom	η	%	88,39	87,15

Tablica 6. Usporedba rezultata mjerenja i proračuna pri djelomičnom opterećenju

REZULTATI PRI DJELOMIČNOM OPTEREĆENJU			Proračun	Mjerenja
ULAZNI PODACI				
Maseni protok goriva	B_{dj}	kg_G/h	2,052	2,052
Donja ogrjevna vrijednost goriva	$H_{u,dj}$	kJ/kg_G	17690	17690
Sadržaj CO u suhim dimnim plinovima	$CO_{,dj}$	%	0,228	0,228
DOBIVENE VRIJEDNOSTI				
Temperatura izlaza dimnih plinova	$\vartheta_{dp,dj}$	°C	121	115
Sadržaj CO_2 u suhim dimnim plinovima	$CO_{2,dj}$	%	7,59	7,57
Sadržaj O_2 u suhim dimnim plinovima	$O_{2,dj}$	%	13,25	13,1
Osjetni toplinski gubici dimnih plinova	$G_{dp,dj}$	kJ/kg_G	1583,4	1526,9
Relativni osjetni toplinski gubitak dimnih plinova	$h_{dp,dj}$	%	8,95	8,89
Toplinski gubitak oplate kotla	$G_{opl,dj}$	W	544	600
Relativni osjetni toplinski gubitak oplate kotla	$h_{dp,dj}$	%	5,4	5,95
Stupanj djelovanja indirektnom metodom	$\eta_{uk,dj}$	%	85,23	84,92
Toplinski tok predan vodi	Q_{dj}	kW	8,744	8,6
Stupanj djelovanja direktnom metodom	η_{dj}	%	86,7	85,3

3. PRORAČUN GODIŠNJEG STUPNJA DJELOVANJA KOTLA PREMA NORMI prEN15316 4-1

3.1. Područje djelovanja

Ovaj Europski Standard dio je serije standarda koji propisuju metode kojima se proračunavaju energetski zahtjevi sustava i efikasnost sustava za sustave prostornog grijanja i toplovodne sustave u domaćinstvima

Ovaj standard (prEN 15316-4-1) određuje:

- Zahtijevane ulazne podatke
- Proračunske metode
- Rezultirajuće izlazne podatke
- Metodu kojom se proračunava energetska učinkovitost uređaja za proizvodnju toplinske energije izgaranjem goriva u kotlu koja se Kristi za prostorno grijanje

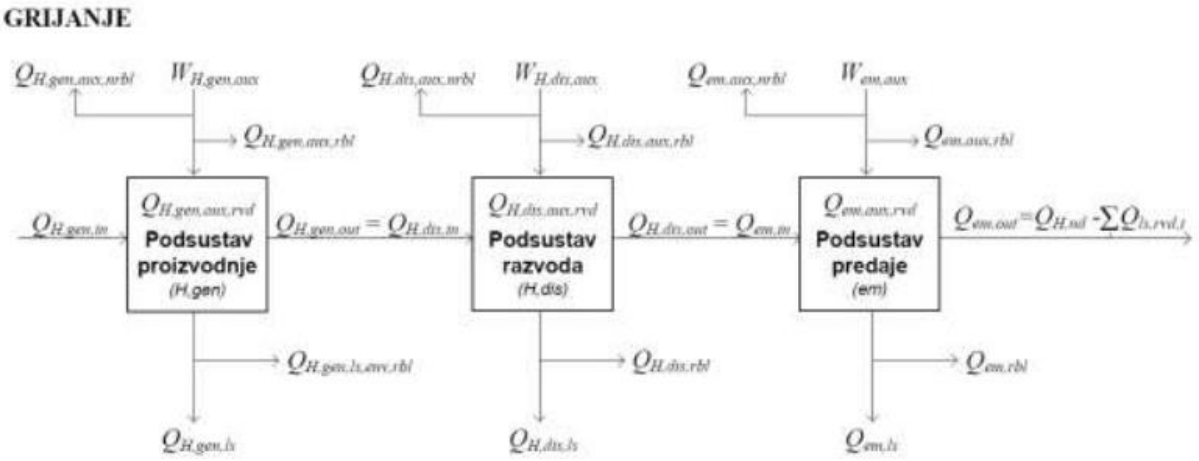
Ovaj standard određuje metode za proračunavanje
-Toplinskih gubitaka grijanja i kućanskih sustava za proizvodnju tople vode
-Povratne toplinske gubitke za prostorno grijanje i kućanskih sustava za proizvodnju tople vode
-Pomoćne energije grijanja i kućanskih sustava za proizvodnju tople vode

