

Projekt ispitne stanice za kotlove na drvene pelete

Cigić, Igor

Master's thesis / Diplomski rad

2014

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:235:786537>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Igor Cigić

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović, dipl. ing.

Student:

Igor Cigić

Zagreb, 2014.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof dr. sc. Damiru Doviću na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Želio bih zahvaliti i prof. dr. sc. Srećku Švaiću na savjetima i pruženoj pomoći prilikom provedbe ispitivanja.

Na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i roditeljima na razumijevanju i pruženoj potpori tijekom cjelokupnog studiranja, pa tako i prilikom izrade ovog rada.

Igor Cigić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	V
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	XII
1. UVOD.....	1
1.1. Biomasa.....	1
1.2. Svojstva biomase.....	3
1.2.1. Kemijski sastav biomase	3
1.2.2. Ogrjevna vrijednost biomase	5
1.3. Drvna biomasa	6
1.4. Proizvodnja toplinske energije iz drvne biomase	8
1.4.1. Kamini i peći na biomasu	9
1.4.2. Toplovodni kotlovi.....	10
2. ZAHTJEVI ZA TOPLOVODNE KOTLOVE PREMA HRN EN 303-5	14
2.1. Opći zahtjevi	14
2.2. Konstrukcijski zahtjevi	15
2.2.1. Projektni zahtjevi	16
2.3. Sigurnosni zahtjevi.....	17
2.3.1. Općenito	17
2.3.2. Sigurnost protiv povrata plamena kod automatskog loženja	17
2.3.3. Sigurnost protiv prekomjernog loženja kotla ili smetnji kod dobave goriva.....	19
2.3.4. Sigurnost protiv dobave nedovoljne količine zraka ili nepotpunog izgaranja	19
2.3.5. Površinske temperature	19
2.3.6. Curenje sustava za izgaranje	20
2.3.7. Uređaji za regulaciju ograničavanje temperature.....	20
2.3.8. Kotlovski pribor	21
2.4. Zahtjevi na pogonske karakteristike kotla	21
2.4.1. Općenito	21

2.4.2.	Efikasnost kotla.....	21
2.4.3.	Temperatura dimnih plinova.....	22
2.4.4.	Potlak dimnjaka	23
2.4.5.	Minimalni toplinski učin.....	23
2.4.6.	Ograničenja emisija	23
3.	ISPITNA LINIJA.....	24
3.1.	Hidraulički proračun	24
3.1.1.	Dimenzioniranje cjevovoda metodom izbora brzine strujanja	24
3.1.2.	Pad tlaka.....	25
3.1.3.	Membranska ekspanzijska posuda.....	27
3.2.	Rezultati hidrauličkog proračuna	29
3.3.	Izvedba ispitne linije	30
3.3.1.	Mjerna linija za analizu dimnih plinova	31
3.3.2.	Hidraulički krug.....	33
3.4.	Mjerna oprema	34
3.4.1.	Uređaj za mjerenje sastava dimnih plinova MRU Nova 2000	34
3.4.2.	Ultrazvučni kalorimetar SIEMENS tip UH50	35
3.4.3.	Vaga tip Ohaus CH30R11	36
3.4.4.	Termoparovi.....	37
3.4.4.1.	Termoparovi na strani vode, CuKo (Tip T).....	37
3.4.4.2.	Termopar u ložištu NiCr-Ni (Tip K).....	37
3.4.4.3.	Kontaktni termopar	38
3.4.5.	A/D pretvarač proizvođača Agilent	39
4.	ISPITIVANJE KOTLA NA BIOMASU	40
4.1.	Općenito	40
4.2.	Mjerene veličine.....	40
4.3.	Metoda i vrijeme ispitivanja	41
4.4.	Određivanje toplinskog učina i efikasnosti kotla.....	41
4.4.1.	Metode mjerenja toplinskog učina.....	41
4.4.1.1.	Određivanje toplinskog učina u krugu kotla.....	41
4.4.1.2.	Određivanje toplinskog učina preko izmjenjivača topline.....	41
4.4.2.	Određivanje nominalnog toplinskog učina	42

4.4.3.	Određivanje minimalnog toplinskog učina	42
4.4.4.	Određivanje efikasnosti kotla (direktna metoda)	42
4.5.	Određivanje vrijednosti emisija	43
4.6.	Opis postupka ispitivanja	43
4.6.1.	Mjerenje protoka goriva	43
4.6.1.1.	Mjerenje protoka goriva iz ložišta	43
4.6.1.2.	Mjerenje protoka goriva iz spremnika goriva	43
4.6.2.	Zapaljenje i predispitni period	44
4.6.3.	Ispitni period	44
4.7.	Mjerni protokol	45
4.8.	Objekt ispitivanja	48
4.9.	Rezultati ispitivanja	50
4.9.1.	Klasa kotla	51
5.	TERMODINAMIČKI PRORAČUN	52
5.1.	Ulazni podaci	52
5.2.	Specifične topline produkata izgaranja	53
5.2.1.	Specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova pri standardnim uvjetima ..	53
5.2.2.	Specifični toplinski kapacitet vodene pare	54
5.3.	Proračun parametara izgaranja	54
5.3.1.	Stehiometrijska količina kisika	55
5.3.2.	Potrebna minimalna količina zraka	55
5.3.3.	Količina suhih dimnih plinova kod stehiometrijskog izgaranja	55
5.3.4.	Određivanje $\text{CO}_{2\text{max}}$	56
5.3.5.	Određivanje $\text{SO}_{2\text{max}}$	56
5.3.6.	Stvarna količina dimnih plinova	56
5.3.7.	Količina vodene pare u dimnim plinovima	57
5.4.	Efikasnost kotla	57
5.4.1.	Indirektna metoda	57
5.4.1.1.	Gubitak osjetne topline dimnim plinovima q_A	58
5.4.1.2.	Gubitak topline dimnim plinovima zbog nepotpunog izgaranja q_U	58
5.4.1.3.	Gubici topline kroz ovojniciu kotla q_S	58
5.4.1.4.	Gubitak topline zbog neizgorenog ostatka goriva u pepelu q_B	59

5.4.2. Direktna metoda.....	60
5.5. Proračun toplinskog učina kotla.....	60
5.6. Proračun toplinske energije unesene gorivom	61
5.7. Ispitno izvješće.....	62
6. ZAKLJUČAK.....	63
LITERATURA.....	65
PRILOZI.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1.	CO ₂ neutralnost biomase [20]	2
Slika 2.	Sastav biomase [21].....	3
Slika 3.	Ovisnost ogrjevnih vrijednosti o sadržaju vlage u gorivu [21]	6
Slika 4.	a) Briketi, b) Peleti [20].....	7
Slika 5.	Primjer grijanja kućanstava pomoću biomase [20]	8
Slika 6.	Osnovni dijelovi kamina na pelete [3]	9
Slika 7.	Kotao na pelete [6]	10
Slika 8.	Kotao na biomasu [7]	11
Slika 9.	Pirolitički kotao [8]	12
Slika 10.	Efikasnost kotla u postotcima.....	22
Slika 11.	Dijagram pada tlaka za čelične cijevi.....	26
Slika 12.	Pumpa Wilo-TOP-STG 40/10	29
Slika 13.	Ekspanzijska posuda IMERA R12 – 12L.....	29
Slika 14.	Shema ispitne linije	30
Slika 15.	Horizontalna izvedba dimovodnog priključka	31
Slika 16.	Mjerna linija za analizu dimnih plinova.....	31
Slika 17.	Konstrukcija mjerne sekcije za vertikalni i horizontalni izlaz na dimnjak	32
Slika 18.	Hidraulički krug ispitne linije.....	33
Slika 19.	Uređaj za mjerenje sastava dimnih plinova MRU Nova 2000 [9]	35
Slika 20.	Ultrazvučni kalorimetar Siemens UH50 [10].....	36
Slika 21.	Vaga tip Ohaus CH30R11 [11]	36
Slika 22.	Termopar Tip T	37
Slika 23.	Termopar Tip K [13]	38

Slika 24.	Kontaktni termopar.....	38
Slika 25.	A/D pretvarač proizvođača Agilent [15]	39
Slika 26.	Ispitna stanica	48
Slika 27.	Izmjenjivač topline voda-zrak	49
Slika 28.	Mjerenje temperature i potlaka te uzimanje uzorka dimnih plinova.....	49
Slika 29.	Prikaz mjerenih temperatura	50
Slika 30.	Sadržaj produkata dimnih plinova.....	51
Slika 31.	Ukupni koeficijent prijelaza topline s površine ovojnice kotla slobodnom konvekcijom i zračenjem pri temperaturi okoline 20 °C kao funkcija prosječne temperature površine ovojnice t_m (T_{st})	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav krute biomase [19]	4
Tablica 2. Minimalne debljine stjenke	15
Tablica 3. Granice emisija.....	23
Tablica 4. Ulazni podaci za hidraulički proračun.....	24
Tablica 5. Koeficijenti lokalnog otpora.....	27
Tablica 6. Normom dopuštena odstupanja mjernih veličina	34
Tablica 7. Mjerni protokol.....	45
Tablica 8. Rezultati mjerenja protoka goriva	47
Tablica 9. Srednje vrijednosti parametara mjerenih u hidrauličkom krugu	47
Tablica 10. Srednje vrijednosti parametara mjerenih na mjernoj liniji dimnih plinova.....	47
Tablica 11. Ulazni podaci za termodinamički proračun.....	52
Tablica 12. Proračun parametara izgaranja goriva	54
Tablica 13. Rezultati termodinamičkog proračuna	61
Tablica 14. Ispitno izvješće	62

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_1	m^2	površina ovojnice niže srednje temperature
A_2	m^2	površina ovojnice više srednje temperature
a	kg/kg	maseni udio pepela u gorivu
B	kg/s	protok goriva
b	%	gorivi sastojci u pepelu
C	%	volumni udio ugljika u gorivu
CO	ppm	sadržaj CO u suhim dimnim plinovima pri 10% O ₂
CO_{avg}	ppm	prosječni sadržaj CO u suhim dimnim plinovima
CO_2	%	prosječni sadržaj CO ₂ u suhim dimnim plinovima
CO_{2max}	%	maksimalni sadržaj CO ₂ u suhim dimnim plinovima
c_{psr}	kJ/(kgK)	specifični toplinski kapacitet vode
C_r	%	sadržaj ugljika u pepelu
$C_{pm,sdp}$	kJ/(m ³ K)	specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova
C_{pm,h_2o}	kJ/(m ³ K)	specifični toplinski kapacitet vodene pare
c	kg/kg	maseni udio ugljika u gorivu
d_u	mm	unutarnji promjer cijevi
H	%	volumni udio vodika u gorivu
H_d	J/kg	donja ogrjevna vrijednost goriva
H_g	J/kg	gornja ogrijevna vrijednost goriva
H_{dc}	J/kg	donja ogrijevna vrijednost ugljika
h	kg/kg	maseni udio vodika u gorivu

h_{dod}	m	Statička visina instalacije od sredine ekspanzijske posude do najviše točke sustava
h_{sys}	m	dodatnih 0,5 do 3 metra
q_{mw}	kg/h	maseni protok vode
q_{mv}	m ³ /h	volumni protok vode
m	m ³ /h	maseni protok dimnih plinova
m_{R}	kg/s	maseni protok ugljika u pepelu
$O_{2\text{avg}}$	%	prosječni sadržaj O ₂ u suhim dimnim plinovima
$O_{2\text{standard}}$	%	normom propisan sadržaj O ₂ u suhim dimnim plinovima
o	kg/kg	maseni udio kisika u gorivu
p_0	bar	primarni tlak – tlak prilikom isporuke
R	Pa/m	jedinični linijski pad tlaka
Q	kW	nominalni toplinski učin
Q_a	kJ/kg	toplinski gubici osjetne topline dimnih plinova
Q_B	kW	toplina unesena gorivom
Q_U	kW	toplinski gubici zbog nepotpunog izgaranja
Q_S	kW	toplinski gubici kroz ovojnicu kotla
Q_N	kW	nazivni toplinski učin
Q_R	kW	toplinski gubici zbog neizgorenog ostatka goriva
q_A	-	toplinski gubici osjetne topline dimnih plinova u odnosu na ogrjevnju vrijednost ispitnog goriva
q_B	-	toplinski gubici zbog nepotpunog izgaranja u odnosu na ogrjevnju vrijednost ispitnog goriva
q_U	-	toplinski gubici zbog nepotpunog izgaranja u odnosu na ogrjevnju vrijednost ispitnog goriva

q_s	-	toplinski gubici kroz ovojnicu kotla u odnosu na ogrjevnu vrijednost ispitnog goriva
q_R	-	toplinski gubici zbog neizgorenosti goriva u odnosu na ogrjevnu vrijednost ispitnog goriva
s	kg/kg	maseni udio sumpora u gorivu
t_a	°C	srednja temperatura dimnih plinova
t_{m1}	°C	niža srednja temperatura dijela ovojnice kotla
t_{m1}	°C	viša srednja temperatura dijela ovojnice kotla
V_{sdp}	m ³ /kg _B	stvarna količina dimnih plinova
$V_{sdp,min}$	m ³ /kg _B	količina suhih dimnih plinova kod stehiometrijskog izgaranja
$V_{n,min}$	L	Minimalni volumen zatvorene ekspanzijske posude
V_w	m ³ /kg _B	količina vodene pare u dimnim plinovima

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
α_1	kW/m ² K	koeficijent prijelaza topline na površini ovojnice kotla kod temperature t_{m1}
α_2	kW/m ² K	koeficijent prijelaza topline na površini ovojnice kotla kod temperature t_{m2}
$\Delta\theta$	°C	razlika temperatura vode polaza i povrata
η_K	%	efikasnost kotla
ζ	-	koeficijent lokalnog otpora
λ	-	faktor pretička zraka
ρ_w	kg/m ³	Gustoća vode
τ	s	period

ϑ_{dp}	$^{\circ}\text{C}$	temperatura dimnih plinova
ϑ_{pol}	$^{\circ}\text{C}$	temperatura vode polaza
ϑ_{pov}	$^{\circ}\text{C}$	temperatura vode povrata
ϑ_{sr}	$^{\circ}\text{C}$	srednja temperatura polaza i povrata

SAŽETAK

U prvom dijelu uvoda nalazi se kratak osvrt na biomasu, njezina svojstva i podjelu te njezin značaj u energetsom sektoru. Drugi dio uvoda opisuje osnovne podjele i razlike toplovodnih kotlova na biomasu.

U okviru ovoga rada izrađen je projekt ispitne stanice za ispitivanje toplinskih karakteristika kotlova na drvene pelete prema normi HRN EN 303-5. Mjerna staza ispitne stanice omogućuje ispitivanje kotlova u rasponu nazivnih toplinskih učinaka 15-60kW. Projekt sadržava odgovarajuće crteže mjerne staze i njen smještaj u ispitni prostor, potrebne proračune te specifikaciju opreme. Odabrana je mjerna oprema te je napravljen mjerni protokol i obrasci za rezultate mjerenja.

Provedeno je ispitivanje toplovodnog kotla na drvene pelete instaliranog u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje. Koristeći podatke s tog mjerenja provedeni su proračuni za obradu izmjerenih veličina, ispunjeni mjerni obrasci i izrađeno je ispitno izvješće.

Ključne riječi: toplovodni kotao na pelete, ispitivanje toplovodnog kotla, biomasa

1. UVOD

Zbog ekonomskog razvoja i sve većeg životnog standarda moderno industrijsko društvo sve više postaje ovisno o energiji. Tijekom 20. stoljeća u svijetu je utrošeno deset puta više energije nego li su naši preci utrošili u čitavom tisućljeću koje je prethodilo 1900. Takav ogroman porast potrošnje energije bio je moguć samo zahvaljujući eksploataciji fosilnih goriva koja danas sudjeluju sa više od 80% u svjetskoj potrošnji energije. Međutim, jasno je da je ovakav trend dugoročno neodrživ.

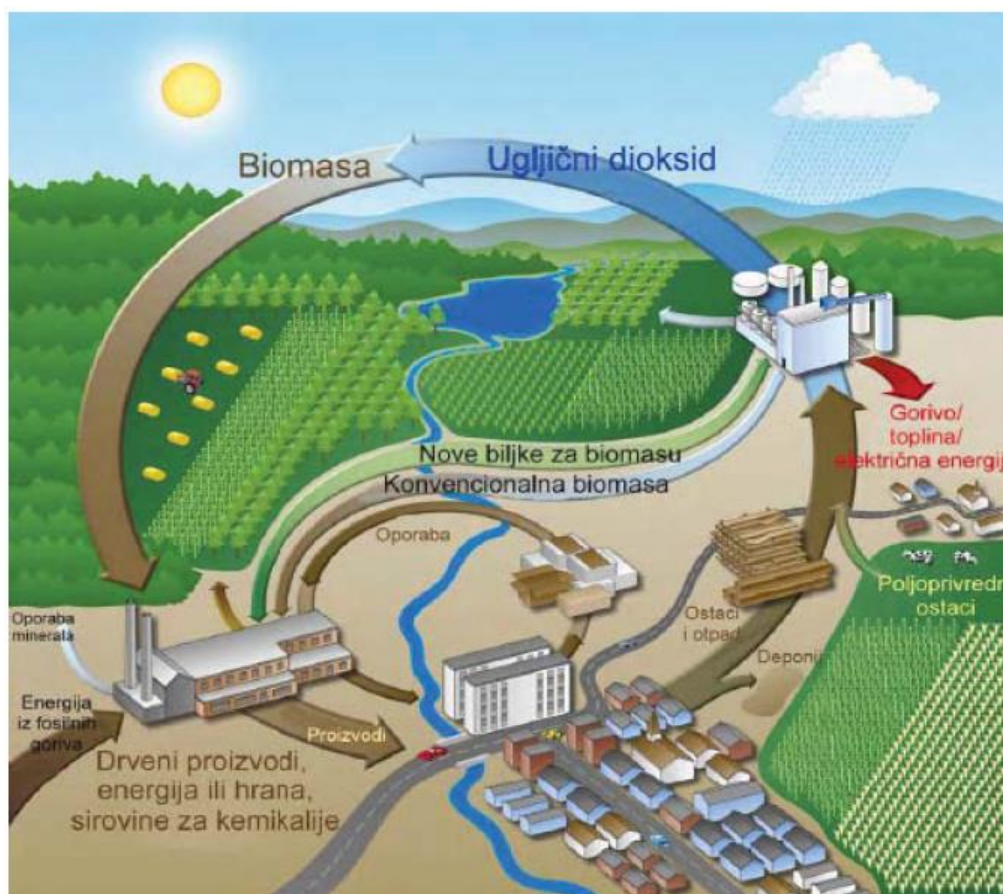
Opće je poznato da korištenje fosilnih goriva ima negativne posljedice na okoliš. Emisije stakleničkih plinova koje nastaju kao posljedica korištenja fosilnih goriva pospješuju učinak klimatskih promjena, a uvijek postoji i rizik zagađenja tla i vode. Osim toga, zalihe fosilnih goriva su ograničene, a sa smanjenjem zaliha posezati će se skupljim i nepovoljnijim metodama dobave fosilnih goriva, što će imati globalno loš utjecaj na cijene energije. Upravo zato se kao jedna od dobrih alternativa danas sve više prepoznaje mogućnost korištenja biomase i ostalih obnovljivih izvora energije. Korištenjem biomase dobiva se bioenergija koja se potom može koristiti kao toplinska energija, u obliku biogoriva ili se upotrijebiti za proizvodnju električne energije, a u svakoj varijanti je povoljnija za okoliš od korištenja fosilnih goriva [1].

