

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

mr Sanja Petrović Bećirović

**UTICAJ PROMENE PARAMETARA
PROCESA SAGOREVANJA NA
ENERGETSKE I EKOLOŠKE
KARAKTERISTIKE PEĆI NA PELET**

doktorska disertacija

Beograd, 2016.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Sanja Petrović Bećirović, M.Sc.

**IMPACT OF VARIATION IN COMBUSTION
PARAMETERS ON ENERGY AND
ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF
PELLET STOVE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

PODACI O MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor izrade doktorske disertacije:

Prof. dr Dragoslava Stojiljković, *redovni profesor, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*

Članovi Komisije:

Prof. dr Aleksandar Jovović, *redovni profesor, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*

dr Nebojša Manić, *docent, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*

Prof. dr Petar Gvero, *redovni profesor, Mašinski fakultet Univerziteta u Banja Luci*

dr Rade Karamarković, *docent, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu Univerziteta u Kragujevcu*

Datum odbrane:

PREDGOVOR

Svakom istraživaču poznato je koliko je radosti, ushićenja, ali i izazova i trenutaka sumnje utkano u različite segmente istraživačkog procesa. Put od početne ideje, protkane entuzijazmom i željom za autentičnim doprinosom u naučnoj oblasti kojom se istraživač bavi, pa do krajnjeg rezultata i pozitivnog ishoda istraživačkog procesa, prilično je dug i često neizvestan. Samo uz beskompromisnu posvećenost, istrajnost, veliki trud, ali i iskreno interesovanje i skoro dečiju radoznalost ovaj put može se preći uspešno i završiti plodonosno.

Disertacija pred vama predstavlja rezultat jednog takvog procesa koji je istovremeno bio i interesantan i zahtevan, dugotrajan i izazovan, iritantan i zanimljiv. Kako bi izbegao lutanje i efikasno rešavao nezaobilazne nedoumice, Autor se na svom istraživačkom putu oslanjao na znanje, mudrost i iskustvo svog mentora, prof. dr Dragoslave Stojiljković, koja je sigurnim korakom predvodila ovu naučnu ekspediciju, dovodeći je polako do željenog ishoda. S tim u vezi, Autor koristi priliku da se zahvali svom mentoru na strpljenju, poverenju, uloženom trudu i vremenu, ali i iskrenom i toplom ljudskom odnosu i razumevanju iskazanom tokom višegodišnjeg rada na pripremi ove Disertacije, uključujući i situacije kada nije sve išlo po planu i kada se činilo da je željeni cilj prilično daleko. Posebna zahvalnost upućena je dr Nebojši Maniću, koji je nesebično delivši svoje ideje i iskustvo stečeno tokom istraživačkog rada u istoj oblasti, učinio sagledavanje razmatrane problematike zanimljivijim, interesantnijim, ali i donekle jednostavnijim. Takođe, Autor veliku zahvalnost duguje i svojim kolegama iz preduzeća Energoprojekt ENTEL, koji su bili izvor nesebične podrške tokom svih faza istraživačkog procesa.

Kao i tokom drugih značajnih životnih koraka, najveća zahvalnost upućena je porodici. Bez njihove ljubavi, podrške, pomoći i vere, bilo bi sve mnogo teže, kao što bi se i uspeh činio manje značajnim i vrednim kada se ne bi podelio sa najdražima. Disertaciju posvećujem svojim roditeljima koji su bili i ostali moj izvor najveće snage tokom svih životnih izazova. Čini me neizmerno radosnom što još jednom mogu da ih učinim ponosnim, znajući sa sigurnošću da će njihova sreća zbog izrade ove disertacije

biti najveća. Hvala vam za život koji ste mi podarili i koji ste me naučili dostojanstveno da živim.

Na kraju, nemerljiva zahvalnost ide mojim anđelima, Iliji i Dimitriju, uz koje sam naučila šta zaista znači безусловna ljubav. Ta snažna pokretačka sila, koja menja život iz korena, iznova me tera da dosegmem visine za koje ni sama nisam znala da sam sposobna. Ilija i Dimitrije, nadam se da ćete izrasti u srećne i zadovoljne ljude i da će moj rad buditi u vama osećaj ponosa tokom života koji su pred vama. Volim vas.

Autor

Beograd, septembar 2016.

UTICAJ PROMENE PARAMETARA PROCESA SAGOREVANJA NA ENERGETSKE I EKOLOŠKE KARAKTERISTIKE PEĆI NA PELET

Rezime

U okviru ove doktorske disertacije razmatrana je problematika sagorevanja peleta u uređajima male snage tj. pećima i kotlovima toplotne snage do 100 kWt. Veliki značaj koji je predmetnoj problematici dodeljen u energetske strategijama Evropske Unije, ali i Republike Srbije, ukazuje na aktuelnost teme i značaj istraživanja u cilju optimizacije procesa sagorevanja i postizanja što efikasnijeg sagorevanja goriva uz što manje lokalno zagađenje životne sredine. Eksperimentalna ispitivanja sprovedena u okviru ove disertacije obuhvatila su analizu uticaja promene parametara procesa sagorevanja na energetske (ostvarena toplotna snaga i stepen korisnosti) i ekološke (emisija ugljen monoksida) karakteristike peći za sagorevanje drvnih peleta deklarisanе snage 8 kWt. Pored analize efekata kvaliteta goriva, u okviru kojih je razmatrano sagorevanje dve alternativne vrste peleta od bukve, analiziran je i uticaj promene konstruktivnih karakteristika ložišta (izmena gorionika u ložištu peći i korišćenje gorionika toplotnog kapaciteta 6, 8 i 10 kWt) i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa (za tri predefinisane vrednosti od 8 ± 2 , 12 ± 2 i 16 ± 2 Pa), kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju peći. Na taj način, eksperimentalna ispitivanja obuhvatila su ispitivanje 36 radnih režima sa različitim kombinacijama variranih parametara. Zaključeno je da najveći uticaj na performanse rada ima kvalitet peleta, pri čemu pored hemijskog sastava i toplotne moći, fizičke karakteristike goriva (veličina peleta i nasipna i komadna gustina) predstavljaju značajan faktor koji direktno utiče na potrošnju goriva, ali i na vrednost koeficijenta viška vazduha u ložištu, difuziju kiseonika pri sagorevanju, tok odvijanja procesa sagorevanja i na temperaturu dimnog gasa. Takođe, pokazano je da izmena gorionika u ložištu nije dovoljna da se poveća/smanji deklarisanа snaga peći pri nepromenjenim podešavanjima sistema automatskog upravljanja uređajem, već je neophodno izvršiti i odgovarajuće podešavanje upravljačkog sistema za svaku konstruktivnu izmenu koja utiče na proces sagorevanja goriva. Promenom potpritiska u kanalu dimnog gasa može se u određenoj meri uticati na proces sagorevanja goriva kako bi se omogućilo ispunjavanje zahteva

relevantnog standarda u pogledu energetske i ekološke karakteristike rada peći na pelet. Pri tome, potpritisak u kanalu dimnog gasa značajnije utiče na emisije ugljen monoksida nego na stepen korisnosti analiziranog uređaja. Utvrđeno je i da je uticaj navedenog parametra direktno povezan sa kvalitetom korišćenog goriva, tako da očekivani efekti promene potpritiska u slučaju jedne vrste goriva ne moraju i najčešće nemaju identične efekte u slučaju sagorevanja alternativnog goriva. Utvrđeno je da emisije ugljen monoksida zavise od toplotnog opterećenja peći i to tako što su emisije zagađujućih materija najniže pri nominalnom toplotnom opterećenju. Pored eksperimentalnog ispitivanja, u okviru ove doktorske disertacije razvijen je i odgovarajući matematički model sagorevanja peleta u analiziranoj peći, koji je omogućio numeričku simulaciju različitih režima rada ispitivanog ložnog uređaja korišćenjem softverskog paketa Ansys Fluent 15.0. Dobijeni rezultati temperaturnih i koncentracijskih polja unutar ložišta ukazali su na činjenicu da se paljenje goriva i prostiranje plamena ne odvija duž centralne ose simetrije ložišta, već pomerenom ka njegovoj desnoj bočnoj površini. U navedenoj zoni ložišta se iz tog razloga odvijaju i intenzivnije reakcije sagorevanja goriva i intenzivnija reakcija dogorevanja CO u CO₂, što je potvrđeno dobijenim rezultatima koncentracijskih polja pomenutih hemijskih komponenta. Poređenje rezultata numeričke simulacije sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja pokazalo je zadovoljavajuće slaganje dve grupe podataka, na osnovu čega je zaključeno da se razvijen model može koristiti za poboljšanje rada analizirane vrste ložnih uređaja u cilju optimizacije procesa sagorevanja i ispunjavanja propisanih normativna u pogledu zahtevanog stepena korisnosti i maksimalno dozvoljene emisije ugljen monoksida iz uređaja za sagorevanje peleta male snage.

Ključne reči: peć na pelet, energetske i ekološke karakteristike, optimizacija rada, modelovanje

Naučna oblast: Mašinstvo

Uža naučna oblast: Tehnologija materijala - pogonski materijali i sagorevanje

UDK broj: 662.61:66.041:662.63(043.3)

IMPACT OF VARIATION IN COMBUSTION PARAMETERS ON ENERGY AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF PELLET STOVE

Abstract

This Doctoral Dissertation considers pellet combustion in small scale heating devices i.e. devices with rated heat output of up to 100 kWth. Both European and Serbian energy sector development strategies consider the household pellet use to be the issue of particular importance, thereby confirming the relevance of the topic selected and indicating that research activities conducted with an aim to optimize combustion process and achieve efficient pellet combustion, with minimum damage to the local environment are highly important. Experimental investigation has been performed in order to examine the impact of variation in combustion parameters on energy and environmental performance of pellet stove with a rated heat output of 8 kWt. The stove performance indicators considered included the actually achieved heat output and performance efficiency of the combustion unit (energy performance indicators), as well as carbon monoxide emission (environmental performance indicator). Apart from examining the impact of fuel variation, where combustion of two types of beech pellets were addressed, effects associated with modifications in stove construction features (alternative use of burners with thermal capacity of 6, 8 and 10 kWth) as well as flue draft changes (8 ± 2 , 12 ± 2 and 16 ± 2 Pa) were also investigated, both at nominal and reduced heat load. In such manner, experimental investigation included analysis of 36 operating regimes with different combinations of parameters varied. Based on the results achieved, it is concluded that pellet quality has the most pronounced effect on the stove performance indicators, with physical properties (pellet size, particle density and bulk density), in addition to pellet chemical composition and heating value, hugely affecting fuel consumption, excess air coefficient, diffusion of oxygen, combustion process features and defining flue gas temperature. Also, it has been shown that alteration in burner capacity is not sufficient to proportionally increase/decrease heat output of the stove, but that appropriate changes in the stove control system must be made after any modification in the stove configuration that affects fuel combustion process. Flue draft variations may, to a certain extent, affect fuel combustion in the

furnace so to enable fulfillment of regulatory requirements related to prescribed energy and environmental performance of the stove. It is also shown that flue draft variations have more significant effect on carbon monoxide emissions than on the efficiency of the combustion unit. Experiments performed have shown that effects of flue draft modification on the stove's performance are directly related to the quality of the fuel used, meaning that the effects associated with flue draft modifications in case of one type of pellet shall not necessarily be the same, and usually are not the same, when alternative pellet is combusted. It is determined that carbon monoxide emissions depend on the heat load, with lowest emissions recorded in case of nominal heat load. In addition to the experimental investigations performed, a mathematical model has been developed and used in numerical simulations of pellet combustion in the stove examined. Commercial CFD software Ansys Fluent 15.0 was employed to simulate combustion processes corresponding to different operating regimes of the stove. Results gathered based on the simulations performed, which included temperature, velocity and concentration fields, indicated that fuel ignition and flame propagation in the furnace did not occur along the central vertical axis of the stove, but were rather shifted towards its right side wall. As a result, more intense combustion reactions, as well as more intense oxidation of CO and formation of CO₂ occur in the right half of the furnace in comparison to its left half. This conclusion is confirmed by CO and CO₂ concentration fields obtained as a result of numerical simulations performed. Comparison between experimental and numerical data has shown good agreement, leading to the conclusion that the model developed can be used to improve operation of small combustion units, primarily with respect to combustion process optimization and fulfillment of regulatory norms related to minimum efficiency and maximum permissible carbon monoxide emissions prescribed for small scale heating devices.

Keywords: pellet stove, energy and environmental characteristics, performance optimization, CFD modeling

Scientific discipline: Mechanical Engineering

Scientific subdiscipline: Engineering Materials - Fuels and Combustion

UDC number: 662.61:66.041:662.63(043.3)

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE U GLOBALNOJ ENERGETICI.....	6
3.	ULOGA BIOMASE U SEKTORU PROIZVODNJE TOPLOTNE ENERGIJE.....	18
3.1	Proizvodnja toplotne energije iz obnovljivih izvora energije.....	19
3.2	Korišćenje biomase za podmirivanje potreba za toplotnom energijom u Evropskoj Uniji.....	21
3.3	Korišćenje biomase za podmirivanje potreba za toplotnom energijom u Republici Srbiji.....	27
4.	KARAKTERISTIKE BIOMASE KAO OBNOVLJIVOG IZVORA ENERGIJE.....	41
4.1	Definicija i podela biomase.....	42
4.2	Pregled tehnologija za iskorišćenje energije biomase.....	46
4.3	Uređaji za sagorevanje biomase.....	55
4.4	Emisije koje nastaju sagorevanjem biomase.....	60
5.	PELETI OD BIOMASE I UREĐAJI ZA NJIHOVO SAGOREVANJE.....	64
5.1	Prednosti korišćenja peleta od biomase.....	65
5.2	Zahtevi u pogledu kvaliteta peleta i sirovina korišćenih za njihovu proizvodnju.....	67
5.3	Tehnologija proizvodnje drvnih peleta.....	75
5.4	Uređaji male snage za sagorevanje drvnih peleta.....	85
5.5	Standardizacija uređaja male snage za sagorevanje peleta.....	93
5.6	Pregled istraživanja u oblasti uređaja male snage za sagorevanje peleta.....	97
6.	MODELOVANJE I NUMERIČKA SIMULACIJA PROCESA SAGOREVANJA PELETA U UREĐAJIMA MALE SNAGE.....	109
6.1	Uloga numeričkih simulacija u sagledavanju problematike sagorevanja biomase.....	110
6.2	Pregled matematičkih modela razvijenih za simulaciju sagorevanja peleta u uređajima male snage.....	113
6.3	Analiza matematičkih modela razvijenih za simulaciju sagorevanja peleta u uređajima male snage.....	128

7.	EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA RADNIH KARAKTERISTIKA PEĆI NA PELET SA ASPEKTA PROMENE PARAMETARA PROCESA SAGOREVANJA.....	131
7.1	Cilj sprovođenja eksperimentalnih ispitivanja.....	132
7.2	Eksperimentalna instalacija.....	132
7.3	Plan i program merenja.....	136
7.3.1	Ispitivanje uticaja vrste goriva na radne performanse peći na pelet.....	137
7.3.2	Ispitivanje uticaja toplotog kapaciteta gorionika na radne performanse peći na pelet.....	137
7.3.3	Ispitivanje uticaja potpritisaka u kanalu dimnog gasa na radne performanse peći na pelet.....	139
7.4	Mereni parametri i korišćena merna oprema.....	139
7.5	Procedura sprovođenja eksperimentalnih ispitivanja.....	142
7.6	Ispitivani radni režimi.....	145
8.	PREGLED I ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA.....	148
8.1	Rezultati eksperimentalnih ispitivanja.....	149
8.1.1	Rezultati ispitivanja kvaliteta goriva.....	150
8.1.2	Rezultati ispitivanja procesa sagorevanja i produkata sagorevanja peleta.....	151
8.1.3	Prikaz srednjih vrednosti rezultata kontinualnih merenja mernih parametara.....	157
8.2	Obrada rezultata eksperimentalnih ispitivanja.....	163
8.2.1	Definisanje parametara potrebnih za postavku matematičkog modela sagorevanja peleta u analiziranoj peći.....	163
8.2.2	Sagledavanje energetskih i ekoloških karakteristika rada razmatrane peći na pelet.....	172
8.3	Analiza rezultata eksperimentalnih ispitivanja.....	177
8.3.1	Analiza kvaliteta goriva.....	177
8.3.2	Analiza energetskih i ekoloških karakteristika rada razmatrane peći.....	178
8.3.3	Analiza uticaja variranja radnih parametara na proces sagorevanja peleta u razmatranoj peći.....	182

9.	MODELOVANJE I NUMERIČKA SIMULACIJA SAGOREVANJA PELETA U ISPITIVANOJ PEĆI NA PELET.....	193
9.1	Definisanje metodološke postavke numeričke simulacije.....	194
9.2	Definisanje matematičkog modela.....	199
9.2.1	Definisanje osnovnih transportnih jednačina.....	199
9.2.2	Definisanje osnovnih podmodela disperzne faze.....	203
9.2.3	Definisanje kinetike procesa sagorevanja.....	206
9.3	Definisanje domena i graničnih uslova za sprovođenje numeričke simulacije.....	210
10.	REZULTATI MODELOVANJA I NUMERIČKE SIMULACIJE PROCESA SAGOREVANJA PELETA.....	215
10.1	Sagledavanje rezultata modelovanja i numeričke simulacije.....	216
10.2	Prikaz rezultata modelovanja i numeričke simulacije.....	218
10.3	Poređenje rezultata modelovanja i numeričke simulacije sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja.....	233
10.4	Analiza rezultata modelovanja i numeričke simulacije.....	238
10.5	Zaključak procesa validacije razvijenog modela i numeričke simulacije.....	239
11.	ZAKLJUČNA RAZMATRANJA.....	241
12.	LITERATURA.....	252
13.	PRILOZI.....	265

SPISAK SLIKA

Slika 2-1	Globalna potražnja za primarnom energijom u periodu 2000-2035. godina [3].....	8
Slika 2-2	Bruto finalna potrošnja energije po sektorima u periodu 1990-2035. godina i struktura korišćenih energenata u sektoru široke potrošnje [3].....	10
Slika 2-3	Istorijski porast koncentracija gasova sa efektom staklene bašte kao rezultat ljudskih aktivnosti [6].....	12
Slika 2-4	Doprinos pojedinačnih sektora globalnim godišnjim GHG emisijama [7].....	13
Slika 2-5	Instalisana snaga novih energetske postrojenja na OIE na globalnom nivou u periodu 2000-2014. godina [8].....	14
Slika 2-6	Procentualni udeo OIE u bruto finalnoj potrošnji energije zemalja članica EU-28 [11].....	16
Slika 2-7	Porast udela OIE u bruto finalnoj potrošnji energije u EU-28 u periodu 2004-2014. godina [11].....	16
Slika 3-1	Udeo pojedinačnih sektora u bruto finalnoj potrošnji energije u EU [12, 13].....	19
Slika 3-2	Porast udela OIE u ključnim privrednim sektorima EU-28 u periodu 2004-2014. godina [14].....	20
Slika 3-3	Planirani udeo različitih OIE u proizvodnji toplotne i rashladne energije u EU u 2020. godini [16].....	21
Slika 3-4	Udeo biogoriva u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije u EU u periodu do 2020. godine [19].....	23
Slika 3-5	Aspekti koji ilustruju značajnu ulogu biomase u sektoru proizvodnje toplotne energije namenjene za zagrevanje domaćinstava u EU.....	26
Slika 3-6	Struktura potrošnje primarne energije u Republici Srbiji [24].....	28
Slika 3-7	Struktura bruto finalne potrošnje energije u Republici Srbiji po energentima [24].....	29
Slika 3-8	Struktura bruto finalne potrošnje energije u Republici Srbiji po sektorima [24].....	29

Slika 3-9	Gradovi u Republici Srbiji sa sistemom daljinskog grejanja i tip goriva koji se koristi u pripadajućim toplanama [29].....	35
Slika 3-10	Udeo domaćinstava u gradovima Srbije koji su potencijalni korisnici peleta od biomase za grejanje [30].....	37
Slika 3-11	Aspekti koji ilustruju značajnu ulogu biomase u sektoru proizvodnje toplotne enegije namenjene za zagrevanje domaćinstava u Republici Srbiji.....	39
Slika 4-1	Aktivnosti u lancu isporuke čvrstog biogoriva [34].....	46
Slika 4-2	Šema tehnologija za preradu biomase.....	47
Slika 4-3	Dvostepeno dovodenje vazduha za sagorevanje drvene biomase.....	48
Slika 4-4	Međuzavisnost sadržaja vlage, toplotne moći i a) gustine čvrste biomase, b) energetske gustine čvrste biomase [40].....	54
Slika 4-5	Opseg snaga postrojenja i sektori korišćenja čvrste biomase kao goriva.....	55
Slika 4-6	Spektar parametara koji utiču na proces sagorevanja čvrste biomase...	59
Slika 5-1	Globalna: a) proizvodnja i b) potrošnja peleta [48].....	66
Slika 5-2	Karakteristike drvnih peleta prečnika 8 mm, proizvedenih u skladu sa zahtevima relevantnog standarda [54].....	68
Slika 5-3	Primer deklaracije za proizvedene pelete [57].....	71
Slika 5-4	Glavni koraci u tehnologiji proizvodnje peleta.....	76
Slika 5-5	Tehnološki proces proizvodnje drvnih peleta.....	79
Slika 5-6	Peletiranje drvnog materijala pomoću matrice prese za peletiranje i valjaka za istiskivanje peletiranog materijala.....	81
Slika 5-7	Uticaj karakteristika peleta na njihovu manipulaciju i proces sagorevanja.....	84
Slika 5-8	Namena peći i kotlova male snage za sagorevanje peleta.....	86
Slika 5-9	Konstrukcija peći za sagorevanje peleta od biomase.....	88
Slika 5-10	Kotao na pelet sa spoljašnjim gorionikom i rezervoarom za pelete [64].....	90
Slika 5-11	Kotao na pelet sa ugrađenim gorionikom: (a) konstrukcija, (b) veza sa skladištem peleta [65].....	91

Slika 5-12	Način dovoda goriva u ložište uređaja za sagorevanje peleta: a) sa donje strane, b) sa bočne strane i c) sa gornje strane [66].....	92
Slika 5-13	Predlog unificirane eko-oznake uređaja za sagorevanje biomase na nivou cele Evropske Unije [71].....	96
Slika 5-14	Izmerene emisije CO, NO _x i praškastih materija za analizirane vrste peleta i različito toplotno opterećenje kotla [60].....	101
Slika 5-15	Primer međusobne zavisnosti koeficijenta viška vazduha (λ) i emisija CO iz peći i kotlova male snage [55].....	103
Slika 5-16	Funkcionalna zavisnost emisija CO i NO od sadržaja O ₂ u dimnom gasu za različite geometrije gorionika [103].....	107
Slika 6-1	Prikaz slaganja rezultata razvijenog modela i eksperimentalnih ispitivanja za: a) emisije CO i b) emisije NO _x [108].....	116
Slika 6-2	Šematski prikaz modela sagorevanja peleta u kotlu snage 50 kWt [113].....	117
Slika 6-3	Šematski prikaz modelovanog sabijanja goriva u sloju [114].....	122
Slika 6-4	Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata modelovanja promene debljine sloja goriva [114].....	123
Slika 6-5	Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata temperaturnog polja: a) eksperimentalni podaci, b) numerička simulacija [118].....	127
Slika 6-6	Numerička simulacija: a) strujnog polja, b) raspodele goriva, c) raspodele O ₂ i c) raspodele CO u ložištu kotla [118].....	128
Slika 6-7	Prikaz najčešće primenjivane metodologije modelovanja sagorevanja biomase u sloju [105].....	129
Slika 7-1	Ispitivana peć na pelet.....	134
Slika 7-2	Šematski prikaz rada ispitivane peći na pelet.....	136
Slika 7-3	Konstrukcija gorionika toplotnog kapaciteta 8 kWt.....	138
Slika 7-4	Raspored mernih mesta za merenje karakterističnih parametara: a) poprečni presek peći, b) pogled sa prednje strane.....	140