Ovaj standard određuje proračun energetske učinkovitost pod sustava za proizvodnju topline za grijanje vode ,uključujući kontrolu koja se bazira na procesu izgaranja goriva, koji rade s konvencionalnim fosilnim gorivima jednako kao i sa obnovljivima.
Ovaj standard ne pokriva dimenzioniranje ili inspekciju kotlova.
Ovaj standard se također primjenjuje na generatore topline za grijanje ili za kombiniranu primjenu kao što je potrošna topla voda, hlađenje I grijanje.
Kotlovi za proizvodnju potrošne tople vode uzimaju se u proračun u poglavlju M8-8.
Ovaj Europski Standard je glavni standard za podsustave kojima se topline proizvodi izgaranjem (kotlovi, biomasa) i također je namijenjen za proizvodnju potrošne tople vode i/ili prostorno grijanje. Te vrijednosti ulazni su podaci za računanje cjelokupne energetske upotrebe s obzirom na prEN 15603 i prEN 15316-1.

3.2. Postupak proračuna

Proračun je moguće provesti na satnoj, dnevnoj, mjesečnoj ili godišnjoj razni. Na slici je dan shematski prikaz podjele termotehničkog sustava grijanja, a u ovom proračunu u razmatranje i analizu uzima se pod sustav proizvodnje topline.

Svi podaci i vrijednosti koji se koriste u proračunu nalaze se u normi prEN 15316-4-1.



Slika 10. Shematski prikaz podjele termotehničkog sustava grijanja [8]

3.3. Tijek proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti podsustava proizvodnje energije (kotla)

Prilikom proračuna godišnje efikasnosti kotla polazi se od pretpostavke da je kotao instaliran u obiteljsku kuću, površine $A = 200\ m^2$.

Toplinsko opterećenje (gubici) su

$$q_{em} = 215 \frac{kWh}{m^2}$$

Sezona grijanja traje osam mjeseci u godini

$$n_{mth} = 8$$

$$n_d = 30$$

Broj sati u godini za koje je potrebno grijanje

$$t_{h,uk} = n_{mth} = 24 \cdot n_d \cdot n_{mth} = 5760 \frac{h}{a}$$

Ukupna godišnja potreba za toplinskom energijom

$$Q_{em} = q_{em} \cdot A \cdot t_{h,uk} = 43000 \frac{kWh}{a}$$

$\varepsilon_c = 1{,}32$ -faktor uvećanja opterećenja zbog sustava razvoda i predaje topline

Toplinska energija na ulazu u podsustav razvoda

$$Q_{H;dis;in} = Q_{em} \cdot \varepsilon_c = 56760 \ \frac{kWh}{a}$$

$$Q_{H;gen;out} = Q_{H;dis;in} = 56760 \ \frac{kWh}{a}$$

Prosječna snaga podsustava proizvodnje

$$P_{n;gen,out} = \frac{Q_{H;gen;out}}{t_{h,uk}} = 9{,}854 \ kW$$

3.3.1. Ulazni podaci

Tip kotla -atmosferski kotao na krutu biomasu

Kontrolni tip kotla -kotao postavljen na pod

Mjesto kotla -kotao postavljen u kotlovnicu

Gorivo -drvni peleti

$P_n = 29{,}4 \ kW$ -snaga kotla pri punom opterećenju

$P_{int} = 8{,}82 \ kW$ -snaga kotla pri djelomičnom opterećenju

$\beta_{H;gen} = \frac{P_{n;gen,out}}{P_n} = 0{,}34$ -faktor opterećenja kotla

$c_1 = 81$; $c_2 = 2$ -koeficjenti za proračun učinkovitosti kotla

Učinkovitost kotla pri punom opterećenju, u ovisnosti o učinku, dana je slijedećim izrazom

$$\eta_{gen;Pn} = c_1 + c_2 \cdot \left(\frac{P_n}{1kW}\right) = 83{,}9 \ \%$$

Učinkovitost kotla pri djelomičnom opterećenju, u ovisnosti o učinku, dana je slijedećim izrazom