1.1. Biomasa

Biomasa se, u kontekstu energetike odnosi na svu materiju, biljnog i životinjskog podrijetla koja se može koristiti kao gorivo. Biomasa je obnovljivi izvor energije, a općenito se može podijeliti na drvnu, nedrvnu i životinjski otpad, unutar čega se mogu razlikovati:

- drvna biomasa (ostaci iz šumarstva, otpadno drvo),
- drvna uzgojena biomasa (brzorastuće drveće),
- nedrvna uzgojena biomasa (brzorastuće alge i trave),
- ostaci i otpaci iz poljoprivrede,
- životinjski otpad i ostaci,
- gradski i industrijski otpad.

Glavna prednost u korištenju biomase kao izvora energije su obilni potencijali, ne samo u tu svrhu zasađene biljne kulture već i otpadni materijali u poljoprivrednoj i prehrambenoj industriji. Plinovi koji nastaju korištenjem biomase mogu se također iskoristiti u proizvodnji energije. Prednost biomase u odnosu na fosilna goriva je i neusporedivo manja emisija štetnih plinova i otpadnih tvari. Računa se da je opterećenje atmosfere s CO₂ pri korištenju biomase kao goriva zanemarivo, budući da je količina emitiranog CO₂ prilikom izgaranja jednaka količini apsorbiranog CO₂ tijekom rasta biljke (Slika 1.)- ukoliko su sječa i prirast drvene mase u održivom odnosu - 1 hektar šumskih površina godišnje apsorbira jednaku količinu CO₂ koja se oslobađa izgaranjem 88 000 litara loživog ulja ili 134 000 m³ prirodnog plina [20].



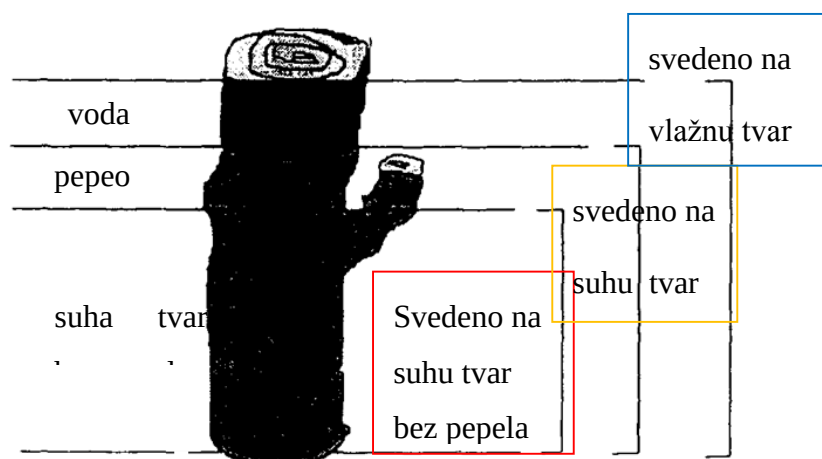
Slika 1. CO₂ neutralnost biomase [20]

Kao sekundarni oblik biomasa može biti u krutom, kapljevitom ili plinovitom agregatnom stanju. Sekundarni oblici se dobiju različitim biokemijskim pretvorbama. Najčešći oblici su:

- kruto (briketi i peleti - nastaju zgušnjavanjem tj. smanjenjem udjela vlage, radi transporta i automatizacije loženja),
- kapljevito (biogoriva: biodizel - esterifikacijom biljnih ulja, etanol - hidrolizom škroba i fermentacijom),
- plinovito agregatno stanje (bioplin od izmeta životinja, deponijski plin - anaerobnom digestijom, ksiloplin - rasplinjavanjem krute biomase) [20].

1.2. Svojstva biomase

Prilikom definiranja svojstava biomase važno je napomenuti da li su ona svedena na biomasu uključujući ili ne uključujući sadržaj vlage i sadržaj pepela [21].



Slika 2. Sastav biomase [21]

1.2.1. Kemijski sastav biomase

Biljna se biomasa uglavnom sastoji od ugljika (C), kisika (O) i vodika (H). Ugljik je kruta komponenta biogoriva čijom se oksidacijom otpušta sadržaj energije goriva. Uz to, daljnja se energija stvara iz vodika u procesu oksidacije koji, pribrojen energiji koju proizvede ugljik, određuje neto ogrjevnu vrijednost goriva. S druge strane, kisik samo održava progresiju procesa oksidacije. Kemijski sastav krute biomase prikazan je tablicom 1 (**Tablica 1. Kemijski sastav krute biomase** Tablica 1) [19].

Tablica 1. Kemijski sastav krute biomase [19]

	C	H	O	N	K	S	Cl
	maseni udio % (suha osnova)						
Smreka (s korom)	49,8	6,3	43,2	0,13	0,13	0,015	0,005
Bukva (s korom)	47,9	6,2	43,3	0,22	0,22	0,015	0,006
Jablan KKO	47,5	6,2	44,1	0,42	0,35	0,031	0,004
Vrba KKO	47,1	6,1	44,2	0,54	0,26	0,045	0,004
Kora (Crnogorično drveće)	51,4	5,7	38,7	0,48	0,24	0,085	0,019
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Crnogorično drveće	47-54	5,6-7,0	40-44	<0,1-0,5		<0,01-0,05	<0,01-0,03
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Listopadno drveće	48-52	5,9-6,5	41-45	<0,1-0,5		<0,01-0,05	<0,01-0,03
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva	51-56	5,9-6,5	36-43	0,3-1,2		0,02-0,2	<0,01-0,05
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Ostaci od pridobivanja drva	50-53	5,9-6,3	40-44	0,3-0,8		0,01-0,08	<0,01-0,04
Uobičajene vrijednosti za materijale od neprerađenog drva Kulture brzorastućih nasada	47-51	5,8-6,7	40-46	0,2-0,8		0,02-0,1	<0,01-0,05
Miskant	47,5	6,2	41,7	0,73	0,7	0,15	0,22
Pšenična slama	45,6	5,8	42,4	0,48	1	0,082	0,19
Tritikala (zrnje)	43,5	6,4	46,4	1,68	0,6	0,11	0,07
Pogača od uljane repice	51,5	7,4	30,1	4,97	1,6	0,55	0,019
<i>Fosilna goriva, radi usporedbe</i>							
Ugljen	72,5	5,6	11	1,3	-	0,94	<0,1
Lignit	65,9	4,6	23	0,7	-	0,39	<0,1
Lož ulje	85-86	11-13	1-4	-	-	-	-
Prirodni plin	75	25	-	-	-	-	-

Elementi koji izravno utječu na razinu štetnih emisija koje nastaju izgaranjem su: sumpor (S), dušik (N), klor (Cl) i sadržaj pepela. Što je njihov sadržaj u gorivu viši, to su prisutniji u

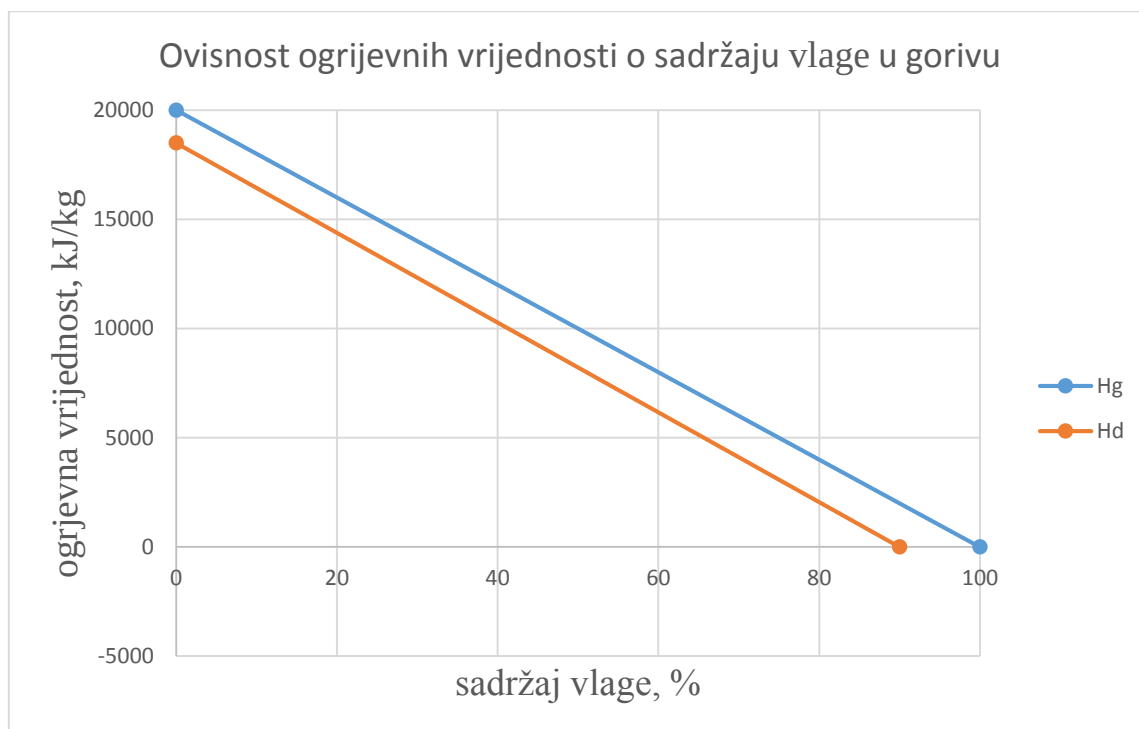
emisijama u atmosferu. Sadržaj dušika u gorivima iz drvene biomase relativno je nizak, dok je mnogo viši u žitaricama – posebno ako uključimo i reproduktivne organe (zrnje) – posebno u sjemenkama uljane repice. To izravno utječe na stvaranje dušikova oksida (NO_x) koji tijekom izgaranja postaje plinovit i ne ostaje u pepelu. Kalij (K) koji se najčešće nalazi u poljoprivrednim biogorivima, snižava točku tališta pepela, čime pomaže stvaranju troske u rešetki koja je uzrok značajnih problema u procesu izgaranja. Udio sumpora (S) u krutim biogorivima mnogo je niži u usporedbi s fosilnim gorivima koja sadrže ugljik. Općenito, najveći dio sumpora ostaje u pepelu (40 do 90%), dok se iz ostatka formira nestabilni SO_2 . Za razliku od slame žitarica, goriva iz drvene biomase karakterizira krajnje nizak sadržaj klor (Cl). Klor sudjeluje u formiranju spojeva poput HCl i dioksina/furana. Iako će većina Cl biti vezana u lebdećem pepelu (40-95%), ostatak će formirati HCl, koji pojačan procesima kondenzacije ima korozivan učinak na metalne unutrašnje dijelove kotlova i dimnjaka [19].

1.2.2. Ogrjevna vrijednost biomase

Ogrjevna vrijednost goriva izražava količinu energije koja se otpušta tijekom potpunog izgaranja jedinice mase goriva. Sadržaj vlage drva smanjuje njegovu ogrjevnju vrijednost. Dio energije koji se otpušta tijekom procesa izgaranja troši se na isparavanje vode te se iz tog razloga smatra gubitkom topline. Isparavanje vode uključuje potrošnju energije od 2,44 MJ po kilogramu vode. Stoga je moguće razlikovati sljedeće:

- Donja ogrjevna vrijednost (H_d) – otpuštena se voda tretira kao para, tj. izdvaja se termalna energija koja je potrebna za isparavanje vode (latentna toplota isparavanja vode na 25°C).
- Gornja ogrjevna vrijednost (H_g) – voda se u produktima izgaranja tretira kao tekućina.

Ogrjevna vrijednost suhog drva za različite vrste drva razlikuje se unutar vrlo uskog intervala, od 18,5 do 19 MJ/kg. U četinjačama je 2% viša nego u listačama. Uzrok ove razlike je posebno u višem udjelu lignina, a djelomično u višem udjelu smole, voska i ulja prisutnog u četinjačama [21].



Slika 3. Ovisnost ogrjevnih vrijednosti o sadržaju vlage u gorivu [21]

Tijekom sušenja, smanjenje od 10% u vlažnosti uzrokuje povećanje od oko 2160 kJ/kg u energetske vrijednosti.

1.3. Drvena biomasa

Postoje razni načini da se iz drvene biomase dobije energija. Upotrebljava se isključivo šumska biomasa (ostaci i otpad nastali redovitim gospodarenjem šumama, prostorno i ogrjevno drvo) i biomasa iz drvene industrije (ostaci i otpad pri piljenju, brušenju, blanjanju - gorivo u vlastitim kotlovnica, sirovina za proizvode, briketi i peleti - nastaju sabijanjem, odnosno prešanjem usitnjene drvene biomase u rasutom stanju radi transporta i automatizacije loženja, i dr. - jeftinije i kvalitetnije gorivo od šumske biomase). Pri obradi drveta gubi se oko 35 - 40% od ulazne sirovine u procesu proizvodnje, a količina otpada za neke proizvode kao što su parketi iznosi i do 65% [20].



Slika 4. a) Briketi, b) Peleti [20]

Biomasa se može izravno pretvarati u energiju jednostavnim sagorijevanjem (izgaranjem) te se tako proizvesti pregrijana vodena para za grijanje u industriji i kućanstvima ili za dobivanje električne energije u malim termoelektranama. Takva postrojenja kao gorivo koriste drveni otpad iz šumarstva i drvne industrije, slamu i druge poljoprivredne ostatke te komunalni i industrijski otpad. Osnovne su značajke pri primjeni šumske ili drvne biomase kao energenta jednake kao kod svakog goriva:

- kemijski sastav,
- ogrjevnost (energetska) vrijednost
- temperatura samozapaljenja,
- temperatura izgaranja ,
- fizikalna svojstva koja utječu na ogrjevnost (npr. gustoća i vlažnost) [20].



Slika 5. Primjer grijanja kućanstava pomoću biomase [20]

Temeljna veličina za proračun energije iz određene količine drva jest njegova ogrjevna vrijednost. Najveći utjecaj na nju ima vlažnost, potom kemijski sastav, gustoća i zdravost drva. Zbog većeg udjela vlage i hlapljivih sastojaka, energetska vrijednost drvene mase je znatno niža u odnosu na fosilna goriva, pa i dizajn ložišta mora biti različit u odnosu na one za fosilna goriva:

- izgaranje na rešetci (manji sustavi)
- fluidizirani sloj (veći sustavi – pogodno za goriva sa većim udjelom vlage).

Za naše podneblje i vrste drveća važno je za njegovu ogrjevnu vrijednost utvrditi ubraja li se ono u listače ili četinjače, odnosno u meko ili tvrdo drvo, jer je udio pojedinih sastojaka pri tome različit, a različita je i tvar koja se može koristiti kao gorivo. Smanjenjem vlažnosti biomase ogrjevna vrijednost se uvelike povećava. Iz tog je razloga, za što bolje iskorištenje energije, korisno sušiti biomasu [20].

1.4. Proizvodnja toplinske energije iz drvene biomase

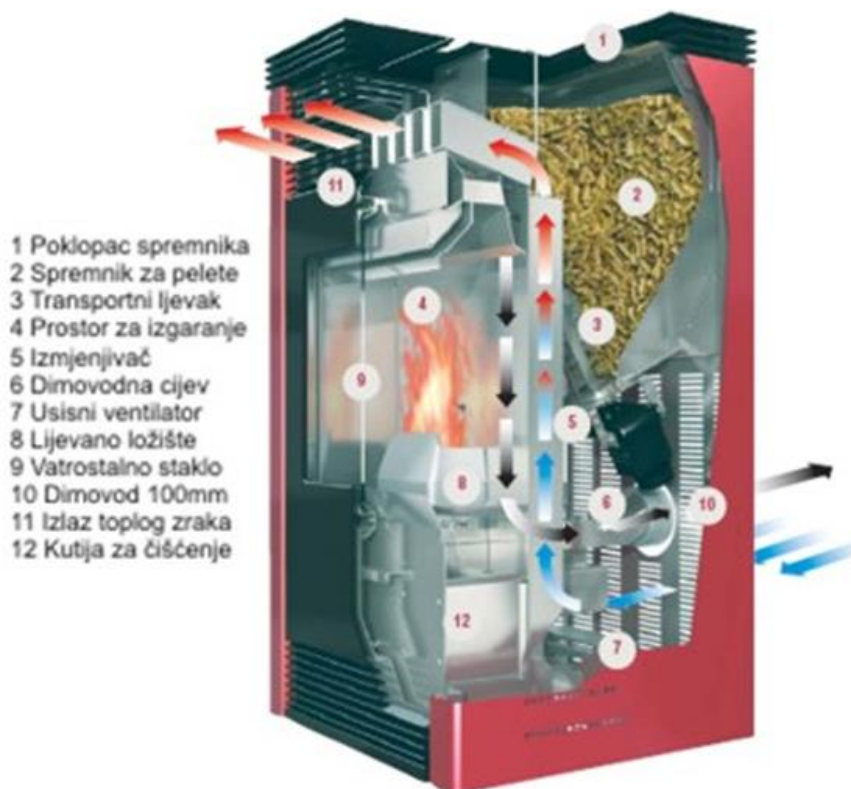
Najstariji način korištenja drvene biomase je izgaranje na otvorenom. Danas postoji niz uređaja i nekoliko načina pretvorbe energije sadržane u drvnj biomasu u toplinsku energiju:

- Izgaranje u pećima i kaminima,
- Izgaranje u kotlovima,

- Rasplinjavanje i izgaranje
- Dobivanje tekućeg goriva, plina i topline porolizom [21].

1.4.1. Kamini i peći na biomasu

Kamini i peći na biomasu koriste se za grijanje stambenih prostora i/ili centralno grijanje, a istovremeno mogu služiti i kao namještaj u svakom ambijentu. Topli zrak pomoću ventilatora izlazi iz peći u prostoriju kroz specijalne rešetke na prednjoj strani peći. Drugim ventilatorom dovodi se primarni zrak u ložište, a dimni plinovi se istodobno odvede iz ložišta u dimnjak [2]. Imaju modernu regulaciju i ovisno od proizvođača isporučuju se i daljinski upravljači. Mogu biti opremljeni ventilirajućim ispustima kojima se može distribuirati topli zrak u ostale prostorije ili toplinskim izmjenjivačem za zagrijavanje kotlovske vode za grijanje radijatora. U slučaju s izmjenjivačem kamini i peći su najčešće opremljeni i pumpom te ekspanzijskom posudom, takva izvedba znatno povisuje cijenu [3].



Slika 6. Osnovni dijelovi kamina na pelete [3]

Ložište je opremljeno vratima sa vatrootpornim staklom (do 700°C) čime se dobiva lijepi vizualni efekt plamena unutar ložišta, a istovremeno se sprječava izlazak pepela i dima u zagrijani prostor. Unutarnji dio ložišta izrađen je od vermikulita (samočistivog otpornog materijala) koji ima visoki toplinski kapacitet. Vanjske stranice peći izrađene su od nehrđajućeg čelika i obojene u boju po želji u termootpornom prahu visoke kvalitete.

