

EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA GASIFIKACIONE KOMORE KOTLA NA DRVA

EXPERIMENTAL TESTS OF THE GASIFICATION CHAMBER OF A WOOD-BURNING BOILER

Rade KARAMARKOVIĆ^{1*}, Dušan TODOROVIĆ², Đorđe NOVČIĆ¹,
Marko OBRADOVIĆ², Miloš NIKOLIĆ¹

¹ Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu Univerziteta u Kragujevcu, Srbija

² Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd

Na evropskom tržištu od ukupnog broja prodatih kotlova u 2021. god., 36% otpada na kotlove na biomasu. Među njima se za sagorevanje drveta koriste 3 konstrukcije: tipična sa strujanjem na više i konstrukcije sa istosmernom i unakrsnom gasifikacijom. Dve poslednje navedene konstrukcije karakteriše višestepeno sagorevanje: u zasebnoj komori se prvo vrši gasifikacije a potom se gorivi gas sagoreva u ložištu. Između pomenutih komora koriste se vatrostalni umeci koji omogućavaju sagorevanje gorivog gasa i velike količine čestica koje on nosi sa sobom, kao i unapređenje prenosa topote u ložištu. Prilikom projektovanja vatrostalnog dela i ložišta potrebno je uzeti u obzir temperaturna i brzinska polja, kao i sastav gorivog gasa. Cilj rada je da: (i) predstavi eksperimentalna ispitivanja gasifikacione komore i (ii) da smernice za njeno projektovanje. Ispitivanja su rađena na gasifikacionom kotlu na drva termičke snage 18 kW i sprovodila su se diskontinualno na taj način što bi kotaо prvo ušao u nominalni radni režim, koji bi potom bio prekinut zatvaranjem otvora za dovodenje sekundarnog vazduha. Tokom takvih uslova, uzorkovao bi se gorivi gas, na čiji sastav najviše utiču: rastojanje između otvora primarnog vazduh i izlaza iz komore za gasifikaciju, veličina, oblik i vlažnost drva, karakteristike gasifikovanog sloja (šupljine, zone različitih temperatura), gubitak topote i oblik i geometrija izlaznog otvora komore.

Ključne reči: Biomasa; kotao; gasifikacija; eksperimentalna ispitivanja; model

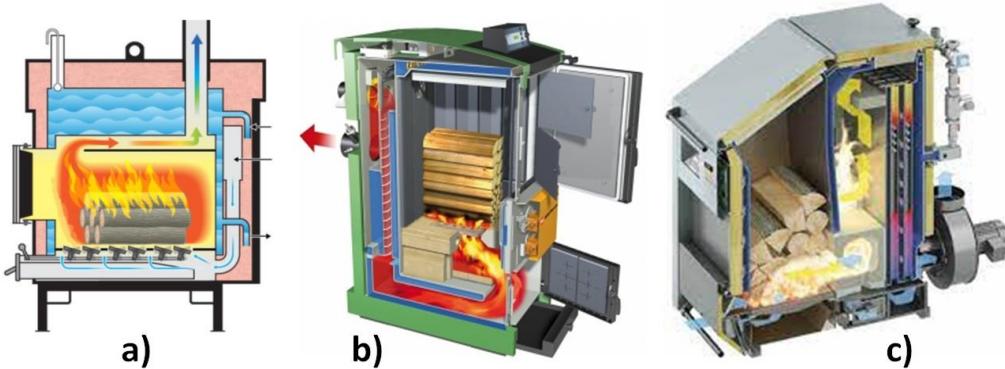
On the European market, biomass boilers accounted for 36% of the total number of boilers sold in 2021. Among them, there are three constructions used for burning wood: the typical upward flow design and constructions with co-current and cross-current gasification. The latter two constructions are characterized by multi-stage combustion: first, gasification is carried out in a separate chamber, and then the combustible gas is burned in the combustion chamber. Refractory inserts are used between the mentioned chambers to enable the combustion of combustible gas and the large amounts of particles it carries, as well as to improve heat transfer in the combustion chamber. When designing the refractory part and the combustion chamber, it is necessary to know the temperature and velocity fields, as well as the composition of the combustible gas. The aim of the study is to: (i) present experimental tests of the gasification chamber and (ii) provide guidelines for its design. The tests were carried out on an 18 kW wood gasification boiler, and were conducted intermittently by first entering the nominal operating mode, which was then interrupted by closing the secondary air inlet. Under such conditions, the combustible gas was sampled, and its composition was most affected by the distance between the primary air inlets and the gasification chamber outlet, the size, shape, and moisture content of the wood, the characteristics of the gasified layer (voids, zones of different temperatures), heat loss, and the shape and geometry of the outlet of the chamber.

Key words: Biomass; boiler; gasification; experimental investigation; model

* Corresponding author, e-mail: karamarkovic.r@mfkv.kg.ac.rs

1 Uvod

Od ukupne energije biomase koja se koristi u umerenom klimatskom pojasu, 20% otpada na ogrevno drvo [1]. U Republici Srbiji je u 2017. godini ogrevnom drvu pripadao još veći udeo u biomasi koja je činila 10% primarne i 11% energije raspoložive za finalnu potrošnju [2]. Navedeni pokazatelje svedoče o još uvek važnosti drveta kao energenta. Dodatni razlog vezan za korišćenje ogrevnog drveta čine sve stroža ograničenja emisije zagađujućih materija iz uređaja koji ga sagorevaju. Zahtevnost graničnih vrednosti emisije kod uređaja male snage najjasnije pokazuju nacionalni aneksi standarda EN 303-5:2021. Da bi zadovoljili ove anekse proizvođači najčešće koriste tri načina višestepenog sagorevanja [3] prikazana na Sl. 1. Sva tri načina u prvom stepenu koriste nepotpuno sagorevanje (gasifikaciju) u nepokretnom sloju: suprotosmernu, istosmernu i unakrsnu.