Slika 7-5	Merna staza: 1-ispust dimnog gasa u atmosferu, 2-regulator potpritiska u kanalu dimnog gasa, 3-podesiva klapna, 4-podesiv regulator protoka, 5-kolenasta veza, 6-merna deonica, 7-peć na pelet, 8- kolenasti element, 9-ložište, 10-zadnji zid, 11-postolja peći, 12-digitalna merna vaga.....	142
Slika 8-1	Promena ukupne mase peći za režim PA-N-B8-D12.....	152
Slika 8-2	Promena temperature dimnog gasa i temperature toplog vazduha za režim PA-N-B8-D12.....	152
Slika 8-3	Promena temperature u ložištu peći za režim PA-N-B8-D12.....	153
Slika 8-4	Promena temperatura karakterističnih površina peći za režim PA-N-B8-D12.....	153
Slika 8-5	Promena temperature i sastava gasovitih produkata sagorevanja za režim PA-N-B8-D12.....	154
Slika 8-6	Promena ukupne mase peći za režim PB-N-B8-D12.....	154
Slika 8-7	Promena temperature dimnog gasa i temperature toplog vazduha za režim PB-N-B8-D12.....	155
Slika 8-8	Promena temperature u ložištu peći za režim PB-N-B8-D12.....	155
Slika 8-9	Promena temperatura karakterističnih površina peći za režim PB-N-B8-D12.....	156
Slika 8-10	Promena temperature i sastava gasovitih produkata sagorevanja za režim PB-N-B8-D12.....	156
Slika 8-11	Poređenje literaturnih podataka za određivanje potrošnje goriva merenjem promene ukupne mase peći i korišćenjem stehiometrijskih jednačina sagorevanja [122].....	164
Slika 8-12	Potrošnja goriva za ispitivane radne režime.....	165
Slika 8-13	Poređenje literaturnih podataka za određivanje količine vazduha za sagorevanje na osnovu stehiometrijskih jednačina sagorevanje i na osnovu masenog bilansa procesa sagorevanja [122].....	167
Slika 8-14	Količina vazduha za sagorevanje za ispitivane radne režime.....	168
Slika 8-15	Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura graničnih površina za sagorevanje peleta A.....	169

Slika 8-16	Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura graničnih površina za sagorevanje peleta B.....	170
Slika 8-17	Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura dimnog gasa za pelet A i pelet B: a) leva strana peći, b) desna strana peći.....	171
Slika 8-18	Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura toplog vazduha za pelet A i pelet B: a) leva strana peći, b) desna strana peći.....	172
Slika 8-19	Rezultati određivanja srednjih vrednosti parametara procesa sagorevanja: a) sadržaj kiseonika u gasovitim produktima sagorevanja, b) sadržaj ugljen dioksida u gasovitim produktima sagorevanja.....	173
Slika 8-20	Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperature gasovitih produkata sagorevanja.....	174
Slika 8-21	Rezultati određivanja toplotne snage peći.....	175
Slika 8-22	Rezultati određivanja stepena korisnosti peći.....	175
Slika 8-23	Rezultati određivanja emisije ugljen monoksida (CO), svedene na referentnu vrednost od 13% O ₂ (v/v) u dimnom gasu.....	176
Slika 8-24	Rezultati određivanja emisije azotnih oksida (NO _x), svedene na referentnu vrednost od 13% O ₂ (v/v) u dimnom gasu.....	177
Slika 8-25	Uticaj promene toplotne snage gorionika na energetske i ekološke performanse rada peći pri: a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i potpritisku u kanalu dimnog gasa od 12±2 Pa	185
Slika 8-26	Uticaj promene potpritiska u kanalu dimnog gasa na energetske i ekološke performanse rada peći pri: a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i za korišćenje gorionika kapaciteta 8 kWt...	190
Slika 9-1	Metodologija razvijenog matematičkog modela.....	196
Slika 9-2	Modelovana geometrija ispitivane peći na pelet.....	211
Slika 9-3	Usvojena numerička mreža unutar domena modela.....	212
Slika 10-1	Temperatura u ložištu dobijena numeričkom simulacijom sagorevanja peleta A u peći sa gorionikom kapaciteta 8 kWt.....	219
Slika 10-2	Temperatura u ložištu dobijena numeričkom simulacijom sagorevanja peleta B u peći sa gorionikom kapaciteta 8 kWt.....	219
Slika 10-3	Poređenje vrednosti temperature u ložištu dobijene eksperimentalnim	220

	ispitivanjem i numeričkom simulacijom za pelet A.....	
Slika 10-4	Poređenje vrednosti temperature u ložištu dobijene eksperimentalnim ispitivanjem i numeričkom simulacijom za pelet B.....	220
Slika 10-5	Temperatursko polje dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12.....	223
Slika 10-6	Brzinsko polje dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12.....	224
Slika 10-7	Polje koncentracije O ₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12.....	225
Slika 10-8	Polje koncentracije CO ₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12.....	226
Slika 10-9	Polje koncentracije CO dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12.....	227
Slika 10-10	Temperatursko polje dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12.....	228
Slika 10-11	Brzinsko polje dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12.....	229
Slika 10-12	Polje koncentracije O ₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12.....	230
Slika 10-13	Polje koncentracije CO ₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12.....	231
Slika 10-14	Polje koncentracije CO dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12.....	232
Slika 10-15	Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja sadržaja kiseonika u izlaznom dimnom gasu.....	234
Slika 10-16	Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja toplotne snage peći.....	235
Slika 10-17	Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja stepena korisnosti peći.....	236
Slika 10-18	Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja koncentracije ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu.....	237
Slika VI-1	Uticaj promene toplotnog kapaciteta gorionika na energetske i	275

ekološke performanse rada peći pri: a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i potpritisku u kanalu dimnog gasa od 8 ± 2 Pa..

- Slika VI-2 Uticaj promene toplotnog kapaciteta gorionika na energetske i ekološke performanse rada pri: a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i potpritisku u kanalu dimnog gasa od 16 ± 2 Pa 276
- Slika VI-3 Uticaj promene potpritiska u kanalu dimnog gasa na energetske i ekološke performanse rada peći pri: a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i za korišćenje gorionika kapaciteta 6 kWt.... 277
- Slika VI-4 Uticaj promene potpritiska u kanalu dimnog gasa na energetske i ekološke performanse rada peći pri: a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i za korišćenje gorionika kapaciteta 10 kWt.... 278

SPISAK TABELA

Tabela 3-1	Dinamika porasta udela OIE u Republici Srbiji do 2020. godine [27].....	31
Tabela 3-2	Proizvodnja toplotne i rashladne energije iz IOE u Republici Srbiji u 2020. godini [27].....	33
Tabela 4-1	Najvažnije karakteristike čvrste biomase i njihovi uticaji [40].....	52
Tabela 4-2	Tipičan sadržaj vlage, toplotna moć, nasipna gustina i energetska gustina pojedinih vrsta čvrste biomase [41].....	53
Tabela 4-3	Zagađujuće materije koje nastaju sagorevanjem biomase i njihov uticaj na klimu, životnu sredinu i zdravlje ljudi [40].....	61
Tabela 5-1	Podela uređaja za sagorevanje peleta od biomase na osnovu nominalne snage.....	69
Tabela 5-2	Pregled evaluacionih kriterijuma sa aspekta proizvodnje peleta [54], [55].....	72
Tabela 5-3	Podela uređaja za sagorevanje peleta snage do 100 kWt [54].....	86
Tabela 5-4	Predložena klasifikacija uređaja na biomasu male snage [71].....	96
Tabela 5-5	Rezultati ispitivanja kotla deklarisanе snage 40 kWt za različite vrste peleta pri nominalnom/redukovanom toplotnom opterećenju [102]....	105
Tabela 5-6	Rezultati ispitivanja kotla snage 40 kWt za različite vrste peleta pri nominalnom/redukovanom toplotnom opterećenju [104].....	108
Tabela 6-1	Teorijska količina dimnih gasova i realna količina vazduha za sagorevanje [117].....	125
Tabela 6-2	Poređenje analitički određenih parametara sa rezultatima numeričkog modela [117].....	125
Tabela 7-1	Deklarisane karakteristike ispitivane peći na pelet [121].....	133
Tabela 7-2	Konstruktivne karakteristike ispitivanih gorionika.....	138
Tabela 7-3	Identifikacija merenih temperatura.....	140
Tabela 7-4	Identifikacija ispitivanih radnih režima analizirane peći na pelet.....	146
Tabela 8-1	Rezultati ispitivanja kvaliteta goriva.....	150
Tabela 8-2	Rezultati ispitivanja potrošnje goriva.....	157

Tabela 8-3	Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet A, nominalno toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa.....	158
Tabela 8-4	Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet A, redukovano toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa.....	159
Tabela 8-5	Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet B, nominalno toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa.....	160
Tabela 8-6	Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet B, redukovano toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa.....	161
Tabela 8-7	Rezultati ispitivanja sadržaja nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja.....	162
Tabela 8-8	Vrednosti koeficijenta viška vazduha za ispitivane radne režime.....	166
Tabela 8-9	Određivanje srednjih vrednosti temperatura graničnih površina.....	169
Tabela 8-10	Pregled ispunjenosti zahteva EN 14785 za ispitivane režime rada peći.....	180
Tabela 9-1	Stehiometrijski koeficijenti u jednačinama sagorevanja volatila.....	209
Tabela I-1	Pregled standarda i tehničkih uputstava za čvrsta biogoriva.....	267
Tabela II-1	Podela čvrste biomase prema poreklu u skladu sa ISO 17225-1:2014.	269
Tabela III-1	Pregled evropskih standarda za uređaje male snage namenjene za sagorevanje čvrstih goriva.....	273
Tabela IV-1	Zahtevane karakteristike uređaja male snage na drvni pelet, u skladu sa EN 14785:2006.....	274
Tabela V-1	Poređenje zahteva standarda za sagorevanje biomase u pojedinim zemljama EU [66].....	274

1. UVOD

Aktuelni izazovi u sektoru energetike nose sa sobom veliku odgovornost u pogledu neophodnosti uspostavljanja stabilnih temelja održivog globalnog razvoja, kojim će se omogućiti dugoročni ekonomski i socijalni razvoj čovečanstva na način koji ne narušava integritet planetarnih eko-sistema, podmiruje osnovne energetske potrebe stanovništva na planeti i smanjuje rizike vezane za sigurnost snabdevanja energijom i opasnosti od geopolitičkih sukoba do kojih dolazi kao posledica sve izraženije borbe za globalno neravnomerno raspoređenim izvorima primarne energije. Obnovljivi izvori energije identifikovani su kao jedno od ključnih rešenja kada je u pitanju utemeljivanje održive energetike, sektora koji u najvećoj meri utiče na ekonomski razvoj, stanje životne sredine i zdravlje stanovništva svake države, ali i cele planete. Za razliku od fosilnih goriva, smatra se da eksploatacija obnovljivih izvora energije (OIE) generalno ne utiče na zagađenje životne sredine i da uz primenu principa održivosti, omogućava iskorišćenje neograničenog (obnovljivog) energetskog potencijala. Pored toga, veće oslanjanje na lokalno raspoložive izvore energije omogućava i lokalni razvoj privrede, doprinoseći većoj energetske nezavisnosti država i njihovom stabilnijem ekonomskom razvoju.

Evropska Unija predstavlja globalnog lidera u borbi za veće učešće OIE u sektoru energetike. Doslednim i sistematskim pristupom, Evropska Unija (EU) uspešno povećava korišćenje OIE u zemljama članicama, promovise upotrebu "čistih" tehnologija i sve značajnije se okreće tehničkim rešenjima koja manje narušavaju stanje životne sredine i zdravlje ljudi, čak i po cenu da to predstavlja ekonomski nepovoljniju opciju proizvodnje energije. Subvencije za korišćenje OIE koje su uvedene u zemljama EU počevši od 2000. godine (najpre u Nemačkoj i Danskoj, a zatim i u ostalim zemljama EU) svedoče u prilog činjenici da je EU spremna da dugoročno podrži primenu OIE. Danas, mnoge tehnologije dobijanja energije iz OIE sa ekonomskog aspekta mogu da konkurišu tradicionalnim vidovima proizvodnje energije, naročito imajući u vidu sve veće troškove dobijanja energije iz fosilnih goriva koji su prouzrokovani sve strožijim zahtevima u pogledu obavezne primene mera za sprečavanje prekomernog zagađenja.

Kao zemlja koja pretenduje na članstvo u EU, Republika Srbija je potpisivanjem ili ratifikacijom različitih međunarodnih sporazuma preuzela čitav niz obaveza u pogledu povećanja korišćenja OIE. Pomenute odluke svedoče o ozbiljnoj nameri države

da povećá učešće OIE u energetske intenzivnim delatnostima kako bi do 2020. godine učešće OIE u bruto finalnoj potrošnji energije sa 21,2%, koliko je iznosilo u 2009. godini, bilo povećano na 27%. U Strategiji razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine (Sl. glasnik RS br. 101/15), prepoznata je očekivana uloga OIE u energetskej budućnosti Srbije, pri čemu je biomasa, učestvujući sa čak 61% u ukupnom potencijalu OIE naše zemlje, identifikovana kao najznačajniji obnovljivi resurs kojim Srbija raspolaže. Sa druge strane, Srbija je kao jedan od ključnih sektora za ostvarivanje pomenutog cilja povećanog učešća OIE identifikovala sektor proizvodnje toplotne i rashladne energije. U skladu sa Nacionalnim akcionim planom Republike Srbije za korišćenje OIE - NAPOIE (Sl. glasnik RS, br. 53/13), planirano je da učešće OIE u pomenutom sektoru dostigne 30% u 2020. godini. Navedeni cilj ostvariće se najviše porastom korišćenja biomase u sektoru domaćinstava, ali i u kogenerativnim postrojenjima i sistemima daljinskog grejanja.

Zagrevanje prostora u domaćinstvima i zgradama korišćenjem posebno pripremljenog oblika biomase u obliku peleta ili briketa je naročito interesantno kao alternativa postojećim individualnim ložnim uređajima u kojima se sagoreva ekološki znatno nepovoljnije fosilno gorivo (ugalj, mazut, ulje za loženje). Upotreba peleta ili briketa veoma je atraktivna i kao alternativa električnoj energiji koja se trenutno, usled niske regulisane cene, intenzivno koristi za zagrevanje životnog i radnog prostora u Srbiji. Ipak, kako se očekuje da će cena električne energije u budućnosti biti značajnije povećana, grejanje na električnu energiju izgubiće svoju ekonomsku atraktivnost, pa će se individualni korisnici odlučivati za druge opcije snabdevanja toplotnom energijom, uključujući i grejanje na pelet. Pri tom, potrebno je pomenuti da adekvatna primena mere koja bi podrazumevala veću zastupljenost grejnih uređaja na pelet zahteva adekvatnu kontrolu kvaliteta samih peleta, ali i karakteristika rada uređaja za njihovo sagorevanje.

Shodno navedenom, u okviru aktivnosti sprovedenih u cilju izrade ove doktorske disertacije analizirana je problematika sagorevanja peleta u uređajima male snage (do 100 kWt) koji su namenjeni za zagrevanje domaćinstava. Razmatran je uticaj vrste peleta, konstruktivnih karakteristika i radnih parametara peći na pelet deklarisanu toplotne snage 8 kWt na njene energetske i ekološke karakteristike rada. Pomenuta sagledavanja obuhvatila su i analizu ispunjenosti odgovarajućih zahteva koje propisuje

merodavni evropski standard EN 14785:2006 koji se odnosi na ložne uređaje male snage u kojima se sagorevaju peleti. Prikazani su rezultati sagorevanja peleta koji je preporučen od strane proizvođača analiziranog ložnog uređaja, kao i rezultati sagorevanja alternativnog goriva koje je lako dostupno na tržištu Srbije. Upoređivanjem dobijenih rezultata kvantifikovan je uticaj kvaliteta goriva na mogućnost dostizanja deklarisanе snage i efikasnosti peći na pelet, kao i na rezultujuću emisiju ugljen monoksida. Pored toga, razmatran je i uticaj promene toplotne snage gorionika na radne performanse razmatranog uređaja za sagorevanje, sa ciljem ispitivanja mogućnosti da se jednostavnom izmenom gorionika u nepromenjenoj konstrukciji peći dobije uređaj različite deklarisanе snage. Navedena mera omogućila bi da se peći približnih deklarisanih snaga konstruktivno razlikuju jedino po snazi instalisanog gorionika, čime bi se značajno pojednostavila izrada i smanjili troškovi proizvodnje ovih ložnih uređaja. Eksperimentalna ispitivanja obuhvatila su i analizu uticaja promene potpritiska u kanalu dimnog gasa, a u cilju razmatranja mogućnosti uticanja na kvalitet procesa sagorevanja i dalje na energetske i ekološke performanse rada analiziranog uređaja. Pored eksperimentalnog ispitivanja, u okviru doktorske disertacije razvijen je i odgovarajući matematički model sagorevanja peleta u analiziranoj peći, koji je korišćen u numeričkoj simulaciji različitih režima rada razmatranog ložnog uređaja korišćenjem softverskog paketa Ansys Fluent 15.0. Zaključci sprovedenih ispitivanja, kao i smernice za dalja istraživanja, formirani na osnovu analize rezultata eksperimentalnih ispitivanja i sprovedene numeričke simulacije procesa sagorevanja, ukazali su na moguće pravce unapređenja i optimizacije procesa sagorevanja u cilju ispunjavanja propisanih normativa u pogledu zahtevanih energetskih i ekoloških performansi rada analiziranih uređaja za sagorevanje.

Potrebno je imati u vidu da oblast nauke i tehnike predstavlja jedan od najznačajnijih faktora koji će uticati na budućnost energetske prakse u svetu. Nauka obezbeđuje osnove za racionalno razmatranje prednosti i nedostataka različitih rešenja snabdevanja energijom, za izbor prioriternih oblasti daljeg istraživanja i razvoja, kao i identifikovanje inovativnih mogućnosti podmirivanja potreba za energijom. Tehnologija i inženjering, kroz neprekidnu optimizaciju raspoloživih rešenja, u mogućnosti su da utiču na razvoj postojećih energetskih alternativa i to najviše kroz iskustva koja se stiču u samoj praksi. Shodno tome, ova doktorska disertacija predstavlja doprinos

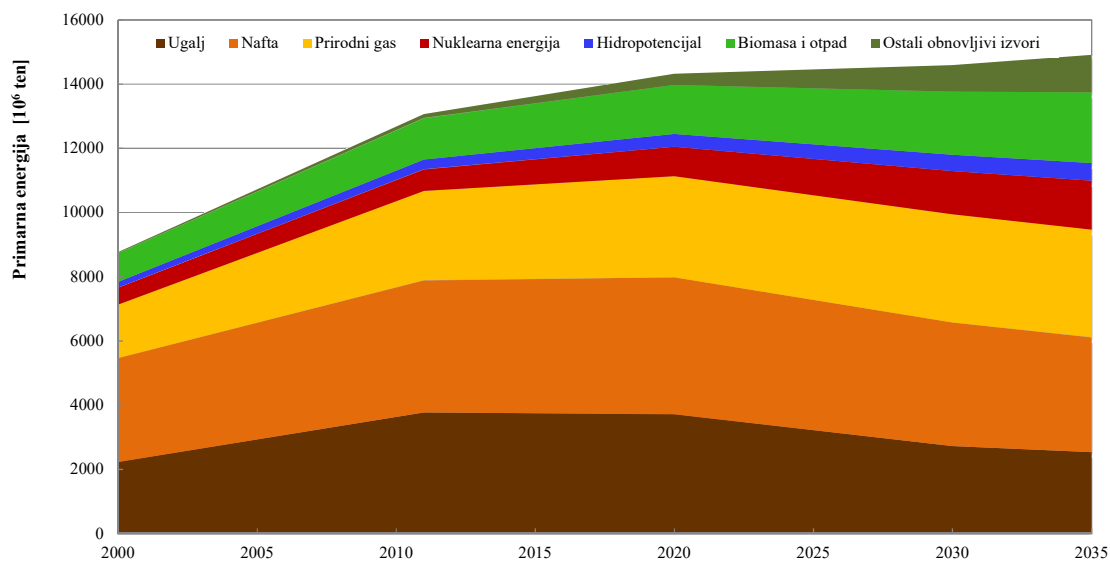
sagledavanju i unapređenju jednog segmenta energetske delatnosti, koji je na osnovu aktuelne zakonske regulative i usvojenih strateških dokumenata prepoznat kao veoma važan za Republiku Srbiju. Konkretni naučni doprinos ove disertacije ogleda se u postavljanju jasnih smernica za unapređenje procesa sagorevanja peleta od drvene biomase u uređajima male snage. Dobijeni rezultati ukazuju na značajan uticaj koji kvalitet goriva i parametri procesa sagorevanja imaju na efikasnost rada i emisiju zagađujućih materija pomenutih ložnih uređaja. Zaključci usvojeni nakon sprovedene analize uticaja promene različitih parametara procesa sagorevanja, a za utvrđeni kvalitet goriva, ukazuju na moguća unapređenja procesa sagorevanja u cilju poboljšanja energetskih i ekoloških performansi rada razmatranih uređaja. Primenom odgovarajućeg podešavanja i optimizacije rada mogu se postići značajno bolje radne performanse razmatrane vrste uređaja, što će u krajnjem ishodu omogućiti smanjenje potrošnje primarne energije i manje emisije zagađujućih materija iz sektora domaćinstava, kao jednog od najznačajnijih sektora potrošnje energije. Navedena unapređenja sa aspekta poboljšanja ekoloških performansi rada posebno su značajna za sredine u kojima ne postoji tehnička mogućnost ili ekonomski interes korisnika za priključenje na sistem daljinskog grejanja ili prelazak na sagorevanje ekološki prihvatljivije vrste fosilnog goriva (npr. prirodnog gasa).

Na kraju, potrebno je naglasiti da intenzivna naučna i tehnološka aktivnost, praćena regulatornim merama koje će stimulirati i ubrzati razvoj savremenih energetskih rešenja, predstavljaju adekvatan način na koji se može uticati na transformaciju aktuelne prakse u oblasti proizvodnje i potrošnje energije u našoj zemlji, a u cilju postizanja održivosti i dugoročne stabilnosti sektora energetike.

2. OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE U GLOBALNOJ ENERGETICI

Dostupnost energije u današnjem svetu smatra se ključnim faktorom globalnog razvoja, ali i opstanka savremenog društva u obliku u kom on danas postoji. Intenzivan ekonomski i socijalni razvoj zabeležen tokom poslednjih decenija, dinamikom koja prevazilazi sve dosadašnje razvojne periode, direktno je povezan za dramatičnim porastom potražnje za pouzdanim, pristupačnim i ekološki prihvatljivim izvorima energije, kao i savremenim naučnim i tehnološkim dostignućima u oblasti njihove eksploatacije. Porast potrošnje energije koji prati globalni razvoj neminovno dovodi do porasta cene energenata i otvara pitanje sigurnosti snabdevanja energijom.

Istorijski osvrt na trend promene potrošnje energije ukazuje na činjenicu da se razvoj ljudskog društva sve do kraja XVIII veka odlikovao samo umerenim porastom broja stanovnika, bruto domaćeg proizvoda (BDP) i umerenim intenzitetom porasta potrošnje energije. Industrijska revolucija krajem XVIII i početkom XIX veka donela je dramatične promene u razmatranoj oblasti, tako da se samo tokom XX veka broj stanovnika na Zemlji uvećao 3,7 puta, porastavši sa 1,6 na 6 milijardi [1]. Tokom navedenog perioda u većini zemalja koje se danas mogu smatrati razvijenim uočen je trend porasta potrošnje energije kao direktne posledice porasta stepena ekonomskog razvoja i modernizacije društva, tako da je samo tokom XX veka potražnja za finalnom energijom porasla više od 30 puta [2]. Imajući u vidu da će se trend porasta globalnog broja stanovnika nastaviti i da će u 2050. godini taj broj dostići 8,7 milijardi [1], kao i činjenicu da će se u nekim od najmnogoljudnijih zemalja sveta beležiti najveće stope ekonomskog razvoja i porast BDP-a, jasno je da će potražnja za energijom u budućnosti i dalje rasti. Prognoze Međunarodne agencije za energetiku ukazuju na podatak da će 2035. godine potreba za primarnom energijom porasti za dodatnih 30%, Slika 2-1 [3].