1.4.2. Toplovodni kotlovi

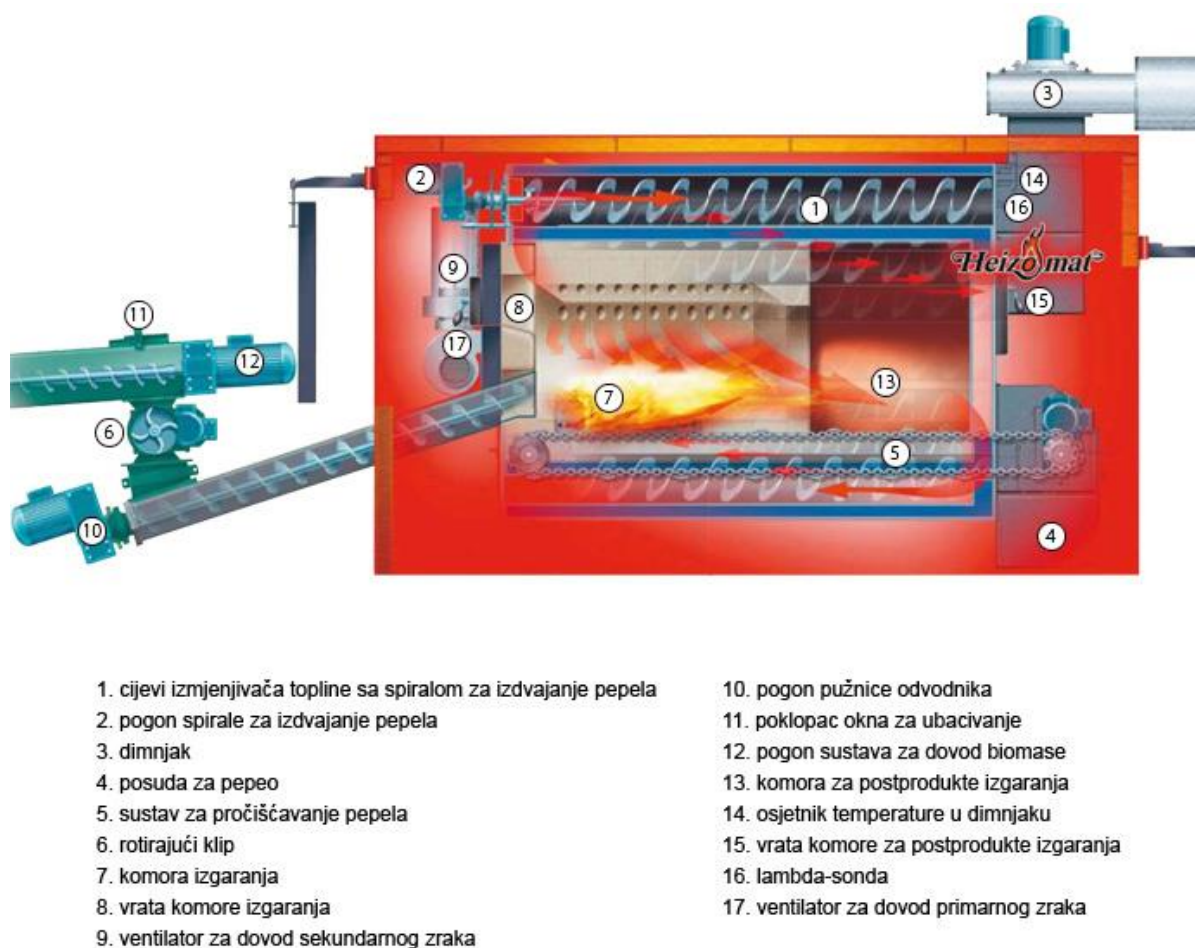
Kotao je zatvorena posuda u kojoj se voda ili neki drugi medij zagrijava toplinom koju razvija neko gorivo ili električna energija. Najčešće grijani medij u kotlu je voda, svi drugi mediji upotrebljavaju se vrlo rijetko. Toplovodni kotlovi rade se od kvalitetnog kotlovskog lima i bešavnih cijevi tehnologijom zavarivanja. Vrata za loženje moraju biti dovoljno velika kako bi se omogućilo loženje krupnim komadima drvne biomase te jednostavno čišćenje i održavanje. Kotlovi su dobro toplinski izolirani u kvalitetnoj metalnoj oplati [4]. Loženje može biti na kruto (ugljen, briketi, peleti) ili kapljevito (lož ulje) gorivo. Za loženje na kapljevito gorivo potrebno je ugraditi gorionik, na za to predviđeno mjesto. Ako se kotao loži krutim gorivom potrebno je ugraditi posebna vrata i gorionik, spremnik za pelete, pužni transporter i automatsku regulaciju [5].



Slika 7. Kotao na pelete [6]

Peleti u odnosu na ostalu drvenu masu imaju najvišu ogrjevnu vrijednost i vrlo nisku vlažnost (max 10%). Tijekom izgaranja razvijaju se vrlo visoke temperature stoga se ne mogu koristiti u svim kotlovima za centralno grijanje jer može doći do deformacije ložišta. Za njihovo

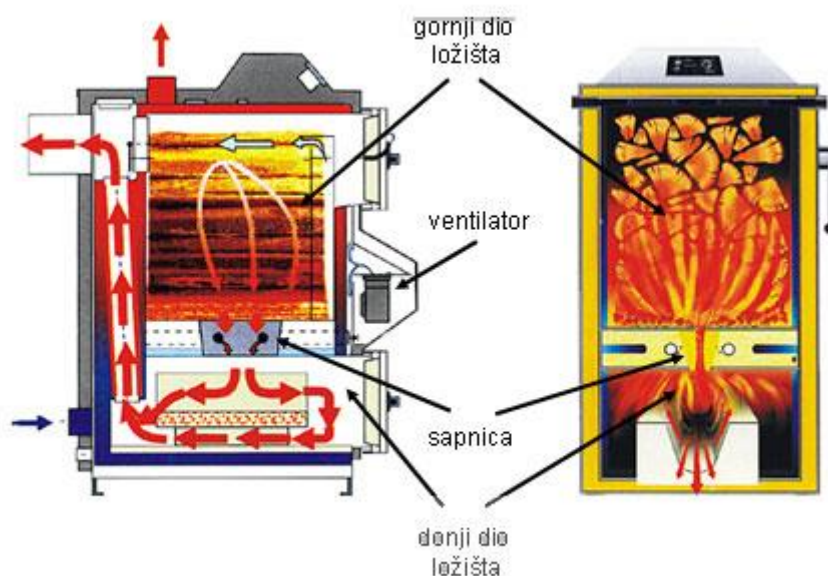
korištenje u sustavima grijanja konstruirani su posebni kotlovi na pelete (Slika 7). Sastavni dio kotla je, između ostalog i spremnik peleta. Njegova zapremnina dostatna je za 100-150 kg peleta. Ovisno o potrebi za toplinom i veličini kotla navedena količina može biti dovoljna za rad i po nekoliko dana. Peleti se automatski doziraju u ložišni prostor kotla pomoću transportnog mehanizma. Potpala je također automatska tako da ovi kotlovi korisnicima pružaju maksimalni komfor. Spremnik peleta može se ručno dopunjavati ali razvijeni su i sustavi automatskog dopunjavanja iz centralnog skladišta. Kod skladištenja je vrlo važno da predviđeni prostor nije vlažan [6].



Slika 8. Kotao na biomasu [7]

Na slici (Slika 8) je prikazan kotao iz serije RHK-AK proizvođača Heizomat. Kotao je posebno konstruiran kako bi mogao raditi koristeći široki spektar biomase, uključujući drvo. Okrugla ciklička komora izgaranja s vrtložnim dovodom zraka za izgaranje omogućava veliki stupanj

iskoristivosti goriva. Dovod primarnog zraka ostvaren je kroz vatrostalnu oblogu tunela pri dnu komore izgaranje, dok se sekundarni zrak dovodi kroz vatrostalnu oblogu pokrova. Sustav rešetki na lancu polagano prenosi gorivo kroz komoru izgaranja i osigurava njegovo potpuno izgaranje prije nego što se pepeo izbaci u odgovarajuću posudu. Prednost takvog rješenja je u tome da se kretanje lanca s rešetkama može prilagoditi značajkama izgaranja širokog spektra biomase, kako bi se osiguralo optimalno izgaranje i ostvarile što manje količine pepela [7].



Slika 9. Pirolitički kotao [8]

Piroliza je jedna od tri osnovne faze procesa izgaranja drva. To je toplinsko raspadanje drveta i promjena njegovog agregatnog stanja. Na temperaturama iznad 100 °C toplinskim zagrijavanjem iz drveta se počinju oslobađati plinovi. Ova se faza odvija u svim pećima odnosno kotlovima loženim na drvo bez obzira na njihov tip, njihovu starost i sl. Kod pirolitičkih kotlova (Slika 9.), faza pirolize je naglašena zahvaljujući posebnoj konstrukciji kotla, regulaciji i ugrađenom ventilatoru. Kotlovi na pirolizu najčešće imaju dvodijelno ložište i ventilator s promjenjivim brojem okretaja koji dobavlja potrebnu količinu zraka. U gornjem dijelu dolazi do sušenja drva, njegove toplinske razgradnje i stvaranja žara. Ventilator u gornji dio ložišta dovodi zrak pri čemu u području oko žara dolazi do rasplinjavanja, odnosno intenzivnog stvaranja drvnog plina. Količina dovedenog primarnog zraka u gornji dio ložišta dovoljna je samo za rasplinjavanje ali ne i za potpuno izgaranje. Zbog potlaka/pretlaka (ovisno

o mjestu ugradnje ventilatora) nastali drveni plin prelazi u donji dio ložišta. Prolaskom kroz područje žara i kroz sapnicu, plin se upali i u potpunosti izgara. Potpunost izgaranja osigurana je dovodenjem sekundarnog zraka kroz sapnicu. Kvaliteta i izgled plamena podsjeća na izgaranje ulja ili plina na klasičnim plamenicima. Pirolitički kotlovi imaju stupnjeve korisnosti oko 90 %, za razliku od standardnih kotlova na drvo kod kojih se iskoristivost kreće od 65 do 70% [8].

2. ZAHTJEVI ZA TOPLOVODNE KOTLOVE PREMA HRN EN 303-5

Norma HRN EN 303-5 navodi zahtjeve za toplovodne kotlove na kruta goriva koji su konstruirani za centralno grijanje gdje je radni medij voda, najveća dozvoljena temperatura vode 110°C, a najveći radni tlak 6 bara. Zahtjevi definiraju sigurnost rada kotla, kvalitetu izgaranja, radne parametre kotla i održavanje kotla. Također navedeni su i zahtjevi za dodatnu opremu kotla koja utječe na sigurnost rada kotla.

2.1. Opći zahtjevi

Kotlovi moraju biti vatrootporni i sigurni za upravljanje. Moraju biti izrađeni od nezapaljivog materijala i moraju biti otporni na deformacije te moraju biti takvi da:

- mogu izdržati naprezanja koja nastaju tijekom uobičajenog rada,
- ne dođe do prevelikog zagrijavanja ($\leq 110\text{ °C}$) radnog medija (vode),
- plinovi ne cure, iz kotla ili uređaja za loženje, u opasnim količinama,
- vatra ne suklja iz kotla i da žar ne ispada iz ložišta prilikom uobičajenog rada kotla,
- spriječe opasne koncentracije zapaljivih plinova ($\leq 5\text{ % CO}$) u ložištu i dimnjaku.

Zapaljivi materijali se mogu koristiti samo za:

- unutarnje komponente regulacije i sigurnosnu opremu,
- upravljačke ručice,
- električnu opremu,
- dodatnu opremu (npr. kućište plamenika)
- dodatni estetski dodaci (npr. dodatni ukrasni poklopac).

Dijelovi komponenti koji su izrađeni od zapaljivih materijala moraju biti ugrađeni na takav način da im površinska temperatura ne prijeđe temperaturu određenu od strane proizvođača ili normom koja se odnosi na tu komponentu.

Materijali koji su izloženi tlaku moraju biti u skladu sa opće priznatim tehničkim zahtjevima. Konstrukcija kotla mora biti takva da je omogućeno jednostavno upravljanje i loženje. Konstrukcijski dijelovi dostupni tijekom korištenja ili redovitog održavanja ne smiju imati oštre

rubove i uglove koji mogu uzrokovati oštećenja ili ozljede osoblja tijekom održavanja. Motori i ventilatori trebaju biti ugrađeni na način da su buka i vibracije svedene na minimum.

2.2. Konstrukcijski zahtjevi

Materijali za izradu čeličnih dijelova kotlova izloženih tlaku propisani su normom HRN EN 303-5 i navedeni su u Tablici 1 spomenute norme. Ostali materijali koji nisu navedeni mogu se koristiti samo uz odgovarajuće dokaze o istovjetnosti otpornosti na koroziju, vatrootpornosti i čvrstoće s nelegiranim čelikom određene debljine materijala za određenu primjenu. Minimalne debljine stjenki prikazane su tablicom 2. i u obzir uzimaju:

- maksimalni dopušteni radni tlak,
- nazivni toplinski učin,
- svojstva materijala.

Tablica 2. Minimalne debljine stjenke

Nazivni toplinski učin	Ugljični čelici					Nehrđajući čelici i čelici sa zaštitom od korozije				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
kW	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
$Q_N \leq 100$	5	4	3,2	3	4	3	2	1,5	2	3
$100 < Q_N \leq 300$	5	4	3,2	4	4	3	2	1,5	2	3
$300 < Q_N \leq 500$	5	5	3,2	4	4	4	2	1,5	2	3
a: za stjenke ložišta koje je u kontaktu sa vatrom i vodom b: za stjenke konvekcijskih grijaćih površina izvan komore izgaranja (osim okruglih cijevi) c: za okrugle cijevi u zoni konvekcijskih grijaćih površina izvan komore izgaranja d: za stjenke koje su u kontaktu samo sa vodom e: rešetke vodom hladene										

Minimalne debljine stjenke prema tablici 2 primjenjuju se na površine izložene tlaku, cijevi i okove. Manje debljine stjenki mogu se primijeniti uz predložene dokaze koji pokazuju istovjetnost s obzirom na koroziju, vatrootpornost i čvrstoću.

2.2.1. Projektni zahtjevi

Kotlovi i pripadajuće komponente moraju biti projektirani na način da:

- se hidraulički sustav kotla može potpuno odzračiti,
- se kod uobičajenog rada, u skladu s uputama proizvođača, ne pojavljuje pretjerano isparavanje radnog medija,
- su izmjenjivačke površine s dimovodne strane pristupačne zbog kontrole i čišćenja s kemijskim sredstvima i četkama.

Provrta za vijke i slične komponente koje se koriste za spajanje sklopnih dijelova ne smiju prolaziti u prostore kroz koje struji voda. Ovaj se zahtjev ne odnosi na mjerna mjesta ili upravljačku i sigurnosnu opremu. Kotlovi moraju imati barem jedan priključak za punjenje i pražnjenje. Taj priključak može biti zajednički.

Svi kotlovi moraju biti toplinski izolirani. Toplinska izolacija treba izdržati uobičajena toplinska i mehanička naprezanja. Izolacijski materijal treba biti nezapaljiv i ne smije ispuštati plinove tijekom uobičajenog rada.

Čvrstoća dijela kotla koji sadrži vodu treba biti određena za protoke koji odgovaraju nominalnom toplinskom učinku sa temperaturnim razlikama polaza i povrata vode od 10 K i 20 K.

Spremnik za gorivo koji je sastavni dio kotla treba biti izrađen od vatrootpornog materijala prema normi EN 13501-2. Volumen spremnika za gorivo ne smije biti veći od 1,5 m³. Konstrukcija spremnika za gorivo treba omogućavati nesmetan protok goriva sve dok se spremnik potpuno ne isprazni.

Kapacitet posude za pepeo treba biti takav da omogući neprestan rad kotla barem 12 sati pri nominalnom toplinskom učinku, a da se pritom koristi propisano gorivo.

2.3. Sigurnosni zahtjevi

2.3.1. Općenito

Potencijalne opasnosti u radu kotla uključujući potpalni sustav kotla i uređaje za loženje trebaju se izbjeći bilo konstrukcijskim rješenjima bilo korištenjem sigurnosnih uređaja. Proizvođač treba izvršiti procjenu rizika koja pokriva sve potencijalne opasnosti kotla i odrediti mjere za izbjegavanje ili kontrolu opasnosti sigurnosnim režimom. Upravljačke funkcije sigurnosnog režima trebaju biti definirane i prema tome realizirane. Procjena rizika se treba izvršiti prema normi EN ISO 12100 s posebnim naglaskom na tip kotla i vrstu goriva.

Podjela upravljačkih funkcija:

- Klasa A – upravljačke funkcije koje se ne odnose na sigurnosnu primjenu.
- Klasa B – upravljačke funkcije čija uloga je sprječavanje nastajanja nesigurnih pogonskih stanja sustava. Kvar kontrolnih funkcija neće direktno dovesti do opasnih situacija.
- Klasa C – upravljačke funkcije koje su namijenjene sprječavanju nastajanja posebno opasnih situacija kao što su eksplozije ili veći kvarovi koji mogu direktno uzrokovati opasnost u radu.

Prilikom procjene rizika svakoj identificiranoj opasnosti potrebno je dodijeliti određenu klasu upravljačkih funkcija. Aktivacija kontrolnih funkcija klase B ili klase C treba rezultirati barem prekidom dovoda goriva.

2.3.2. Sigurnost protiv povrata plamena kod automatskog loženja

Konstrukcija sustava za automatsko loženje treba sprječavati pojavu povrata plamena. Opasnost od pojave povrata plamena je svrstana kao rizik koji odgovara sigurnosnoj klasi C. Nastajanje pojave povrata plamena osim konstrukcijskim značajkama sprječava se i ugradnjom jednog ili više sigurnosnih uređaja za tu namjenu.

Odgovarajuće konstrukcijske značajke ili sigurnosni uređaji trebaju:

- raditi na principu zatvorenog sustava,
- spriječiti povrat plamena u slučaju nestanka napajanja,
- spriječiti povrat plamena u slučaju kvara ili smetnji na automatskom sustavu za loženje.

Površinska temperatura uređaja za loženje kotla (bez izolacije) ili ugrađenog spremnika za gorivo ne smije prijeći 85 °C u bilo kojem radnom režimu niti u slučaju kvara. Ako se taj uvjet može osigurati konstrukcijskim značajkama, nisu potrebni dodatni sigurnosni uređaji.

Pregrijavanje uređaja za loženje zbog provođenja topline može se spriječiti na sljedeće načine:

- uređajima za gašenje, npr. sustavima vodenih prskalica koje se uključuju kod postizanja temperature 95 °C,
- uređajima za brzo pražnjenje uređaja za loženje i prestanak loženja kotla – aktivacija tih uređaja je kod postizanja temperature od 95 °C ili kod porasta temperature za 20 °C od uobičajenih pogonskih temperatura,
- uređajima za loženje koji su hlađeni vodom, a temperatura vode je ograničena isključivanjem kotla iz pogona.

Pregrijavanje spremnika za gorivo može se spriječiti na sljedeće načine:

- uređajima za gašenje ugrađenim u spremnik goriva, npr. sustav vodenih prskalica koje se uključuju kod postizanja temperature od 95 °C,
- dostatnom izolacijom spremnika goriva od toplih dijelova kotla,
- prirodnom ventilacijom prostora između spremnika goriva i tijela kotla (odvojena kućišta).

Konstrukcijskim značajkama ili sigurnosnim uređajima treba se spriječiti propuštanje značajne količine dimnih plinova u sustav dovoda goriva ili spremnik goriva, kako ne bi došlo do samozapaljenja goriva. Zbog ostalih sigurnosnih razloga (npr. sprječavanje trovanja sa CO) treba izbjeći i najmanju količinu povrata dimnih plinova.