Slika 1. Metode višestepenog sagorevanja drveta: a) tradicionalno sagorevanje naviše [4],
b) istosmerna gasifikacija [5], c) poprečna gasifikacija [6]

Prilikom korišćenja numeričkog modelovanja u cilju adekvatnog dimenzionisanja komore za sagorevanje gasa i keramičkog dela (dodatak, umetak) koji se u njoj koristi za što potpunije sagorevanje gasa i letećih čestica, unapređenje transfera topote i taloženje letećeg pepela (videti Sl. 2.) kao ulazan podatak potrebni su sastav i temperatura gorivog gasa na izlazu iz gasifikacione komore. Njih za konstrukciju prikazanu na Sl. 1 b). gotovo i da nema u literaturi. Uglavnom se autori, poput [7] bave sagorevanjem gorivog gasa nastalog u istosmernom reaktoru za gasifikaciju. Drozatos i dr. su u radu [8] numerički modelovali kotao vrlo sličan kotlu prikazanom na Sl. 2. Da bi odredili sastav gasa pretpostavili su da je njegova temperatura na izlazu iz gasifikacione komore 850°C i da se u komoru dovodi toliko primarnog vazduha da koeficijent viška vazduha iznosi $\lambda=0.66$. Sastav su određivali minimiziranjem Gibbsove slobodne energije i od gorivih komponenti dobili: ugljen monoksid CO 6.8% i vodonik H₂ i metan CH₄ ispod 0.5%. Druge izvore za sastav i temperaturu gorivog gasa iz konstrukcije prikazane na Sl. 1 b) autori nisu uspeli da pronađu. U literaturi najviše podataka ima za tradicionalno višestepeno sagorevanje prikazano na Sl. 1 a). Kod njega je gasifikacija do detalja ispitana i što je vrlo značajno sastav gasa je veoma blizak onom koji se dobija u istosmernim reaktorima za gasifikaciju. Kod ovog tipa, autori [9] su ispitivali gasifikaciju drvene sečke u zavisnosti od njene vlažnosti i količine vazduha. Do detalja su predstavili rezultate ispitivanja i merni lanac. Glavni zaključci rada [9] su da količina primarnog (gasifikacionog) vazduha i sadržaj vlage u gorivu značajno utiču na sastav gasa i njegovu temperaturu, na ponašanje gasifikovanog sloja goriva i emisiju praškastih materija. Pri niskim vrednostima primarnog vazduha značajan je uticaj tera na toplotnu moć gasa i niže su emisije praškastih materija. Ove emisije su značajno niže kod suve biomase. Ponašanje drveta u uslovima gasifikacije u kotlovima, tj. njegove geometrijske deformacije i gubitak mase sa vremenom i temperaturom obrađuje rad [10]. Kirč sa koaturima u radovima [11] i [12] obrađuje šaržni reaktor za gasifikaciju u peći koja koristi različite vrste biomase. U ovim radovima, autori su takođe dobili sastave gasa vrlo slične onima koji se dobijaju pri istosmernoj gasifikaciji. Imajući u vidu prethodno navedene činjenice, kao i potrebe modelovanja i projektovanja, cilj rada je da predstavi ispitivanja gasifikacione komore u radu i da definiše osnovne konstruktivne i radne parametre koji utiču na sastav i temperaturu gorivog gasa.

2 Eksperimentalna ispitivanja

2.1 *Kotao*

Eksperimenti su izvođeni na gasifikacionom kotlu na drva nominalne termičke snage 18kW. Glavni delovi kotla su: komora za gasifikaciju (pozicija 1 na Sl. 2., 3.b) i 5.), komora za sagorevanje (5 na Sl. 2. i 3.b) i konvektivni deo kotla (6 na Sl. 2.).

Gasifikaciona komora dimenzija 410x520x700 mm je ujedno i skladište goriva. Velika zapremina komore omogućava celodnevni rad kotla sa dva nalaganja. Otvori za ubacivanje predgrijanog primarnog vazduha nalaze se na bočnim stranama komore na visini 150 mm od njenog dna. Vatrostalni beton (Sl.2. i 3.b) ima više funkcija: nosi šaržu goriva, deli dve komore, akumulira toplotu za endotermne reakcije, služi za dovod, predgrevanje i uvođenje sekundarnog vazduha. Osim vatrostalnog betona i masivnih vrata, komora je najvećom delom okružena kanalima kroz koje struji kotlovska voda.

Gorivi gas sagoreva na prelazu između gasifikacione i komore za sagorevanje. Njegovo što potpunije sagorevanja kao i sagorevanje sitnih čestica koje nosi sa sobom omogućava keramičko postolje (poz. 5 na Sl. 2. i 3.b). Osim pomenutih ono ima i sledeće uloge: pepeo prinosi vratima za čišćenje, pospešuje transfer toplote u ložištu i kombinacijom promena brzina i inercijalnih sila pospešuje taloženje čestica.

Konvektivni deo kotla (poz. 6 na Sl. 2.) se sastoji od cevi prečnika 82,5 mm sa turbulatorima u vidu opruga. U odnosu na okolinu, kotao je na potpritisku zahvaljujući ventilatoru (7 na Sl. 2.).