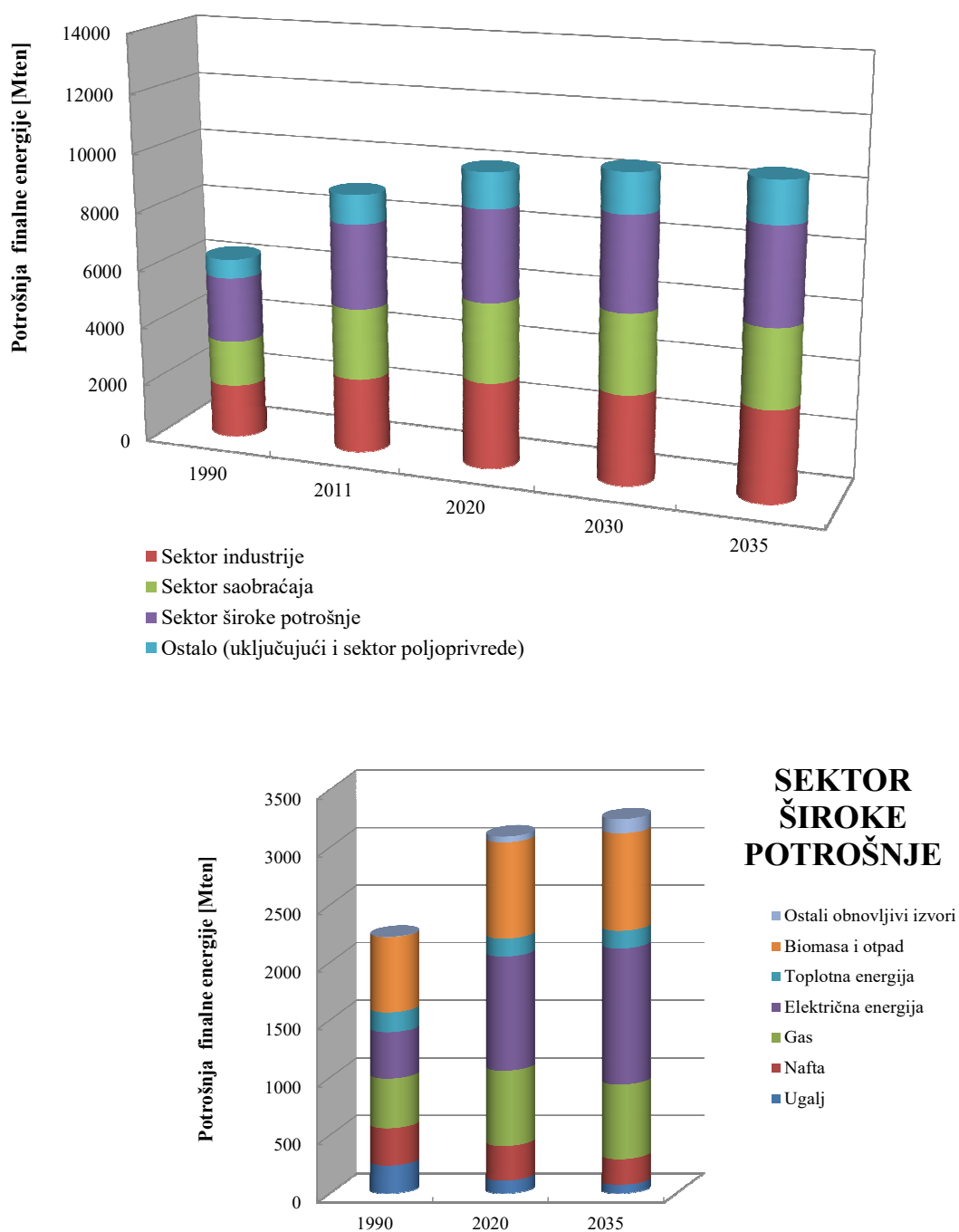
Slika 2-1 Globalna potražnja za primarnom energijom u periodu 2000-2035. godina [3]

Fosilna goriva, u koja spadaju ugalj, nafta i prirodni gas, danas učestvuju sa čak 81,4% u globalnoj potrošnji primarne energije. Nakon fosilnih goriva, sledeću značajnu grupu energenata u globalnoj potrošnji trenutno predstavljaju biomasa i otpad, koji u energetsom miksu trenutno učestvuju sa 10,2%. Nuklearna energija, hidro energija i ostali obnovljivi izvori energije¹ zastupljeni su redom sa 4,8%, 2,4% i 1,2% [2]. U periodu do 2035. godine očekuje se porast potražnje za svim vrstama energenata, kako fosilnih goriva, tako i obnovljivih izvora energije. Prirodni gas zauzimaće sve važnije mesto u globalnoj potražnji, beležeći konstantan rast udela koji se javlja prvenstveno kao rezultat dobro razvijene gasovodne mreže i povoljnijih ekoloških karakteristika pomenutog energenta u poređenju sa ostalim fosilnim gorivima. Sa druge strane, nafta i ugalj, kao energenti koji su tradicionalno predstavljali dominantne izvore primarne energije, polako beleže smanjenje učešća u energetsom miksu, prvenstveno usled problema koji se odnose na geopolitičke nestabilnosti i često oscilovanje cene, kada je u pitanju nafta, tj. ekoloških problema u eksploataciji kada je u pitanju ugalj. U razvijenim zemljama sveta jasno je izražena svest da sagorevanje uglja predstavlja “prljavu tehnologiju” tj. tehnologiju koja doprinosi značajnoj degradaciji i zagađenju životne sredine i narušavanju zdravlja stanovništva. Pored problema odlaganja velikih količina

¹ Pod ostalim obnovljivim izvorima energije podrazumevaju se solarna energija, energija vetra, geotermalna energija i energija plime i oseke.

pepela koje nastaju sagorevanjem uglja, postrojenja na ugalj danas su u obavezi da preduzmu sve neophodne mere kako bi se smanjile i kontrolisale emisije zagađujućih materija u vazduh, u prvom redu emisije sumpornih i azotnih oksida i emisije praškastih materija, ali i emisije u ostale medijume životne sredine. Pri tome je važno napomenuti da kako svest o štetnosti pojedinih materija na zdravlje ljudi i okolinu raste, zakonskom regulativom uvode se sve oštrije norme u pogledu maksimalno dozvoljenih emisija štetnih materija, čime se zahtevaju sve efikasniji sistemi kontrole zagađenja i generalno efikasniji termoenergetski ciklusi, što utiče na višu cenu proizvodnje energije i smanjuje atraktivnost uglja kao energenta. Nuklearna energija, za koju je do 2010. godine beležen povećan interes i koja je čak razmatrana kao energija koja može dati globalno rešenje za podmirivanje energetske zavisnosti čovečanstva, polako beleži pad popularnosti. Pitanja kao što su bezbednost nuklearnih postrojenja, ponovo pokrenuta nakon udesa koji su se tokom 2011. godine dogodili u Japanu, problem odlaganja nuklearnog otpada, kao i bojazan od razvoja nuklearnog oružja, utiču na sporiju izgradnju novih nuklearnih postrojenja. Pojedine države, uključujući Nemačku, usvajaju čak nacionalne strategije kojima se u potpunosti odustaje od izgradnje novih nuklearnih kapaciteta i zatvaraju postojeće nuklearne elektrane. Dijagram prikazan na Slici 2-1 ukazuje na očekivano povećanje učešća biomase i otpada u strukturi korišćenih energenata, kao i ostalih obnovljivih izvora energije, iz razloga koji su već pomenuti, a koji će detaljnije biti objašnjeni u nastavku.

Na Slici 2-2 prikazana je i raspodela bruto finalne potrošnje energije po privrednim sektorima, u okviru kojih je, imajući u vidu predmet ove disertacije, posebno zanimljivo posmatrati sektor široke potrošnje. Sektor široke potrošnje učestvuje sa oko 30% u trenutnoj potrošnji finalne energije što će se približno zadržati i do 2035. godine, kada se očekuje da će pomenuti sektor postati energetska najintenzivniji sektor, jer će udeo saobraćaja i industrije opasti na račun porasta potrošnje energije u sektoru poljoprivrede. U sektoru široke potrošnje doći će do dramatičnije promene u korišćenju pojedinih vrsta finalne energije, jer se očekuje da će udeo električne energije porasti sa današnjih 30% na 36% u 2035. godini, prvenstveno na račun dramatičnog napuštanja korišćenja uglja i nafte u ovom sektoru. Takođe je značajno konstatovati da će biomasa i otpad i dalje ostati bitni izvori energije u razmatranom sektoru, sa udelom od oko 26% u 2035. godini.

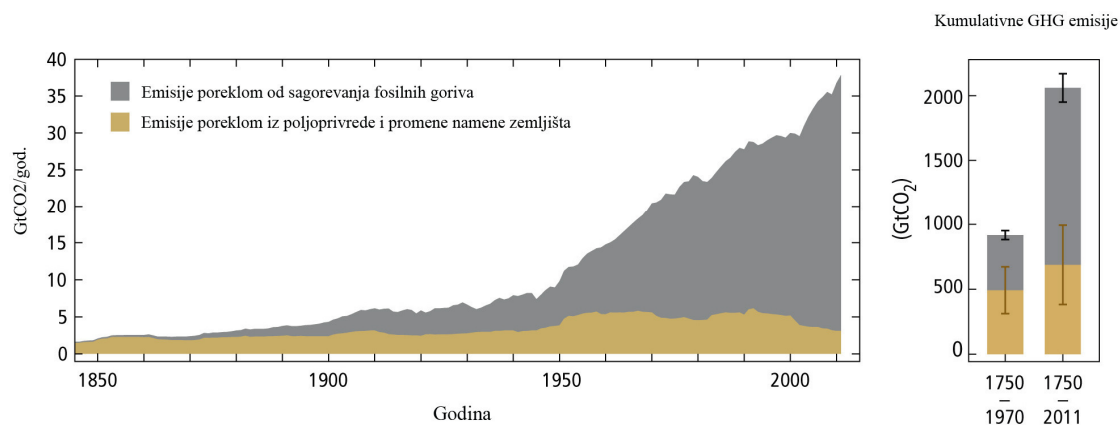


Slika 2-2 Bruto finalna potrošnja energije po sektorima u periodu 1990-2035. godina i struktura korišćenih energenata u sektoru široke potrošnje [3]

Potrebno je takođe pomenuti i da su problemi korišćenja fosilnih goriva neizostavno vezani i sa još jednim globalnim problemom, a to su emisije gasova sa efektom staklene bašte (GHG gasovi), koje se dovode u direktnu vezu sa sve

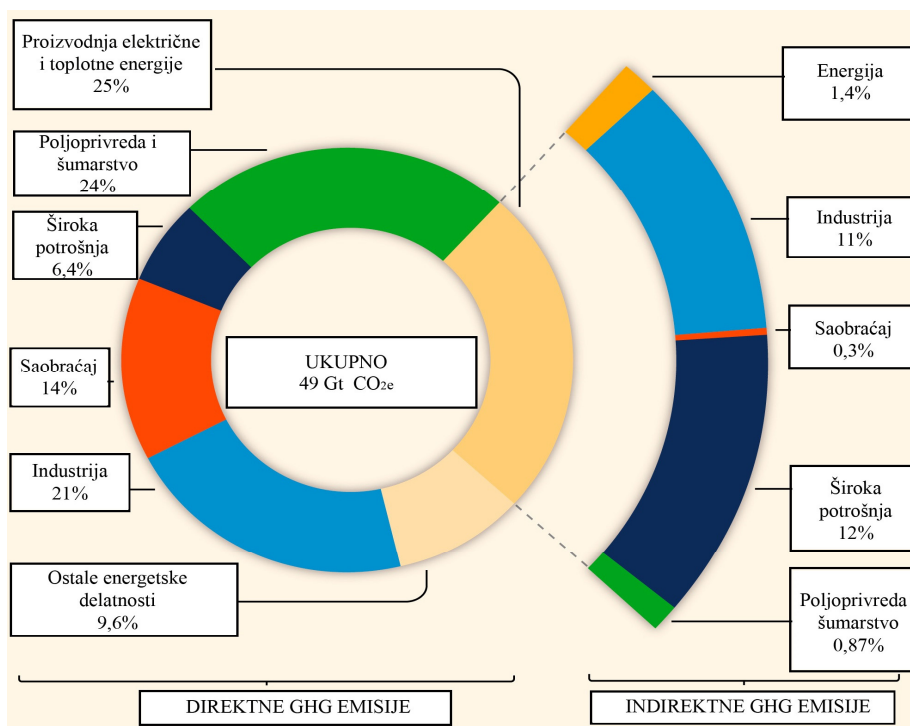
primetnijim klimatskim promenama na planeti. Značajan porast koncentracija GHG gasova koji je direktna posledica ljudskih aktivnosti i industrijalizacije društva, dug period zadržavanja pomenutih gasova u atmosferi, koji u slučaju CO₂ kao najznačajnjeg predstavnika iz pomenute grupe iznosi 100 godina, kao i činjenica da ključni privredni sektori energetike, saobraćaja i industrije predstavljaju najveće emitere pomenutih gasova, doprineli su da problem smanjenja GHG emisija postane neizostavni aspekt pri sagledavanju načina na koji će se podmirivati buduće potrebe za energijom. Na Slici 2-3, na kojoj je prikazan istorijski porast ukupnih GHG emisija, uočljiv je višestruki porast emisija antropogenog porekla (emisija nastalih kao posledica ljudskih aktivnosti) u periodu nakon industrijske revolucije, uz takođe primetnu tendenciju stalnog rasta. Međunarodna zajednica, predvođena Evropskom Unijom, ulaže velike napore kako bi se dugoročno stabilizovala koncentracija CO₂ u atmosferi na nivou od 450 ppm i kako bi se globalno zagrevanje do 2100. godine svelo na porast temperature do najviše +2°C u odnosu na period pre industrijske revolucije. Osnovni principi smanjenja emisija definisani su u Okvirnoj konvenciji Ujedinjenih nacija o klimatskim promenama iz 1992. godine [4], dok su Kjoto protokolom iz 1997. godine [5] po prvi put kvantifikovane obaveze smanjenja pomenutih gasova u razvijenim zemljama sveta i ponuđeni mehanizmi koji mogu pomoći u ispunjavanju definisanih obaveza. Navedeni dokumenti poslužili su kao osnova da se na globalnom nivou, kao i na nivou pojedinačnih država, donese zakonska regulativa kojom se definišu mere i obaveze usmerene ka ostvarivanju neophodnih smanjenja GHG emisija. U periodu nakon usvajanja Kjoto protokola, predstavnici međunarodne zajednice redovno su se sastajali kako bi sagledali aktuelnu situaciju, diskutovali na temu daljih obaveza i usvojili korake ka ostvarivanju željenih ciljeva po pitanju smanjenja emisija. Najnovija konferencija Ujedinjenih nacija (UN) na temu klimatskih promena (COP 21), održana u decembru 2015. godine u Parizu, ujedinila je gotovo sve članice UN po pitanju ciljeva i metoda kojima bi se ograničio porast globalne temperature. Na konferenciji je naglašeno da se definisani ciljevi u pogledu ograničavanja globalnog porasta temperature mogu dostići ukoliko se do 2050. godine GHG emisije smanje 40-70% u odnosu na nivo iz 2010. godine. Pri tome, razvijene zemlje iskazale su spremnost da podnesu veći teret nametnutih obaveza, kako sa aspekta značajnijeg smanjenja sopstvenih emisija, tako i sa

aspekta obezbeđivanja potrebne finansijske, institucionalne i tehnološke podrške manje razvijenim zemljama sveta.



Slika 2-3 Istorijski porast koncentracija gasova sa efektom staklene bašte kao rezultat ljudskih aktivnosti [6]

Ukoliko se pogleda doprinos pojedinačnih sektora globalnim GHG emisijama, prikazan na Slici 2-4, uočljivo je da sektor proizvodnje električne i toplotne energije predstavlja najznačajnijeg zagađivača sa aspekta problema globalnog zagrevanja. Kako se pomenuti sektor bazira na sagorevanju fosilnih goriva, jasan je i doprinos globalnim emisijama razmatranih gasova prikazan na Slici 2-3. Podaci iz literature [6] jasno ukazuju na činjenicu da sa godišnjom emisijom od oko 17 GtCO₂eq (35%) energetske aktivnosti imaju najveći uticaj na razmatrani problem i predstavljaju delatnost u kojoj prioritarno treba raditi kako bi se ostvarila potrebna smanjenja emisija. Ako se dalje pogledaju sektori finalne potrošnje na koje odlaze proizvedena električna i toplotna energija, uočava se da se najznačajniji deo energije, pa samim tim i pripadajućih emisija, može pripisati sektoru široke potrošnje. Na taj način, pomenuti sektor se još jednom nameće kao jedna od ključnih oblasti u kojoj će se odvijati aktivnosti usmerene ka smanjenju GHG emisija.



Slika 2-4 Doprinos pojedinačnih sektora globalnim godišnjim GHG emisijama [7]

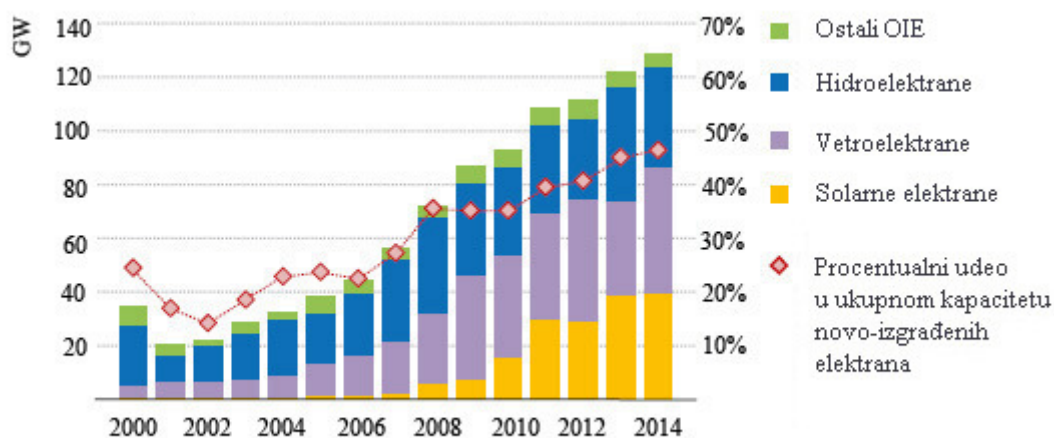
Aktivnosti koje su od strane Međunarodne agencije za energetiku prepoznate kao prioritetne mere za borbu protiv klimatskih promena obuhvataju sledeće [8]:

- 1) povećanje energetske efikasnosti u sektoru industrije, široke potrošnje i saobraćaja u cilju smanjenja specifičnih emisija CO₂ i manje potrošnje energije;
- 2) smanjenje rada nisko efikasnih postrojenja na uglj (čak i uz eventualnu zabranu izgradnje takvih postrojenja);
- 3) povećanje investicija u OIE na 400 milijardi USD u 2030. godini;
- 4) postepeno smanjenje i ukidanje beneficija koje se tiču korišćenja fosilnih goriva.

U okviru sektora široke potrošnje, glavne mere obuhvataju sledeće [8]:

- 1) integrisanje tehnologija baziranih na OIE, zamena vrste goriva i prelazak na korišćenje savremenih oblika OIE ili električne energije;
- 2) poboljšanje efikasnosti rada grejnih uređaja i sistema, uređaja za zagrevanje sanitarne tople vode i sistema rasvete;
- 3) projektovanje i izgradnja zgrada sa niskom/nultom emisijom CO₂, ugradnja savremenih kontrolno-upravljačkih sistema, merenje potrošnje energije.

Imajući sve prethodno rečeno u vidu, jasno je da će OIE predstavljati oslonac za utemeljivanje održive energetske delatnosti. Intenzivne političke kampanje, subvencije za korišćenje OIE, promovisanje međudržavnih programa baziranih na zajedničkim aktivnostima ka uspostavljanju održive energetike, jačanje pratećih industrijskih delatnosti kao podrška primeni OIE, aktivnosti na smanjenju cene proizvodnje energije iz OIE i generalno opredeljenje ka značajnijem korišćenju OIE i iskorišćenju sopstvenih energetske resursa, doveli su do situacije da OIE predstavljaju nezaobilazan aspekt u energetske strategijama svih zemalja sveta. Navedeni napori počeli su daju vidljive rezultate, tako da je instalisani kapacitet novih energetske postrojenja koji se zasnivaju na korišćenju OIE u 2014. godini dostigao 130 GW, što predstavlja više od 45% ukupno novo-instalisanih energetske postrojenja na globalnom nivou (Slika 2-5). Prognoze u pogledu očekivane uloge OIE idu tako daleko da se planira da 2040. godine OIE postanu glavni energent za proizvodnju električne energije [9], što će omogućiti da i pored porasta potrošnje električne enegije u cilju zadovoljenja povećane potražnje, GHG emisije poreklom iz sektora elektroenergetike ne beleže dalji rast.



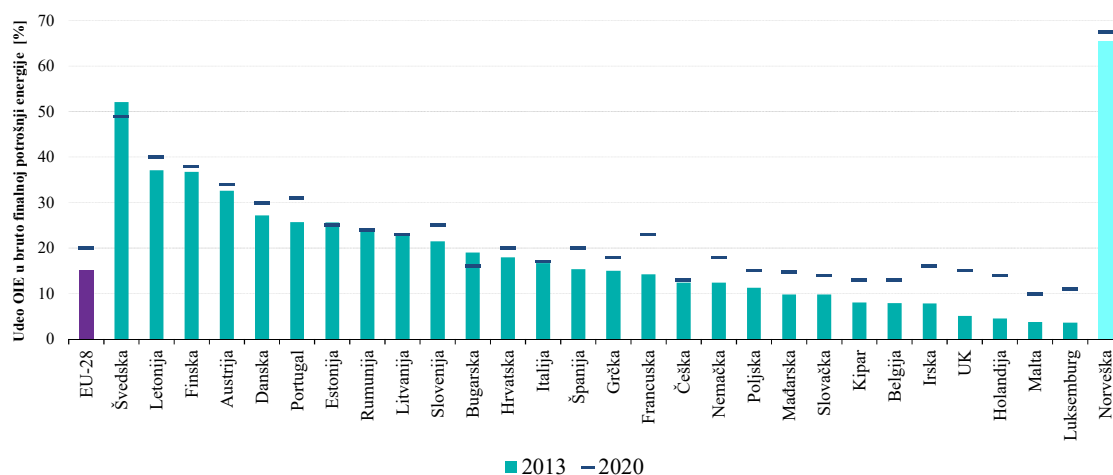
Slika 2-5 Instalirana snaga novih energetske postrojenja na OIE na globalnom nivou u periodu 2000-2014. godina [8]

Evropska Unija, koja predstavlja jednog od pionira u borbi protiv klimatskih promena, je još 2007. godine definisala svoje dobro poznate 20-20-20 ciljeve, kojima se države članice obavezuju da će do 2020. godine ostvariti 20% smanjenje GHG emisija u odnosu na nivo iz 1990. godine, 20% manju potrošnju primarne energije kroz mere

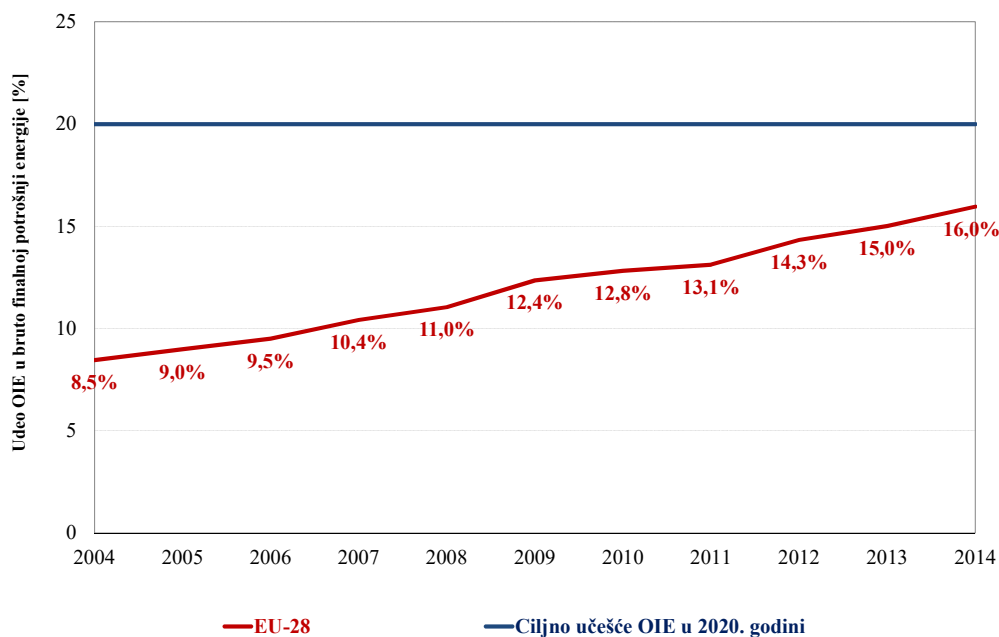
poboljšanja energetske efikasnosti i 20% učešće obnovljivih izvora energije u bruto finalnoj potrošnji energije u 2020. godini. Ovi ciljevi su u kasnijim godinama revidovani u smislu dodatne obaveze EU da se do 2050. godine GHG emisije smanje za 80-95% u odnosu na nivo iz 1990. godine. Pri tome, regulatorni zahtevi, ali i subvencije za korišćenje OIE, identifikovani su kao osnovni pokretač aktivnosti koje doprinose ostvarenju pomenutih ciljeva. Evropska Unija u obnovljivoj energiji vidi način za rešavanje svojih energetske problema, ali i razvijanje pratećih industrijskih grana koje su u direktnoj vezi sa sektorom energetike. Direktiva 2009/28/EC o korišćenju obnovljivih izvora energije [10] definiše obavezu korišćenja OIE u svim sektorima privrede, a naročito u oblastima proizvodnje električne energije, proizvodnje toplotne i rashladne energije, kao i u sektoru saobraćaja. Tada usvojeni ciljevi definisani su kroz obavezu dostizanja 20%-og učešća OIE u bruto finalnoj potrošnji energije do 2020. godine, 10%-og učešća energije iz OIE u sektoru saobraćaja do 2020. godine, uz najmanje 35%-o smanjenje GHG emisija do 2010. godine, 50%-o do 2017. godine i čak 60%-o smanjenje do 2018. godine za goriva koja su proizvedena počevši od 2017. godine. Prepoznajući da svaka zemlja članica raspolože različitim energetske resursima i da se odlikuje specifičnim tržištom energentima, EU je dozvolila da zemlje članice definišu sopstvene ciljeve i načine dostizanja definisanih ciljeva kroz posebne Nacionalne planove kojima će se obezbediti ispunjavanje zahteva iznad pomenute Direktive. U nacionalnim planovima, zemlje članice bile su u obavezi da definišu ciljno učešće OIE u sektorima proizvodnje električne energije, toplotne i rashladne energije, kao i u sektoru saobraćaja, zatim planirano učešće različitih OIE u nacionalnom energetske miksu, regulatorne mere kojima će se obezbediti dostizanje definisanih ciljeva, projekte koji će se realizovati u saradnji sa drugim zemljama članicama, kao i da pripreme posebni nacionalni plan usmeren ka razvoju obnovljivih resursa biomase i mere kojima će se obezbediti proizvodnja biogoriva na način koji se smatra održivim. Porast udela OIE u bruto finalnoj potrošnji energije beleže sve zemlje članice EU, ali se sa Slike 2-6 vidi da je samo nekolicina zemalja već uspela da ostvari svoje nacionalne ciljeve definisane za 2020. godinu. Na nivou cele EU, u 2013. godini udeo OIE iznosio je oko 15% ukupne bruto finalne potrošnje energije od $1103,8 \times 10^6$ ten. Sa druge strane, sa Slike 2-7 može se zaključiti da udeo OIE na nivou EU polako ali sigurno raste,

stopom od oko 1% godišnje, kao i da će se nastavkom aktuelnog trenda na nivou cele EU dostići ciljni udeo od 20% OIE u bruto finalnoj potrošnji energije u 2020. godini.