Pokazatelji značajnog povrata dimnih plinova mogu biti:

- porast temperature dobavnog sustava goriva ili ugrađenog spremnika goriva za više od 20 °C u odnosu na uobičajen rad kotla odnosno bez povrata dimnih plinova,
- volumna koncentracija CO veća od 1 % u dobavnoj liniji,
- pojava dima u ugrađenom spremniku goriva.

Širenje vatre kroz sustav dobave goriva ili ugrađeni spremnik goriva treba izbjeći u bilo kojem pogonskom stanju kotla i u slučaju kvara. Ovo ne uključuje toplinsku reakciju male količine goriva na kraju uređaja za loženje ukoliko ne dolazi do daljnjeg širenja u dobavni sustav goriva.

Pokazatelji značajnog širenja vatre mogu biti:

- porast temperature u uređaju za loženje za više od 20 °C u odnosu na uobičajeno pogonsko stanje,
- površinska temperatura uređaja za loženje postigne vrijednost veću od 85 °C,
- pojava dima u ugrađenom spremniku goriva.

2.3.3. Sigurnost protiv prekomjernog loženja kotla ili smetnji kod dobave goriva

Prilikom stavljanja kotla u pogon i neprekidnog rada kotla sa maksimalnim loženjem ne smije doći do pojave bilo kakvih opasnih situacija. Kotao treba biti opremljen sigurnosnim uređajem koji zaustavlja dobavu goriva u slučaju da dolazi do nedostatnog izgaranja ili uopće nema izgaranja goriva u glavi plamenika. U fazi potpaljivanja, ukoliko dolazi do nedostatnog izgaranja ili uopće nema izgaranja goriva, sigurnosni uređaj treba zaustaviti dobavu goriva nakon određenog vremena koje je odredio proizvođač plamenika. Kvar sigurnosnog uređaja koji detektira nedostatno izgaranje ne smije dovoditi do opasnih situacija.

2.3.4. Sigurnost protiv dobave nedovoljne količine zraka ili nepotpunog izgaranja

Volumna koncentracija ugljičnog monoksida (CO) u kotlu ne smije prijeći 5%.

2.3.5. Površinske temperature

Temperatura vanjske površine kotla (uključujući dno i vrata osim izlaza dimnih plinova) ne smije prijeći sobnu temperaturu za više od 60 °C. Ovaj zahtjev nije primjenjiv za kotlove koji se prema uputama proizvođača mogu ugraditi na nezapaljive podloge. Prilikom ispitivanja prema normi HRN EN 303-5, površinske temperature upravljačkih ručica i svih ostalih dijelova koji se diraju rukama tijekom rada kotla ne smiju prijeći sobnu temperaturu za više od sljedećih vrijednosti:

- 35 °C za metalne i slične materijale,
- 45 °C za keramičke i slične materijale,
- 60 °C za plastične i slične materijale.

2.3.6. Curenje sustava za izgaranje

Kotlovi projektirani da rade sa pretlakom u komori za izgaranje prilikom ispitivanja prema normi HRN EN 303-5 pri ispitnom tlaku 1,2 puta većem od otpora na dimovodnoj strani pri nominalnom učinku, udio curenja baziran na masenom protoku ne smije prijeći 2 % od masenog protoka dimnih plinova pri nominalnom toplinskom učinku. Otpor na strani dimnih plinova određuje se kad je ložište napunjeno do maksimalnog kapaciteta (kako je definirao proizvođač).

2.3.7. Uređaji za regulaciju ograničavanje temperature

Sigurnosni i regulacijski uređaji te upute za pravilnu ugradnju trebaju biti dani za svaki kotao, ovisno o vrsti sustava izgaranja i vrsti zaštite. Potrebna oprema za svaki pojedini slučaju treba biti isporučena zajedno sa kotlom, ako nije, detaljni opis treba biti priložen u uputama za ugradnju, posebno granične vrijednosti i vremenske konstante za sigurnosni graničnik temperature.

Kod zatvorenog sustava odzračivanja hidrauličke instalacije grijanja gdje se koristi termostatska zaštita, mora biti omogućeno brzo isključivanje sustava loženja, a višak toplinske energija se mora izbaciti iz sustava grijanja preko sigurnosnog izmjenjivača topline ili sličnih uređaja. Sigurnosni izmjenjivač topline i slični uređaji za izbacivanje viška toplinske energije iz sustava grijanja trebaju spriječiti zagrijavanje vode preko dozvoljene temperature od 110 °C.

Sustavi koji omogućuju brzo isključivanje sustava loženja moraju sadržavati sljedeću opremu:

- regulator temperature,
- sigurnosni graničnik temperature.

Ukoliko se ovi zahtjevi ne mogu ispuniti, kotao treba biti ugrađen u otvoreni sustav odzračivanja prema normi EN 12828.

2.3.8. Kotlovski pribor

Ukoliko je kotao tvornički opremljen dodatnom opremom koju je potrebno servisirati kako bi se osigurao ispravan rad i sigurnost kotla, konstrukcija kotla treba omogućavati jednostavan pristup opremi bez potrebe za opsežnim rastavljanjem dijelova kotla.

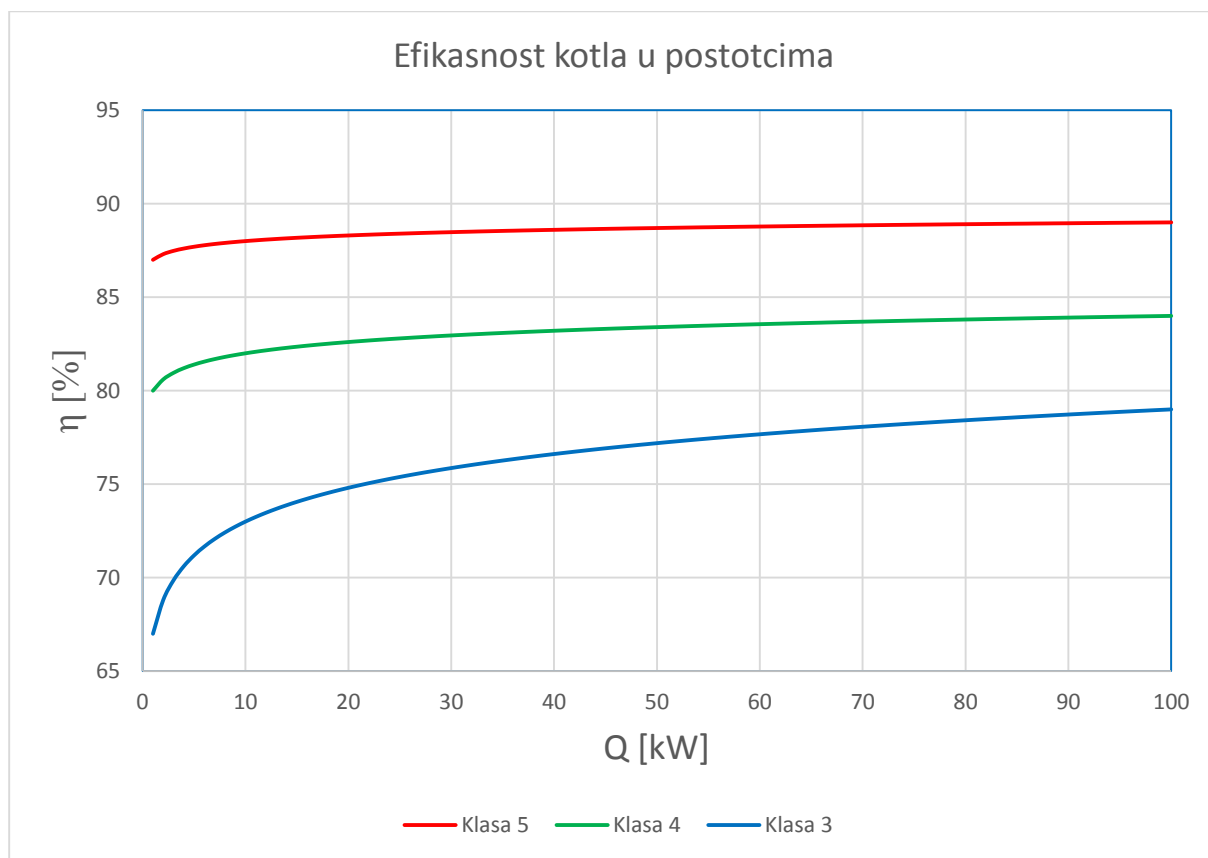
2.4. Zahtjevi na pogonske karakteristike kotla

2.4.1. Općenito

Pogonske karakteristike kotla trebaju biti određene ispitivanjima koristeći odgovarajuća ispitna goriva propisana normom. Goriva za koje se utvrdi da se mogu koristiti u kotlu predstavljat će preporučena goriva za tu vrstu kotla. Nominalni toplinski učin i raspon nominalnog učina može ovisiti o gorivu. Zahtjevi prema efikasnost kotla i granici emisija podijeljene su u 3 klase. Kako bi se zadovoljili zahtjevi pojedine klase potrebno je dostići određene vrijednosti efikasnosti i emisije koje zahtjeva pojedina klasa.

2.4.2. Efikasnost kotla

Prilikom ispitivanja efikasnosti kotla prema normi HRN EN 303-5, kod nominalnog učina efikasnost ne smije biti manja nego li je određeno jednadžbom prikazanom slikom 10 (Slika **10**). Za kotlove nazivnog učina većeg od 100 kW zahtjev efikasnosti klase 4 je 84 %, a zahtjev efikasnosti klase 5 je 89 %. Za kotlove nazivnog učina većeg od 300 kW zahtjev efikasnosti klase 3 je 82 %.



Slika 10. Efikasnost kotla u postotcima

Klasa 5 $Q < 100$ kW

$$\eta_K = 87 + \log Q \quad [\%] \quad (1)$$

Klasa 4 $Q < 100$ kW

$$\eta_K = 80 + 2 \log Q \quad [\%] \quad (2)$$

Klasa 3 $Q < 300$ kW

$$\eta_K = 67 + 6 \log Q \quad [\%] \quad (3)$$

2.4.3. Temperatura dimnih plinova

Za kotlove, koji rade sa dimnim plinovima čija je temperaturna razlika s obzirom na sobnu temperaturu manja od 160 °C kod nominalnog učina, proizvođač treba preporučiti način ugradnje ispušnog sustava kako bi se osigurao dostatan potlak i time spriječilo zaštopavanje i kondenzacija dimnih plinova u dimnjaku.

2.4.4. Potlak dimnjaka

Proizvođač mora odrediti minimalni potlak na izlazu dimnih plinova iz kotla koji je potreban za ispravan rad kotla.

2.4.5. Minimalni toplinski učin

Kotlovi koji imaju sustav automatskog loženja minimalni toplinski učin ne smije biti veći od 30 % nazivnog toplinskog učina. Ovaj zahtjev ograničavanja maksimalnog toplinskog učina treba se postići automatski pomoću kontrolnih uređaja.

2.4.6. Ograničenja emisija

Emisije prilikom izgaranja trebaju biti male. Ovaj zahtjev će biti zadovoljen ukoliko se ne dostignu vrijednosti emisija prikazanih u tablici 3 (Tablica 3) kod nominalnog toplinskog učina. Kod kotlova sa određenim rasponom nominalnog učina emisije se određuju kod najmanjeg nominalnog učina.

Tablica 3. Granice emisija

Loženje	Gorivo	Nominalni toplinski učin	Granice emisija		
			CO		
			mg/m ³ kod 10 % O ₂		
		kW	klasa 3	klasa 4	klasa 5
ručno	biološko	≤50	5000	1200	700
		>50 ≤150	2500		
		>150 ≤500	1200		
	fosilno	≤50	5000		
		>50 ≤150	2500		
		>150 ≤500	1200		
automatsko	biološko	≤50	3000	1000	500
		>50 ≤150	2500		
		>150 ≤500	1200		
	fosilno	≤50	3000		
		>50 ≤150	2500		
		>150 ≤500	1200		

3. ISPITNA LINIJA

Kotao je priključen na krug vode pripremljen za mjerenje protoka te temperatura polaznog i povratnog voda dok je s dimovodne strane priključen na dimovodnu cijev ispitne linije opremljenu s instrumentima za analizu dimnih plinova.

3.1. Hidraulički proračun

Ispitna stanica se projektira za ispitivanje kotlova u rasponu nazivnih toplinskih učinaka 15-60 kW. Hidraulički sustav se dimenzionira za najgori mogući slučaj, a to je ispitivanje kotla nazivnog učina od 60 kW kod najvećeg mogućeg protoka. Protok je obrnuto proporcijalan razlici temperature vode polaznog i povratnog voda kotla. Kod konstantnog učina kotla, smanjenjem razlike temperature polaza i povrata potrebno je povećati protok. Iz toga proizlazi da je najgori slučaj onaj kod najvećeg toplinskog učina i najvećeg protoka, odnosno najmanje razlike temperatura vode polaza i povrata. Najmanja razlika temperature polaza i povrata propisana je normom HRN EN 303-5 i iznosi 10 °C.

Tablica 4. Ulazni podaci za hidraulički proračun

Opis	Oznaka	Vrijednost
Toplinski učin	Q	60000 W
Razlika temperature vode polaza i povrata	$\Delta\vartheta$	10 °C
Srednja gustoća vode	ρ_w	976,54 kg/m ³
Specifični toplinski kapacitet vode	c_{psr}	4,1896 kJ/(kgK)

3.1.1. Dimenzioniranje cjevovoda metodom izbora brzine strujanja

Maseni protok vode:

$$q_{mw} = \frac{Q}{\Delta\vartheta \cdot c_{psr}}, [\text{kg/s}] \quad (4)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti dobivamo:

$$q_{mw} = 1,432 \text{ kg/s} = 5155,623 \text{ kg/h}$$

Volumni protok vode:

$$q_{vw} = \frac{q_{mw}}{\rho_w}, [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti dobivamo:

$$q_{vw} = 0,001467 \text{ m}^3/\text{s} = 5,28 \text{ m}^3/\text{h}$$

Orientacijska brzina strujanja za razvod kotla je $w = 0,5 - 1 \text{ m/s}$. Odabiremo brzinu $w = 1 \text{ m/s}$.

Unutarnji promjer cijevi:

$$d_u = \sqrt{\frac{4q_{vw}}{w\pi}}, [\text{m}] \quad (6)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti dobivamo:

$$d_u = 0,0432 \text{ m} = 43,2 \text{ mm}$$

Odabiremo standardnu čeličnu cijev DN40 unutarnjeg promjera 43,1 mm .

Stvarna brzina strujanja je:

$$w = \frac{4 \cdot q_{vw}}{d_u^2 \cdot \pi}, [\text{m/s}] \quad (7)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti dobivamo:

$$w = 1 \text{ m/s}$$

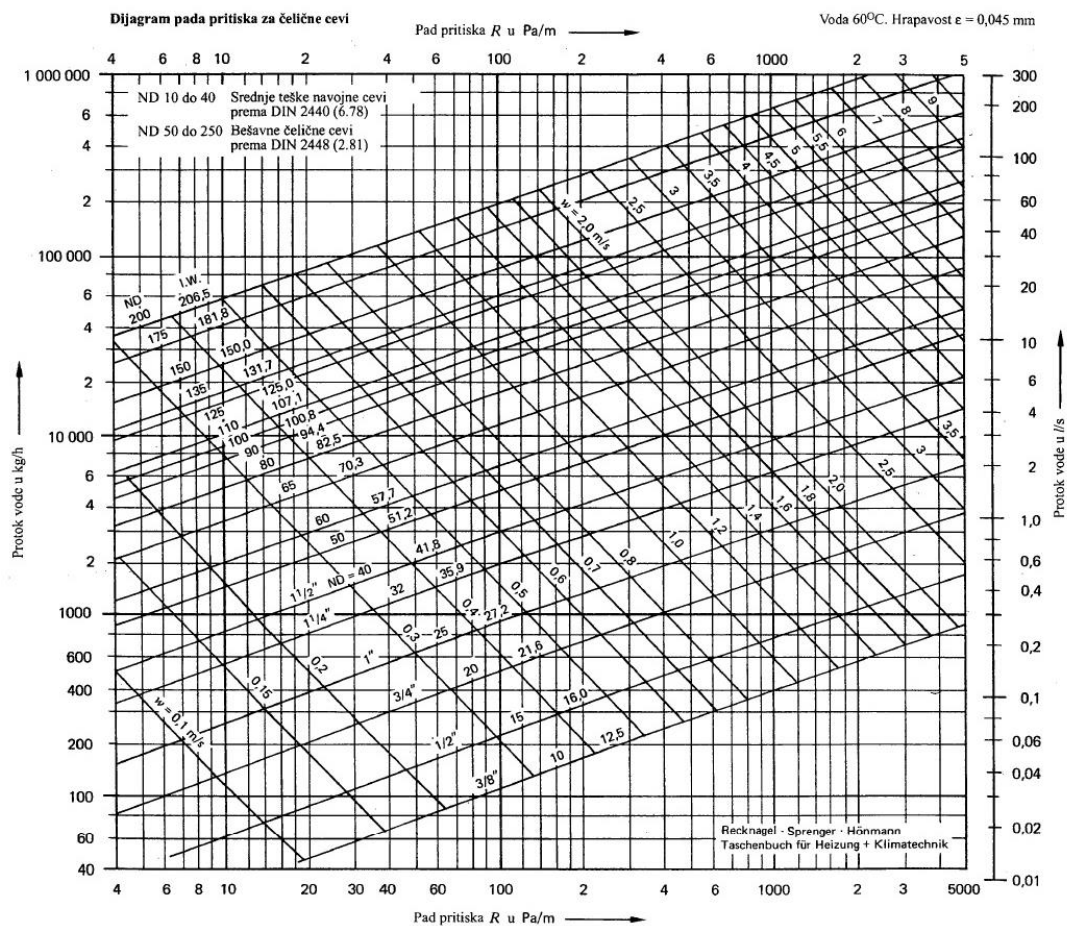
3.1.2. Pad tlaka

Linijski pad tlaka javlja se zbog površinske hrapavosti cijevi, a računa se preko izraza:

$$\Delta p_{tr} = R \cdot L, [\text{Pa}] \quad (8)$$

Iz dijagrama na slici 11., pomoću izračunatog protoka vode i nazivnog promjera, očitamo jedinični pad tlaka R .

$$R = 70 \text{ Pa/m}$$



Slika 11. Dijagram pada tlaka za čelične cijevi

Iz crteža dispozicije ispitne stanice (Prilog II) određena je ukupnu dužina cijevi hidrauličke linije L .

$$L = 12 \text{ m}$$

Uvrštavanjem očitanih vrijednosti u jednadžbu (8) dobivamo:

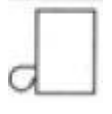
$$\Delta p_{tr} = 840 \text{ Pa}$$

Lokalni pad tlaka javlja se u elementima sustava gdje struja fluida mijenja smjer poput kotlova, ogrjevnih tijela, ventila koljena lukova. Lokalni pad tlaka se računa preko izraza:

$$\Delta p_{lok} = \sum \zeta \frac{\rho_w \cdot w^2}{2}, [\text{Pa}] \quad (9)$$

Lokalni otpori elemenata koji u hidrauličkom krugu nalaze se sljedećoj tablici.