$c_3 = 77$; $c_4 = 3$

$$\eta_{gen;Pint} = c_3 + c_4 \cdot \left(\frac{P_n}{1kW}\right) = 81{,}4\%$$

Toplinski gubitak kotla u stanju pripravnosti računa se prema sljedećem izrazu

$c_5 = 8$; $c_6 = -0{,}28$

$$\mathrm{f}_{gen;ls;P0} = c_5 \cdot \frac{(P_n)^{c_6}}{100} = 0{,}031$$

2.3.2. Toplinski gubici kotla

Toplinski gubici kotla dijele se na iskoristive i neiskoristive gubitke, dok se iskoristivi gubici dijele na iskorištene i neiskorištene toplinske gubitke.

-proračun toplinskih gubitaka kotla pri punom opterećenju

$\vartheta_{HC;mn} = 71{,}2°C$ -srednja radna temperature kotlovske vode

$\vartheta_{gen;test;Pn} = 70°C$ - srednja temperatura vode u kotlu na ispitnim temperaturama

$f_{corr;Pn} = 0{,}04\ \%/°\mathrm{C}$-faktor korekcije kod standardnih kotlova na biomasu certificiranih sukladno odgovarajućim EN normama

$f_{Hs/Hi} = 1{,}08$ -faktor konverzije za dostavljenu energiju

Korigirana učinkovitost kotla pri punom opterećenju računa se prema izrazu

$$\eta_{gen;Pn;corr} = \eta_{gen;Pn} + f_{corr;Pn} \cdot \left(\vartheta_{gen;test;Pn} - \vartheta_{HC;mn}\right) = 83{,}852\%$$

Korigirani toplinski gubici kotla pri punom opterećenju računaju se prema izrazu

$$P_{H;gen;ls;Pn;corr} = \frac{(f_{Hs/Hi} - \eta_{gen;Pn;corr})}{\eta_{gen;Pn;corr}} \cdot P_n = 8{,}47kW$$

-proračun toplinskih gubitaka kotla pri djelomičnom opterećenju

$\vartheta_{gen;test;Pint} = 70°C$ - Annex B, Table B.1

$f_{corr;Pint} = 0{,}05\ \%/°\mathrm{C}$ -faktor korekcije prema Annex B, Table B.4

Korigirana učinkovitost kotla pri djelomičnim opterećenju računa se prema izrazu

$$\eta_{gen;Pint;corr} = \eta_{gen;Pint} + f_{corr;Pint} \cdot \left(\vartheta_{gen;test;Pint} - \vartheta_{HC;mn}\right) = 81{,}34\%$$

Korigirani toplinski gubici kotla pri djelomičnom opterećenju računaju se prema izrazu

$$P_{H;gen;ls;Pint;corr} = \frac{(f_{Hs/Hi} - \eta_{gen;Pint;corr})}{\eta_{gen;Pint;corr}} \cdot P_{int} = 2{,}89kW$$

-proračun toplinskih gubitaka kotla za stanje pripravnosti

$\vartheta_{i;brm} = 13°C$ -temperatura prostorije u kojoj se nalazi kotao prema Annex B, Table B.8

$f_{gen;ls;P0} = 0{,}031$ -standardna vrijednost za toplinski gubitak u stanju pripravnosti