Gledajući još dalje u budućnost, na nivou EU je tokom 2014. godine usvojena platforma na osnovu koje je dogovoreno da u 2030. godini udeo OIE u bruto finalnoj potrošnji dostigne 27%, a da GHG emisije budu redukovane za 40% u odnosu na nivo iz 1990. godine.



Slika 2-6 Procentualni udeo OIE u bruto finalnoj potrošnji energije zemalja članica EU-28 [11]



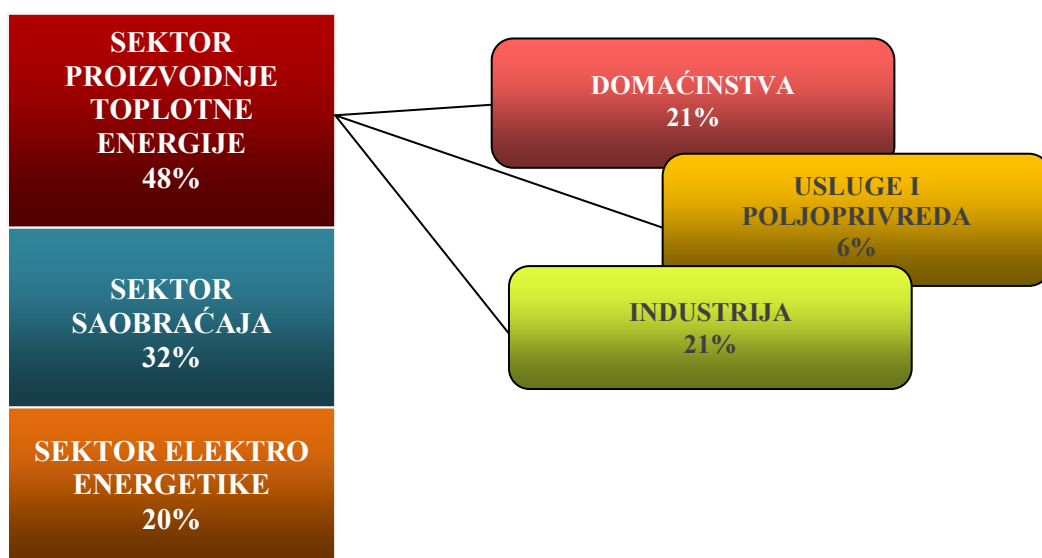
Slika 2-7 Porast udela OIE u bruto finalnoj potrošnji energije u EU-28 u periodu 2004-2014. godina [11]

Na kraju, može se sa sigurnošću reći da OIE danas predstavljaju jedno od ključnih rešenja kada je u pitanju budućnost globalne energetike i rešavanje problema koji se odnose na ekološke posledice tradicionalnog sagorevanja fosilnih goriva, ali i na sigurnost snabdevanja energijom. Interes i ulaganje u unapređenje tehnologija iskorišćenja OIE i dalje će rasti, kao i regulatorni pritisci kojima će se iskorišćenje lokalno raspoloživih OIE uvoditi kao imperativ na kom će se zasnivati energetske strategije svih zemalja sveta.

3. ULOGA BIOMASE U SEKTORU PROIZVODNJE TOPLOTNE ENERGIJE

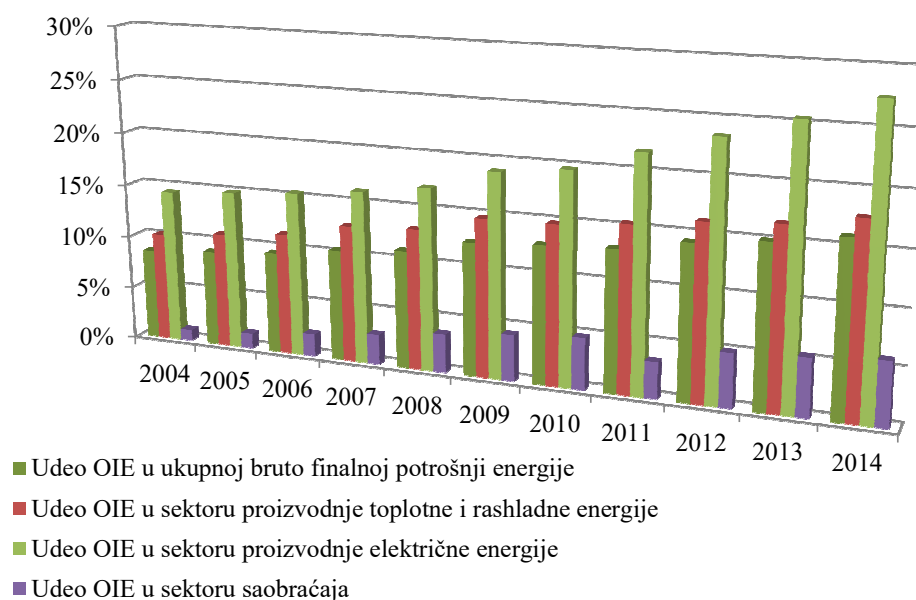
3.1 Proizvodnja toplotne energije iz obnovljivih izvora energije

U analizama i prognozama globalne potrošnje finalne enegije i odgovarajućeg udela OIE, sektor proizvodnje toplotne energije sve do skoro nije zauzimaao adekvatno mesto, jer je pažnja uglavnom bila skoncentrisana na sektor elektroenergetike, delom i na sektor saobraćaja, u kojima je regulatornim okvirima i subvencijama za upotrebu OIE promovisano veće učešće obnovljive energije i smanjenje emisija GHG gasova. Međutim, proizvodnja toplotne energije predstavlja veoma značajan sektor na koji odlazi čak 48% bruto finalne potrošnje energije u EU, kao što je prikazano na Slici 3-1. Pri tome, dominantan deo ove ogromne količine energije tradicionalno se dobija sagorevanjem fosilnih goriva, prvenstveno uglja i naftnih derivata, a u novije vreme sve više i prirodnog gasa. Evropska Unija je Direktivom 2009/28/EC o promociji korišćenja OIE konačno prepoznala ogroman značaj sektora proizvodnje toplotne energije i mogućnosti koje pruža sa aspekta primene OIE, čime je premošćena regulatorna praznina koja je vladala u ovoj oblasti. Uvrstivši sektor proizvodnje toplotne i rashladne energije u tri prioriteta sektora u kojima se zahteva povećanje udela OIE (pored elektroenergetskog sektora i sektora saobraćaja), energenti korišćeni za proizvodnju toplotne enegije po prvi put dobijaju strateški značaj u planiranju održive energetske budućnosti zemalja EU.



Slika 3-1 Udeo pojedinačnih sektora u bruto finalnoj potrošnji energije u EU [12, 13]

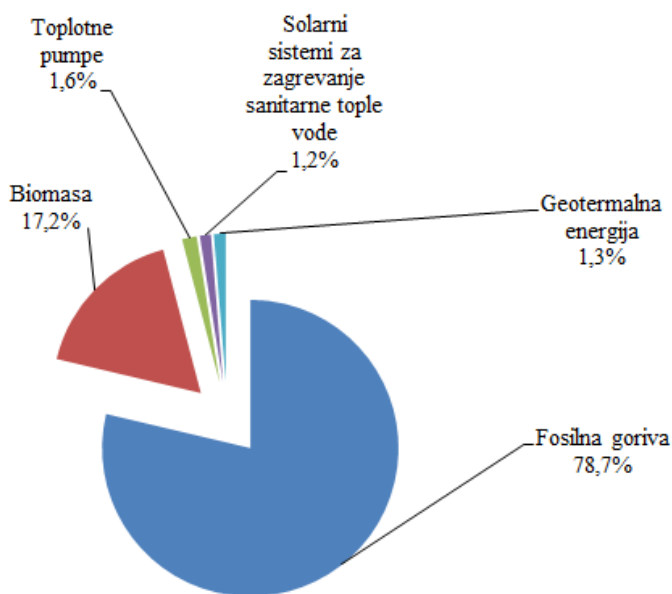
Aktivnosti koje su zemlje članice EU preduzele kako bi se OIE što više koristili u pomenutim ciljnim sektorima rezultirale su značajnim porastom udela obnovljive energije u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije, ali i u ostala dva ključna sektora. Porast udela OIE u pojedinačnim sektorima, kao i u bruto finalnoj potrošnji energije, ostvaren u periodu 2004-2014. godina u EU prikazan je na Slici 3-2. U 2014. godini, OIE su u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije učestvovali sa 17,7%, što predstavlja značajan porast u odnosu na 10,2% koliko je doprinos OIE ovom sektoru iznosio 2004. godine [14]. Porast udela OIE u sektoru proizvodnje električne energije je još evidentniji, gde su OIE u 2014. godini obezbeđivali čak 27,5% ukupno proizvedene električne energije. Što se tiče sektora saobraćaja, za koji je definisano ciljno učešće OIE od 10% u 2020. godini, sa Slike 3-2 je primetno da udeo OIE takođe raste, od svega 1% koliko je iznosio 2004. godine do 6% koliko je iznosio 2014. godine. U izveštaju Evropske komisije o napretku primene OIE u pojedinačnim sektorima u EU [15], naglašeno je da je u mnogim državama članicama (Bugarska, Finska, Švedska) upravo razvoj primene OIE u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije, kao opcija koja zahteva najniža ekonomska ulaganja, omogućio da se dostignu individualni nacionalni ciljevi definisani za 2014. godinu.



Slika 3-2 Porast udela OIE u ključnim privrednim sektorima EU-28 u periodu 2004-2014. godina [14]

3.2 Korišćenje biomase za podmirivanje potreba za toplotnom energijom u Evropskoj Uniji

Na osnovu trendova prikazanih u prethodnom poglavlju može se zaključiti da će ciljni udeo OIE u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije od 20% na nivou EU u 2020. godini biti ostvaren i da se očekuje da će čak dostići nivo od 21,3% [16]. Planira se da navedeni udeo OIE bude ostvaren korišćenjem biomase, toplotnih pumpi, solarnim sistemima za zagrevanje sanitarne tople vode i korišćenjem geotermalne energije. Planirani udeo pojedinih vrsta OIE u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije u 2020. godini prikazan je na Slici 3-3. Sa prikazanog dijagrama vidi se da je biomasa prepoznata kao osnovni OIE koji će biti korišćen za podmirivanje potreba za toplotnom i rashladnom energijom u periodu koji dolazi.



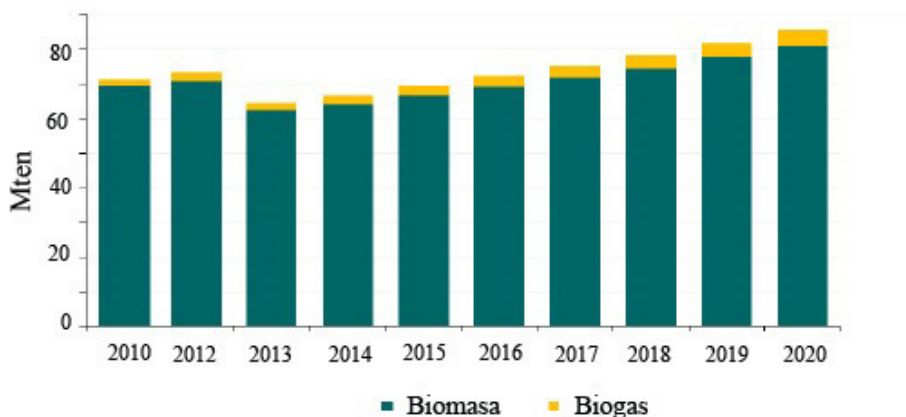
Slika 3-3 Planirani udeo različitih OIE u proizvodnji toplotne i rashladne energije u EU u 2020. godini [16]

Korišćenje biomase neizostavno je povezano sa načelima održive proizvodnje i eksploatacije ovog obnovljivog resursa. Mogućnosti i ograničenja u pogledu značajnih količina biomase čija se eksploatacija planira u budućnosti vezani su za aspekte koji se odnose na sledeće faktore:

- raspoloživost resursa – biomasa može doprineti sigurnosti snabdevanja energijom, ali treba imati u vidu da su njeni resursi ipak ograničeni,
- konkurentnost korišćenja u energetske svrhe u odnosu na korišćenje biomase u ostalim industrijskim granama, u prvom redu u prehrambenoj industriji,
- uticaj na stanje životne sredine i zdravlje stanovništva – povećana eksploatacija biomase za potrebe generisanja energije može imati negativne uticaje na kvalitet vazduha, karakteristike tla i očuvanje biodiverziteta,
- emisije gasova sa efektom staklene bašte – biomasa može doprineti smanjenju GHG emisija, ali se pri njihovom sagledavanju mora imati u vidu celokupni tok procesa eksploatacije biomase (od prikupljanja/proizvodnje do sagorevanja).

Iako Direktiva 2009/28/EC ne definiše kriterijume za održivo korišćenje biomase za potrebe proizvodnje energije, Evropska Unija je 2010. godine definisala kriterijume održivosti na kojima se mora zasnivati upotreba biomase za pomenute namene [17]. Između ostalog, predlaže se primena principa kaskadnog iskorišćenja biomase, u okviru kog bi se biomasa višenamenski koristila i gde bi iskorišćenje za dobijanje energije predstavljalo poslednji korak u njenoj eksploataciji. Sa aspekta korišćenja šumske biomase, Evropska strategija razvoja sektora šumarstva [18] definisala je principe kojima se obezbeđuje da evropski šumski fond bude eksploatisan na način koji će garantovati primenu kriterijuma održivosti do 2020. godine. Pridajući posebnu važnost navedenoj problematici, Evropska Komisija je tokom 2014. godine izdala izveštaj o trenutnoj situaciji sa aspekta održivog korišćenja biomase za potrebe proizvodnje električne, toplotne i rashladne energije, sa ciljem da se sagledaju aktuelne i planirane mere koje će obezbediti da se biomasa za pomenute namene koristi na način kojim će se postići maksimalno iskorišćenje ovog prirodnog resursa, a da se pri tom ne naruši stanje životne sredine [19]. U izveštaju se navodi da se biomasa u EU trenutno uglavnom koristi u domaćinstvima za potrebe grejanja (oko 50% ukupno korišćene biomase). Posebno su popularna postrojenja male snage za sagorevanje peleta, o čemu jasno govori podatak da je samo u 2013. godini u domaćinstvima šest evropskih zemalja instalisano 442.000 novih kotlova na pelet i više od 2×10^6 novih peći na pelet [20]. Pored domaćinstava, biomasa se takođe sagoreva i u toplanama i sistemima daljinskog grejanja. U navedenim postrojenjima instalisani su savremeni kotlovi za sagorevanje

modernih oblika biomase (peleti, drvena sečka, briketi), kao i za spaljivanje organske frakcije komunalnog otpada ili korišćenje biogasa. Sa Slike 3-4 može se videti da se očekuje da će udeo toplotne i rashladne energije proizvedene iz biomase i biogasa u 2020. godini dostići $85,4 \times 10^6$ ten, pri čemu će čvrsta biomasa sa $80,9 \times 10^6$ ten (89,5%) ubedljivo najviše doprineti pomenutoj proizvodnji energije [19].



Slika 3-4 Udeo biogoriva u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije u EU u periodu do 2020. godine [19]

Očekuje se takođe da će količina biomase koja će se koristiti u domaćinstvima za grejanje porasti sa $28,2 \times 10^6$ ten koliko je iznosila u 2005. godini, na $35,6 \times 10^6$ ten u 2020. godini, čime će se u sektoru domaćinstava trošiti 39,4% ukupne količine biomase namenjene za proizvodnju toplotne energije u 2020. godini. U istom periodu se očekuje da će količina biomase koja će se sagorevati u postrojenjima sistema daljinskog grejanja porasti više od tri puta i to sa $5,8 \times 10^6$ ten, koliko je iznosila u 2005. godini, na $17,7 \times 10^6$ ten koliko će iznositi u 2020. godini [19]. Pomenuta 2005. godina smatra se važnom jer je upravo tada na nivou EU usvojen Akcioni plan za biomasu [21], u kom su definisane konkretne mere koje su dovele do povećanog korišćenja biomase u sektorima proizvodnje električne i toplotne energije, kao i u sektoru saobraćaja. Posebna pažnja posvećena je ulozi biomase u sektoru proizvodnje toplotne energije, gde su kao najvažnije mere identifikovani regulatorni podsticaji za veće korišćenje biomase, izmena direktive o energetske karakteristika zgrada, u cilju povećanja atraktivnosti korišćenja OIE, kao i povećanje efikasnosti rada kotlova i drugih ložnih uređaja u domaćinstvima i smanjenje njihovog negativnog uticaja na životnu sredinu.

U sumarnim sagledavanjima trenutne situacije na polju primene OIE u ciljnim sektorima definisanim Direktivom 2009/28/EC, naglašava se zadovoljstvo postignutim, ali i obaveza da se udeo OIE dodatno poveća, posebno u sektoru proizvodnje toplotne energije i u sektoru saobraćaja. Evropska Komisija je takođe najavila da će do 2017. godine usvojiti novu Direktivu o promovisanju korišćenja obnovljivih izvora energije kojim će se planirani udeo OIE u EU do 2030. godine povećati na 27%, ali uz obaveznu primenu načela održivosti proizvodnje bioenergije.

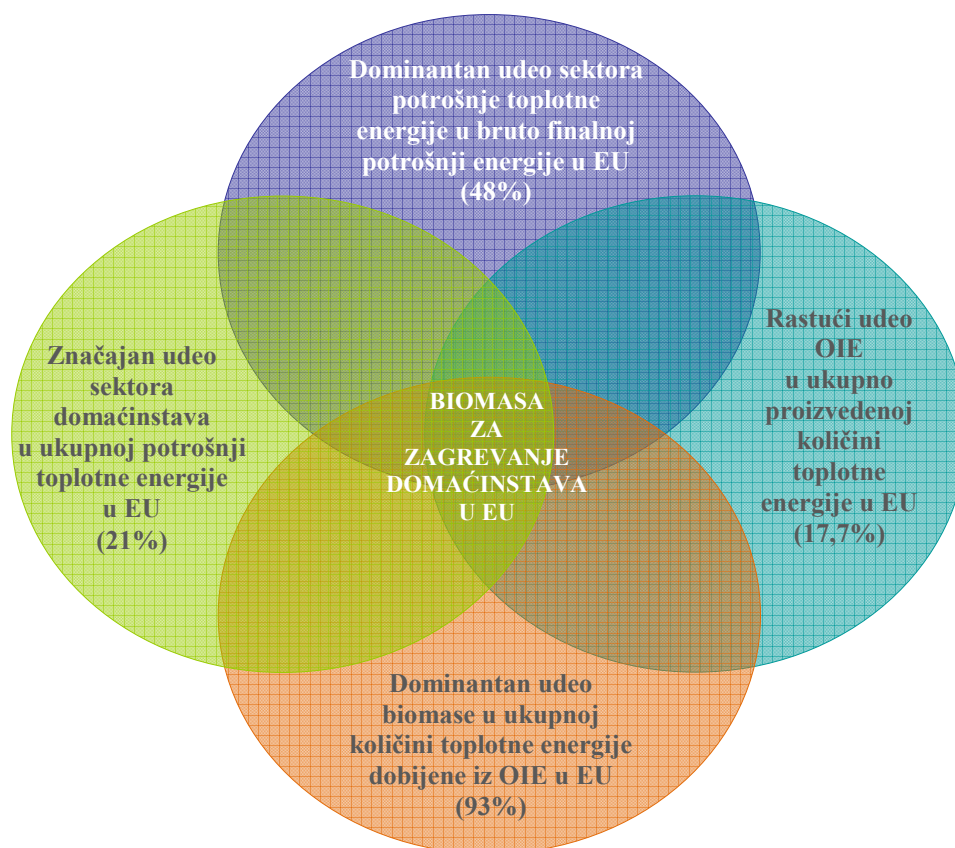
Imajući u vidu temu ove doktorske disertacije, posebno je važno ukazati na značaj sektora domaćinstava u celokupnoj strategiji tranzicije ka energetski održivom sektoru proizvodnje toplotne energije iz OIE, a u prvom redu iz biomase. Sa Slike 3-1 uočljivo je da domaćinstva učestvuju sa 21% u potrošnji toplotne energije u EU. Potrebno je imati u vidu da prelazak na OIE zahteva i prilagođavanje postojeće infrastrukture, pri čemu je prelazak na OIE najekonomičniji kada se primeni u novim objektima ili pri planiranim rekonstrukcijama grejnog sistema. Ukoliko se u takvim situacijama propusti prilika da se ugradi ili pređe na grejni sistem koji se bazira na korišćenju OIE, objekat ostaje decenijama zavisen od fosilnih izvora toplotne energije. Vremenska dimenzija planiranih mera je s toga veoma važna, naročito sa aspekta regulatornih zahteva i podsticajnih mera kojima će se obezbediti da se pri izgradnji novih ili rekonstrukciji postojećih objekata iskoriste svi mogući obnovljivi energetski potencijali. Izbori koje će milioni stanovnika praviti prilikom izgradnje ili revitalizacije/rekonstrukcije svojih kuća/zgrada smatraju se ključnim za integraciju OIE u sektor proizvodnje toplotne energije. Direktiva 2009/28/EC je i u tom segmentu napravila konkretne pomake, definišući obavezni minimalni udeo OIE u proizvedenoj toplotnoj energiji kada su u pitanju nove i revitalizovane zgrade. Pri tome, primena OIE u domaćinstvima uvek se razmatra u paketu sa povećanjem energetske efikasnosti samih objekata i njihovih grejnih sistema, uz primenu mera koje se odnose na:

- poboljšanje termičke izolacije objekata,
- povećanje efikasnosti ložnih uređaja i
- povećanje efikasnosti sistema za distribuciju toplotne energije.