Tablica 5. Koeficijenti lokalnog otpora

Element	Prikaz	Lokalni otpor ζ	Komada	Ukupno
Luk $r/d = 1$		0,35	12	4,2
Kotao		2,5	1	2,5
$\Sigma \zeta$				6,7

Uvrštavanjem poznatih veličina u izraz (9) dobivamo:

$$\Delta p_{lok} = 3310,58 \text{ Pa}$$

Ukupni pad tlaka u hidrauličkom krugu je zbroj linijskog pada tlaka i lokalnog pada tlaka.

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_{tr} + \Delta p_{lok}, [\text{Pa}] \quad (10)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti dobivamo:

$$\Delta p = 4150,6 \text{ Pa}, H = 0,44 \text{ m}$$

3.1.3. Membranska ekspanzijska posuda

Ekspanzijska posuda koristi se za održavanje tlaka u sustavu unutar zadanih granica, kompenzaciju promjene volumena ogrjevnog medija kao posljedice promjene temperature te sprječava manjak ogrjevnog medija.

Stanje membranske posude prilikom isporuke:

$$p_0 = \frac{h_{sys} + h_{dod}}{10}, [\text{bar}] \quad (11)$$

gdje je,

h_{sys} - statička visina instalacije od sredine ekspanzijske posude do najviše točke sustava (određen iz crteža u Prilogu II $h_{sys} = 2,8\text{m}$), [m]

h_{dod} – dodatnih 0,5 do 3 metra (0,05 do 0,3 bar).

Uvrštavanjem poznatih veličina dobivamo:

$$p_0 = 1,425 \text{ bar}$$

Volumen ekspanzijske posude određuje se iz izraza:

$$V_{n,\min} = (V_e + V_v) \cdot \frac{p_e + 1}{p_e - p_0}, [\text{lit}] \quad (12)$$

gdje je,

$V_{n,\min}$ – minimalni volumen zatvorene ekspanzijske posude, [lit]

V_e – volumen širenja vode u litrima izazvan proširenjem vode pri temperaturama od 10°C do maksimalne temperature polaznog voda, [lit]

V_v – dodatni volumen – oko 0,5% volumena vode u instalaciji, min 3 litre,

p_e – projektni krajnji tlak, povezan sa točkom otvaranja sigurnosnog ventila – 0,5 bar ispod tlaka sigurnosnog ventila (tlak sigurnosnog ventila je 2,5 bar),

p_0 – primarni tlak ekspanzijske posude (tlak plina prilikom isporuke)

Volumen širenja određuje se prema izrazu:

$$V_e = \frac{n \cdot V_A}{100}, [\text{lit}] \quad (13)$$

gdje je,

n – postotak širenja vode (za 70°C iznosi 2,24),

V_A – volumen vode u sustavu (17,5 lit)

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u jednadžbu (13) dobivamo:

$$V_e = 0,392 \text{ lit}$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u jednadžbu (12) dobivamo:

$$V_{n,\min} = 9,5 \text{ lit}$$

3.2. Rezultati hidrauličkog proračuna

Proračunom je određen nazivni promjer čeličnih cijevi. Nazivni promjer odabranih cijevi je DN40 vanjskog promjera 48,3 mm i debljine stijenke 2,6 mm. Ukupno je potrebno 12 metara cijevi i 12 koljena $r/d = 1$.

U proračunu je dobiven protok $5,25 \text{ m}^3/\text{h}$ i visina dobave pumpe 0,43m te je prema tome odabrana pumpa Wilo-TOP-STG 40/10. Pumpa je prikazana sljedećom slikom.



Slika 12. Pumpa Wilo-TOP-STG 40/10

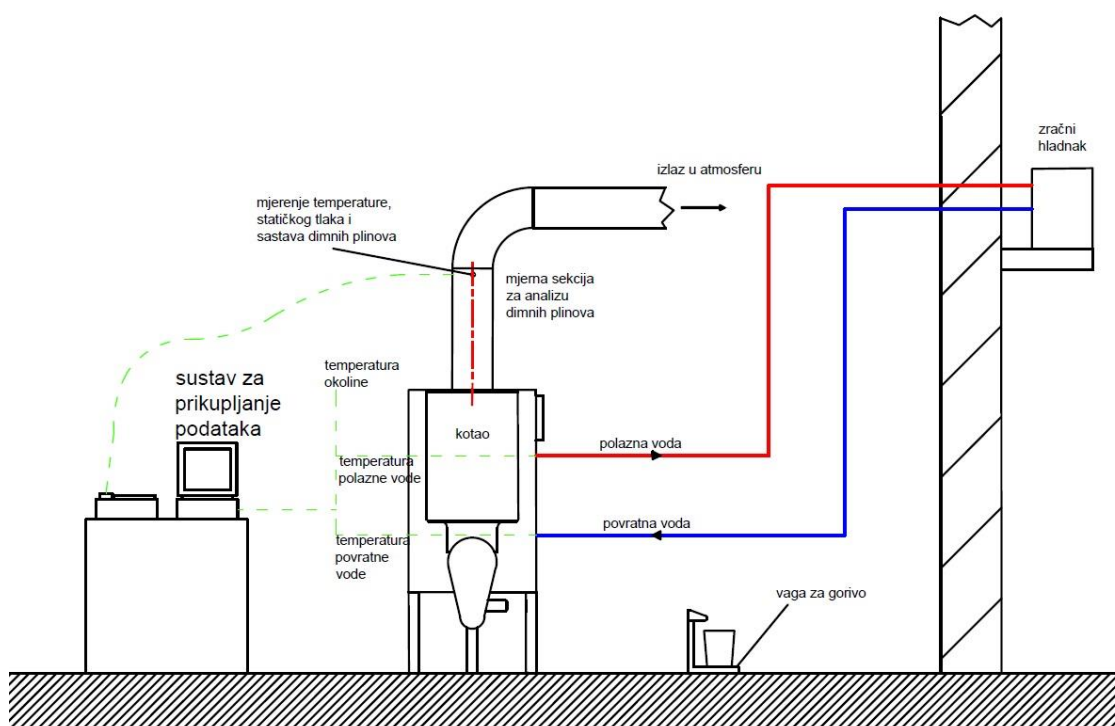
Proračunom je dobiven volumen ekspanzijske posude od 9,5 litara, uzimamo prvu veću koju je moguće nabaviti. Odabrana je ekspanzijska posuda IMERA R12 – 12L za centralno grijanje sa promjenjivom membranom. Ekspanzijska posuda prikazana je slikom 13.



Slika 13. Ekspanzijska posuda IMERA R12 – 12L

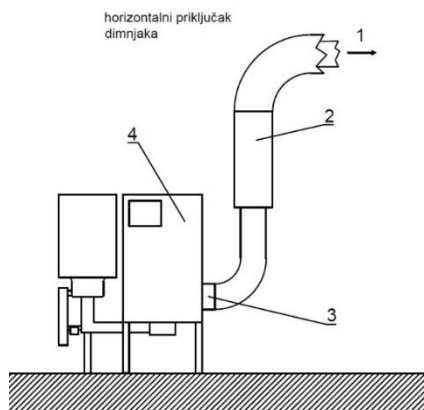
3.3. Izvedba ispitne linije

Ispitna linija sastoji se od kotla na pelete koji mora biti montiran u skladu s uputama proizvođača. Kotao treba biti postavljen na minimalnoj udaljenosti od zapaljivih predmeta prema uputama proizvođača. Mjerna linija za analizu dimnih plinova mora omogućiti mjerenje temperature dimnih plinova, određivanje sastava dimnih plinova te mjerenje statičkog tlaka (uzgona). Sve zajedno povezano je na hidraulički krug. Shema ispitne linije prikazana je na sljedećoj slici (Slika 14).



Slika 14. Shema ispitne linije

Mjerna linija za analizu dimnih plinova treba biti spojena na kotao. Dimni plinovi izbacuju se u atmosferu pomoću ventilatora. Ispitna linija može biti izvedena sa vertikalnim ili horizontalnim izlazom dimnih plinova, ovisno o izvedbi dimovodnog priključka na kotlu.

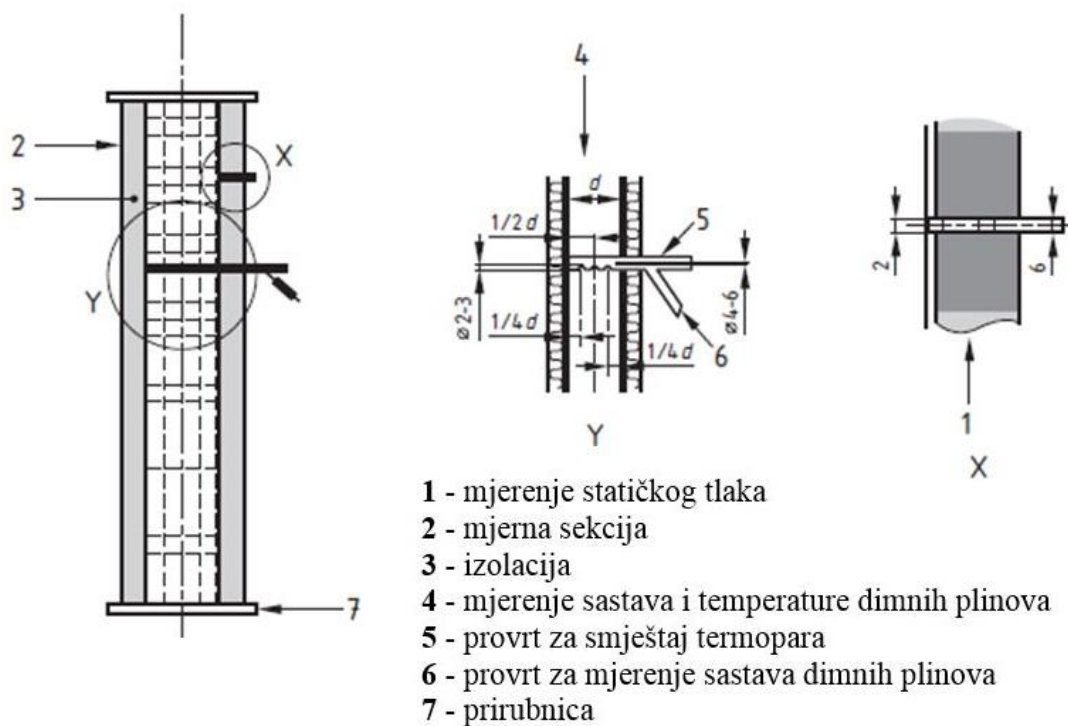


Slika 15. Horizontalna izvedba dimovodnog priključka

1 – izlaz prema atmosferi, 2 – mjerna sekcija, 3 – horizontalni priključak, 4 – kotao

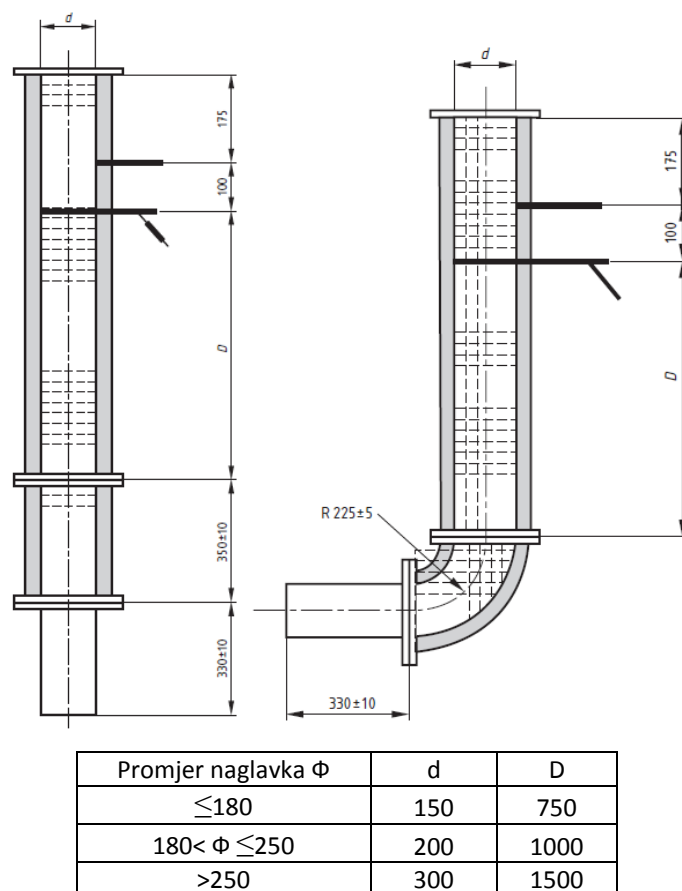
3.3.1. Mjerna linija za analizu dimnih plinova

Osnovna konstrukcija i detalji mjerne linije prikazani su na sljedećoj slici. Mjerna linija mora biti potpuno izolirana mineralnom vunom ili sličnim materijalom koji osigurava toplinsku vodljivost od $0,04 \text{ W/(mK)}$ na prosječnoj temperaturi od $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 16. Mjerna linija za analizu dimnih plinova

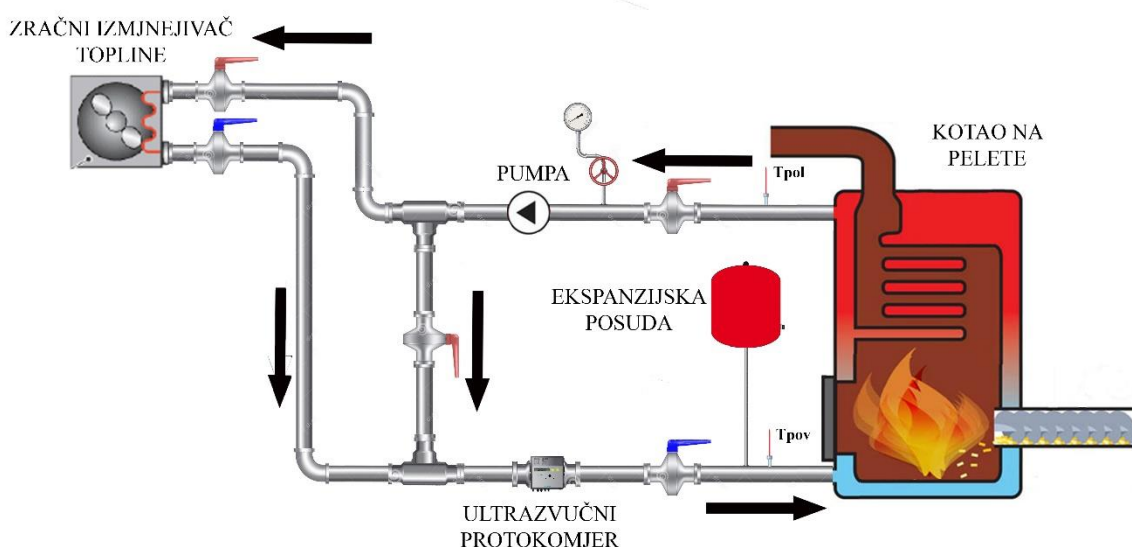
Temperatura dimnih plinova mjeri se pomoću termopara tipa K koji je kroz otvor 5 smješten unutar sonde, kao što je prikazano na slici 13 (detalj Y). Sonda sa zatvorenim krajem dodiruje nasuprotni zid mjerne sekcije. Sonda ima tri otvora za uzimanje uzorka, svaka $(2,5 \pm 0,5)$ mm promjera. Jedan otvor pozicioniran je u središte dimnjaka dok se preostala dva nalaze na $\frac{1}{4}$ promjera dimnjaka mjereno od unutarnje stjenke dimnjaka. Unutarnji promjer sonde mora biti (5 ± 1) mm. Ista sonda koristi se i za mjerenje sastava dimnih plinova. Uzorak dimnih plinova odvodi se kroz provrt 6 koji je spojen sa uređajem za analizu dimnih plinova i sustavom za obradu podataka. Statički tlak mjeri se pomoću cjevčice unutarnjeg promjera od 6 mm kao što je prikazano na prethodnoj slici (detalj X). Završetak cjevčice mora biti priljubljen za unutarnju stjenku mjerne sekcije. Mjerna linija treba biti spojena na kotao pomoću neizoliranog naglavka i izoliranog podesivog priključka. Naglavak mora biti izrađen od neobojanog mekog čelika. Duljina mora biti (330 ± 10) mm, a promjer mora odgovarati unutarnjem promjeru mjerne sekcije. Konstrukcija mjerne sekcije sa dimenzijama prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 17. Konstrukcija mjerne sekcije za vertikalni i horizontalni izlaz na dimnjak

3.3.2. Hidraulički krug

Kotao na pelete priključen je na krug vode pripremljen za mjerenje protoka te temperatura polaznog i povratnog voda dok je s dimovodne strane priključen na dimovodnu cijev ispitne linije opremljenu s instrumentima za analizu dimnih plinova. Krug vode, čija shema je prikazana na Slici 22. je zatvoren sustav s ekspanzijskom posudom i zračnim hladnjakom. Strujanje vode ostvaruje se pumpom za vodu, protok vode mjeri se ultrazvučnim kalorimetrom, a temperatura vode termoparovima T tipa. Kroz hidraulički krug cirkulira voda konstantnog protoka. Tijekom ispitivanja toplinskog učina kotla, prema normi HRN EN 303-5 temperatura izlazne (polazne) vode treba iznositi 80 ± 10 °C.



Slika 18. Hidraulički krug ispitne linije

3.4. Mjerna oprema

Svi mjerni uređaji i oprema moraju biti potpuno ispravni te moraju biti unutar razreda točnosti u skladu s normom HRN EN 303-5. Ovisno o mjerenoj veličini vrijednosti mogu odstupati kako je prikazano slijedećom tablicom.