Automatika upravlja kotлом pomoću dva ventila i odsisnog ventilatora. Ventil primarnog vazduha zajedno sa varijabilnom brzinom ventilatora pokušava da dostigne zadatu snagu, dok ventil sekundarnog vazduha pokušava da održava konstantnim zadatu vrednost kiseonika u dimnom gasu (najčešće 7%).

2.2 *Gorivo*

Za ispitivanja su korišćena bukova drva sastava datog u Tabeli 1. Sastav drveta uziman je sa ranijih ispitivanja iste seče (gomile) [13] dok je vlažnost merena za svaku od korišćenih cepanica. Količina vlage u njima varirala je u opsegu od 6.5% do 22.6% sa najčešćim vrednostima između 9.5 i 11 mas%. Vlaga je kontrolisana pomoću uređaja Testo 616 (merno mesto 5 u Tabeli 2.).

Tabela 1. Tehnička i elementarna analiza goriva. 1- u suvoj masi, 2- kao ostatak, 3 – u suvoj masi bez pepela, 4 – prosečna vrednost

Isparljiva masa ¹	Pepeo ¹	Fiksni ugljenik ^{1,2}	C ³	H ³	O ^{3,2}	N ³	S ³	W ⁴
85,9	0,57	13,4	49,1	5,7	44,5	0,15	0,045	12,85

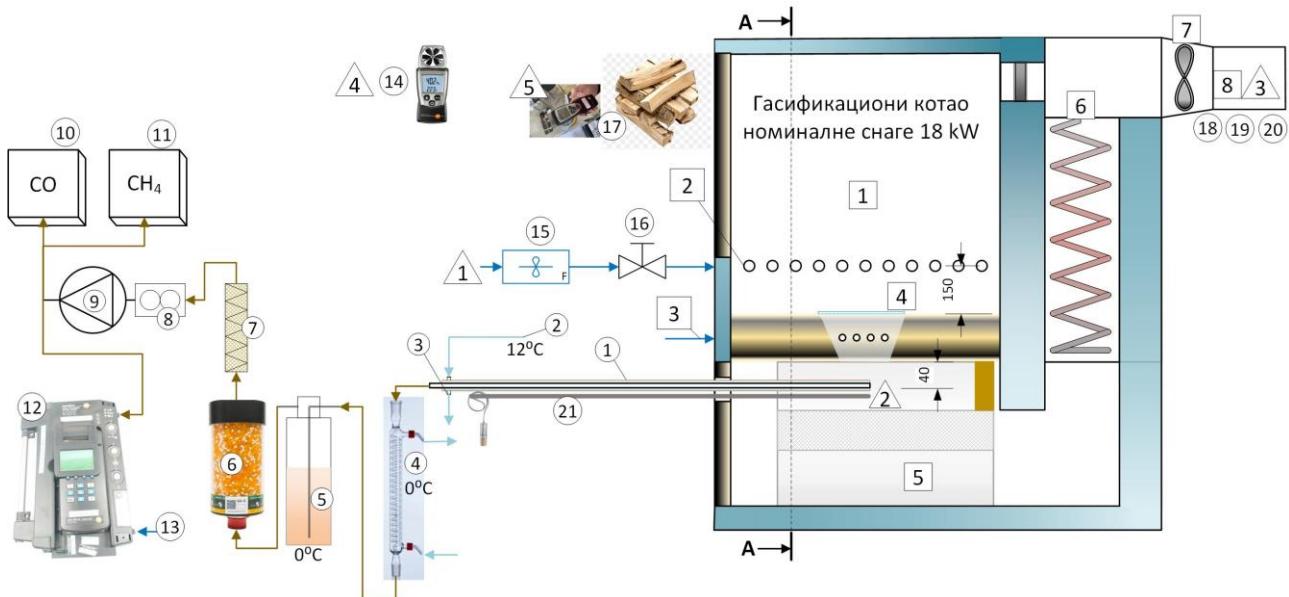
2.3 *Merene veličine i postupak merenja*

Komora za gasifikaciju ne dozvoljava nezavisna ispitivanja zato što je u najvećem delu ograničena kanalima za strujanje kotlovske vode. Zbog toga, a i da bi što verodostojnije oponašala radne uslove, ispitivanja su vršena ciklično: na svakih 25 minuta rada, komora je ispitivana u interval od 10 minuta. Tokom uzorkovanja ventilator (7 na Sl. 2) bi radio sa konstantnim brojem obrtaja a protok primarnog vazduha bi se održavao približno konstantnim pomoću ručnog regulacionog ventila (poz. 16 na Sl. 2. i Sl. 3.a). Zbog stalnih promena otpora u komori, protok vazduha se neprestano menja ali ga ja sa ventilom (16) moguće održavati u opsegu $\pm 0,1$ l/s. Ovaj ventil je neophodan i zato što se zatvaranjem dovoda sekundarnog vazduha (poz. 3 na Sl. 2.) remeti strujna slika kotla: protok kroz gasifikacionu komoru raste zato što se zatvara njemu paralelna grana za sekundarni vazduh. Zapreminski merač protoka (15) i pomenuti regulacioni ventil (16) su korišćeni na ovom mernom mestu (Sl. 2. i Sl. 3.a). Radi tačnosti merenja, vodilo se računa da budu postavljeni na pravoj deonici, minimum 5D, od najbližeg lokalnog otpora. Maseni protok primarnog vazduha je računat na osnovu merenja temperature i vlažnosti okolnog vazduha (videti merno mesto 4 na Sl. 2. i Tab. 2.).