Navedenim merama može se značajno uticati na smanjenje potrebne količine energije za zagrevanje objekata, što direktno utiče na uštedu prirodnih resursa.

Na osnovu svega rečenog jasno je da biomasa ima veoma važnu, ako ne i ključnu ulogu u sektoru proizvodnje toplotne energije u EU i da će tu ulogu nastaviti da ima i u budućnosti. Biomasa je definisana kao obnovljivo gorivo koje predstavlja najbolji izbor kada su u pitanju mala, srednja, a u pojediniim slučajevima čak i velika postrojenja za generisanje toplotne energije. Ipak, potrebno je imati u vidu da poslednjih godina različite organizacije civilnog društva u EU zastupaju stav da korišćenje biomase u postrojenjima velike snage nema pozitivan, već negativan uticaj na životnu sredinu i smanjenje GHG emisija [22]. Zastupajući stav da sagorevanje biomase u industrijskim postrojenjima ne može ispuniti zahteve u pogledu održivog korišćenja ovog prirodnog resursa, da zahteva veliku površinu zemljišta za uzgajanje energetske zasade, čime utiče na degradaciju samog zemljišta i narušava biodiverzitet, ili narušava održivost šumskog fonda, pomenute grupacije ističu da se biomasa na održiv način može koristiti samo odgovarajućom primenom u individualnim domaćinstvima i postrojenjima male snage.

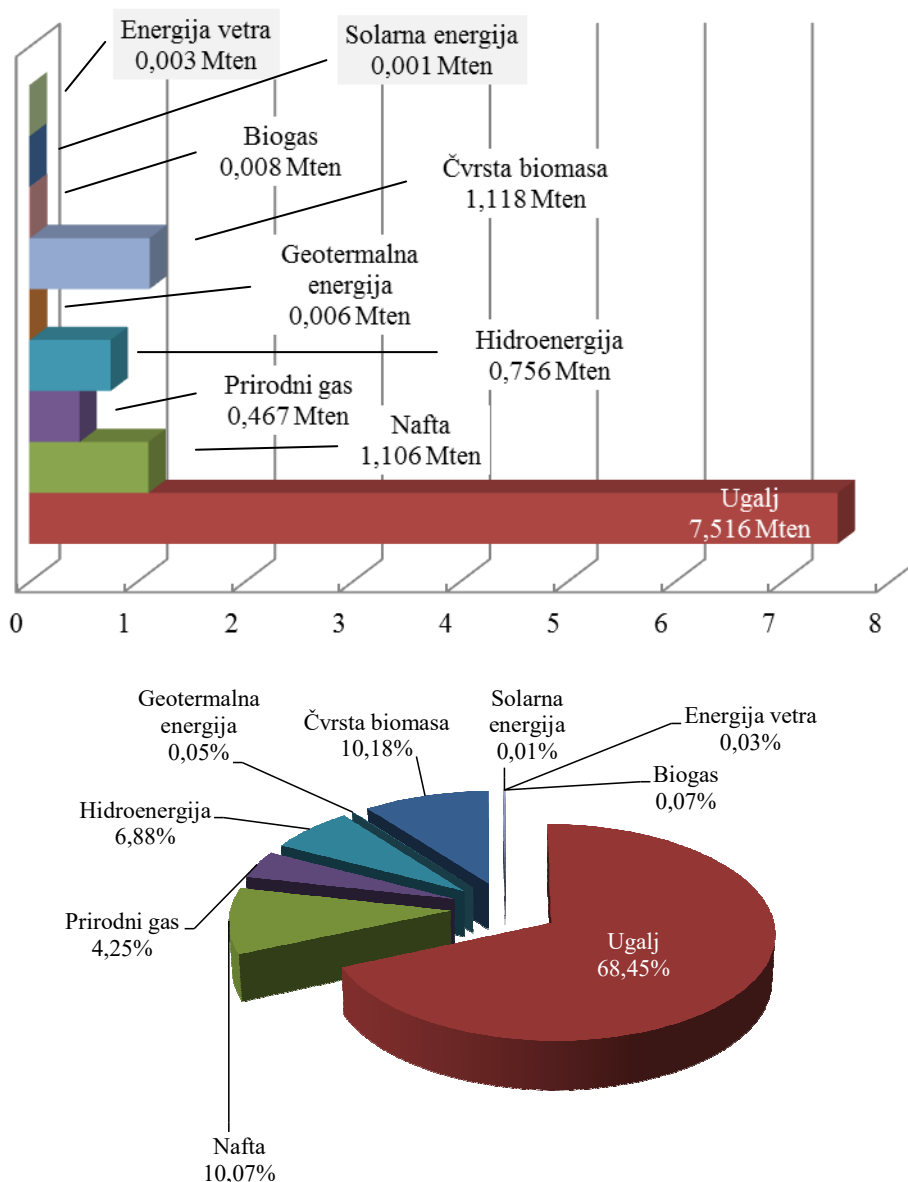
Na Slici 3-5 sumarno su prikazani najznačajniji aspekti prethodne analize na osnovu kojih se može sagledati značaj ispitivanja biomase i odgovarajućih uređaja za sagorevanje koji se koriste za generisanje toplotne energije u sektoru domaćinstava u EU.



Slika 3-5 Aspekti koji ilustruju značajnu ulogu biomase u sektoru proizvodnje toplotne enegije namenjene za zagrevanje domaćinstava u EU

3.3 Korišćenje biomase za podmirivanje potreba za toplotnom energijom u Republici Srbiji

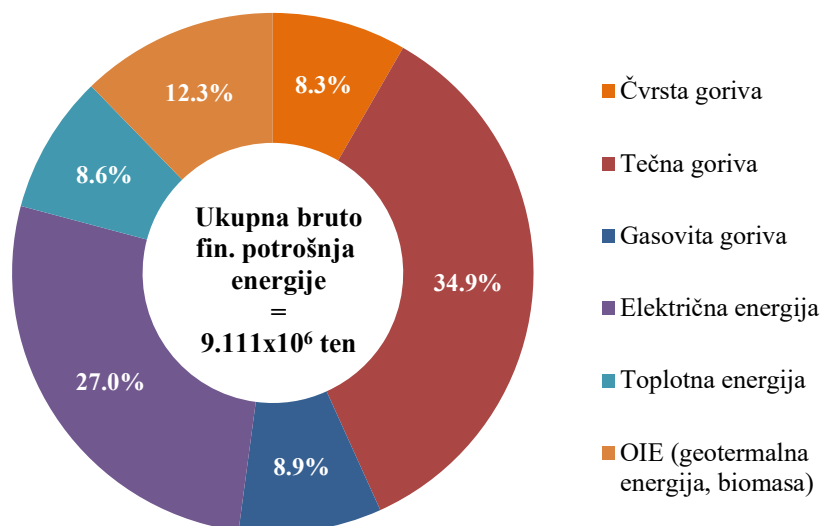
Republika Srbija spada u grupu zemalja sa velikim energetske intenzitetom tj. velikom potrošnjom energije koja se javlja kao rezultat neefikasnog rada energetske postrojenja i sistema, kao i regulisane cene električne energije, koja je za domaćinstva oko 3,5 puta niža od proseka EU, a oko 1,5 tj. 2 puta niža nego u Bugarskoj i Rumuniji, najsiromašnijim zemljama članicama EU [23]. Za podmirivanje velike energetske potrošnje Srbija se tradicionalno oslanja na korišćenje fosilnih goriva, prvenstveno nisko kaloričnog domaćeg lignita. Kao što je prikazano na Slici 3-6, ugalj tj. lokalno raspoloživ lignit predstavlja dominantan izvor primarne energije, učestvujući sa čak 67,6% u strukturi primarnih izvora energije, što predstavlja godišnju potrošnju od oko $7,516 \times 10^6$ ten [24]. U strukturi planirane proizvodnje primarne energije u Srbiji za 2016. godinu, obnovljivi izvori energije učestvuju sa 17,2%, od čega čvrsta biomasa ima dominantno učešće od 59% tj. oko $1,118 \times 10^6$ ten. Hidroenergija učestvuje sa oko 40%, dok svi ostali OIE učestvuju sa manje od 1%. Potrebno je pomenuti da je potrošnja primarne energije po jedinici bruto domaćeg proizvoda (BDP) u Republici Srbiji značajno veća nego u EU (6 puta veća nego u Nemačkoj, 5 puta veća nego u Francuskoj, 3 puta veća nego u Sloveniji i skoro 2 puta veća nego u Rumuniji) [25], što, imajući u vidu oslanjanje na fosilna goriva, rezultuje veoma nepovoljnom situacijom sa aspekta zagađenja životne sredine.



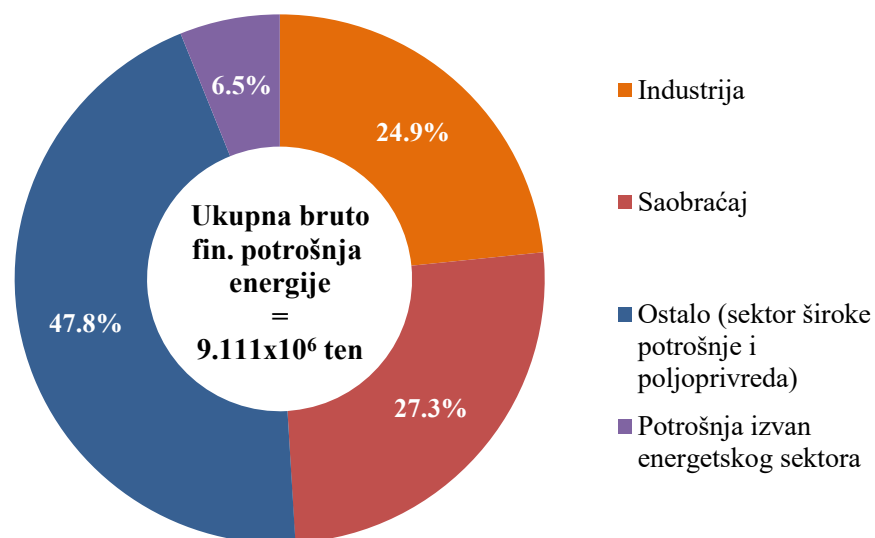
Slika 3-6 Struktura potrošnje primarne energije u Republici Srbiji [24]

Veoma je zanimljivo pogledati i strukturu potrošnje finalne energije, kako po energentima, tako i po sektorima. Na Slici 3-7 prikazana je struktura potrošnje finalne energije po izvorima energije, odakle se zaključuje da električna energija učestvuje sa 27% u bruto finalnoj potrošnji, dok toplotna energija učestvuje sa 8,6%. Međutim, potrebno je napomenuti da se proizvodnja električne energije skoro dominantno bazira na sagorevanju fosilnih goriva u termoelektranama (65,5%), dok približno trećinu proizvodnih kapaciteta predstavljaju hidroelektrane (34,5%). Toplotna energija se

takođe dominantno generiše sagorevanjem fosilnih goriva, sa učešćem OIE od oko 24% [26].



Slika 3-7 Struktura bruto finalne potrošnje energije u Republici Srbiji po energentima [24]



Slika 3-8 Struktura bruto finalne potrošnje energije u Republici Srbiji po sektorima [24]

Slika 3-8 ukazuje da u Republici Srbiji sektor široke potrošnje, uključujući i domaćinstava, predstavlja jednog od najvećih potrošača sa aspekta finalne potrošnje energije, dok su industrijski sektor i sektor saobraćaja zastupljeni sa 24,9% tj. sa 27,3%. Imajući u vidu da je Srbija energetska siromašna zemlja, kao i činjenicu da se energija u zemlji troši neracionalno i neefikasno, jasno je da se prilikom planiranja nacionalne energetske strategije moraju razmotriti i promovirati sve mogućnosti iskorišćenja raspoloživih obnovljivih izvora energije. Zakonodavni organi Republike Srbije prepoznali su značaj koji EU, kao zajednica kojoj će se Srbija jednog dana priključiti, pridaje obnovljivoj energiji, shvatajući da usklađivanje zakonske regulative u oblasti korišćenja OIE predstavlja neophodan korak na evropskom putu Srbije. Pored toga, potpisivanjem i ratifikovanjem međunarodnih dokumenata, Srbija je preuzela niz obaveza u pogledu povećanog učešća OIE, uključujući i obaveze koje su proistekle iz potpisivanja Ugovora o pristupanju Energetskoj zajednici iz 2006. godine, a koje se odnose na obavezu promovisanja proizvodnje električne energije iz OIE i postupanja u skladu sa Direktivom 2001/77/EC o promovisanju električne energije proizvedene iz OIE i Direktivom 2003/30/EC o promovisanju upotrebe biogoriva ili drugog goriva proizvedenog iz obnovljivih izvora u sektoru saobraćaja. Navedene direktive su kasnije zamenjene ranije pomenutom Direktivom 2009/28/EC o promovisanju korišćenja OIE, koja je tako postala regulatorni dokument u skladu sa kojim Srbija mora postupati.

Shodno obavezama preuzetim ugovorom o osnivanju Energetske zajednice, Srbija se obavezala da će do 2020. godine povećati udeo energije iz obnovljivih izvora u bruto finalnoj potrošnji energije sa 21,2% koliko je iznosilo u 2009. godini na 27%. Zakonska regulativa usvojena u cilju promovisanja korišćenja obnovljive energije, ali i uspostavljanja principa održivog razvoja nacionalne energetike, obuhvata, između ostalog, Zakon o energetici (Sl. glasnik RS, br. 80/11, sa izmenama u Sl. glasniku RS, br. 93/12, 124/12 i 145/14), Strategiju razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine (Sl. glasnik RS br. 101/15), Uredbu o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije (Sl. glasnik RS, br. 8/13), Uredbu o merama podsticaja za povlašćene proizvođače električne energije (Sl. glasnik RS, br. 8/13), Pravilnik o garanciji porekla električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije (Sl. glasnik RS, br. 24/14), Nacionalnu strategiju održivog razvoja (Sl. glasnik RS, br. 57/08), Nacionalnu strategiju održivog korišćenja prirodnih

resursa i dobara (Sl. glasnik RS, br. 33/12), Zakon o efikasnom korišćenju energije (Sl. glasnik RS, br. 25/13), kao i Nacionalni akcioni plan Republike Srbije za korišćenje OIE - NAPOIE (Sl. glasnik RS, br. 53/13). Pored toga, očekuje se donošenje i usvajanje ostalih nedostajućih zakonodavnih dokumenata koje su definisani u NAPOIE, a koji se odnose na Zakon o obnovljivim izvorima energije, komplet zakona i podzakonskih akata o promovisanju proizvodnje biogoriva, ali i preporuka o podsticajnim merama za proizvodnju toplotne energije iz OIE i načinu sticanja statusa povlašćenog proizvođača toplotne energije.

Akcionim planom Republike Srbije za OIE [27] utvrđeni su načini i mehanizmi koji će dovesti do dostizanja pomenutog cilja koji je definisan za 2020. godinu. U Tabeli 3-1 prikazana je očekivana dinamika porasta udela OIE u tri ciljna privredna sektora koja su prepoznati Direktivom 2009/28/EC.

Tabela 3-1 Dinamika porasta udela OIE u Republici Srbiji do 2020. godine [27]

Sektor privrede	Godina							
	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.	2019.	2020.
Proizvodnja toplotne i rashladne energije	26%	26%	26%	26%	27%	28%	29%	30%
Proizvodnja električne energije	29%	30%	30%	31%	32%	33%	35%	37%
Saobraćaj	0%	0%	2%	3%	5%	7%	8%	10%
Ukupno učešće OIE	21%	21%	22%	23%	23%	25%	26%	27%

U skladu sa NAPOIE, navedeni ciljevi energetske politike Republike Srbije koji se odnose na veće korišćenje OIE postizaće se realizacijom sledećih aktivnosti [27]:

- 1) izgradnja novih objekata koji zadovoljavaju zahteve u pogledu energetske efikasnosti i korišćenja OIE,
- 2) energetska sanacija zgrada i uvođenje OIE u sektor zgradarstva (uglavnom u objekte javne namene),
- 3) zamena ulja za loženje, uglja i prirodnog gasa koji se koriste za grejanje biomasom i drugim vidovima OIE,
- 4) uvođenje daljinskih sistema grejanja baziranih na korišćenju OIE i kombinovanoj proizvodnji električne i toplotne energije,
- 5) zamena korišćenja električne energije za proizvodnju sanitarne tople vode solarnom energijom i drugim vidovima OIE,
- 6) proizvodnja električne energije iz OIE,

- 7) uvođenje biogoriva i drugih OIE u sektor saobraćaja,
- 8) razvoj distributivne mreže za priključenje manjih proizvođača električne energije i
- 9) proizvodnja i korišćenje opreme i tehnologija koje će omogućiti efikasnije korišćenje energije iz OIE.

Sa aspekta sektora proizvodnje toplotne i rashladne energije, NAPOIE definiše da će se ciljno učešće od 27% OIE u 2020. godini ostvariti najviše porastom korišćenja biomase, čija će se primena povećati za dodatnih 124 kten (u odnosu na referentnu 2009. godinu) u individualnim domaćinstvima, ali i u kogenerativnim postrojenjima i sistemima daljinskog grejanja. Na taj način, postrojenja i sistemi na biomasu obezbediće 83% dodatne energije iz OIE koja će se generisati kako bi se podmirile potrebe razmatranog sektora u 2020. godini, dok će se ostatak potreba za energijom podmirivati izgradnjom postrojenja na biogas i sistemima za iskorišćenje geotermalne i solarne energije, kao što je prikazano u Tabeli 3-2. Potrebno je napomenuti da iako Vlada Republike Srbije planira donošenje preporuka o podsticajnim merama za proizvodnju toplotne energije iz OIE, konkretne podsticajne mere donose lokalne samouprave u čijoj je nadležnosti snabdevanje toplotnom energijom. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine takođe posebno naglašava neophodnost analize mogućnosti uvođenja podsticajnih mera za korišćenje OIE u sektoru proizvodnje toplotne energije.

Imajući u vidu da se potencijal svih OIE u Republici Srbiji procenjuje na $5,65 \times 10^6$ ten godišnje, od čega 61% čini potencijal biomase (oko $3,448 \times 10^6$ ten) čije se korišćenje trenutno procenjuje na oko 30% raspoloživog potencijala [25], jasno je zašto je biomasa prepoznata kao ključni obnovljivi energent za ispunjavanje nacionalnih ciljeva u pogledu učešća OIE u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije. Sa aspekta raspoloživog potencijala biomase, najveći potencijal čini drvena biomasa ($1,53 \times 10^6$ ten) i poljoprivredna biomasa ($1,67 \times 10^6$ ten), dok je potencijal biorazgradivog komunalnog otpada procenjen na 205×10^3 ten. Veće korišćenje biomase u sektoru široke potrošnje i u toplanama, kao i zamena fosilnih goriva koja se koriste za grejanje obnovljivim izvorima energije, nalaze se i među strateškim merama Vlade Republike Srbije usmerenim ka povećanju proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. U Strategiji razvoja energetike Republike Srbije takođe je definisan prioritet korišćenja

novih OIE, kao i novih, energetski efikasnijih i ekološki prihvatljivijih tehnologija i uređaja/opreme za generisanje energije.

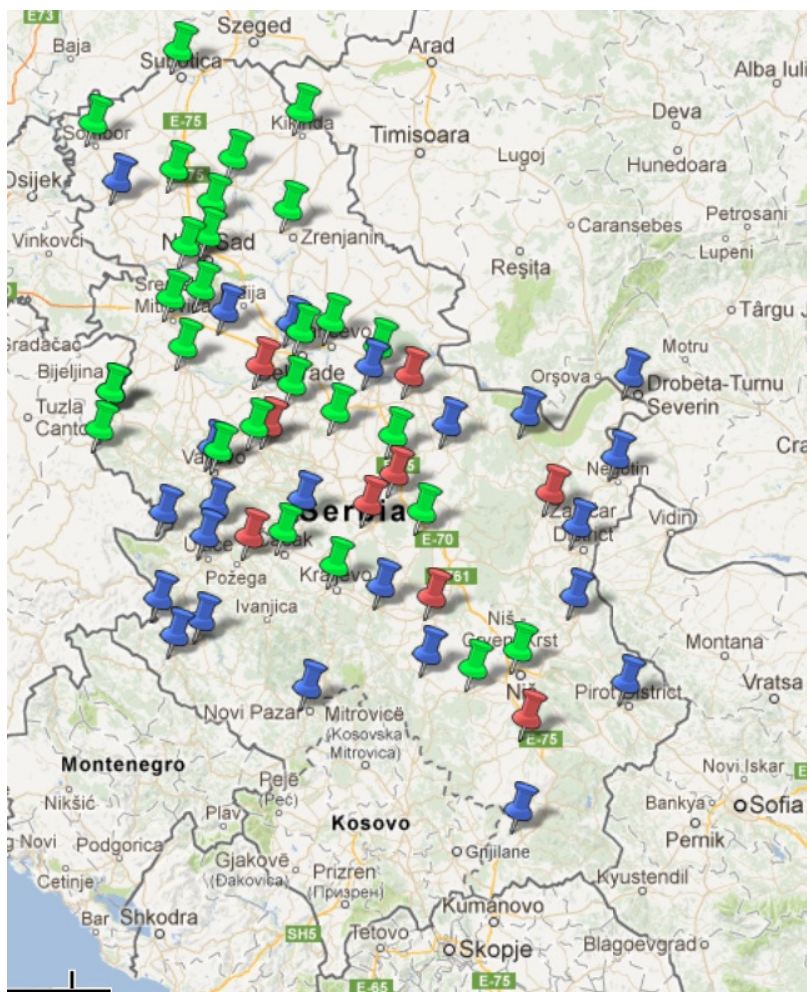
Tabela 3-2 Proizvodnja toplotne i rashladne energije iz IOE u Republici Srbiji u 2020. godini [27]

<i>Vrsta OIE</i>	<i>Planirana proizvodnja [kten]</i>	<i>Udeo u dodatno planiranoj proizvodnji toplotne energije do 2020. godine (u odnosu na referentnu 2009. godinu)</i>
Biomasa – individualna domaćinstva	50	34%
Biomasa – CHP postrojenja	49	33%
Biomasa – sistemi daljinskog grejanja	25	16%
Biogas – CHP postrojenja	10	7%
Geotermalna energija	10	7%
Solarna energija	5	3%

Zagrevanje prostora u domaćinstvima i zgradama korišćenjem posebno pripremljenog oblika biomase - peleta ili briketa, posebno je interesantno kao alternativa postojećim individualnim ložištima u kojima se sagoreva ekološki znatno nepovoljnije fosilno gorivo (ugalj, mazut, ulje za loženje) obnovljivim biogorivom. Imajući u vidu da je u pojedinim gradovima Srbije samo mali deo stanovništva priključen na sisteme daljinskog grejanja, dok se ostatak stanovništva u gradovima greje sopstvenim sistemima i instalacijama grejanja, i ako se u ozbir takođe uzmu i individualna ložišta u domaćinstvima u ruralnim delovima zemlje, jasno je da korišćenje peleta ili briketa za pomenute namene ima veliki potencijal. Upotreba peleta ili briketa veoma je atraktivna i kao alternativa električnoj energiji koja se trenutno, usled niske regulisane cene, intenzivno koristi za grejanje životnog i radnog prostora u Srbiji. Međutim, kako se očekuje da će otvaranjem tržišta električne energije i dovođenjem cene električne energije sa regulisane na tržišnu vrednost ovakav vid grejanja izubiti svoju ekonomsku atraktivnost, individualni korisnici odlučivaće se za druge vidove snabdevanja toplotnom energijom.