Tablica 6. Normom dopuštena odstupanja mjernih veličina

Mjerena veličina	Dozvoljeno odstupanje
CO	± 10 % od mjerene vrijednosti ili 10 ppm (primjenjuje se veće odstupanje)
O ₂	± 5 % od mjerene vrijednosti ili 0,4% volumena (primjenjuje se veće odstupanje)
CO ₂	± 5 % od mjerene vrijednosti ili 0,4%
NO _x	± 5 % od mjerene vrijednosti ili 15 ppm (primjenjuje se veće odstupanje)
Efikasnost	± 3 % od stvarne vrijednosti
Volumni protok	Dopušteno odstupanje je najviše 0,5% mjerene vrijednosti
Mjerenje tlaka	Do vrijednosti 0,6 mbar dopušteno odstupanje iznosi 0,01 mbar
	Za vrijednosti tlaka veće od 0,6 mbar dopušteno odstupanje je maksimalno 2% od mjerene vrijednosti

Tijekom ispitivanja na ispitnoj su liniji instalirani slijedeći instrumenti i oprema:

3.4.1. Uređaj za mjerenje sastava dimnih plinova MRU Nova 2000

MRU Nova 2000 je kompaktan uređaj za provođenje mjerenja sastava dimnih plinova. Uređaj je ugrađen aluminijsko kućište. Mjerenje sastava dimnih plinova se provode u izdvojenom uređaju na osnovu uzorka koji se uzima pomoću mjerne sonde iz dimovodne cijevi. Uzorak

plina se pomoću membranske pumpe dovodi do rashladnika (Peltierov rashladni uređaj), gdje se naglo hladi i izdvaja se kondenzat (vodena para). Tako obrađeni plinovi se dalje vode na senzore za detekciju pojedinih plinova gdje se provodi elektrokemijska analiza. U dimnim plinovima može se mjeriti sadržaj kisika (O_2), ugljičnog monoksida (CO), ugljičnog dioksida (CO_2), dušičnog monoksida (NO), dušičnog dioksida (NO_2) i sumpornog dioksida (SO_2). Također se mjeri pretičak zraka i potlak na izlazu dimnih plinova iz kotla. Uređaj ima USB i R32 sučelje za prijenos podataka [9]. Mjerna nesigurnost ovog uređaja ovisno o mjerenoj veličini je:

- $\pm 0,2\%$ apsolutnog iznosa kod mjerenja kisika (O_2)
- 10 ppm ili $\pm 5\%$ kod mjerenja ugljičnog monoksida (CO)
- $\pm 0,3$ apsolutnog iznosa kod mjerenja ugljičnog dioksida (CO_2)
- $\pm 0,3$ mbar ili $\pm 1\%$ mjerene vrijednosti



Slika 19. Uređaj za mjerenje sastava dimnih plinova MRU Nova 2000 [9]

3.4.2. *Ultrazvučni kalorimetar SIEMENS tip UH50*

Ultrazvučni kalorimetar opremljen je raznim senzorima i može biti napajan iz različitih izvora napajanja. Koristi se za mjerenje potrošnje toplinske energije u sustavima centralnog grijanja. Također je prikladan za mjerenje volumnog protoka u hidrauličkim sustavima. Mjerenje volumnog protoka bazira se na ultrazvučnom principu mjerenja [10]. Mjerna nesigurnost ovih uređaja je unutar 1%. Uređaj ne sadrži pokretne dijelove zbog čega dijelovi nisu izloženi

trošenju. Optimalno mjesto za ugradnju ovog uređaja je na povratni vod hidrauličkog kruga. Postoje različite izvedbe ovakvih uređaja, a izvedba ovisi o mjerenoj snazi i protoku. Svaka izvedba isporučuje se sa cijevi određene dužine koja je potrebna kako bi se osiguralo precizno mjerenje. Zbog toga, kod ugradnje ovakvih uređaja nije potrebno voditi računa o utjecaju ostalih elemenata hidrauličkog kruga na rad ovog uređaja.



Slika 20. Ultrazvučni kalorimetar Siemens UH50 [10]

3.4.3. Vaga tip Ohaus CH30R11

Ohaus CH30R11 je digitalna vaga za laboratorij. Napajati se može izmjeničnom strujom ili baterijama. Ima sustav automatskog gašenja nakon određenog vremena neaktivnosti zbog uštede energije. Rezultat mjerenja se ispisa na LCD zaslonu [11].



Slika 21. Vaga tip Ohaus CH30R11 [11]

3.4.4. Termoparovi

Termoparovi su najrasprostranjeniji termometri, a njihove prednosti su da mogu raditi u velikom rasponu temperature i relativno su jeftini. Kod mjerenja temperature termoparovima izlazni signali napona su vrlo mali, reda veličine 10^{-3} [V]. Zbog toga je vrlo bitno da je taj signal dobro izoliran (zaštitnim kućištima i sli.) od drugih utjecaja iz okoline koji bi mogli kvariti izlazni signal (npr. od utjecaja elektromagnetnog polja) termopara i tako utjecati na promjenu izlaznog napona. U obzir se obavezno mora obavezno uzeti kompenzacija referentne temperature tj. temperature hladnog spoja.

3.4.4.1. Termoparovi na strani vode, CuKo (Tip T)

Termopar tip T često se koristi za regulaciju temperature, prije svega zbog njegove visoke točnosti, usprkos ograničenom temperaturnom opsegu do $+400$ °C. Standard zahtijeva točnost od ± 1 °C do temperature 100 °C, ali se na tržištu mogu naći primjerci sa boljom preciznošću, npr. ± 0.25 °C u cijelom radnom opsegu [12]. Ovaj tip termopara koristi se za mjerenje temperature okoliša te temperatura vode polaza i povrata.

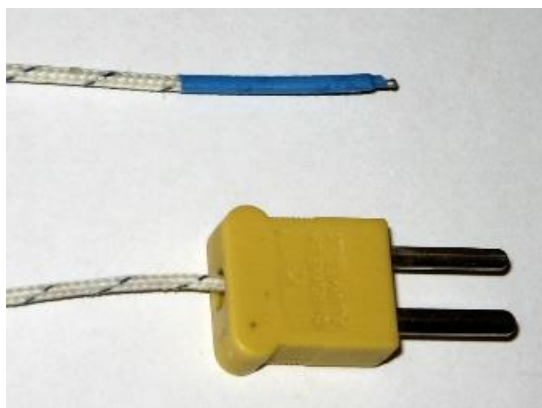


Slika 22. Termopar Tip T

3.4.4.2. Termopar u ložištu NiCr-Ni (Tip K)

Termopar Tip K napravljen je od legure Nikal + Krom. Ovaj tipovi, kao i ostali tipovi, termoparova se umjeravaju zbog postizanja veće točnosti. Njegova točnost je određena normom i ona iznosi ± 3 °C između temperatura 0 °C i 400 °C i ± 0.75 °C između temperatura $+400$ °C

i 1100 °C. Ovaj tip termopara koristi se i van ovih opsega temperatura, ali tada točnost nije definirana [12]. Ovaj tip termopara koristi se za mjerenje temperature dimnih plinova.



Slika 23. Termopar Tip K [13]

3.4.4.3. Kontaktni termopar

Kontaktni termopar mjeri temperaturu objekta s kojim je termopar u kontaktu. Termopar je spojen na prijenosni uređaj koji je kompatibilan sa K,J,T,S termoparovima. Ovj kontaktni termopar koristi se za mjerenje temperature vanjske ovojnice kotla.



Slika 24. Kontaktni termopar

3.4.5. A/D pretvarač proizvođača Agilent

A/D pretvarač je uređaj koji povezuje analitičke instrumente sa podatkovnim sustavima. Pretvara analogni signal analitičkih instrumenata u digitalni signal i prenosi na glavno računalo za daljnju obradu podataka [14].



Slika 25. A/D pretvarač proizvođača Agilent [15]

4. ISPITIVANJE KOTLA NA BIOMASU

4.1. Općenito

Da bi se utvrdio toplinski učin, efikasnost kotla, sastav dimnih plinova, izlazna temperatura dimnih plinova i potlak na izlazu dimnih plinova kotao, prilikom testiranja, radi u različitim pogonskim režimima. Kod nominalnog toplinskog učina kotlom treba upravljati tako da je omogućen neprekidan rad kotla. Minimalni toplinski učin kotla treba se automatski regulirati upravljačkim uređajima bez ručnih intervencija. Prije bilo kakvog mjerenja kotao treba postići radnu temperaturu. Tijekom ispitivanja kotlom treba upravljati u skladu sa uputama proizvođača. Temperatura okolišnog zraka treba biti između 15 °C i 30 °C. Potlak na izlazu dimnih plinova treba biti podešen na minimalni potlak definiran od proizvođača. Prilikom ispitivanja srednja vrijednost potlaka ne smije odstupati od određene vrijednosti više od $\pm 3,0$ Pa.

4.2. Mjerene veličine

Mjerenja sljedećih parametara provode se jednokratno i dobiveni rezultati zapisuju se u izvješću o ispitivanju:

- sadržaj vlage u gorivu,
- donja ogrjevna vrijednost goriva,
- protok mase goriva,
- površinske temperature (kod nominalnog učina i tipičnih radnih uvjeta).

Mjerenja sljedećih mjernih veličina trebaju biti kontinuirana i zapisana u izvješću o ispitivanju:

- toplinski učin,
- temperatura polaza vode,
- temperatura povrata vode,
- temperatura okoliša,
- temperatura dimnih plinova,
- potlak na izlazu dimnih plinova,
- sadržaj kisika O₂,

- ugljičnog dioksida CO_2 ,
- sadržaj ugljičnog monoksida CO.

Sve mjerne veličine koje se moraju konstantno mjeriti trebaju imati maksimalni vremenski interval mjerenja 20 s, a zapisane trebaju biti kao srednje vrijednosti intervala od najviše 1 minute. Vremenski intervali trebaju biti tako određeni da se oscilacije mjernih veličina mogu zapisati sa zadovoljavajućom točnošću. Zapisane srednje vrijednosti su osnova za određivanje srednje vrijednosti za ispitni period.

4.3. Metoda i vrijeme ispitivanja

Prije početka ispitivanja kotao treba dovesti na radnu temperaturu koristeći odgovarajuću količinu goriva. Nakon uspostavljanja potrebnog stabilnog stacionarnog stanja:

- trajanje ispitivanja kod nominalnog toplinskog učina treba trajati najmanje 6 sati,
- ispitivanje kod najmanjeg kontinuiranog toplinskog učina treba trajati najmanje 6 sati,
- ispitivanje kod najmanjeg toplinskog učina u radu s prekidima treba trajati najmanje 6 sati + vrijeme za završavanje zadnjeg perioda.

4.4. Određivanje toplinskog učina i efikasnosti kotla

4.4.1. Metode mjerenja toplinskog učina

Mjeri se količina korisne topline predane radnom mediju (vodi). Može se odrediti direktno u krugu kotla ili indirektno preko izmjenjivača topline.

4.4.1.1. Određivanje toplinskog učina u krugu kotla

Količina korisne topline predane vodi određuje se mjerenjem masenog protoka hladne vode koja ulazi u sustav kotla i porast temperature do izlazne temperature vode iz kotla.

4.4.1.2. Određivanje toplinskog učina preko izmjenjivača topline

Toplinska energija proizvedena u kotlu predaje se okolišu u izmjenjivaču topline. Toplina koja se preda okolišu dobije se izračunom iz protoka i razlike temperature radnog medija. Toplinski gubici priključaka između kotla i izmjenjivača topline te gubici topline samog izmjenjivača

topline određuju se preliminarnim ispitivanjima ili preko linija specifičnih gubitaka topline mjerne linije. Toplinski učin kotla dobije se zbrajanjem količine toplinskih gubitaka i topline predane okolišu.

4.4.2. Određivanje nominalnog toplinskog učina

Toplinski učin koji je odredio proizvođač prilikom ispitivanja treba biti određen u granicama od $\pm 8\%$. Tijekom ispitivanja na nominalnom toplinskom učinku srednja vrijednost polazne temperature treba biti između $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, a srednja temperaturna razlika vode polaza i povrata treba biti između $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Razlika temperature treba se održavati da vrijedi:

$$\frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2} - \vartheta_{ok} \geq 35,0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

gdje su:

- ϑ_{pol} – temperatura polaza vode ($^{\circ}\text{C}$),
- ϑ_{pov} – temperatura povrata vode ($^{\circ}\text{C}$),
- ϑ_{ok} – temperatura okoliša ($^{\circ}\text{C}$).

4.4.3. Određivanje minimalnog toplinskog učina

Provođenje ispitivanja minimalnog toplinskog učina treba biti na najmanjem toplinskom učinku koji je odredio proizvođač te trebaju biti ostvareni zahtjevi iz članka 2.4.5. Temperature na strani vode definirane u članku 4.4.2 trebaju biti uzete u obzir prilikom ispitivanja, sa iznimkom razlike temperature povrata i polaza vode. Minimalni toplinski učin treba postići prije početka ispitivanja. Kotao treba traženi toplinski učin postići automatski preko upravljačkog uređaja.

4.4.4. Određivanje efikasnosti kotla (direktna metoda)

Efikasnost treba biti određena koristeći direktnu metodu baziranu na donjoj ogrjevnoj vrijednosti H_d .

4.5. Određivanje vrijednosti emisija

Prosječna vrijednost sadržaja CO₂, O₂ i CO mjeri se tijekom cijelog ispitnog perioda kod nominalnog toplinskog učina. Kod utvrđivanja sastava prašine ispitni period podjeljuje se na najmanje 4 jednaka vremenska dijela. U svakom vremenskom dijelu perioda mjerenja počinju sa početkom svakog pojedinog dijela. Vrijeme po filteru je ograničeno na 30 minuta. Prosječni sadržaj prašine se određuje iz najmanje 4 izmjerene vrijednosti. Kod minimalnog toplinskog učina mjerenja emisija se izvode tijekom jednog perioda izgaranja.

4.6. Opis postupka ispitivanja

4.6.1. Mjerenje protoka goriva

Mjerenje ovog parametra ne provodi se kontinuirano tijekom cijelog ispitnog postupka. Postoje dva načina kojima je moguće odrediti protok goriva. Mjerenje se provodi kroz tri perioda, a svaki od njih traje najmanje 10 minuta. Konačan iznos protoka goriva je srednja vrijednost izmjerenih protoka. Prije početka mjerenja protoka goriva potrebno je potpuno ukloniti pepeo i neizgorene ostatke peleta iz ložišta kotla.

4.6.1.1. Mjerenje protoka goriva iz ložišta

- na upravljačkoj ploči podesiti brzinu istjecanja goriva
- uključiti automatski sustav loženja
- zapisati točno vrijeme uključivanja sustava automatskog loženja
- nakon točno 10 minuta isključiti sustav loženja
- skupiti gorivo iz ložišta i izvagati
- izmjerenu masu goriva podijeliti sa vremenom 600s, zapisati protok goriva u kg/s
- postupak ponoviti tri puta
- odrediti srednji protok iz tri izmjerene vrijednosti

4.6.1.2. Mjerenje protoka goriva iz spremnika goriva

- na upravljačkoj ploči podesimo brzinu istjecanja goriva

- izmjeriti masu goriva iz spremnika
- uključiti automatski sustav loženja
- zapisati točno vrijeme uključivanja sustava loženja
- nakon točno 10 minuta isključiti sustav loženja
- isisati gorivo iz automatskog sustava loženja i vratiti u spremnik
- izmjeriti preostalu masu goriva iz spremnika
- razliku izmjerenih masa goriva podijeliti sa 600s
- zapisati izmjereni protok u kg/s
- postupak ponoviti tri puta
- odrediti srednji protok iz tri izmjerene vrijednosti

4.6.2. Zapaljenje i predispitni period

- uključiti ventilator i namjestiti potlak
- odrediti protok vode kako bi se osigurali parametri iz 4.4.2
- uključiti ultrazvučni protokomjer
- podesiti protok vode u hidrauličkom krugu pomoću regulacijske armature
- uključiti automatski sustav loženja
- izvršiti paljenje goriva preko upravljačke ploče (paljenje se postiže upaljačem u ložištu)
- uključiti ventilator zračnog hladnjaka
- podesiti temperaturu polaza vode iz 4.4.2. pomoću prestrujnog ventila
- uključiti opremu za kontinuirano mjerenje sastava dimnih plinova i opreme za kontinuirano mjerenje temperatura

4.6.3. Ispitni period

- očitavati i zapisivati promjene na protokomjeru (odrediti srednju vrijednost)
- kontinuirano mjeriti parametre u vremenskim intervalima od maksimalno 30s, zapisivati vrijednosti u intervalima ne većim od 1min

- u stacionarnom radu kotla izmjeriti vanjske temperature ovojnice kotla (podijeliti ovojnicu kotla na područja podjednake temperature, izmjeriti temperaturu u nekoliko točaka pojedinog područja, iz izmjerenih temperatura odrediti srednju temperaturu pojedinih područja)
- izmjeriti dimenzije vanjske ovojnice kotla (odrediti površine područja podjednake temperature određenih u prethodnom koraku, svakoj površini pridružiti određenu srednju temperaturu)
- nakon završetka ispitnog perioda prema 4.3. isključiti sustav automatskog loženja
- nakon ohlađivanja kotla na sobnu temperaturu, ukloniti pepeo i neizgorene ostatke goriva iz ložišta
- izvagati pepeo i neizgorene ostatke

4.7. Mjerni protokol

Mjerni protokol ispitivanja karakteristika toplovodnog kotla prikazan je tablicom 4 (Tablica 7.), sadrži redoslijed niza ispitivanja koja su izvršena te njihov period i točno vrijeme izvršavanja.

Tablica 7. Mjerni protokol

MJERNI PROTOKOL ZA ISPITIVANJE TOPLINSKIH KARAKTERISTIKA KOTLA NA BIOMASU PREMA HRN EN 303-5 – Kotlovi na kruta goriva			
	Tip kotla :	Kotao na pelete	
	Datum :	13.11.2014.	
	Ispitivač :	Igor Cigić	
		min	vrijeme ispitivanja, h
1	MJERENJE PROTOKA GORIVA brzina 6,1		
	1. ispitni period	10	9:36 – 9:46

	2. ispitni period	10	09:48 – 9:58
	3. ispitni period	10	10:00 – 10:10
2	MJERENJE PROTOKA GORIVA brzina 10		
	1. ispitni period	10	10:13 – 10:23
	2. ispitni period	10	10:25 – 10:35
	3. ispitni period	10	13:36 – 10:46
3	ISPITIVANJE TOPLINSKIH KARAKTERISTIKA KOTLA protok goriva brzina 6,1		
	predispitni period	55	10:50 – 11:45
	ispitni period	35	11:45 – 12:20
4	MJERENJE PROTOKA GORIVA brzina 6,1		
	1. ispitni period	20	09:38 – 9:58
	2. ispitni period	20	9:58 – 10:18
	3. ispitni period	20	10:21 – 10:41
<i>NAPOMENA :Ispitni period ispitivanja toplinskih karakteristika je 35 minuta, normom je propisan period trajanja ispitnog perioda najmanje 6h. Ponovljena su mjerenja protoka goriva kod brzine 6,1.</i>			

Podaci dobiveni nakon svakog ispitnog perioda dio su mjernog protokola i zapisani su u sljedećim tablicama. Tablica 8. sadrži podatke mjerenja protoka prema protokolu iz tablice 4. U tablici 6. zapisane su srednje vrijednosti mjerenih parametara u hidrauličkom krugu nakon

ispitnog perioda, a u tablici 7. su zapisane srednje vrijednosti parametara mjerenih na mjernoj liniji dimnih plinova.

Tablica 8. Rezultati mjerenja protoka goriva

		Masa goriva	Period	Protok goriva
Dan	Vrijeme	m_B	τ	B
dd.mm.gg	hh:mm	kg	s	kg/h
Mjerenje protoka goriva - brzina 6,1				
13.11.2014.	9:46	0,66	600	3,69
13.11.2014.	9:58	0,73	600	4,38
13.11.2014.	10:10	0,71	600	4,26
Mjerenje protoka goriva – brzina 10				
13.11.2014.	10:23	1,24	600	7,44
13.11.2014.	10:35	1,21	600	7,26
13.11.2014.	10:46	1,25	600	7,5
Mjerenje protoka goriva – brzina 6,1				
24.11.2014.	9:58	1,44	1200	4,32
24.11.2014.	10:18	1,47	1200	4,41
24.11.2014.	10:21	1,47	1200	4,41

Tablica 9. Srednje vrijednosti parametara mjerenih u hidrauličkom krugu

Dan	Vrijeme	ϑ_{pol}	ϑ_{pov}	ϑ_{ok}	q_{vw}	Qw
dd.mm.gg	hh:mm	°C	°C	°C	m ³ /h	kW
13.11.2014.	12:20	79,64	61,00	16,07	19,69	19,69

Tablica 10. Srednje vrijednosti parametara mjerenih na mjernoj liniji dimnih plinova

Dan	Vrijeme	ϑ_{dp}	λ	O ₂	CO ₂	CO	CO	Potlak
dd.mm.gg	hh:mm	°C	-	%	%	ppm	ppm/O ₂	Pa
13.11.2014.	12:20	180,28	1,7	8,58	11,98	750,00	654,58	-0,14

4.8. Objekt ispitivanja

Za potrebe ispitivanja koristiti će se toplovodni kotao na drvene pelete. Na kotao je ugrađen pužni mehanizam za automatsku dobavu goriva, te ventilator za dobavu zraka. Kotao je ugrađen na mjernu liniju u *Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje FSB Zagreb*.