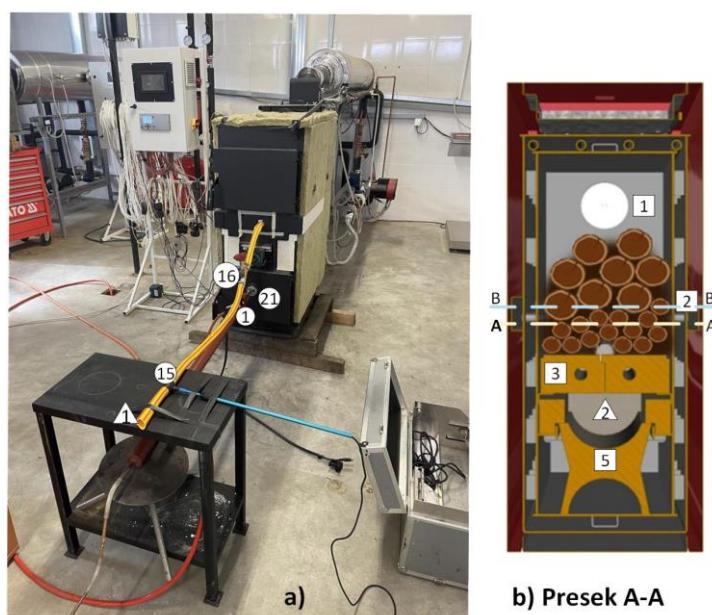
Tabela 2. Merna mesta, merene veličine i karakteristike korišćene merne opreme.

Merno mesto	Br.	Merena veličina i oprema	Greška merenja (aps. ili relativna)
1	15	Merač zapreminskog protoka primarnog vazduha Flowatch, merni opseg 1 – 30 m/s, Ø 20 mm, rezolucija 0.1 m/s, 3 cm/s, radna temperatura -50 do 100°C	±2% PS
2	8	Zapreminske protok gorivog gase- Zambeli ZB1 – min 16 dm ³ /h, max protok 4m ³ /h	±3%
2	10	Koncentracija CO u suvom gorivom gasu Gasni analizator Uras 3E (proizvođač Hartmann & Braun) Opseg merenja: 0 – 25% CH ₄ , 0 – 50% CH ₄	±1%
2	11	Koncentracija CH ₄ u suvom gorivom gasu, Gasni analizator Uras 3E (proizvođač Hartmann & Braun), Opseg merenja: 0 – 10% CO, 0 – 40% CO	±1%
2	12	Koncentracija CO u suvom gorivom gasu	±5%
2	12	Koncentracija CO ₂ u suvom gorivom gasu	±0,3 zap%+1%
2	12	Koncentracija O ₂ u gasu	±0,8%
2	4,5	Količina vlage i tera u suvom gorivom gasu – gravimetrijskom metodom JEX-200	±0,2 mg
2	21	Temperatura sgg na izlasku iz komore za gasifikaciju – Termopar tip K (NiCr-Ni) max. 1370°C	±1°C
3	18	Temperatura, koncentracija kiseonika u dimnom gasu – kotlovska automatska	±1°C ±0,1 zap%
3	19,20	Zapreminski sastav i količina praškastih materija u dimnom gasu – Horiba ENDA 5000	O ₂ ±0,8%, CO ±10ppm, NO _x ±5%, SO ₂ ±10ppm
4	14	Temperatura i relativna vlažnost okolnog vazduha – Testo 410-2	rel. vlaž. ±2,5%RH temp. ±0,5°C
5	17	Vlažnost drva – Testo 616 (<50% vlage), rezolucija 0.1%	rel.=0,1%/MV%

Slike 2. i 3.b) prikazuju 2. merno mesto. Na njemu su nakon zatvaranju sekundarnog vazduha kroz otvor za vizuelno praćenje sagorevanja postavljane sonde za uzorkovanje gase i merenje temperature. Tabela 2. prikazuje karakteristike korišćenih mernih uređaja. Termopar K-tipa je postavljan do same sonde za uzorkovanje gase i bio je smešten u prohromskoj cevi, koja je sprečavala termičko zračenje od okolne keramike. Za uzorkovanje gase korišćena je vodom hlađena sonda (poz. 1 na Sl. 2., ulaz 2 vode temperature ~10°C i njen izlaz 3). Sonda je bila blago nagnuta prema ledenom vodom (0°C) hlađenom kondenzatoru (4). Ohlađen gas je sa kondenzatora (4) vođen na ispiralicu (5) zapremine 0,25 dm³ napunjenu sa 0,15 dm³ izopropanola. Ispiralica (5) se sve vreme nalazila u ledenoj vodi 0°C. Glavnice vlage i tera su izdvojene iz gase u kondenzatoru (4). Slika 5.c je načinjena tokom merenja i prikazuje izdvojeni kondenzat koji predstavlja smešu vode, tera i čestica. Ove poslednje u najvećem delu predstavljaju negasifikovani ugljenik ponesen gasnom strujom. U radu [14] Hasler i dr. su predstavili apsorpcioni metod za uzorkovanje i selekciju tera iz gorivog gasea. Na osnovu njihovog metoda, Buhmajer i dr. [9] su uzorkovali ter iz gase dobijenog gasifikacijom drvene sečke u kotlu male snage. Za razliku od [9] gde su korišćene 2 ispiralice sa vodom i 5 sa izopropanolom, od kojih su 3 bile u posudi održavanoj na -10°C, u predstavljanom ispitivanju je imajući u vidu njegove potrebe, zahtevanu tačnost, vodom hlađenu sondu i veliki kondenzator, korišćena samo jedna ispiralica (5).