Kao što je prikazano u Tabeli 3-2, korišćenje biomase planira se i u sistemima daljinskog grejanja, gde bi se pomenuta vrsta OIE koristila kao zamensko ili dopunsko gorivo u toplanama. U Srbiji sistemi daljinskog grejanja postoje u 57 gradova, ukupnog instalisanog kapaciteta oko 6.700 MWt i prosečne starosti pripadajuće infrastrukture od

preko 25 godina [26]. Sistem je baziran isključivo na korišćenju fosilnih goriva (prirodni gas 48%, tečna goriva 29% i ugalj 23%). Peleti i briketi od biomase se kao eksperimentalno gorivo koriste u pojedinim toplanama JKP Beogradske elektrane, ali je taj udeo toliko mali da se ne može smatrati značajnim. Svega oko 16% domaćinstava u Srbiji povezano je na sisteme daljinskog grejanja, prvenstveno usled nezadovoljstva korisnika nivoom pruženih usluga koji ne odgovara visokoj ceni grejanja, koja se sa druge strane opravdava visokom cenom energenata i velikim gubicima u distributivnoj mreži. Većina sistema daljinskog grejanja radi sa malom efikasnošću i gubicima koji dostižu 20%. Različite studije, između kojih i studija „*Mogućnosti i procena primene biomase za grejanje u Srbiji – studija o mogućnostima korišćenja biomase u sistemu daljinskog grejanja – poboljšanje energetske efikasnosti i zamena konvencionalnih goriva (lignita i ulja za loženje) biomasom*” [28], koja je uzeta u obzir prilikom izrade NAPOIE, bavile su se mogućnošću instalacije i korišćenja kotlova na biomasu u gradskim toplanama. Pomenuta studija analizirala je mogućnost ugradnje modularnih sistema u deset opština Srbije, u okviru kojih bi se postojeći kotlovi na fosilna goriva zamenili kotlovima na biomasu snage 2 MWt i 4 MWt, čime bi gradski sistemi daljinskog grejanja u potpunosti prešli na korišćenje razmatranog obnovljivog goriva. Sa Slike 3-9, na kojoj je prikazana lokacija toplana u Srbiji, kao i gorivo koje koriste, primećuje se da najveći broj toplana koristi prirodni gas i ulje za loženje, dok samo nekolicina koristi ugalj. Ukoliko se pretpostavi da su gasne toplane u relativno skoroj prošlosti opremljene savremenim gasnim kotlovima, toplane u kojima se koristi tečno gorivo, energent koji sa aspekta zagađenja životne sredine i opasnosti narušavanja zdravlja stanovništva predstavlja jednu od najlošijih energetskih opcija, kao i verovatnoća da je većina pomenutih toplana opremljena kotlovima starijeg datuma koji se odlikuju nižom efikasnošću, a koji su verovatno u dotrajalom stanju, jasno je da bi navedeni sistemi bili najpogodniji za razmatranje mogućnosti prelaska na korišćenje biomase.



toplane na gas



toplane na tečno gorivo

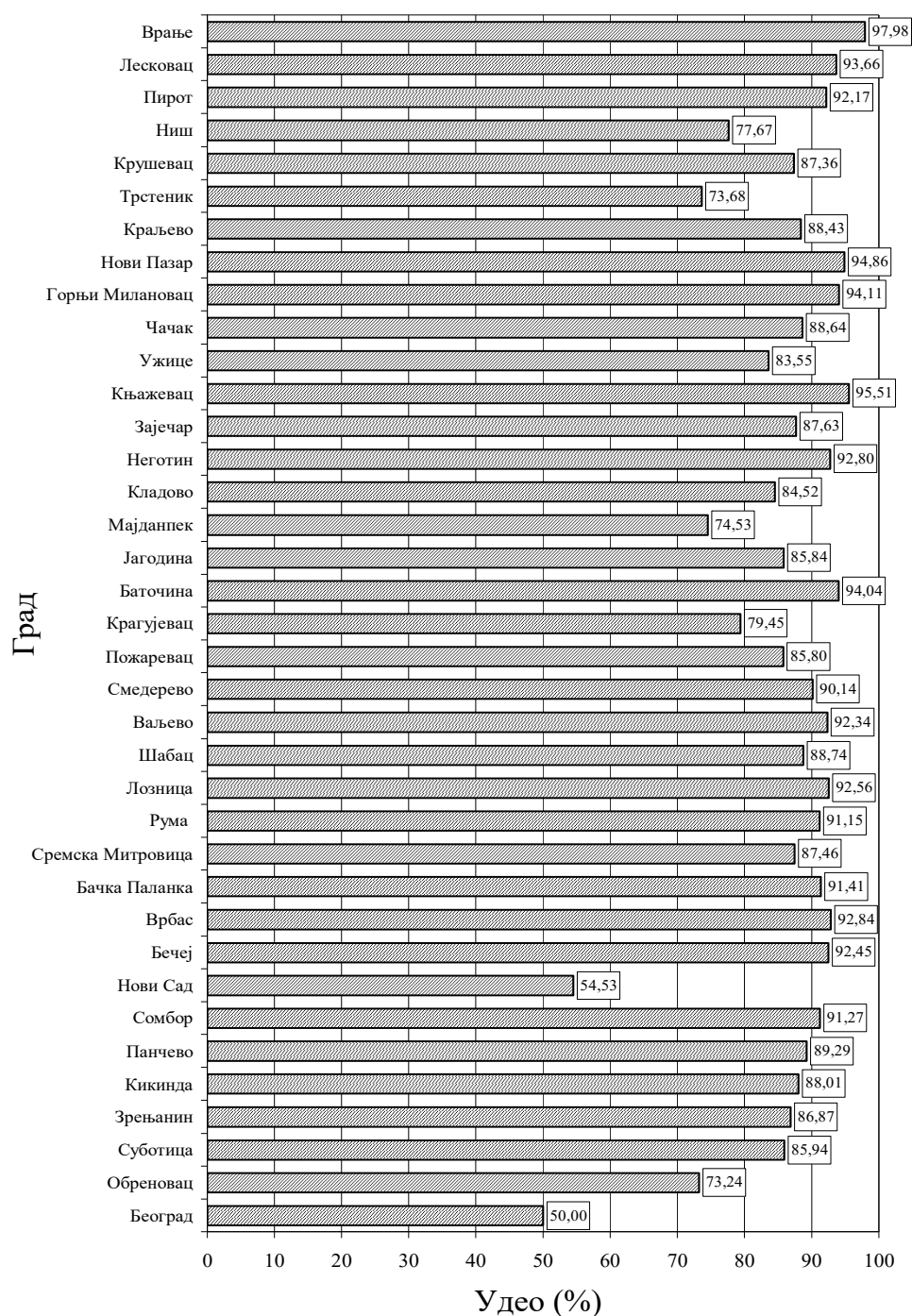


toplane na uglj

Slika 3-9 Gradovi u Republici Srbiji sa sistemom daljinskog grejanja i tip goriva koji se koristi u pripadajućim toplanama [29]

Međutim, potrebno je imati u vidu da je korišćenje biomase u velikim energetske sistemima, kao što su sistemi daljinskog grejanja, nerazdvojno vezano za pitanje sigurnosti nabavke i troškova snabdevanja, transporta i skladištenja biomase. Logistička podrška i organizacija celog procesa takođe predstavljaju bitan aspekt posmatrane problematike. Ekonomski parametri identifikovani su kao odlučujući faktor prilikom razmatranja mogućnosti prelaska sistema daljinskog grejanja sa fosilnog goriva na biomasu.

Sa aspekta predmeta ove disertacije, posebno je interesantan potencijal korišćenja biomase u individualnim ložištima, naročito imajući u vidu da velika većina domaćinstava ne koristi usluge daljinskog grejanja, već za grejanje koriste električnu energiju, ugalj, gas, ulje za loženje ili ogrevno drvo. Iako se u Srbiji ogrevno drvo tradicionalno koristi za grejanje, naročito u seoskim domaćinstvima, većina uređaja za sagorevanje je u dotrajalom stanju ili je njihova upotreba napuštena usled niske cene električne energije koja omogućava korisnicima da pređu na komfornije rešenje zagrevanja životnog prostora. U centralnoj Srbiji registrovane su individualne stambene zgrade koje imaju sopstvene kotlarnice u kojima se za grejanje koristi ulje za loženje ili ugalj. Navedena situacija ne odnosi se samo na sektor domaćinstava, već i na komercijalne i objekte javne namene koji često imaju sopstvene kotlarnice u kojima se najčešće sagoreva ulje za loženje. Generalno gledano, situacija sa aspekta efikasnosti korišćenih ložnih uređaja i uticaja za zagađenje životne sredine je nepovoljna. Aktuelno stanje u oblasti korišćenja bioenergije za zagrevanje domaćinstava ukazuje da odgovarajuće tehnologije postoje i da se masovno primenjuju u pojedinim evropskim zemljama (u prvom redu u Austriji), gde se pokazalo da upotreba briketa, peleta i drvene sečke omogućava jednostavno rukovanje, niske operativne troškove i adekvatnu zamenu sistema na fosilno, tečno ili čvrsto gorivo. Podaci iz literature [30] ukazuju na mogućnost da se čak 75% ukupnog broja domaćinstava u Srbiji, koja čine domaćinstva koja nisu povezana na sisteme daljinskog grejanja niti na gasovodnu mrežu, mogu grejati lokalnim gorivima, u prvom redu peletima i briketima od biomase, Slika 3-10. Određeni procenat navedenih domaćinstava već koristi biomasu za potrebe grejanja, uglavnom u vidu ogrevnog drveta. Međutim, čak i u takvim slučajevima, zamena postojećih neefikasnih ložnih uređaja značajno efikasnijim uređajima na pelete doprinela bi, pored boljeg iskorišćenja energije goriva, i poboljšanjima sa aspekta zaštite životne sredine, jer bi se omogućilo višestruko smanjenje emisija ugljen monoksida i praškastih materija koje predstavljaju najveći problem pri sagorevanju konvencionalnih oblika drvene biomase.

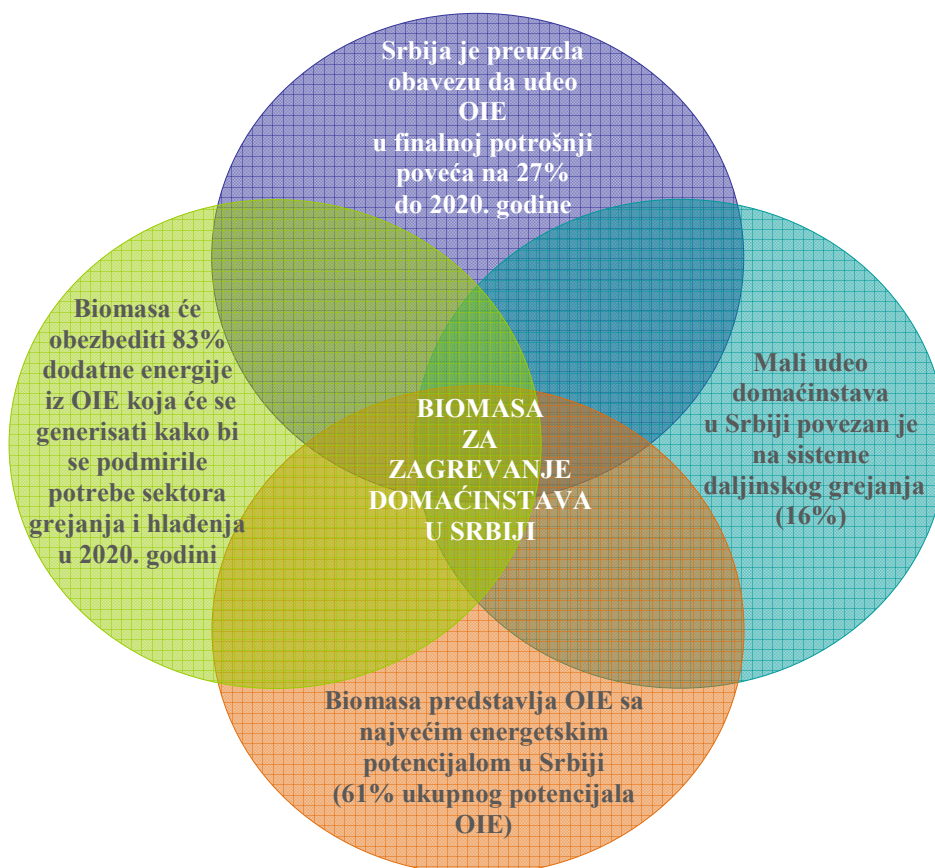


Slika 3-10 Udeo domaćinstava u gradovima Srbije koji su potencijalni korisnici peleta od biomase za grejanje [30]

Kada se sve navedeno ima u vidu, jasno se sagledava zašto primena biomase za potrebe grejanja domaćinstava u Srbiji predstavlja veliki potencijal i zašto je njeno korišćenje u savremenom obliku (briketi i peleti) identifikovano kao jedan od najboljih načina energetske iskorisćenja ovog obnovljivog resursa. Kada se razmatra intenzivno korišćenje biomase, uvek se mora voditi računa da način na koji se planira eksploatacija ovog obnovljivog resursa bude usklađen sa sistematizovanom i kontrolisanom sečom šuma, kada je u pitanju šumska biomasa, tj. sa prioritonom proizvodnje hrane, kada je u pitanju poljoprivredna biomasa. Istovremeno, biomasa koja se koristi za energetske potrebe mora imati i određene karakteristike kako bi se obezbedilo ispunjavanje energetske, ekološke i drugih kriterijuma.

Aktivnosti u pogledu povećanog korišćenja savremenih oblika biomase (peleta i briketa), moraju biti usaglašene na svim nivoima, tako da pored aktivnosti na standardizaciji kvaliteta korišćenog goriva i razvoju adekvatnog domaćeg tržišta obnovljivim energentima, naponi moraju biti usmereni i ka optimizaciji i sertifikaciji uređaja za sagorevanje biomase, kako u pogledu njihovih energetske, tako i u pogledu njihovih ekološke karakteristike. Aspekti koji će takođe uticati na značajnije korišćenje biomase odnose se i na održivost raspoloživih resursa, njihovo strateško korišćenje i obnavljanje, konkurentnost tehnologije korišćenja biomase u odnosu na tradicionalna rešenja zasnovana na sagorevanju fosilnih goriva, kao i poboljšanje radnih performansi uređaja i sistema za sagorevanje biomase. Iskustva dobre prakse u svetu ukazuju da je potrebno uspostaviti odgovarajuće standarde koji propisuju kvalitet peleta i briketa, ali i ložnih uređaja za njihovo sagorevanje. Potrebno je uvesti obavezno sertifikovanje peći i kotlova u skladu sa međunarodnim standardima i uspostavljenim normama, kako bi se obezbedilo zadovoljenje energetske i ekološke, ali i ekonomske kriterijuma koji se nameću kao obavezni uslovi za širu primenu pomenutih sistema.

Na kraju, na Slici 3-11 prikazana je rekapitulacija ključnih aspekata koji upućuju na značajnu ulogu biomase u sektoru generisanja toplotne energije namenjene za zagrevanje domaćinstava u Republici Srbiji.



Slika 3-11 Aspekti koji ilustruju značajnu ulogu biomase u sektoru proizvodnje toplotne enegije namenjene za zagrevanje domaćinstava u Republici Srbiji

Povećani interes za korišćenje biomase kao najperspektivnijeg obnovljivog energetskog resursa Republike Srbije, kako od strane regulatornih organa koji su doneli strateške dokumente kojima su biomasi dodelili značajnu ulogu u održivoj energetskoj budućnosti naše zemlje, ali i od strane krajnjih korisnika koji se na njeno korišćenje odlučuju usled ekonomskih ili razloga koji se odnose na lakoću manipulacije, pozitivno utiču i na istraživačke delatnosti i razvoj uređaja i tehnoloških rešenja koja će težiti smanjenju jediničnih troškova generisanja energije, uz povećanje efikasnosti rada i

smanjenja uticaja na životnu sredinu. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine potstiče istraživački rad u pomenutoj oblasti, posebno naglašavajući sledeće: *“S obzirom na predviđeni značaj sektora OIE, primenjena istraživanja i razvoj privrede treba usmeriti u pravcu proizvodnje opreme i postrojenja za njeno korišćenje, naročito biomase i hidroenergije. Relativno manji kapaciteti ovih proizvodnih jedinica su idealni za razvoj malih i srednjih preduzeća”* (Službeni glasnik RS, br 101/2015, str. 58).

**4. KARAKTERISTIKE BIOMASE KAO OBNOVLJIVOG
IZVORA ENERGIJE**

4.1 Definicija i podela biomase

U skladu sa definicijom navedenom u Direktivi 2009/28/EC, biomasa, kao obnovljiv izvor energije, predstavlja biorazgradivu komponentu proizvoda, otpada i ostataka biološkog porekla iz poljoprivrede (uključujući biljne i životinjske materije), šumarstva i povezanih industrija, kao i biorazgradivi deo industrijskog i komunalnog otpada. Energija akumulirana u biomasi je hemijske prirode, pa tokom njene eksploatacije nema prekida koji su karakteristični za druge OIE, kao što su solarna ili energija vetra. Sa ovog aspekta, biomasa više nalikuje fosilnim gorivima nego OIE, ali se ipak tretira kao ugljenično neutralno gorivo jer se njenim sagorevanjem oslobađa ugljenik koji predstavlja deo prirodnog ugljeničnog ciklusa biljke tj. ugljenik koji je apsorbovan iz atmosfere tokom perioda rasta biljke. Pomenuta argumentacija odnosi se samo na proces sagorevanja biomase, ali ne i njenog prikupljanja, transporta i prerade, ali podrazumeva i ispunjenost kriterijuma održivosti, što znači da iskorišćenje biomase mora biti uvek manje ili jednako prirastu biomase kako bi se održao negativan ili barem neutralan bilans CO₂ tokom životnog ciklusa biomase kao goriva. Kada se govori o poljoprivrednim kulturama, održivost korišćenja biomase treba da podrazumeva plansko i redovno vraćanje određene količine organske materije - biomase (oko 30%) u zemlju u vidu zaoravanja, jer se time održava ravnoteža i postiže veća plodnost zemljišta. Potreba vraćanja minerala u tlo za šumsku biomasu podrazumeva ostavljanje izvesne količine drvene materije u šumskom tlu. Takođe, održivost korišćenja šumske biomase podrazumeva dugoročno planiranje u pogledu pošumljavanja i eksploatacije šumske biomase. Kao jedna od osnovnih prednosti biomase u odnosu na druga obnovljiva goriva ističe se mogućnost njenog skladištenja, čuvanja i namenskog iskorišćenja za podmirivanje trenutnih energetske potreba. Pored toga, šire društveno-socijalne prednosti korišćenja biomase ogledaju se i kroz nova radna mesta i promovisanje razvoja ruralnih područja koja učestvuju u ciklusu uzgajanja, prikupljanja i distribucije biomase kao goriva.

Kako prethodno navedena definicija biomase obuhvata širok spektar mogućih proizvoda, prepoznata je neophodnost standardizacije određenih vrsta biomase kao goriva čiji će tačno definisani kvalitet omogućiti da procesi sagorevanja u postrojenjima

namenjenim za sagorevanje biogoriva² rezultuju očekivanom količinom energije i radom odgovarajućih postrojenja za sagorevanje. Poznavanje karakteristika korišćenog goriva predstavlja osnovni podatak koji utiče na karakteristike i efikasnost procesa sagorevanja, kao i na emisije materija koje zagađuju životnu sredinu. Kako bi se omogućio razvoj efikasnih uređaja za sagorevanje biogoriva potrebno je poznavati karakteristike goriva za koje se uređaj projektuje i izrađuje, na osnovu kojih se može sprovesti optimizacija procesa sagorevanja i prilagođenje konstrukcionih elemenata ložnog uređaja u cilju maksimalnog iskorišćenja energije goriva. Standardizacija biogoriva ima za cilj uspostavljanje jasno definisanog i stabilnog tržišta biogoriva koje proizvođačima biogoriva omogućava sigurniji plasman njihovih proizvoda, proizvođačima uređaja za sagorevanje mogućnost garantovanja performansi rada ložnih uređaja, dok krajnjim korisnicima obezbeđuje nabavku goriva koje odgovara zahtevima uređaja za sagorevanje koje koriste.

Shodno navedenom, Evropski komitet za standardizaciju (European Committee for Standardization – CEN) je kao polaznu osnovu definisao grubu klasifikaciju biomase prema poreklu i to na [31]:

- netretiranu drvnu biomasu,
- energetske zasade,
- ostatke i otpad iz poljoprivredne i životinjske proizvodnje i
- organske ostatke i otpad iz komunalne i industrijske delatnosti.

Prethodno navedene vrste biomase mogu se koristiti u prirodnom obliku ili kao sirovine za dobijanje čvrstih, tečnih ili gasovitih goriva. Biomasa u čvrstom obliku obuhvata drvnu biomasu iz sektora šumarstva, ostatke drvno-prerađivačke industrije, ostatke i otpad iz poljoprivredne proizvodnje, uključujući ratarstvo, voćarstvo i vinogradarstvo, organsku komponentu komunalnog otpada i energetske zasade, kao i čvrsta goriva dobijena od pomenutih sirovina. Biomasa u tečnom obliku obuhvata tečna biogoriva (bioetanol, biodizel i biljna ulja) koja se dobijaju preradom primarne poljoprivredne sirovine, kao i sintetička biogoriva. Gasovito biogorivo podrazumeva

² U skladu sa definicijom navedenom u EN 14588:2010, biogoriva u širem smislu podrazumevaju čvrsta, tečna ili gasovita goriva direktno ili posredno proizvedena od biomase. Direktivom 2009/28/EC definisana su biogoriva u užem smislu i to kao tečna ili čvrsta goriva za saobraćaj koja su proizvedena od biomase.

biogas ili sintetički gas koji se dobija uglavnom preradom životinjskih ekskremenata, energetske zasade ili ostataka iz poljoprivrede.

Imajući u vidu predmet ove disertacije i mogućnost korišćenja biomase za potrebe proizvodnje toplotne energije, posebna pažnja biće posvećena klasifikaciji čvrste biomase. U cilju klasifikacije čvrste biomase, CEN je počevši od 2000. godine doneo više desetina tehničkih specifikacija od kojih su pojedine najpre usvojene kao važeći evropski standardi, a kasnije i kao međunarodni ISO standardi. Pregled usvojenih standarda koji se odnose na čvrsta biogoriva dat je u Prilogu I.

Četiri najvažnije serije evropskih standarda po pitanju čvrstih biogoriva odnose se na: 1) usvojenu terminologiju u oblasti čvrstih biogoriva (EN ISO 16559), 2) klasifikaciju čvrste biomase (EN ISO 17225), 3) obezbeđenje kvaliteta čvrste biomase (EN 15234) i 4) kriterijumi za održivu proizvodnju biogoriva (EN 16214).

U skladu sa EN ISO 17225-1:2014 [32], najgrublja podela čvrste biomase izvršena je po poreklu i to na sledeće kategorije:

- drvenu biomasu,
- poljoprivrednu biomasu,
- biomasu iz voćarstva i
- mešavine i smeše prethodno navedenih grupa, pri čemu smeše podrazumevaju nemenski napravljene kombinacije prethodno navedenih grupa biogoriva, dok mešavine podrazumevaju kombinacije nastale bez namenske proizvodnje.

Svaka od iznad navedenih kategorija obuhvata veći broj podkategorija u skladu sa preciznijim poreklom izvornog materijala čvrste biomase. Podela na podkategorije data je u Prilogu II.

Imajući u vidu definicije navedene u EN ISO 16559:2014 [33], kao i propisani kvalitet i karakteristike čvrstih biogoriva [32], čvrsta biomasa koja je predmet usvojenih tehničkih specifikacija i standarda podeljena je na sledeće podgrupe:

- proizvodi iz poljoprivredne proizvodnje i šumarstva,
- biljni ostaci iz poljoprivredne proizvodnje i šumarstva,
- biljni ostaci iz industrije proizvodnje hrane,
- drveni otpad, sa izuzetkom drvnog otpada koji sadrži halogena jedinjenja ili teške metale koji su posledica korišćenja boja i lakova u procesu prerade drveta, kao i

otpadno drvo poreklom iz sektora građevinarstva, bilo da je u pitanju izgradnja ili rušenje objekata,

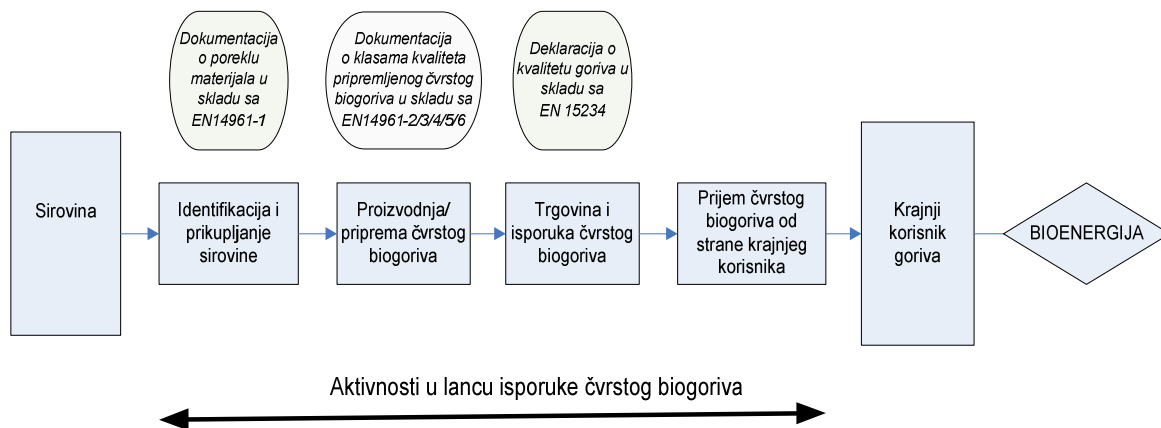
- otpad od plute,
- vlaknasti biljni ostatak iz postupka dobijanja celuloze i proizvodnje papira, ukoliko se koristi za sagorevanje i dobijena toplota koristi na mestu proizvodnje.