Slika 26. Ispitna stanica

Mjerenja su provedena prema normi HRN EN 303-5. Mjerna linija može biti izvedena kao otvoreni sustav ili zatvoreni sustav. Protok vode mjeren je pomoću volumnog ultrazvučnog protokomjera Siemens UH50. Hidraulički krug ispitne stanice shematski je prikazan na slici 18 (Slika 18). Pomoću regulacijskih ventila se namješta protok vode u sustavu, tj. razlika temperatura polaznog i povratnog voda iz kotla. Pomoću prestrujnog voda i regulacijskog ventila na tom vodu uspostavlja se željena temperatura vode polaznog voda iz kotla. Korisna toplina u kotlu se predaje vodi koja se odvodi cjevovodima do izmjenjivača topline koji se nalazi izvan ispitne stanice. Tip izmjenjivača je voda-zrak (Slika 27.) te se preko njega toplina predaje okolišu.



Slika 27. Izmjenjivač topline voda-zrak

Mjerna linija za analizu dimnih plinova izvedena je prema 3.3.1. i omogućuje mjerenje sastava dimnih plinova, temperaturu dimnih plinova te potlak u dimnjaku. Mjerna oprema za analizu dimnih plinova je analizator dimnih plinova MRU Nova 2000, a na slici 28. vidimo sondu priključenu na mjernu sekciju za mjerenje dimnih plinova pomoću koje se uzima uzorak dimnih plinova te odvodi do jedinice analizatora dimnih plinova u kojoj se analizira uzorak. Analiza je automatska i kontinuirana tijekom cijelog ispitnog perioda. Koncentracija kisika O_2 , CO_2 , CO te temperatura dimnih plinova i potlak određuju se svakih 30s. Iz ovih vrijednosti odredi se prosječna vrijednost pojedine veličine i ti se podaci koriste u termodinamičkom proračunu.

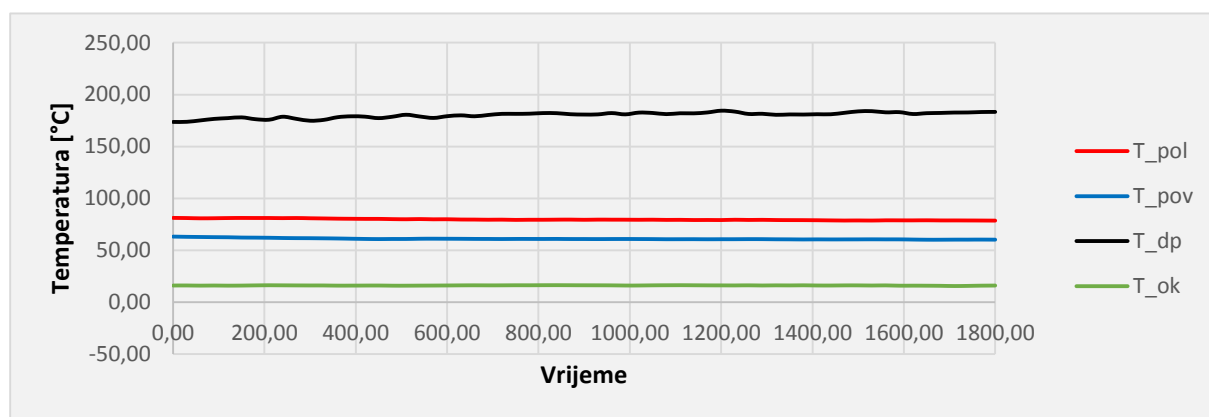


Slika 28. Mjerenje temperature i potlaka te uzimanje uzorka dimnih plinova

Detaljni crtež sa dimenzijama mjerne linije i smještaj svih komponenti kotla i pripadajuće opreme nalazi se prilogu II.

4.9. Rezultati ispitivanja

Provedeno je ispitivanje toplinskih karakteristika kotla. Trajanje ispitivanja bilo je 1,5 h (10:50 – 12:20 h). Mjerni podaci zapisivani su u intervalima od 30 sekundi tijekom cijelog perioda trajanja ispitivanja. Na sljedećem dijagramu prikazane su najznačajnije mjerene temperature.



Slika 29. Prikaz mjerenih temperatura

Na kraju ispitivanja izračunata je prosječna temperatura polazne vode:

$$t_{pol} = 79,64 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

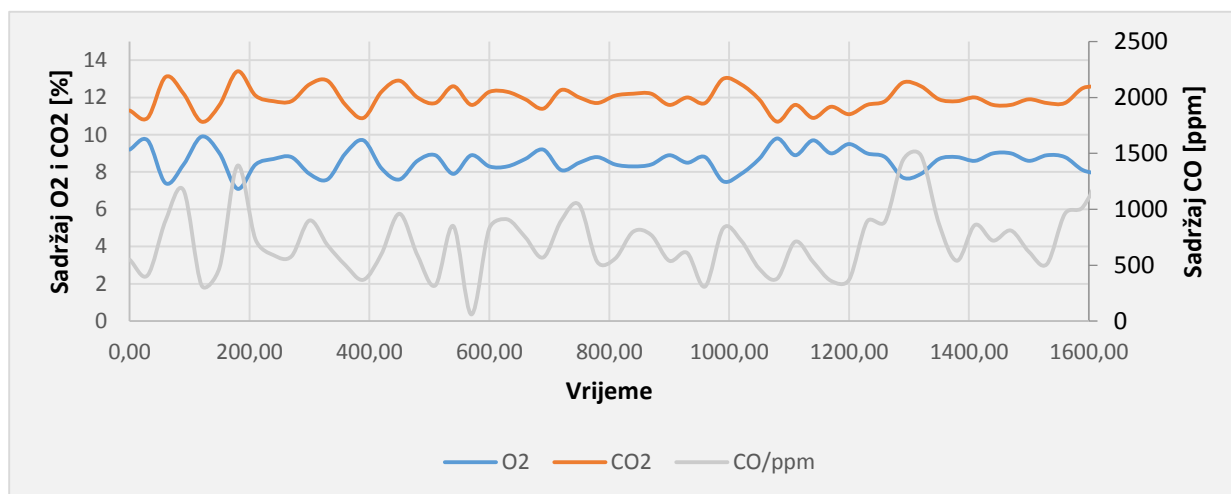
te prosječna temperatura povratne vode:

$$t_{pov} = 61,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Pomoću protokomjera mjeran je protok vode tijekom ispitivanja, te je izračunat prosječni protok koji iznosi 0,93 m³/h.

Izmjerena je koncentracija O₂ [%], CO₂ [%] i CO [ppm] u dimnim plinovima. Srednja koncentracija CO u dimnim plinovima iznosi 750 ppm odnosno 0,075 %. Srednja koncentracija O₂ u dimnim plinovima iznosi 8,58 [%], a srednja koncentracija CO₂ iznosi 11,98 %. Također je izmjerena i koncentracija CO s obzirom na normom propisanih 10% kisika u suhim dimnim plinovima. Srednja koncentracija CO s obzirom na 10% kisika u suhim dimnim plinovima iznosi 654,58 ppm/O₂. Ova koncentracija služi za usporedbu sa drugim kotlovima i za

određivanje klase kotla. Na sljedećem dijagramu prikazana su kretanja koncentracije O₂, CO₂ i CO tijekom stacionarnog perioda ispitivanja.



Slika 30. Sadržaj produkata dimnih plinova

4.9.1. Klasa kotla

Klasu kotla određuje korisnost kotla i sadržaj ugljičnog monoksida (CO) izmjeren s obzirom na normom propisan sadržaj kisika u suhim dimnim plinovima od 10%. Izračunata efikasnost kotla je $\eta_K = 88\%$ pa prema dijagramu prikazanom na slici 10 (Slika 10.) kotao spada u klasu 5. Koncentracija CO s obzirom na propisan sadržaj kisika iznosi 750 ppm pa prema tablici 3 (Tablica 3.) kotao spada u klasu 4. Konačno, kotao spada u klasu 4 budući da kotao treba zadovoljiti sve uvjete pojedine klase.

5. TERMODINAMIČKI PRORAČUN

5.1. Ulazni podaci

Proračun je proveden prema HRN EN 303-5. Za ulazne podatke korištene su vrijednosti dobivene ispitivanjem kotla (Tablica 11).

Tablica 11. Ulazni podaci za termodinamički proračun

Opis	Oznaka	Vrijednost
Normom propisan sadržaj kisika u suhim dimnim plinovima	$O_{2\text{standard}}$	10 %
Prosječni sadržaj kisika u suhim dimnim plinovima	$O_{2\text{avg}}$	8,58 %
Prosječni sadržaj ugljičnog dioksida u suhim dimnim plinovima	$CO_{2\text{avg}}$	11,98 %
Prosječni sadržaj ugljičnog monoksida u suhim dimnim plinovima	CO_{avg}	750 ppm ili 0,075 %
Srednja temperatura dimnih plinova	t_a	180,28 °C
Srednja temperatura ispitne prostorije	ϑ_{ok}	16,07 °C
Niža srednja temperatura dijela ovojnice kotla	t_{m1}	38 °C
Viša srednja temperatura dijela ovojnice kotla	t_{m2}	200 °C
Površina ovojnice niže srednje temperature	A_1	3,2 m ²
Površina ovojnice više srednje temperature	A_2	0,1 m ²
Masa goriva	B	4,38 kg/h
Donja ogrjevna vrijednost goriva	H_d	18396 kJ/kg
Sadržaj ugljika u pepelu	C_r	0 %
Faktor pretička zraka	λ	1,7
Specifični toplinski kapacitet vode	c_{psr}	4,1896 kJ/(kgK)
Gustoća vode	ρ_w	976,54 kg/m ³

Volumni protok vode	q_{vw}	0,93 m ³ /h
Maseni protok vode = $\rho_w \cdot V_w$	q_{mw}	908,18 kg/h
Prosječna temperatura vode polaza	ϑ_{pol}	79,64 °C
Prosječna temperatura vode povrata	ϑ_{pov}	61 °C
Srednja temperatura vode polaza i povrata	ϑ_{sr}	70,32 °C
Sastav goriva - drveni peleti		
Sadržaj vlage	W	8 %
Sadržaj vodika	H	5,49 %
Sadržaj ugljika	C	45,75 %
Sadržaj sumpora	S	0 %
Sadržaj kisika	O	40,16 %
Sadržaj pepela	A	0,50 %
Sadržaj dušika	N	0,1 %

5.2. Specifične topline produkata izgaranja

5.2.1. Specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova pri standardnim uvjetima

Specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova pri standardnim uvjetima određuje se prema sljedećoj formuli [17]:

$$C_{pm,sdp} = 0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_a}{1000^\circ\text{C}}\right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000^\circ\text{C}}\right)^2 + \left[\left\{ 0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_a}{1000^\circ\text{C}}\right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_a}{1000^\circ\text{C}}\right)^2 \right\} \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%}\right) + \left[\left\{ 0,03 \left(\frac{t_a}{1000^\circ\text{C}}\right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_a}{1000^\circ\text{C}}\right)^2 \right\} \cdot \left(\frac{CO_2}{100\%}\right) \right] \right], [\text{Wh/m}^3\text{K}]$$

(14)

t_a je srednja temperatura dimnih plinova, a CO_2 je prosječni sadržaj ugljičnog dioksida u suhim dimnim plinovima. Konačno se dobiva:

$$C_{pm,sdp} = 0,377 [\text{Wh/m}^3\text{K}] = 1,36 [\text{kJ/m}^3\text{K}]$$

5.2.2. Specifični toplinski kapacitet vodene pare

Specifični toplinski kapacitet vodene pare u produktima izgaranja određuje se prema sljedećoj formuli [17]:

$$C_{pm,h_2o} = 0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_a}{1000\text{ }^{\circ}\text{C}}\right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000\text{ }^{\circ}\text{C}}\right)^2, [\text{Wh/m}^3\text{K}] \quad (15)$$

Uvrštavanjem srednje temperature dimnih plinova t_a u prethodnu formulu dobivamo:

$$C_{pm,h_2o} = 0,422 [\text{Wh/m}^3\text{K}] = 1,52 [\text{kJ/m}^3\text{K}]$$

5.3. Proračun parametara izgaranja

Za ovaj proračun potrebna je elementarna analiza goriva zbog toga jer moraju biti zadani sadržaji ugljika c [kg_c/kg_B], vodika h [kg_h/kg_B], sumpora s [kg_s/kg_B], kisika o [kg_o/kg_B], vlage w [kg_w/kg_B], pepela a [kg_a/kg_B] i dušika n [kg_n/kg_B]. Sadržaj goriva preuzet je od proizvođača goriva. Vrijednosti parametara izgaranja prikazane su u tablici 12:

Tablica 12. Proračun parametara izgaranja goriva

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sastav goriva	Udio u smjesi	Potreba za O ₂	Produkti izgaranja goriva (m ³ /kg _B)								
	kg _x /kg _B	m ³ /kg _x	Udio u smjesi X Potreba za O ₂	CO ₂		SO ₂		H ₂ O		N ₂	
				m ³ (CO ₂)/kg _c	Udio u smjesi X m ³ (CO ₂)/kg _c	m ³ (SO ₂)/kg _s	Udio u smjesi X m ³ (SO ₂)/kg _s	m ³ (H ₂ O)/kg _h	Udio u smjesi X m ³ (H ₂ O)/kg _h	m ³ (N ₂)/kg _n	Udio u smjesi X m ³ (N ₂)/kg _n
Maseni udio ugljika, c	0,4775	1,86	0,888	1,85	0,883	-	-	-	-	-	-
Maseni udio vodika, h	0,0549	5,55	0,305	-	-	-	-	11,1	0,60939	-	-
Maseni udio sumpora, s	0	0,7	0	-	-	0,68	0	-	-	-	-
Maseni udio kisika, o	0,4016	-0,7	-0,281	-	-	-	-	-	-	-	-
Maseni udio vlage, w	0,06	0	0	-	-	-	-	1,24	0,0744	-	-
Maseni udio pepela, a	0,005	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Maseni udio dušika, n	0,001	0	0	-	-	-	-	-	-	0,0001	0,0000001
Ukupno	1	$O_{min} = 0,875$		$V_{CO_2} = 0,846$		$V_{SO_2} = 0$		$V_{H_2O} = 0,709$		$V_{N_2} = 0$	

5.3.1. Stehiometrijska količina kisika

Stehiometrijska količina kisika određuje se iz tablice 12. Stupac 1 u tablici 12. sadrži masene udjele komponenata goriva (kg_x/kg_B). Stupac 2 u tablici 12. sadrži potrebnu količinu kisika koja je potrebna za stehiometrijsko izgaranje jednog kilograma pojedinog gorivog elementa (m^3/kg_c). U stupcu 3 dan je umnožak vrijednosti iz stupaca 2 i 3. Stehiometrijska količinu kisika određuje se prema sljedećem izrazu:

$$O_{min} = \sum 3, [\text{m}^3/\text{kg}_B] \quad (16)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz stupca 3 tablice 12 dobivamo:

$$O_{min} = 0,875 [\text{m}^3/\text{kg}_B]$$

5.3.2. Potrebna minimalna količina zraka

Minimalna količina zraka određuje se prema sljedećoj formuli [17]:

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{0,21}, [\text{m}^3/\text{kg}_B] \quad (17)$$

Uvrštavanjem odgovarajućih vrijednosti u jednadžbu (7) dobivamo:

$$L_{min} = 4,342 [\text{m}^3/\text{kg}_B]$$

5.3.3. Količina suhih dimnih plinova kod stehiometrijskog izgaranja

Volumen suhih dimnih plinova kod stehiometrijskog izgaranja određuje se prema sljedećoj formuli [17]:

$$V_{sdp,min} = \sum 5 + \sum 7 + \sum 11 + O_{min} \cdot \frac{0,79}{0,21}, [\text{m}^3/\text{kg}_B] \quad (18)$$

Suma 5, 7 i 11 odnose se na sume vrijednosti u stupcima 5, 7 i 11 u tablici 12. Uvrštavanjem svih poznatih vrijednosti dobivamo:

$$V_{sdp,min} = 4,164 [\text{m}^3/\text{kg}_B]$$

5.3.4. Određivanje CO_{2max}

Vrijednost CO_{2max} je maksimalni volumni udio ugljičnog monoksida koji se može pojaviti u dimnim plinovima, a određuje se prema formuli [17]:

$$CO_{2max} = \frac{\Sigma 5}{V_{sdp,min}}, [m^3/m^3] \quad (19)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$CO_{2max} = 0,205 [m^3/m^3]$$

5.3.5. Određivanje SO_{2max}

Vrijednost SO_{2max} je maksimalni volumni udio sumpornog dioksida koji se može pojaviti u dimnim plinovima, a određuje se prema formuli [17]:

$$SO_{2max} = \frac{\Sigma 7}{V_{sdp,min}}, [m^3/m^3] \quad (20)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$SO_{2max} = 0 [m^3/m^3]$$

5.3.6. Stvarna količina dimnih plinova

Stvarna količina dimnih plinova određuje se prema formuli [17]:

$$V_{sdp} = \frac{\Sigma 5 + \Sigma 7}{(CO_2 + SO_2)_{avg} + CO_{avg}}, [m^3/kg_B] \quad (21)$$

gdje je:

CO_{2avg} – izmjereni volumni udio CO_2 u dimnim plinovima [m^3/m^3]

SO_{2avg} – izmjereni volumni udio SO_2 u dimnim plinovima [m^3/m^3]

CO_{avg} – izmjereni volumni udio CO u dimnim plinovima [m^3/m^3].

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$V_{sdp} = 7,024 [m^3/kg_B]$$

5.3.7. Količina vodene pare u dimnim plinovima

Količina vodene pare koja se pojavljuje u dimnim plinovima računa se pomoću izraza [17]:

$$V_w = \sum 9, [\text{m}^3/\text{kg}_B] \quad (22)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$V_w = 0,709 [\text{m}^3/\text{kg}_B]$$

5.4. Efikasnost kotla

Efikasnost kotla u izvješću treba biti izražena u postotcima.