Slika 2. Šema eksperimentalnih ispitivanja. Kvadratnim oznakama obeleženi su glavni delovi kotla: 1 – gasifikaciona komora, 2 – otvori za primarni vazduh, 3 – sekundarnih vazduh, 4 – izlaz iz gasifikacione komore (uvodenje sekundarnog vazduha), 5 – vatrestralna keramika u zoni sagorevanja, 6 – konvektivni deo kotla sa turbulatorima u obliku opruge. Merna mesta označena truglovima: 1 – primarni (gasifikacioni) vazduh, 2 – uzorkovanje gasa i merenje njegove temperature, 3 – merenje karakteristika dimnog gasa na izlasku iz kotla, 4 – stanje okoline, 5 – vlažnost cepljivica. U kružićima merna oprema: 1 – sonda za uzorkovanje gasa, 2,3 – ulaz i izlaz rashladne vode iz sonde, 4 – kondenzator, 5 – ispiralica napunjena izopropanolom, 6 – filter sa silika gelom, 7 – filter od staklenih vlakana, 8 – merač protoka suvog gasa, 9 – vakum pumpa, 10 – merenje količine CO, 11 – merenje količine CH₄, 12 – gasni analizator, 13 – vazduh za razblaživanje gasa, 14 – anemometar, 15 – merač protoka, 16 – ručni regulacioni ventil, 17 – merač vlažnosti drva, 18 – merači temperature i O₂ u dimnom gasu, 19 – gasni analizator, 20 – izokinetičko uzorkovanje čestica.



Slika 3. a) ispitivani kotao sa delom merne opreme, b) poprečni presek kotla preko komore za gasifikaciju (Oznake su iste kao na Sl. 2.)

Nizvodno od ispiralice (5) za izdvajanje preostale vlage i čestica korišćeni su filteri od silika gela (6) i staklenih vlakana (7). Po izlasku iz filtara, mereni su zapreminski protok i temperatura uzorkovanog gasa pomoću Zambeli ZB1 (8,9, videti i Tab. 2.). Potom je suvi gorivi gas razdvajan na dva toka. Jedan prema uređajima za određivanje koncentracije metana CH₄ i ugljen monoksida

CO (10, 11 videti Tab. 2.) a drugi prema gasnom analizatoru Testo 350 xl (12). Ovi uređaji (10÷12) imaju sopstvene vakum pumpe, koje su zarad preglednosti izostavljene na Sl. 2. U gasnom analizatoru (12) je suvi gas razblaživan sa okolnim vazduhom sa faktorom 40 (1:39) i određivane su koncentracije kiseonika O₂, ugljen dioksida CO₂, i kao i u (10) koncentracija ugljen monoksida CO. Koncentracija azota N₂ je računata na osnovu protoka primarnog vazduha (15) i elementarnog sastava bukovih cepanica (videti prethodno poglavlje). Kao i u radu [9] pretpostavljeno je da je sav ter u obliku heptana C₇H₁₆. Koncentracija vodonika H₂ je određivana uz pretpostavku da u suvom gasu nakon izdvajanja vlage i tera nije bilo drugih komponenti osim CO, CO₂, CH₄, O₂ i N₂.

Na mernom mestu 3 (Sl. 2., Tab. 2.) sve vreme su pomoću kotlovske automatike očitavane temperatura i količina kiseonika O₂ u dimnom gasu. Pre nego su izvedena opisana merenja na istom mernom mestu rađene su kotlovska ispitivanja shodno EN 303-5 (videti Tab. 3.).

Temperatura gasa u mernom lancu je kontrolisana na mestu merenja zapreminskog protoka (8).

3 Rezultati

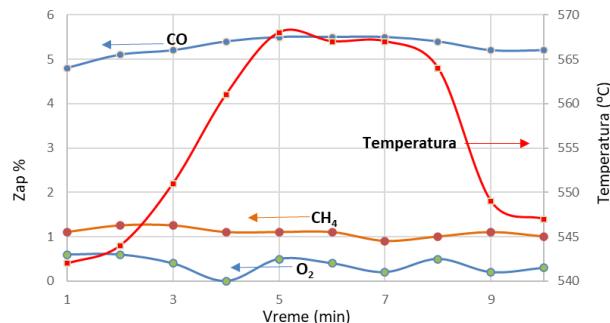
Tabela 3. prikazuje osnovne tehničke podatke kotla kod kog je ispitivana gasifikaciona komora. Kod ove vrste kotlova, automatika reguliše protok sekundarnog vazduha tako da količina kiseonika u dimnom gasu bude oko 7% ili da odgovara nekoj drugoj vrednosti koja daje visok stepen korisnosti pri najnižim mogućim emisijama. Otuda je najčešća vrednost koeficijenta viška vazduha između 1,5 i 1,6. U tabeli su prikazane i merene vrednosti količine primarnog vazduha svedene na koeficijent viška vazduha. Kretale su se u opsegu $\lambda = 0,35 \div 0,45$.

Tabela 3. Karakteristike ispitivanog kotla.