$\Delta\vartheta_{gen;test;P0} = 50°C$ -temperature prema Annex B, Table B.3

Korigirani toplinski gubici kotla pri 0 % opterećenja računaju se prema sljedećem izrazu

$$P_{H;gen;ls;P0;corr} = \frac{P_n}{\eta_{gen;Pn}} \cdot f_{gen;ls;P0} \cdot f_{Hs/Hi} \cdot \left(\frac{\vartheta_{Hc;mn} - \vartheta_{i;brm}}{\Delta\vartheta_{gen;test;P0}}\right)^{1{,}25} = 1{,}42kW$$

-proračun toplinskih gubitaka kotla pri specifičnom omjeru kapaciteta $\boldsymbol{\beta_{H;gen}}$

$\beta_{H;gen} = 0{,}34$ -specifični omjer kapaciteta kotla

$\beta_{Pint} = 0{,}3$ -omjer djelomičnog i punog kapaciteta

$\beta_{Pn} = 1$ -omjer punog kapaciteta

$t_{H;use} = 5760h/a$ -broj sati grijanja u mjesecu

Vrijede uvjet: $\beta_{Pint} < \beta_{H;gen} < \beta_{Pn}$, pa se toplinski gubici generatora računaju prema izrazu

$$P_{H;gen;ls;Px} = \left(\frac{\beta_{H;gen} - \beta_{Pint}}{\beta_{Pn} - \beta_{Pint}}\right) \cdot \left(P_{H;gen;ls;Pn;corr} - P_{H;gen;ls;Pint;corr}\right) + P_{H;gen;ls;Pint;corr} = 3{,}209kW$$

Toplinski gubici u promatranom vremenskom intervalu rada kotla računaju se prema izrazu

$$Q_{H;gen;ls} = P_{H;gen;ls;Px} \cdot t_{H;use} = 18483\ kWh/a$$

2.3.3. Ukupna potrebna pomoćna energija podsustava proizvodnje

Standardne vrijednosti za računanje potrošne snage pomoćne energije računa se prema izrazu

$$P_{aux;P(n,int,0)} = \frac{c_7 + c_8 \cdot {P_n}^n}{1000}$$

Tablica 7. Parametri za proračun potrebne energije za pogon pomoćnih uređaja

opterećenje	c_7	c_8	n
P_n	40	0,35	1
P_{int}	20	0,1	1
P_0	15	0	0

Na temelju gornjeg izraza dobije se

$$P_{aux;Pn} = 0{,}05029\ kW$$

$$P_{aux;Pint} = 0{,}0229\ kW$$

$$P_{aux;P0} = 0{,}015\ kW$$

Na temelju uvjeta $\beta_{Pint} < \beta_{H;gen} < \beta_{Pn}$ može se izračunati prosječna vrijednost pomoćne energije linearnom interpolacijom prema izrazu

$$P_{H;aux;Px} = \left(\frac{\beta_{H;gen} - \beta_{Pint}}{\beta_{Pn} - \beta_{Pint}}\right) \cdot \left(P_{H;aux;Pn} - P_{H;aux;Pint}\right) + P_{H;aux;Pint} = 0{,}0245\ kW$$

Ukupna pomoćna toplinska energija kotla računa se prema izrazu

$$W_{H;gen} = P_{H;aux;Px} \cdot t_{H;use} = 141{,}12\ kWh/mth$$

2.3.4. Proračun vraćene i iskoristive pomoćne energije

Dio pomoćne energije predan podsustavu razvoda

$f_{aux;rvd} = 0{,}75$ standardna vrijednost

Dio pomoćne energije predan grijanom prostoru

$f_{aux;rbl} = 1 - f_{aux;rvd} = 0{,}25$

$f_{brm} = 0{,}3$ faktor smanjenja temperature u ovisnosti o lokaciji kotla

Vraćena pomoćna energija, predana ogrjevnom mediju, računa se prema izrazu

$$Q_{H;gen;aux;rvd} = W_{H;gen} \cdot f_{aux;rvd} = 105{,}84\ kWh/a$$

Iskoristiva pomoćna energija koja se predaje grijanom prostoru

$$Q_{H;gen;aux;rbl} = W_{H;gen} \cdot (1 - f_{brm}) \cdot f_{aux;rbl} = 24{,}7\ kWh/a$$