Navedena podela izvršena je na osnovu:

- porekla biogoriva (sa aspekta definicije biološkog porekla biogoriva),
- oblika u kom se svako od biogoriva nalazi na tržištu (peleti, briketi, drvena sečka i slično),
- normativnih karakteristika (karakteristika koje se moraju definisati za gorivo koje se plasira na tržište, uključujući obavezno dimenzije, sadržaj vlage i sadržaj pepela),
- informativnih karakteristika (karakteristika koje mogu biti navedene ukoliko to zahteva kupac ili prodavac goriva, uključujući energetska gustinu goriva, sadržaj hlorida i slično).

Pri tome, potrebno je napomenuti da EN ISO 17225, osim pomenutog dela 1 koji se odnosi na opšte zahteve u pogledu specifikacija i klase goriva, obuhvata još pet delova kojima se bliže određuje standardni kvalitet tačno određenih proizvoda koji se koriste kao čvrsta biogoriva u različitim postojenjima, u skladu sa pregledom datim u Prilogu I.

Evropski standard koji garantuje obezbeđenje kvaliteta čvrstog biogoriva, EN 15234 [34], definiše postupke i mere kojima se obezbeđuje da zahtevi u pogledu kvaliteta čvrstih biogoriva budu ispunjeni u celom lancu isporuke, počevši od inicijalnih sirovina, pa sve do krajnjeg potrošača, u skladu sa Slikom 4-1. Navedenim standardom postavljen je standardizacioni okvir koji omogućava efikasno funkcionisanje tržišta čvrstih biogoriva, tako da je krajnji korisnik u mogućnosti da pronađe gorivo čije mu karakteristike odgovaraju za korišćenje u uređaju za sagorevanje koji poseduje, dok, sa druge strane, proizvođač biogoriva ima mogućnost da proizvodi gorivo tačno određenih karakteristika za dalji plasman na tržište. Proizvođač je u obavezi da na deklaraciji proizvedenog goriva navede karakteristike goriva koje plasira na tržište.

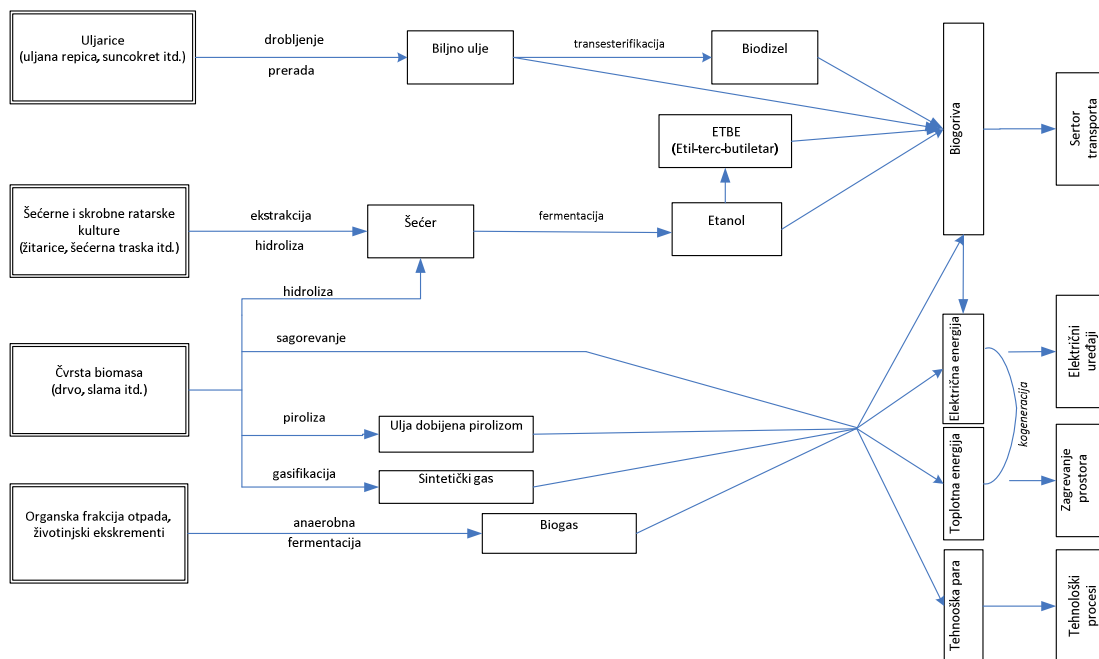


Slika 4-1 Aktivnosti u lancu isporuke čvrstog biogoriva [34]

Veoma je važno napomenuti da se regulativom Evropske Unije zahteva da biomasa koja se koristi za energetske namene bude proizvedena na održiv način. Kako bi se precizno definisao pojam održive proizvodnje biogoriva, do sada je usvojeno nekoliko evropskih standarda, takođe navedenih u Prilogu I, kojima se, između ostalog, definišu aspekti zaštite životne sredine koji su u vezi sa kriterijumima i indikatorima održive proizvodnje biogoriva namenjenih za korišćenje u energetske svrhe, kao i proračun bilansa emisije gasova sa efektom staklene bašte preko analize životnog ciklusa biogoriva.

4.2 Pregled tehnologija za iskorišćenje energije biomase

Širok spektar oblika u kojima se javlja biomasa uslovljava da iskorišćenje energetskog potencijala biomase za dobijanje toplotne ili električne energije, ili za transformaciju u tečno ili gasovito biogorivo, bude ostvaren putem različitih termičkih, hemijskih ili bioloških procesa. Na Slici 4-2 prikazani su različiti postupci za dobijanje finalne bioenergije/biogoriva u zavisnosti od ulazne sirovine.



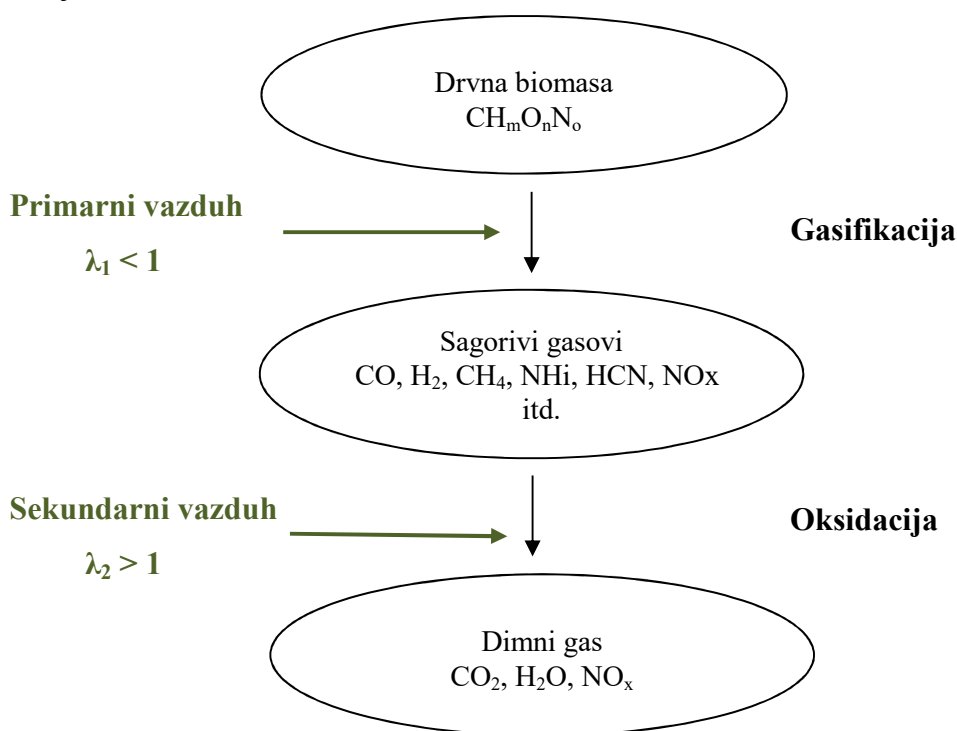
Slika 4-2 Šema tehnologija za preradu biomase

Kada je u pitanju čvrsta biomasa, ubedljivo najzastupljeniji tehnološki proces je termički proces tj. proces sagorevanja. Procesi sagorevanja koriste se u cilju direktnog zagrevanja boravišnog/radnog prostora, za zagrevanje vode u manjim pećima/kotlovima sistema za grejanje, za zagrevanje napojne vode kotlovskih postrojenja većih sistema za proizvodnju električne energije ili sistema kombinovane proizvodnje električne i toplotne enegije, kao i za zagrevanje sanitarne vode u većim sistemima daljinskog grejanja.

Sagorevanje drvene biomase se generalno sastoji iz tri faze:

- Zagrevanje goriva i isparavanja vlage - sprovodi se na temperaturama od oko 100-120°C u cilju isparavanja vlage iz goriva;
- Devolatilizacija/gasifikacija - prilikom zagrevanja drvene biomase na temperature preko 300°C, drvena materija se termički razlaže na gasne komponente (CO, H₂, CH₄ i dr.) i čvrsti ostatak; nastale gasne komponente mešaju se sa vazduhom, pale se i započinje proces sagorevanja; na temperaturi od oko 500°C u proseku oko 85% drvene materije prešlo je u gasnu fazu (volatili) [35], u kojoj se nalazi oko 60-70% toplotnog potencijala korišćene drvene biomase;
- Sagorevanje koksnog ostatka – nakon devolatilizacije isparivih komponenti, preostala čvrsta masa goriva pri odgovarajuće visokoj temperaturi podleže procesu oksidacije (sagorevanja).

U većini savremenih peći na drvenu biomasu vazduh potreban sa sagorevanje goriva dovodi se putem dvostepenog sistema za doziranje primarnog i sekundarnog vazduha. Primarni vazduh omogućava gasifikaciju drvene biomase, dok sekundarni vazduh služi za oksidaciju gorivih gasova i čvrste mase goriva preostale nakon procesa devolatilizacije. Princip dvostepenog dovođenja vazduha za sagorevanje prikazan je na Slici 4-3. Primarni vazduh koji se u ložište dovodi za potrebe gasifikacije obično se dodaje tako da koeficijent viška vazduha bude $\lambda < 1$, kako bi se izbegla oksidacija goriva u ovoj fazi procesa. Sa druge strane, u fazi sagorevanja potrebno je postići optimalni koeficijent viška vazduha, koji obično iznosi 1,5-2 [35]. Koeficijent viška vazduha iznad navedenog utiče na snižavanje temperature sagorevanja, dok koeficijent viška vazduha ispod navedenog dovodi do neadekvatnog mešanja gasne komponente goriva i vazduha. Suviše male količine viška vazduha mogu dovesti do značajnog porasta emisija ugljen monoksida usled nedovoljne količine kiseonika u procesu sagorevanja.



Slika 4-3 Dvostepeno dovođenje vazduha za sagorevanje drvene biomase

Opisano stepenasto uvođenje vazduha u uređaj za sagorevanje čvrste biomase omogućava potpuniji proces sagorevanja i smanjenje emisija koje se javljaju usled nepotpunog sagorevanja. Dovod sekundarnog vazduha obezbeđuje dogorevanje

prethodno nepotpuno sagorelih produkata sagorevanja i utiče na smanjenje neophodne količine viška vazduha.

Proces sagorevanja čvrstog biogoriva zavisi od karakteristika samog goriva i od parametara sagorevanja u korišćenom uređaju za sagorevanje. Kao najuticajniji parametri izdvajaju se:

- karakteristike goriva: sadržaj vlage, pepela i volatila, toplotna moć, nasipna gustina, energetska gustina, veličina komada goriva, temperatura topljenja pepela, sadržaj ugljenika (C), vodonika (H), kiseonika (O), hlora (Cl), azota (N), sumpora (S), kalijuma (K), natrijuma (Na), magnezijuma (Mg), kalcijuma (Ca), fosfora (P) i teških metala,
- temperatura sagorevanja u ložištu i vreme boravka goriva u ložištu,
- količina i karakteristike vazduha dovedenog u zonu sagorevanja (raspodela unutar ložišta, temperatura, brzina strujanja i dr.).

Sadržaj vlage u gorivu može varirati u velikom opsegu u zavisnosti od vrste goriva, načina njegovog čuvanja i eventualnog predtretmana. Opseg sadržaja vlage kreće se od 25% do 60% m/m u slučaju kore drveta, drvnih ostataka drvno-prerađivačke industrije ili se spušta do ispod 10% (peleti). Goriva sa visokim sadržajem vlage se pre ubacivanja u ložište suše kako bi se postigla potrebna temperatura sagorevanja i omogućilo dovoljno vreme boravka goriva u ložištu za odvijanje potpunog sagorevanja. Navedeni proces sušenja zahteva dodatnu količinu energije koja može značajno umanjiti ukupnu efikasnost procesa sagorevanja. Povećan sadržaj vlage u gorivu takođe izaziva i probleme sa paljenjem goriva.

Gornja toplotna moć čvrstih biogoriva obično varira u opsegu 18-22 MJ/kg (za suhu materiju). Na toplotnu moć goriva utiče sadržaj odgovarajućih hemijskih elemenata u gorivu i to sadržaj C, H, S, N, O, kao i sadržaj pepela i vlage.

Glavne komponente drvene biomase su celuloza, hemiceluloza i lignin, koji se sastoje iz atoma ugljenika, vodonika i kiseonika. Celuloza čini 40-50% drvnog materijala, hemiceluloza 20-35%, dok lignin predstavlja prosečno 15-35% drvene mase [36]. Pored navedenih hemijskih elemenata, biomasa sadrži i azot (N), sumpor (S) i hlor (Cl), elemente koji u najvećoj meri ulaze u sastav pepela (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si, Ti), ali i elemente koji se u manjoj meri nalaze u pepelu (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Tl, V, Zn). Potrebno je napomenuti da sadržaj pojedinih

komponenti, a samim tim i ponašanje tokom procesa sagorevanja, različitih vrsta biomase varira u širokom opsegu u zavisnosti od vrste biomase koja se sagoreva [37, 38].

Udeo sumpora (S) u čvrstim biogorivima mnogo je niži u poređenju sa fosilnim gorivima, tako da će najveći deo sumpora pri sagorevanju čvrste biomase ostati u pepelu (40 do 90%), dok će se iz ostatka formirati nestabilni SO₂. Udeo hlora zavisi od vrste biogoriva koje se koristi. Za razliku od slame žitarica koja ima značajno veći sadržaj hlora (Cl), goriva od drvene biomase odlikuju se niskim sadržajem hlora. Hlor učestvuje u formiranju jedinjenja kao što su HCl i dioksini/furani. Iako će većina hlora biti vezana u letećem pepelu (40-95%), ostatak će formirati HCl, koji pojačan procesima kondenzacije ima korozivno dejstvo na metalne delove unutrašnjosti kotlova i dimnjaka. Sadržaj azota (N) u gorivima od drvene biomase relativno je nizak, dok je mnogo viši u žitaricama, posebno u semenkama biljke. Azot u gorivu direktno utiče na stvaranje azotnih oksida (NO_x) koji tokom sagorevanja napuštaju ložište kroz dimnjak i dospevaju u atmosferu. Kalcijum (Ca) i magnezijum (Mg) u gorivu povećavaju tačku topljenja pepela. Sa druge strane, kalijum (K), koji se najčešće nalazi u poljoprivrednim biogorivima, značajno snižava tačku topljenja pepela, čime pomaže stvaranju naslaga šljake na rešetci i dovodi do značajnih problema u procesu sagorevanja [39]. Drvo i kora drveta imaju relativno visoku tačku topljenja (1.300-1.400°C), pa se ne smatraju problematičnim sa aspekta problema koji se odnose na topljenje pepela. Sa druge strane, tačka topljenja pepela biljaka iz familije trava je ispod 1.000°C, što kao posledicu ima lako stvaranje šljake tokom procesa sagorevanja. U slučaju žitarica, tačka topljenja pepela je ispod 750°C, pa se navedena vrsta goriva smatra posebno kritičnom po razmatranom pitanju. Zbog svih navedenih razloga poljoprivredna biogoriva imaju više kritičnih aspekata u poređenju sa drvnom biomasom, pa se generalno ređe koriste i to uglavnom u specijalnim uređajima za sagorevanje. Iznad navedeni primeri takođe upućuju na zaključak da je veoma teško definisati generalne karakteristike čvrstih biogoriva sa aspekta njihovog sagorevanja, jer se svaka vrsta biomase odlikuje posebnim, nekada međusobno bitno različitim osobinama.

Stehiometrija procesa sagorevanja utiče na potpunost sagorevanja i emisije zagađujućih materija u vazduh. Emisije zagađujućih materija predstavljaju rezultat nepotpunog sagorevanja goriva usled nekog od sledećih razloga: 1) neadekvatnog

mešanje goriva i vazduha u ložištu, 2) nedovoljne količine kiseonika u ložištu, 3) niske temperature sagorevanja u ložištu ili 4) nedovoljnog vremena boravka goriva u ložištu, koje je potrebno za odvijanje potpunog sagorevanja. Navedeni parametri utiču jedni na druge, tako da se njihovom optimizacijom postiže smanjenje emisija zagađujućih materija koje se javljaju kao rezultat procesa nepotpunog sagorevanja.

Najvažnije karakteristike čvrste biomase i odgovarajući efekti prikazani su u Tabeli 4-1, dok su u Tabeli 4-2 prikazane tipične vrednosti pojedinih parametara za određene vrste biomase. Iz Tabele 4-2 jasno se može uočiti jedan od osnovnih nedostataka korišćenja nepripremljene biomase u energetske svrhe, a to je veći sadržaj vlage (čiji su negativni uticaji na proces sagorevanja već pomenuti), kao i mala energetska gustina. Problem male energetske gustine stvara probleme sa aspekta transporta, manipulacije i skladištenja goriva. Na Slici 4-4a prikazana je međusobna zavisnost sadržaja vlage, donje toplotne moći i energetske gustine goriva. Iz prikazanog dijagrama može se zaključiti da povećan sadržaj vlage utiče na smanjenje toplotne moći, kao i na povećanje gustine čvrste biomase. Slika 4-4b ilustruje međuzavisnost sadržaja vlage, toplotne moći i energetske gustine čvrste biomase, dovodeći do zaključka da su povećan sadržaj vlage i smanjena toplotna moć kod drvne biomase direktno u vezi sa nižom energetskom gustinom pomenutog goriva.

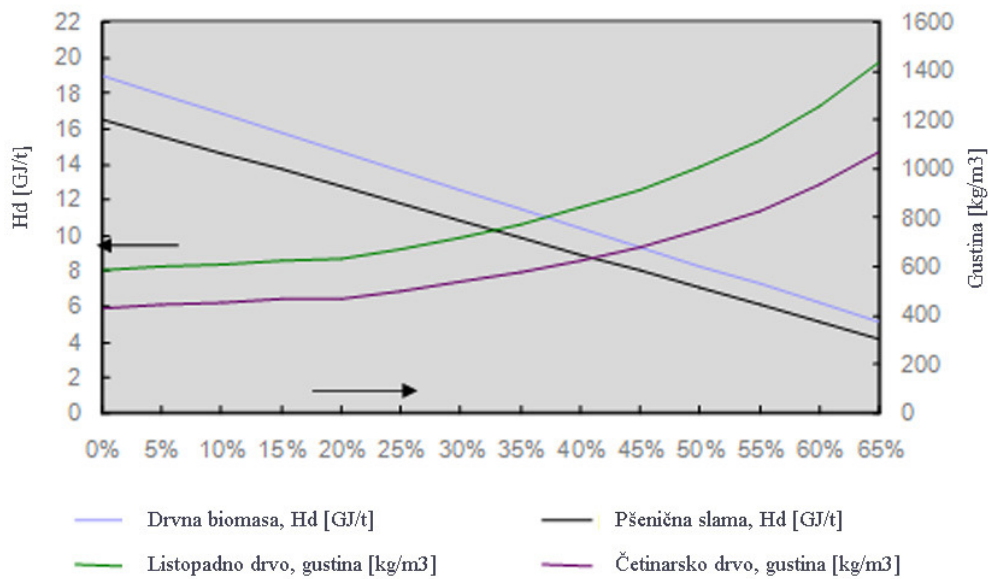
Tabela 4-1 Najvažnije karakteristike čvrste biomase i njihovi uticaji [40]

<i>Karakteristika</i>	<i>Uticaj</i>
<i>Fizičke karakteristike</i>	
Sadržaj vlage	Skladištenje, gubitak suve materije, Hd, samopaljenje, projektno rešenje sistema za sagorevanje
Hd, Hg	Iskorišćenje energije goriva, projektno rešenje sistema za sagorevanje
Sadržaj volatila	Proces termičkog razlaganja goriva
Sadržaj pepela	Emisija praškastih materija, prikupljanje i odlaganje pepela, izbor tehnologije sagorevanja
Topivost pepela	Bezbednost u radu sistema za sagorevanje, izbor tehnologije sagorevanja, stvaranje naslaga na grejnim površinama, smanjenje efikasnosti sagorevanja
Nasipna gustina	Logistika (skladištenje, transport, manipulacija)
Fizičke dimenzije, oblik i vrsta biogoriva	Prikupljanje i transport, izbor tehnologije sagorevanja, bezbednost u radu sistema za sagorevanje, sušenje, formiranje praškastih materija
Otpornost na abraziju	Promene u kvalitetu goriva, segregacija, sitne frakcije praškastih materija
Poroznost	Reaktivnost goriva, proces devolatilizacije goriva
Dimenzije	Vreme potrebno za sagorevanje, homogenost goriva, potpunost sagorevanja
<i>Hemijske karakteristike</i>	
Ugljenik, C	Gornja toplotna moć
Vodonik, H	Gornja toplotna moć, donja toplotna moć
Kiseonik, O	Gornja toplotna moć
Hlor, Cl	Emisije HCl, dioksina i furana, korozija, snižavanje temperature topljenja pepela
Azot, N	Emisije NO _x , NO ₂
Sumpor, S	Emisije SO _x , korozija
Fluor, F	Emisije HF, korozija
Kalijum, K	Korozija (izmenjivača toplote, pregrejača pare), snižavanje temperature topljenja pepela, formiranje aerosola, korišćenje pepela kao biljne prihrane
Natrijum, Na	Korozija (izmenjivača toplote, pregrejača pare), snižavanje temperature topljenja pepela, formiranje aerosola
Magnezijum, Mg	Povećanje temperature topljenja pepela, korišćenje pepela kao biljne prihrane
Kalcijum, Ca	Povećanje temperature topljenja pepela, korišćenje pepela kao biljne prihrane
Fosfor, P	Korišćenje pepela kao biljne prihrane
Teški metali	Emisije, korišćenje pepela, formiranje aerosola

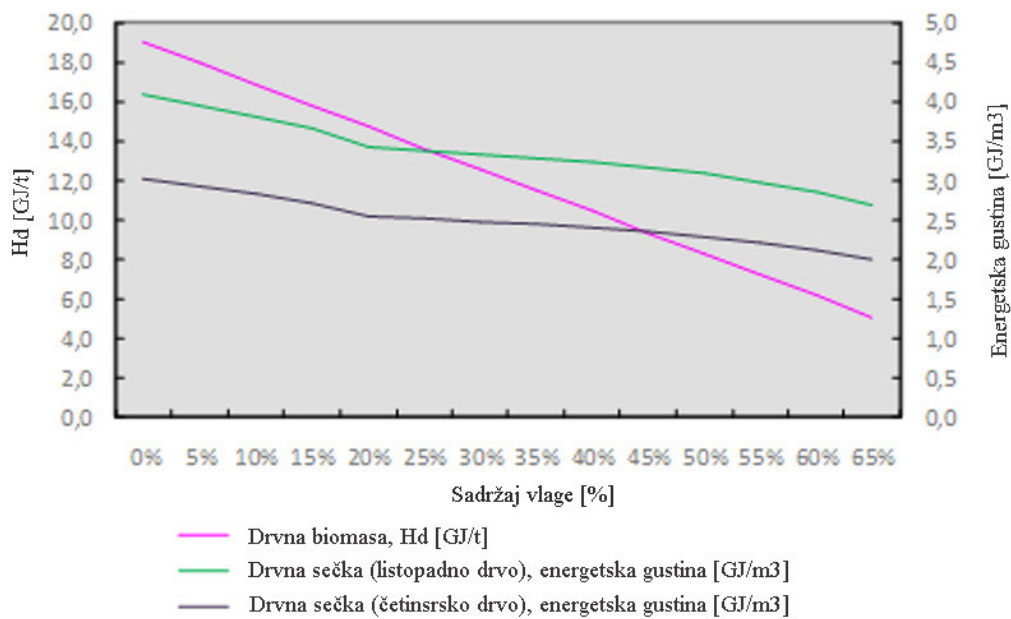
Tabela 4-2 Tipičan sadržaj vlage, toplotna moć, nasipna gustina i energetska gustina pojedinih vrsta čvrste biomase [41]