Nominalna snaga	18,07 kW
Stepen korisnosti	90,3%
Emisija CO (svdena na 10% O ₂ u sdg)	126,57 mg/m ³ N
Emisija NOx (10% O ₂)	175,75 mg/m ³ N
Emisija OGC (10% O ₂)	5,02 mg/m ³ N
Emisija praškastih mmaterija (10% O ₂)	18,44 mg/m ³ N
λ - najčešće	1,5÷1,6
λ primarnog vazduha u radu (tokom ispitivanja)	0,22÷0,67 (min÷max) (sr. vr. 0,35÷0,45)

Tabela 4. prikazuje rezultate 4 serije ispitivanja. U njoj su u poslednje dve kolone dati sastavi gorivih gasova na optimalnim tačkama gasifikacije bukovih drva sa 12,85% vlage na pritisku od 0,1 MPa. CBP – SRS je optimalna gasifikacija sa vazduhom na standardnom referentnom stanju [15], dok je CBP -PV optimalna gasifikacija sa vazduhom predgrejanim na temperaturu gasifikacije [16]. Optimalna tačka se naziva i granična tačka ugljenika. Kod nje je proces gasifikacije predstavljen kao hemijsko isparavanje pri kom se dodaje minimalna količina vazduha koja je potrebna da sav ugljenik pređe u gasovito stanje. U tom slučaju u gasu ostaje najveća količina hemijske energije iz originalne biomase. U poređenju sa ovim vrednostima i eksperimentalnim rezultatima predstavljenim u [9] i [12] izmereni su neočekivani sastavi gase. Kolona 1 predstavlja gas dobijen na samom početku ispitivanja kad je kotao bio napunjen gorivom do linije koja je niža od otvora za uvođenje primarnog vazduha (linija A-A na Sl. 3.b). U ovom slučaju ni kotao nije mogao da postigne svoju nominalnu snagu. Potom je nivo goriva u komori podignut na visinu koja odgovara liniji B-B na Sl. 3.b). Dobijene vrednosti su prikazane u kolonama 2-4. Kolona 3 odgovara najčešće dobijanom sastavu gase. Ovo su srednje vrednosti a kako su se menjale u toku uzorkovanja prikazuje Slika 4. Na njoj su date srednje minutne vrednosti dobijene kao srednje vrednosti 4 merenja u toku minuta uzorkovanja. Na slici se vide relativno male varijacije rezultata tokom jedne serije merenja. Mase vlage i tera dobijene opisanim gravimetrijskim metodom pokazuju relativno velike količine tera u

gorivom gasu. Zapravo ter je taj koji je davao toplotnu moć gasu. Količina H_2O i tera u gasu izmerene su za sve serije ispitivanja, pa su na kraju svođene na pojedinačne sastave gasa pod pretpostavkom da su u svakoj od serija ispitivanja emitovane iste količine vlage i tera. Dobijeni odnos vlage i tera odgovara vrednostima koje su u [9] dobili za $\lambda=0,25$. U istom radu pokazano je da količina tera opada sa povećanjem količine primarnog vazduha. Sa njegovim povećanjem generalno raste temperatura gasa na izlazu iz komore.



Slika 4. Promene zapreminske koncentracije CO , CH_4 , O_2 i temperature dimnog gasa tokom testa 3.

Rezultati su proveravani na osnovu materijalnog i elementarnog bilansa. Prosečno odstupanje materijalnog bilansa bilo je 8,4%, dok je kod elementarnog bilansa najveće odstupanje bilo kod kiseonika i ugljenika. Manjak od 8 do 14% ugljenika u produktima može se objasniti postojanjem negasifikovanog ugljenika, dok je manjak kiseonika u produktima posledica više uzroka: greške merenja ulaznog vazduha i gasovitih produkata, kao i napred navedenih pojednostavljenja i osrednjavanja.

Dobijeni rezultati su slični teorijskim rezultatima koje su u svojim istraživanjima koristili u radu [8], ali se od njih razlikuju po tome što je gas dosta niže temperature i što u sebi ima dosta tera. Pomenuta činjenica da je gasifikaciona komora u najvećem delu okružena kotlovsom vodom utiče na nižu temperaturu gasa i na njegov sastav.

Tabela 4. Dobijeni eksperimentalni i rezultati teorijskih modela.