2.3.5. Iskoristivi toplinski gubitak kroz ovojnicu kotla

$f_{env} = 0{,}5$ faktor prema Annex B, table B.7

Iskoristivi toplinski gubitak kroz ovojnicu kotla računa se prema izrazu

$$Q_{H;gen;ls;env;rbl} = P_{H;gen;ls;P0;corr} \cdot (1 - f_{brm}) \cdot f_{env} \cdot t_{H;use} = 2862{,}72\ kWh/a$$

2.3.6. Ekvivalentna toplinska energija koju je potrebno gorivom isporučiti podsustavu proizvodnje

Osnovna toplinska bilanca podsustava proizvodnje računa se prema izrazu

$$E_{gen;in} = Q_{gen;out} - Q_{H;gen;aux;rvd} + Q_{gen;ls} = 75127{,}2\ kWh/mth$$

2.3.7. Godišnji stupanj djelovanja kotla

$$\eta_{k,god} = \frac{Q_{gen;out}}{E_{gen;in}} = \frac{56760}{75127{,}2} = 0{,}7554 = 75{,}54\%$$

4. ZAKLJUČAK

U prvom dijelu rada cilj je bio izraditi proračun toplinskih karakteristika kotla i stupnja djelovanja pri punom i djelomičnom opterećenju, te dobivene rezultate usporediti s rezultatima dobivenim mjerenjem u laboratoriju. Rezultati su pokazali da se vrijednosti dobivene proračunom i mjerenjem ne razlikuju jako puno. Stupanj djelovanja kotla prema indirektnoj metodi dobiven proračunom $\eta_{ko} = 86,43\%$, te stupanj djelovanja prema indirektnoj metodi dobiven mjerenjem $\eta_{ko,m} = 86,5\%$. Stupanj djelovanja dobiven direktnom metodom prema proračunu $\eta = 88,39\ \%$, te stupanj djelovanja direktnom metodom prema mjerenjima $\eta_m = 87,15\ \%$. Razlika u stupnjevima djelovanja proizlazi zbog većeg toplinskom toku, 29,83 kW, koji je dobiven prema proračunu, u odnosu na toplinski tok, 29,4 kW , prema mjerenjima.

Pri djelomičnom opterećenju kotla izgaranje se odvija s većim faktorom pretička zraka što za posljedicu ima veću količinu dimnih plinova koja smanjuje teorijsku temperaturu izgaranja, a zbog manjeg opterećenja niža je i temperatura na izlazu dimnih plinova. Postignuti stupanj djelovanja kotla direktnom metodom kod mjerenja je $\eta_{dj,m} = 85,3\ \%$, a kod proračuna $\eta_{dj} = 86,7\ \%$.

U drugom dijelu rada proveden je proračun godišnjeg stupnja djelovanja kotla prema normi prEN15361-4. Proračun je proveden uzimajući u obzir pretpostavljene podatke za obiteljsku kuću s prosječnim toplinskim zahtjevima. Dobiveni godišnji stupanj djelovanja iznosi $\eta_{k,god} = 75,54\ \%$. To je posljedica toga što kotao tokom cijele godine ne radi pri nazivnom toplinskom opterećenju, već postoje razdoblja u godini kada kotao radi pri djelomičnom opterećenju ili je u pripravnosti.

PRILOZI

CD-R disc

LITERATURA

[1] Galović, A.: ***Termodinamika I,*** V. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[2] Galović, A.: ***Termodinamika II,*** V. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[3] Kreuh L.: ***Generatori pare,*** Školska knjiga, Zagreb, 1978.

[4] Alfirević I. i suradnici.: ***Krautov strojarski priručnik,*** II. Izdanje, Sajema d.o.o., Zagreb, 2009.

[5] Halasz B.; Galović A.; Boras I.: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.

[5] Norma HRN EN 303-5, 2012.

[6] Norma prEN 15316-4-1, 2015.

[7] Norma EN 15296

[8] Norma HRN EN 304

[9] Norma SIS-CEN/TS 14961:2005

[10] www.drvnipelet.hr

[11] Bosch, Katalog Solid 2000 B