5.4.1. Indirektna metoda

Indirektna metoda koristi se za kontrolu stupnja efikasnosti izračunatog direktnom metodom. Ova metoda zasniva se na određivanju toplinskih gubitaka iz kotla te naknadnim izračunom korisno odane topline. 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 neizgorenog goriva u pepelu. Efikasnost kotla računa se prema slijedećem izrazu:

$$\eta_K = (1 - q_A - q_U - q_S - q_B) \cdot 100, [\%] \quad (23)$$

gdje je,

q_A – relativni gubitak osjetne topline dimnim plinovima, [-]

q_U – relativni gubitak topline dimnim plinovima zbog nepotpunog izgaranja, [-]

q_S – relativni gubitak topline kroz vanjsku ovojnicu kotla, [-]

q_B – relativni gubitak topline kao posljedica neizgorenog ostatka goriva u pepelu, [-]

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$\eta_K = 86,1 [\%]$$

5.4.1.1. Gubitak osjetne topline dimnim plinovima q_A

Relativni gubitak osjetne topline q_A , je posljedica više temperature dimnih plinova u odnosu na temperaturu zraka za izgaranje. Ako je temperatura zraka i goriva dovedenog u ložište jednaka temperaturi okoliša, a dimni plinovi su odvojeni na suhe dimne plinove i vodenu paru u dimnim plinovima, toplinski gubici dimnim plinovima računaju se prema slijedećem izrazu:

$$q_A = (V_{sdp} \cdot C_{pm,sdp} + V_w \cdot C_{pm,h_2o}) \cdot (t_a - \vartheta_{ok}) \cdot \frac{1}{H_d}, [-] \quad (24)$$

gdje je,

t_a – srednja temperatura dimnih plinova, [°C]

ϑ_{ok} – temperatura okoliša, [°C]

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$q_A = 0,095 [-]$$

5.4.1.2. Gubitak topline dimnim plinovima zbog nepotpunog izgaranja q_U

Relativni gubici dimnim plinovima zbog nepotpunog izgaranja q_U odnose se na kemijsku energiju sadržanu u ugljičnom monoksidu (CO) čiji sadržaj u dimnim plinovima je pri nepotpunom izgaranju povećan. Gubici topline zbog nepotpunog izgaranja računaju se prema izrazu:

$$q_U = CO \cdot V_{sdp} \cdot \frac{12,64}{H_d}, [-] \quad (25)$$

gdje je,

CO – volumni udio ugljičnog monoksida (CO) u dimnim plinovima [m³/m³].

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$q_U = 0,00362 [-]$$

5.4.1.3. Gubici topline kroz ovojnicu kotla q_s

Relativni gubici topline kroz ovojnicu kotla q_s , predstavljaju neželjeno odavanje topline u prostor oko kotla, osim u slučaju da se radi o grijalicama prostora na kruto gorivo. Spomenuti gubitak računa se prema izrazu:

$$q_s = \frac{q_x}{q_B}, [-] \quad (26)$$

gdje je,

Q_X – toplinski tok prema okolišu, [kW]

$$Q_X = A_1 \cdot \alpha_1 \cdot (t_{m1} - \vartheta_{ok}) + A_2 \cdot \alpha_2 \cdot (t_{m2} - \vartheta_{ok}), [\text{kW}] \quad (27)$$

gdje je,

A_1 – površina kotla iste srednje temperature [m^2]

A_2 – površina kotla iste srednje temperature [m^2]

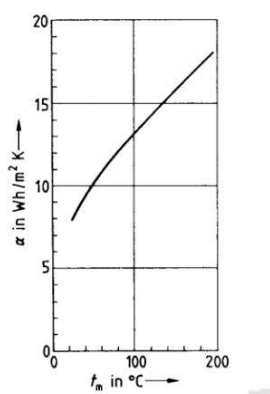
α_1 – koeficijent prijelaza topline na površini ovojnice kotla temperature t_{m1} , [$\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$]

α_2 – koeficijent prijelaza topline na površini ovojnice kotla temperature t_{m2} , [$\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$]

Koeficijente prijelaza topline na površini ovojnice kotla očitavamo iz dijagrama sa slike 31 (Slika 31.). Očitane vrijednosti su $\alpha_1 = 0,008$ [$\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$] te $\alpha_2 = 0,018$ [$\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$].

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u jednadžbu (19) i (20) dobivamo:

$$q_S = 0,04 [-]$$



Slika 31. Ukupni koeficijent prijelaza topline s površine ovojnice kotla slobodnom konvekcijom i zračenjem pri temperaturi okoline 20°C kao funkcija prosječne temperature površine ovojnice t_m (T_{st})

5.4.1.4. Gubitak topline zbog neizgorenog ostatka goriva u pepelu q_B

Relativni gubici topline kao posljedica neizgorenog ostatka goriva u pepelu q_B , računaju se prema sljedećem izrazu:

$$q_B = \frac{q_R}{q_B}, [-] \quad (28)$$

gdje je,

Q_R – gubitak topline (kemijska energija) kao posljedica neizgorenog ostatka goriva u pepelu, [kW]

$$Q_R = m_R \cdot H_{dc}, \quad [\text{kW}] \quad (29)$$

gdje je,

H_{dc} – donja ogrjevnost ugljika, [kJ/kg].

Ako je ispitno gorivo drveni peleti, ne mjeri se ostatak goriva u pepelu. Toplinski gubici zbog neizgorenosti goriva se zanemaruju:

$$q_R = 0,00 [-]$$

5.4.2. Direktna metoda

Efikasnost kotla direktnom metodom računa se pomoću izraza [18]:

$$\eta_K = \frac{q}{q_B} \cdot 100, [\%] \quad (30)$$

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$\eta_K = 88 [\%]$$

5.5. Proračun toplinskog učina kotla

Toplinski učin kotla je prosječni toplinski učin tijekom ispitnog perioda. Potrebne formule bitne za pojedine ispitne metode dane su u poglavlju A.7 norme EN 304:1992.

Toplinski učin kotla Q računa se pomoću slijedećeg izraza:

$$Q = q_{mw} \cdot c_{psr} \cdot (\vartheta_{pol} - \vartheta_{pov}), [\text{kW}] \quad (31)$$

gdje je,

Q – toplinski učin kotla, [kW]

q_{mw} – volumni protok tople vode koja ulazi u kotao odnosno tople vode koja izlazi iz kotla, [kg/s]

c_{psr} – specifični toplinski kapacitet vode kod srednje temperature vode ($\frac{\vartheta_{pol} + \vartheta_{pov}}{2}$), [kJ/(kgK)]

ϑ_{pol} – temperatura vode polaza, [°C]

ϑ_{pov} – temperatura vode povrata, [°C]

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$Q = 19,69 \text{ [kW]}$$

5.6. Proračun toplinske energije unesene gorivom

Za ovaj proračun koriste se formule iz članka A.8.1 norme EN 304:1922.

Toplinska energija unesena gorivom Q_B računa se pomoću slijedećeg izraza:

$$Q_B = B \cdot H_d, \text{ [kW]} \quad (32)$$

gdje je,

B – izmjeren protok goriva, [kg/s]

H_d – donja ogrjevnost goriva, [kJ/kg_g]

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u gornju jednadžbu dobivamo:

$$Q_B = 22,38 \text{ [kW]}$$

Tablica 13. Rezultati termodinamičkog proračuna

Toplinski učin kotla	$Q = 19,69 \text{ kW}$
Toplinska energija unesena gorivom	$Q_B = 22,38 \text{ kW}$
Efikasnost (direktna metoda)	$\eta = 88 \%$
Efikasnost (direktna metoda)	$\eta = 86,1 \%$

5.7. Ispitno izvješće

Tablica 14. Ispitno izvješće

Proizvođač: FSB Zagreb Tip kotla: Kotao na pelete Datum: 13.11.2014.			
ISPITIVANJE KOTLA NA BIOMASU PREMA HRN EN 303-5			
Opis	Oznaka	Jedinica	Prosjek
Ispitno gorivo			Drveni peleti
Ogrjevna vrijednost	H_d	kJ/kg	18396
Sadržaj vlage	W	%	<8 %
Protok goriva	B	kg/s	4,38
Trajanje ispitivanja		h	1,5
Potlak dimnjaka		Pa	-14
Temperatura ispitne prostorije	ϑ_{ok}	°C	16,07
Temperatura dimnih plinova	t_a	°C	180,28
Prosječni sadržaj O_2	O_2	%	8,58
Prosječni sadržaj CO_2	CO_2	%	11,98
Prosječni sadržaj CO	CO	ppm	750
Prosječni sadržaj CO	CO	%	0,075
Prosječni sadržaj CO za 10 % O_2	CO	%	0,0654
Maksimalni sadržaj CO_2	CO_{2max}	%	20,5
Sadržaj ugljika u pepelu	Cr	%	0
Specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova	$C_{pm,sdp}$	kJ/m ³ K	1,36
Specifični toplinski kapacitet vodene pare	$C_{pm,H2O}$	kJ/m ³ K	1,52
Protok dimnih plinova	m	m ³ /h	33,9
Toplinski gubici osjetne topline dimnih plinova	Q_a	kJ/kg	1752,5
	Q_a	%	9,5
Toplinski gubici zbog nepotpunog izgaranja	Q_U	kJ/kg	66,53
	q_U	%	0,36
Toplinski gubici kroz ovojnicu kotla	Q_S	kJ/kg	733,5
	q_S	%	4,0
Toplinski gubici zbog neizgorenog ostatka goriva	Q_R	kJ/kg	0
	q_R	%	0,0
Efikasnost (direktna metoda)	η	%	88
Efikasnost (indirektna metoda)	η	%	86,1
Toplinski učin	Q	kW	19,69

6. ZAKLJUČAK

U radu je opisan postupak ispitivanja toplinskih karakteristika kotla na pelete. Ovaj postupak se sastoji od tri dijela: mjerenje protoka goriva, mjerenje parametara u hidrauličkom krugu i mjerenje parametara dimnih plinova.

Mjerenje protoka goriva izvedeno je dva puta. Prilikom prvog mjerenja protoka goriva napravljene su pogreške koje su dovele do značajnog odstupanja efikasnosti dobivene indirektnom i direktnom metodom. Naime, sustav automatskog loženja pokreće se pritiskom na tipku čime se pokreće elektromotor pužnog prijenosa kojem treba određeno vrijeme za postizanje nazivne brzine vrtnje. Kako smo početak ispitnog perioda odredili pokretanjem elektromotora, izmjerili smo manju količinu goriva jer se nominalni protok goriva uspostavio nakon određenog vremena. Kod ponovljenog mjerenja početak ispitnog perioda određen je kad je uspostavljen nominalni protok goriva. Nakon korekcije proračuna dobili smo rezultate čija su odstupanja u prihvatljivim granicama.

U hidrauličkom krugu mjere se temperature vode polaza i povrata te protok vode na strani kotla. Temperature vode se mjere pomoću termoparova koji su spojeni na sustav za automatsko prikupljanje podataka. Volumni protok se mjeri ultrazvučnim protokomjerom koji nije bio spojen sa sustavom za automatsko prikupljanje podataka. Zbog toga je protok očitavan i zapisivan u slučajnim intervalima, čime se nije dobio najprecizniji podatak unatoč vrlo preciznom uređaju za mjerenje protoka.

Prilikom ispitivanja toplinskih karakteristika izmjeren je i sastav dimnih plinova. Izmjereni je pretižak zraka $\lambda=1,7$ te je provjeren proračunom gdje se preko volumnog udjela ugljičnog dioksida ili kisika dobije vrijednost pretička zraka. U optimalnim uvjetima gdje je ložište kotla konstruirano za izgaranje peleta, iznos pretička zraka za optimalno izgaranje je oko 1,3. Unatoč velikom iznosu pretička zraka, također je izmjeren i veliki udio ugljičnog monoksida (CO) u dimnim plinovima. Jedan od razloga za to je loša izvedba ložišta koje nema sustav odvodnje

pepela, već se pepeo gomila u ložištu i tako sprječava optimalno izgaranje peleta koji dolaze u ložište.

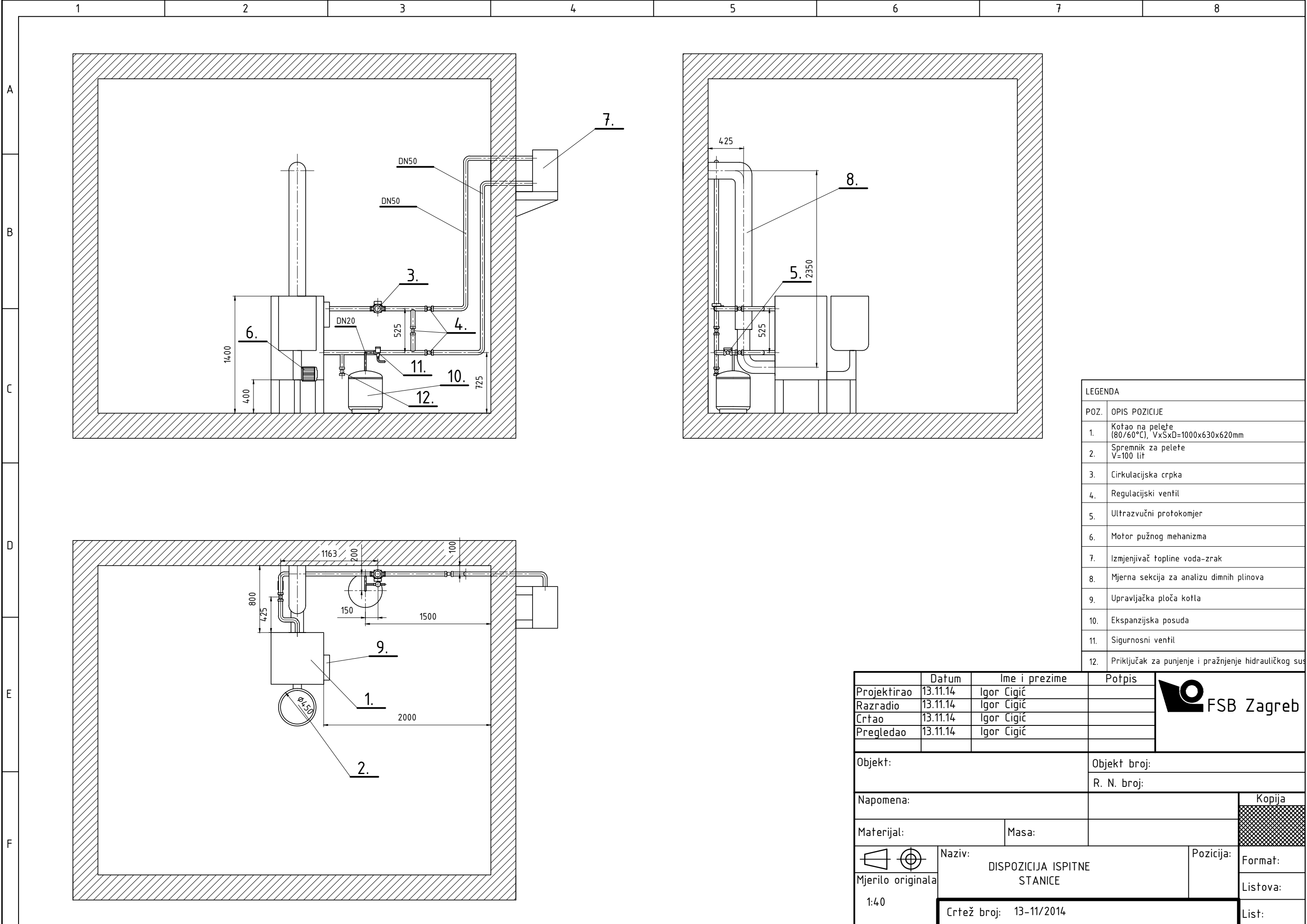
Na temelju svih ispitivanja toplovodnog kotla na drvene pelete prema normi HRN EN 303-5 zaključeno je da kotao spada u klasu 4. Klasu definira efikasnost kotla i količina ugljičnog monoksida (CO) u suhim dimnim plinovima svedena na referentnu vrijednost kisika (O₂) od 10% u suhim dimnim plinovima. Boljom izvedbom ložišta, ugradnjom sustava odvodnje pepela (npr. rešetka u ložištu), smanjio bi se pretičak zraka, a samim time smanjio bi se i protok dimnih plinova odnosno gubici osjetne topline dimnim plinovima i koncentracija ugljičnog monoksida (CO).

LITERATURA

- [1] <http://www.obnovljivi.com/energija-biomase/404-biomasa-za-bioenergiju>
- [2] <http://promogradnja.hr/senko-peci-na-pelete/>
- [3] <http://www.drwnipelet.hr/o-drwnom-peletu/>
- [4] http://www.topling.com/proizvodi/tk_tkv.html
- [5] <http://termoklimadoo.com/shop/kotlovi-na-cvrsto/aoelia□ni-tk-350-750-kw-960-kw/>
- [6] <http://mcsolar.hr/kotlovi-pelet.php>
- [7] <http://www.energetika-net.com/specijali/izdvajamo/energija-u-skladu-s-prirodom-15586>
- [8] <http://www.mcsolar.hr/kotlovi-piroliza.php>
- [9] http://www.mru-instruments.com/ximages/1418364_nova2000us.pdf
- [10] Ultrasonic heat and cooling energy meters UH50
- [11] <http://www.ohaus.ca/PU/CH30R11.htm>
- [12] http://www.ed.rs/ed/tekstovi/principi/tipovi_termoparova.htm
- [13] <http://bs.wikipedia.org/wiki/Termopar>
- [14] <http://www.chem.agilent.com/Library/usermanuals/Public/G35900-90407.pdf>
- [15] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dat_Acquisition_Agilent_\(1\).jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dat_Acquisition_Agilent_(1).jpg)
- [16] Halasz B., Galović A., Boras I.: Toplinske tablice, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [17] EN 304:1992 : Heating boilers – Test code for heating boilers for atomizing oil burners
- [18] HRN EN 303-5: Heating boilers – Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW – Terminology, requirements, testing and marking
- [19] Talijansko udruženje za energiju iz agrošumarstva, Luca Zuccoli Bergomi: Priručnik o gorivima iz drvne biomase
- [20] Šimić, Z., Šljivac, D.: Obnovljivi izvori energije, Zagreb, 2009.
- [21] Švaić, S.: Predavanja iz kolegija Obnovljivi izvori energije - dio Biomasa, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija
- III. Mjerni obrasci



LEGENDA	
POZ.	OPIS POZICIJE
1.	Kotao na pelete (80/60°C), VxSxD=1000x630x620mm
2.	Spremnik za pelete V=100 lit
3.	Cirkulacijska crpka
4.	Regulacijski ventil
5.	Ultrazvučni protokomjer
6.	Motor pužnog mehanizma
7.	Izmjenjivač topline voda-zrak
8.	Mjerna sekcija za analizu dimnih plinova
9.	Upravljačka ploča kotla
10.	Ekspanzijska posuda
11.	Sigurnosni ventil
12.	Priključak za punjenje i pražnjenje hidrauličkog sustava

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	13.11.14	Igor Cigić		
Razradio	13.11.14	Igor Cigić		
Crtao	13.11.14	Igor Cigić		
Pregledao	13.11.14	Igor Cigić		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:		
	Naziv:		Pozicija:	Format:
Mjerilo originala	DISPOZICIJA ISPITNE STANICE			Listova:
1:40	Crtež broj: 13-11/2014			List:

**MJERNI PROTOKOL ZA ISPITIVANJE TOPLINSKIH KARAKTERISTIKA
KOTLA NA BIOMASU PREMA HRN EN 303-5 – *Kotlovi na kruta goriva***

	Tip kotla :		
	Datum :		
	Ispitivač :		
		min	<i>vrijeme ispitivanja, h</i>
1	MJERENJE PROTOKA GORIVA		
	1. ispitni period		
	2. ispitni period		
	3. ispitni period		
2	MJERENJE PROTOKA GORIVA		
	1. ispitni period		
	2. ispitni period		
	3. ispitni period		
3	ISPITIVANJE TOPLINSKIH KARAKTERISTIKA KOTLA		
	predispitni period		
	ispitni period		
NAPOMENA : 			

Mjerenje protoka goriva				
		Masa goriva	Period	Protok goriva
Dan	Vrijeme	m_B	τ	B
dd.mm.gg	hh:mm	kg	s	kg/h
Brzina pužnog mehanizma:				
Brzina pužnog mehanizma:				
Brzina pužnog mehanizma:				

[illegible]

[illegible]