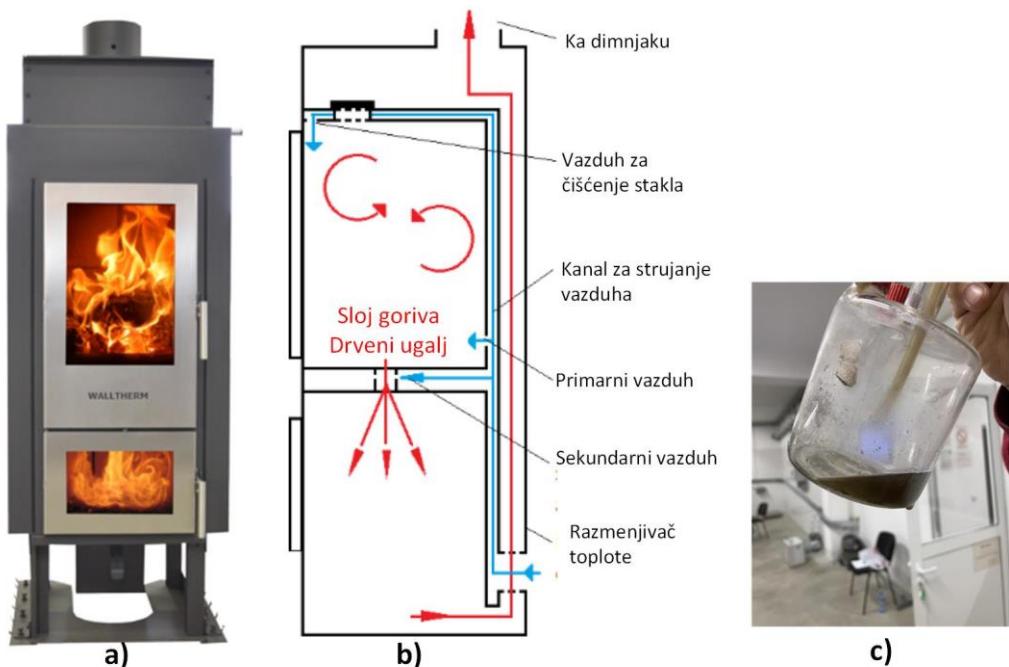
Test	1	2	3	4	CBP - SRS	CBP - PV
Koeficijent viška vazduha λ	0,28	0,43	0,34	0,28	0,285	0,239
CO	2,4%	4,1%	5,3%	5,4%	22,2%	26,2%
CO ₂	19,5%	14,7%	15,7%	17,2%	10,3%	8,4%
CH ₄	0,3%	1,0%	1,1%	1,3%	1,3%	1,3%
H ₂	0,2%	1,1%	1,1%	1,2%	22,8%	25,5%
H ₂ O	22,0%	15,5%	18,2%	20,0%	5,4%	4,6%
N ₂	55,2%	62,8%	58,1%	54,5%	38,0%	33,9%
O ₂	0,3%	0,6%	0,5%	0,4%	0,0%	0,0%
Hd (MJ/kg _B)	0,69	2,25	2,21	2,14	12,64	13,53
Hd sa terom (MJ/kg _B)	11,5	11,5	11,5	11,1		
masa vlage (kg/m ³ sgg)				0,152		
masa tera(kg/m ³ sgg)				0,122		
Temperatura (°C)	497	618	556	570	674,5	698,6

3.1 Diskusija

U prvoj seriji ispitivanja (videti Tab. 4.) niske vrednosti sagorljivih elemenata su posledice tankog sloja gasifikovanog goriva i stvaranja kanalića, uskih prolaza u sloju goriva. U ovom slučaju u prolazu, koji je za protok vazduha a potom i gasa neka vrsta hidrauličke kratke veze, se odvija gotovo potpuno sagorevanje. Kroz ostali deo mase struje manje količine vazduha i uzrokuju gasifikaciju sloja goriva. Devolatilizacija goriva koja se dešava i čija posledica je ter zavisi od brzine širenja toplotnog fluksa sa uskih zona oko kanalića na ostatak goriva. Devolatilizovan gas:

- (i) Cirkuliše iznad goriva u zoni gasifikacije zbog izjednačavanja pritiska. O ovome svedoči ter nalepljen na zidove komore kroz koje struji voda.
- (ii) Zbog relativno velikog otvora za prolaz gase iz zone gasifikacije u zonu sagorevanja (220x80 mm), ter se meša sa dimnim gasom ali zbog nedostatka kiseonika i opadanja temperature gase ne stiže da se redukuje. Opisani proces objašnjava izmerenu količinu tera u gorivom gasu. Ter gasu daje toplotnu moć i razlog je što i pored niske toplotne moći sagorevanje gase stvara vidljivi plamen.
- (iii) Stvara efekat duplog plamena prikazan na Sl. 5.a) i 5.b). Pri punjenju male količine materijala u kotlu se stvara efekat koji se koristi kod gasifikacionih kamina. Kod ispitivane konstrukcije ovaj efekat je poželjan i javlja se kad se u kotao stavlja količina drva koja je ispod otvora za dovod primarnog vazduha. No i pored ove pozitivne osobine ovakav način rada je nepovojan sa stanovišta upravljanja naročito pri prvoj šarži. Pomenuti kanalići onemoćavaju adekvatno upravljanje i postizanje nominalne snage. Pri ispitivanju kod nalaganja do linije A-A (videti Sl. 3.b) kotao nije mogao da ostvari termičku snagu veću od 15.5 kW.

Temperatura gase na izlazu iz komore nije mnogo oscilovala tokom perioda uzorkovanja i generalno je bila viša pri korišćenju veće količine primarnog vazduha. Više vazduha oslobađa veću količinu energije pri reakcijama oksidacije što za poledicu ima više temperature gase. Izmerene vrednosti su niže nego na optimalnoj tački gasifikacije zbog toplotnog gubitka ka vodi, sekundarnom vazduhu i okolini i u skladu su sa vrednostima dobijenim u [9]. Anomalije se javljaju pri punjenjima sa manjom količinom drveta zbog već pomenutih kanalića za protok gase. Pomenuti kanalići nestaju nakon nekoliko šarži zbog usitnjavanja drveta usled pojave pojava sukopljanja i termičke degradacije o čemu se opširnije može pročitati u [10].



Slika 5. a) izgled peći koja koristi gasifikaciju drva [17], princip rada peći pod a) [3],
c) izgled smeše kondenzata

4 Zaključak

U radu su predstavljena ispitivanja gasifikacione komore kotla na drva radi evaluacije njenih performansi i modeliranje komore za sagorevanje. Sastava i temperature proizvedenog gorivog gasa zavise od:

- Broja šarže. Prva šarža je najviše sklona stvaranju kanalića u sloju gasifikovanog materijali. Kanalići utiču na stabilan rad kotla a njihova pojava se redukuje kad se na dnu komore stvori dosta sitnijih komadića drvenog uglja. Tada kotao ulazi u stacionarni radni režim.
- Rastojanja od otvora za primarni vazduh do otvora za izlaz iz komore. Ovo rastojanje treba da bude od 30 do 40 cm i zavisi od oblika i veličine izlaznog otvora.
- Od oblika i veličine izlaznog otvora. Veći otvori stvaraju veću verovatnoću za pojavu kanalića i propadanje čestica u zonu sagorevanja. Zbog toga je potrebno na dnu komore postavljati adekvatnu prepreku. Zato proizvođači kotlova na dnu komore dodaju različite prepreke najčešće napravljene od vlastitog čelika. Opcija za smanjenje propadanja goriva i uznošenja čestica u gasnoj struji se može postići i odgovarajućim oblikom dna komore.
- Toplotnog fluksa koji se sa komore odvodi ka vazduhu za sagorevanje, zagrevanoj vodi i okolini. Veći topotni gubici ka vodi i okolini zahtevaju korišćenje veće količine primarnog vazduha.
- Visini do koje je komora napunjena gorivom i njegovog oblika, veličine i vlažnosti. Ako se koriste komore manje napunjene gorivom tada je moguće koristiti topotni fluks na način koji se radi kod duplih gasifikacionih peći (videti Sl. 5 a) i b)). Maksimalno punjenje gasifikacione komore drvima posle izvesnog vremena redukuje stvaranje kanalića.

Kod ispitivanog tipa komore za gasifikaciju topotna moć gasa je dolazila od sadržaja tera u njemu. Osim oblepljivanja zidova same komore, ter nije stvarao druge probleme. Razlog za dobijeni sastav gase je u relativno malom rastojanju između ulaznih otvora vazduha i otvora na izlazu iz gasifikacione komore, koji je u ovom slučaju ~ 20 cm (rastojanje je promenljivo videti Sl. 2). Gas dobijen tokom ispitivanja prikazane komore napunjene na način prikazan u radu veoma se razlikuje od gase proizvedenog u reaktorima za istosmernu gasifikaciju. Njegov sastav odgovara smeši gase dobijenog suprotosmernom gasifikacijom i produkata gotovo potpunog sagorevanja.

5 Reference

- [1] **Hassan R.**, *Ecosystems and Human Well-being : Current State and Trends , Volume 1*. 2005.
- [2] **Vučićević. A.**, "Statistical Pocketbook of the Republic of Serbia 2020," Beograd, 2020. doi: : ISSN 2683-5622.
- [3] **Adam A.**, "Performance Optimisation of a Residential Wood Log Burning Stove," 2023.
- [4] "ALK Contracting," 2023. <https://alkcontracting.com/outdoorwoodfurnaces.html>.
- [5] "Premier Plumbing & Heating," 2023. <http://premplumbingberwick.co.uk/biomass/>.
- [6] Viessmann, "Kotlovi na cepanice," 2023. <https://www.viessmann.rs/sr/daljinsko-grejanje/kotlovi-na-biomasu/kotlovi-na-cepanice.html>.
- [7] **Chanphavong L., Al-Attab K. A., Zainal Z. A.**, "Flameless Combustion Characteristics of Producer Gas Premixed Charge in a Cyclone Combustor," *Flow, Turbul. Combust.*, vol. 103, no. 3, pp. 731–750, 2019, doi: 10.1007/s10494-019-00043-x.
- [8] **Drosatos P., Nesiadis A., Nikolopoulos N., Margaritis N., Grammelis P., Kakaras E.**, "CFD Simulation of Domestic Gasification Boiler," *J. Energy Eng.*, vol. 143, no. 2, pp. 1–19, 2017, doi: 10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000406.
- [9] **Buchmayr M., Gruber J., Hargassner M., Hochenauer C.**, "Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler," *Biomass and Bioenergy*, vol. 81, pp. 356–363, 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.07.016.
- [10] **Caposciutti G. et al.**, "Experimental investigation on biomass shrinking and swelling behaviour: Particles pyrolysis and wood logs combustion," *Biomass and Bioenergy*, vol. 123, no. August 2018, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1016/j.biombioe.2019.01.044.

- [11] **Kirch T., Medwell P. R., Birzer C. H., van Eyk P. J.**, “Feedstock Dependence of Emissions from a Reverse-Downdraft Gasifier Cookstove,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 56, pp. 42–50, 2020, doi: 10.1016/j.esd.2020.02.008.
- [12] **Kirch T., Medwell P. R., Birzer C. H., Van Eyk P. J.**, “Influences of Fuel Bed Depth and Air Supply on Small-Scale Batch-Fed Reverse Downdraft Biomass Conversion,” *Energy and Fuels*, vol. 32, no. 8, pp. 8507–8518, 2018, doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b01699.
- [13] “ITEM Consult”ltd, “Test Report,” Sofia, Bulgaria, 2018.
- [14] **Hasler P., Nussbaumer T.**, “Sampling and analysis of particles and tars from biomass gasifiers,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 18, no. 1, pp. 61–66, 2000, doi: 10.1016/S0961-9534(99)00071-9.
- [15] **Karamarkovic R., Karamarkovic V.**, “Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures,” *Energy*, vol. 35, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.10.022.
- [16] **Karamarković R. M., Karamarković V. M., Jovović A. M., Marašević M. R., Lazarević A. D.**, “Biomass gasification with preheated air: Energy and exergy analysis,” *Thermal Science*, vol. 16, no. 2. pp. 535–550, 2012, doi: 10.2298/TSCI110708011K.
- [17] “Walltherm gasification stove,” 2023. <https://www.wallnoefer.it/en/products/wallthermr-wood-stoves/wood-boiler-stoves/new-vajolet-basic-insert-stove.html>.