<i>Vrsta čvrstog biogoriva</i>	<i>Sadržaj vlage*</i> [%m/m. s.m.]	<i>Hg</i> [MJ/kg, s.m.]	<i>Hd</i> [MJ/kg, s.m.]	<i>Nasipna gustina*</i> [kg v.m./m ³]	<i>Energetska gustina</i> [MJ/m ³]
Drvena sečka – listopadno drvo	50,0	19,8	8,0	450	3.600
Drvena sečka – listopadno, sušeno drvo	30,0	19,8	12,2	320	3.900
Drvena sečka – četinarsko drvo	50,0	19,8	8,0	350	2.800
Drvena sečka – četinarsko, sušeno drvo	30,0	19,8	12,2	250	3.050
Kora drveta	50,0	20,2	8,2	320	2.620
Drvena piljevina	50,0	19,8	8,0	240	1.920
Drvni peleti	10,0	19,8	16,4	600	9.840
Slama (gusto sabijene bale)	15,0	18,7	14,5	120	1.740

* s.m. – suva materija, v.m.- vlažna materija



a)

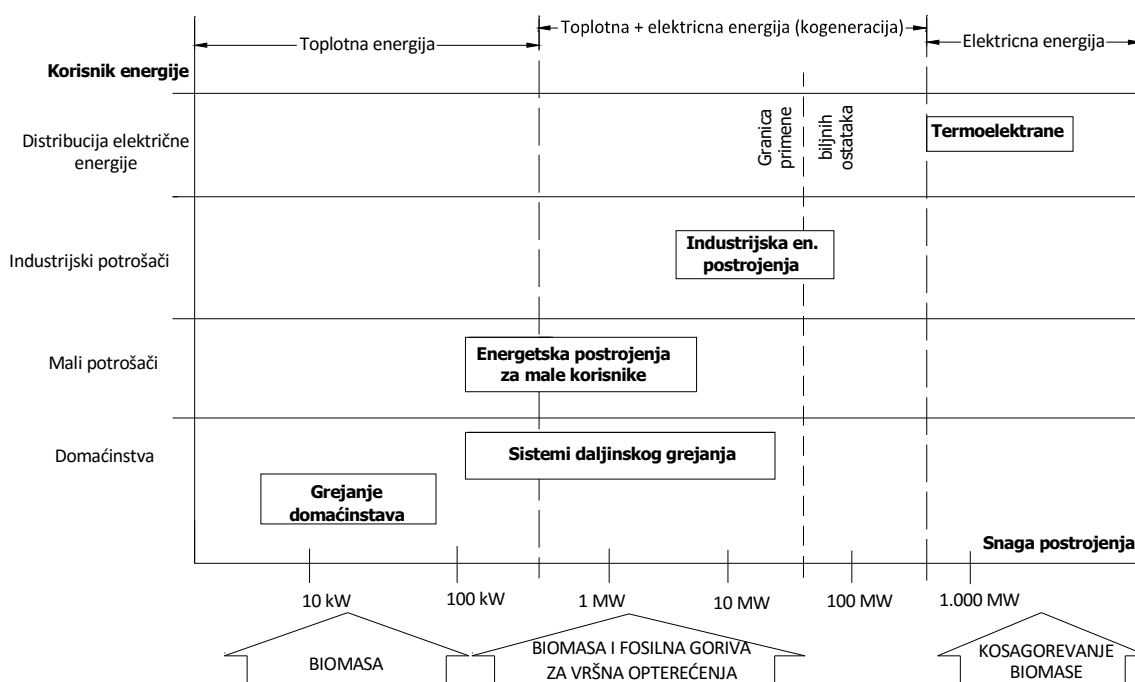


b)

Slika 4-4 Međuzavisnost sadržaja vlage, toplotne moći i
a) gustine čvrste biomase, b) energetske gustine čvrste biomase [40]

4.3 Uređaji za sagorevanje biomase

Danas na tržištu postoji veliki broj različitih uređaja za sagorevanja biomase čija snaga varira od nekoliko kW, u slučaju peći za zagrevanje domaćinstava, do velikih kotlova snage i preko 50 MW koji se koriste u kogenerativnim postrojenjima, a u skladu sa ilustracijom prikazanom na Slici 4-5. U navedenom rasponu nalazi se veliki broj uređaja za sagorevanje koji su pogodni za primenu u različitim energetske postrojenjima, u industriji, u postrojenjima za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije, kao i u sistemima u kojima se biomasa sagoreva zajedno sa fosilnim gorivom (kosagorevanje). Za sagorevanje biomase uglavnom se koriste klasične tehnologije sagorevanja na rešetci (nepokretnoj, pokretnoj, kosoj ili stepenastoj), sagorevanje u letu, sagorevanje u mehurastom fluidizovanom sloju i cirkulacionom fluidizovanom sloju.



Slika 4-5 Opseg snaga postrojenja i sektori korišćenja čvrste biomase kao goriva

Iako se sagorevanje biomase od davnina koristi za generisanje toplotne energije, biomasa predstavlja veoma zahtevno gorivo kada je u pitanju postizanje zadovoljavajuće efikasnosti procesa sagorevanja i sprečavanje emisije štetnih materija.

Sagorevanje ogrevnog drveta, kao tradicionalnog oblika biomase, povezano je sa značajnim emisijama praškastih materija i ugljen monoksida, kao i drugih gasova koji se javljaju kao posledica nepotpunog sagorevanja. Stoga su noviji uređaji za sagorevanje ogrevnog drveta uglavom razvijani u pravcu rešavanja pomenutih problema kako bi drvo i u savremenom svetu nastavilo da se koristi kao izvor energije. Posebni izazovi javljaju se kod uređaja za sagorevanje biomase sa ručnim loženjem, kod kojih je potrebno obezbediti regulisanu količinu proizvedene energije tokom dužeg vremenskog perioda, pri tom postižući maksimalno iskorišćenje energije goriva. Navedeno se često postiže ograničavanjem primarnog ili sekundarnog vazduha koji se dovodi gorivu, što, sa druge strane, može izazvati veoma visoke emisije štetnih materija usled nepotpunosti procesa sagorevanja. U ponudi su takođe i peći u kojima se vrši akumulacija oslobođene energije goriva, na taj način omogućavajući da sistem za sagorevanje biomase radi sa visokim toplotnim opterećenjem i sa manjom količinom viška vazduha, koristeći akumuliranu energiju za dobijanje potrebne količine toplotne energije tokom prihvatljivo dugog vremenskog perioda. Uvođenje sistema za sagorevanje sa automatskom regulacijom omogućili su da proces regulacije sagorevanja, proizvodnje energije i prilagođavanje trenutnim energetskeim zahtevima potrošača postanu mnogo jednostavniji.

Osim same prirode procesa sagorevanja biomase, dodatni problem predstavlja i veliki spektar različitih goriva koja se ubrajaju u biomasu, kao što je objašnjeno u Poglavlju 4.1. Iako se veći broj uređaja koja se danas koriste zasniva na korišćenju ligninsko-celulozne biomase, veliki broj biogoriva predstavlja i ostatke industrijske ili prerađivačke delatnosti koji se odlikuju najrazličitijim karakteristikama i koji se različito ponašaju prilikom sagorevanja.

Biomasa se po svojim karakteristikama takođe bitno razlikuje od uglja, pri čemu se glavne razlike nepripremljene biomase i uglja mogu sumirati na sledeći način:

- biomasa sadrži više isparivih materija, manje ugljenika i više kiseonika u odnosu na ugalj,
- biomasa ima nižu toplotnu moć u odnosu na ugalj,
- proces devolatilizacije biomase počinje na nižim temperaturama u odnosu na ugalj,

- doprinos isparivih materija ukupnoj toplotnoj moći biomase iznosi 70%, u poređenju sa prosečno 36% koliko iznosi doprinos isparivih materija ukupnoj toplotnoj moći uglja [39],
- biomasa, naročito poljoprivredna biomasa, sadrži veći udeo alkalnih komponenti koje mogu dovesti do problema zašljakivanja i stvaranja nalaga na površinama uređaja za sagorevanje.

Navedene karakteristike značajno utiču na način korišćenja biomase kao izuzetno reaktivnog goriva, zahtevajući izbor adekvatne tehnologije sagorevanja i posebnu konstrukciju uređaja za sagorevanje, koja je često drugačija od tradicionalnih uređaja za sagorevanje uglja.

Kada su u pitanju uređaji koji se koriste za zagrevanja domaćinstava, a koji su posebno interesantni sa aspekta teme ove disertacije, parametri koji utiču na efikasnost procesa sagorevanja i emisije štetnih materija su mnogobrojni. Osnovni tehnički aspekti na koje se mora obratiti pažnja prilikom sagorevanja biomase kako bi se postigla željena efikasnost sagorevanja i sprečila prekomerna emisija zagađujućih materija odnose se na temperaturu sagorevanja (viša temperatura ubrzava proces prenosa toplote), vreme potrebno za ostvarivanje potpunog sagorevanja goriva, kao i turbulentnost strujanja u ložištu (turbulencija u ložištu obezbeđuje bolje mešanje goriva i vazduha, pa na taj način pospešuje sagorevanje). Značajni parametri koji utiču na sagorevanje biomase u određenom uređaju male snage se, kao što je rečeno ranije, odnose i na karakteristike goriva, ali i na konstruktivne karakteristike uređaja za sagorevanje i način na koji se odvija proces sagorevanja.

Mehanizmi prenosa toplote imaju direktan uticaj na potpunost sagorevanja biogoriva, pri čemu gubici toplote u uređaju za sagorevanje dovode do nepotpunog sagorevanja. Značajna količina toplote oslobođenja sagorevanjem goriva biva akumulirana u zidovima ložišta i površinama za razmenu toplote koje se nalaze unutar uređaja za sagorevanje, što pozitivno utiče na produženje toplotnog efekta uređaja, ali negativno utiče na emisije, koje se kao posledica nepotpunog sagorevanja javljaju u početnoj fazi sagorevanja nove serije goriva koja se uvodi u uređaj za sagorevanje. Ukoliko je uređaj za sagorevanje dobro termički izolovan, gubici toplote kroz zidove uređaja biće manji, čime će se povećati efikasnost procesa sagorevanja.

Predgrevanjem vazduha za sagorevanje pre njegovog uvođenja u ložište može se u značajnoj meri uticati na povećanje temperature u ložištu. Obično se predgrevanje vrši pomoću dimnih gasova nastalih sagorevanjem goriva koji se, nakon što napuste ložište kotla, recirkulišu i koriste za pomenutu namenu.

U slučaju klasičnih uređaja male snage za sagorevanje drvene biomase potrebno je takođe imati i koeficijent viška vazduha koji je veći od 1, kako bi se obezbedilo adekvatno mešanje vazduha i gasova nastalih sagorevanjem goriva. U ovakvoj situaciji u ložištu će biti značajna količina viška kiseonika, tako da će temperatura sagorevanja biti niža u poređenju sa stehiometrijskom temperaturom sagorevanja. Stoga je postizanje optimalnog mešanja vazduha i goriva od najveće važnosti za omogućavanje adekvatnog sagorevanja goriva. Iako regulacija i upravljanje procesom sagorevanja omogućavaju navedenu optimizaciju, pa se s toga redovno primenjuju u postrojenjima velike snage, njihovo instaliranje u postrojenjima male snage je diskutabilno, usled razloga koji se tiču finansijske opravdanosti ovakve mere.

Vrsta goriva utiče na proces sagorevanja preko ranije pomenutih fizičkih i hemijskih karakteristika, od kojih su najznačajnije prikazane u Tabeli 4-1. Hemijski sastav goriva značajan je sa aspekta toplotne moći goriva, emisija zagađujućih materija i problema vezanih za topivost pepela. Fizičke osobine, među kojima su gustina, poroznost i veličina komada goriva, utiču na vreme potrebno za ostvarivanje potpunog sagorevanja, reaktivnost i proces devolatilizacije goriva.

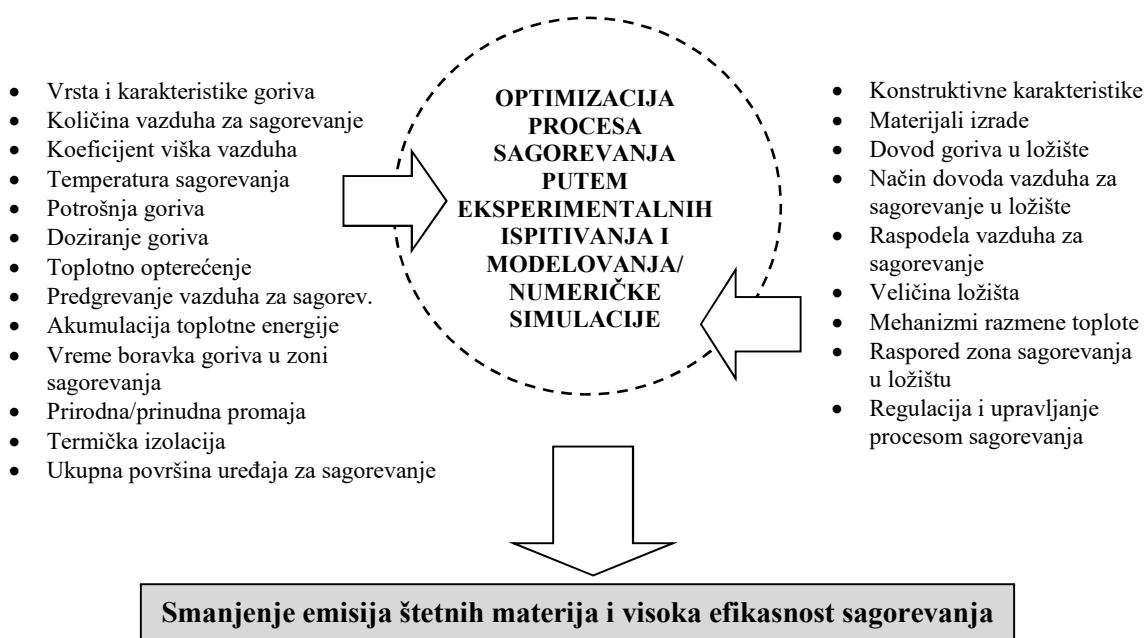
Na proces sagorevanja u određenom uređaju takođe utiče i toplotno opterećenje, pri čemu opterećenje niže od nominalnog (za koje je projektovan uređaj za loženje) može dovesti do povećanih emisija usled nepotpunosti sagorevanja, smanjene efikasnosti procesa rada i operativnih problema uređaja za sagorevanje. Temperatura sagorevanja takođe utiče na vreme potrebno za ostvarivanje potpunog sagorevanja.

Konstruktivno rešenje uređaja za sagorevanje, korišćeni materijali i njihove karakteristike (termički kapacitet, gustina, debljina, termička izolaciona svojstva i slično) utiču na temperature koje se javljaju u ložištu i na regulaciju procesa sagorevanja. Kao što je ranije rečeno, odvojeno dovođenje primarnog i sekundarnog vazduha, kao i adekvatna distribucija vazduha u komori za sagorevanje utiče na povećanje temperature i ubrzanje procesa sagorevanja, adekvatno mešanje goriva i vazduha i smanjenje emisija NO_x i emisija nastalih usled nepotpunog sagorevanja.

Efikasnost razmene generisane toplote, bilo sa okolinom ili sa vodom koja se koristi kao grejni medijum u sistemu za grejanje, takođe utiče na efikasnost celog termičkog procesa sagorevanja biogoriva.

Na kraju, jedan od glavnih nedostataka uređaja male snage za sagorevanje klasičnih oblika biomase predstavlja nemogućnost automatizacije procesa i nizak stepen regulacije sagorevanja, zbog čega dolazi do povećanja emisija i smanjenja efikasnosti ložnih uređaja.

Na Slici 4-6 prikazan je ceo spektar parametara koji utiču na proces sagorevanja čvrstih biogoriva. Navedeni parametri u velikoj meri utiču jedni na druge, čime se prilično komplikuje situacija sa aspekta analize procesa sagorevanja. U savremenoj inženjerskoj praksi ulažu se veliki naponi kako bi se za sagorevanje pojedinih vrsta čvrstih biogoriva projektovali i proizveli što efikasniji i adekvatniji uređaji za sagorevanje koji će omogućiti maksimalno iskorišćenje energetskeg potencijala goriva, uz minimalan uticaj na zagađenje životne sredine. U takvim nastojanjima, modelovanje procesa sagorevanja korišćenjem savremenih softverskih paketa, uz eksperimentalna ispitivanja u cilju boljeg razumevanja određenih fizičkih fenomena, ali i provere izrađenih modela, predstavljaju najbolji način za optimizaciju razmatranih procesa.



Slika 4-6 Spektar parametara koji utiču na proces sagorevanja čvrste biomase

4.4 Emisije koje nastaju sagorevanjem biomase

Emisije zagađujućih materija koje nastaju sagorevanjem biomase zavise od:

- vrste biomase i njenih karakteristika,
- tehnologije sagorevanja,
- konstruktivnog rešenja uređaja za sagorevanje,
- uslova u ložištu i
- mera primenjenih u cilju smanjenja emisija zagađujućih materija.

Pri sagorevanju biomase nastaju ugljen dioksid (CO_2), ugljen monoksid (CO), praškaste materije, isparljiva organska jedinjenja (VOC), azotni oksidi (NO_x), azot suboksid (N_2O), sumporni oksidi (SO_x), teški metali, dioksini, furani i policiklični aromatični ugljovodonici (PAH jedinjenja). Emisije zagađujućih materija koje nastaju sagorevanjem drvene biomase mogu se podeliti u dve grupe:

- 1) emisije koje se javljaju kao rezultat potpunog sagorevanja (u koje spadaju CO_2 , praškaste materije – koje mogu biti i rezultat nepotpunog sagorevanja, NO_x , N_2O , SO_x , teški metali, dioksini, furani) i
- 2) emisije koje se javljaju kao rezultat nepotpunog sagorevanja (u koje spadaju CO , isparljiva organska jedinjenja, PAH jedinjenja, kao i praškaste materije).

Ukoliko je proces sagorevanja biogoriva efikasan, skoro sav organski materijal iz goriva prelazi u CO_2 i H_2O , tako da se formira samo neznatna količina preostalog, uglavnom neorganskog materijala. Sa druge strane, prilikom nedovoljno efikasnog sagorevanja, što je u praksi skoro uvek slučaj, dolazi do formiranja značajne količine praškastih materija koje su posledica nepotpunog sagorevanja goriva i koje značajno povećavaju emisiju pomenutih zagađujućih materija. U skladu sa prethodno datim objašnjenjima, uzok nepotpunog sagorevanja može biti neadekvatno mešanje goriva i vazduha u komori za sagorevanje, nedovoljna količina kiseonika u ložištu, niska temperatura sagorevanja ili nedovoljno vreme boravka goriva u zoni sagorevanja.

U Tabeli 4-3 prikazane su zagađujuće materije koje nastaju sagorevanjem biomase i njihov uticaj na klimu, životnu sredinu i zdravlje ljudi.

Tabela 4-3 Zagađujuće materije koje nastaju sagorevanjem biomase i njihov uticaj na klimu, životnu sredinu i zdravlje ljudi [40]

Zagađujuća materija	Poreklo	Efekat
Ugljen dioksid (CO ₂)	Glavni produkt sagorevanja biomase	<i>Klima:</i> Gas sa efektom staklene bašte, ali se ne uzima u obzir zbog zatvorenog ciklusa ugljenika koji se odvija tokom perioda uzgajanja biljke (kada dolazi do apsorpcije CO ₂ iz atmosfere) pa sve do njenog sagorevanja (kada dolazi do emisije CO ₂ u atmosferu); biomasa se tretira kao CO ₂ neutralno gorivo.
Ugljen monoksid (CO)	Produkt nepotpunog sagorevanja biomase	<i>Klima:</i> Indirektan uticaj na klimatske uslove preko obrazovanja O ₃ . <i>Zdravlje ljudi:</i> Negativan uticaj na osobe koje boluju od astme i oboljenja disajnih organa; može dovesti do gušenja.
Metan (CH ₄)	Produkt nepotpunog sagorevanja biomase	<i>Klima:</i> Gas sa efektom staklene bašte; indirektan uticaj na klimatske uslove preko obrazovanja O ₃ .
Nemetanske lako isparive materije	Produkt nepotpunog sagorevanja biomase	<i>Klima:</i> Indirektan uticaj na klimatske uslove preko obrazovanja O ₃ . <i>Zdravlje ljudi:</i> Negativan uticaj na rad respiratornih organa.
Policiklični aromatični ugljovodnici (PAH)	Produkt nepotpunog sagorevanja biomase	<i>Klima i životna sredina:</i> Povratni efekat gasa staklene bašte preko formiranja aerosola; indirektni efekti kroz povećane koncentracije teških metala u istaloženim aerosolima. <i>Zdravlje ljudi:</i> kancerogeni efekat.
Praškaste materije	Čađ, šljaka i kondenzovani teški ugljovodnici kao produkti nepotpunog sagorevanja biomase; leteći pepeo i soli	<i>Klima i životna sredina:</i> Povratni efekat gasa staklene bašte preko formiranja aerosola; indirektni efekti kroz povećane koncentracije teških metala u istaloženim aerosolima. <i>Zdravlje ljudi:</i> Negativan uticaj na rad respiratornih organa; Kancerogeni efekat.
Azotni oksidi (NO _x)	Produkt sagorevanja svih vrsta biomase koje sadrže azot; dodatni NO _x se pod određenim uslovima može obrazovati i od azota iz vazduha	<i>Klima i životna sredina:</i> Indirektan uticaj na klimatske uslove preko obrazovanja O ₃ ; povratni efekat gasa staklene bašte preko formiranja aerosola; kisele kiše; oštećenje vegetacije; formiranje smoga; korozija i oštećenje materijala <i>Zdravlje ljudi:</i> Negativan uticaj na rad respiratornih organa; NO ₂ je toksičan.
Azot suboksid (N ₂ O)	Produkt sagorevanja svih vrsta biomase koje sadrže azot	<i>Klima:</i> Gas sa efektom staklene bašte <i>Zdravlje ljudi:</i> Indirektan uticaj preko oštećenja ozonskog omotača.
Amonijak (NH ₃)	Male količine mogu biti emitovane kao rezultat nepotpune konverzije NH ₃ , formiranog tokom gasifikacije goriva, u azotne produkte sagorevanje; može se javiti kao posledica primene sekundarnih mera za smanjenje emisije NO _x (ubrizgavanje NH ₃)	<i>Životna sredina:</i> Kisele kiše; oštećenje vegetacije; korozija i oštećenje materijala. <i>Zdravlje ljudi:</i> Negativan uticaj na rad respiratornih organa.
Sumporni oksidi (SO _x)	Produkt sagorevanja svih vrsta biomase koje sadrže sumpor	<i>Klima i životna sredina:</i> Povratni efekat gasa staklene bašte preko formiranja aerosola; kisele kiše; oštećenje vegetacije; formiranje smoga; korozija i oštećenje materijala. <i>Zdravlje ljudi:</i> Negativan uticaj na rad res. organa

Teški metali	Sve vrste biomase sadrže teške metale u određenoj količini, koji ostaju u pepelu ili isparavaju	<i>Zdravlje ljudi:</i> Akumulacija u lancu ishrane; pojedini teški metali su toksični, dok pojedini imaju kancerogeni efekat.
Prizemni ozon (O ₃)	Sekundarni proizvod sagorevanja biomase, formiran u atmosferskim hemijskim reakcijama CO, CH ₄ , nemetanskih lako isparivih materija i NO _x	<i>Klima i životna sredina:</i> Gas sa efektom staklene bašte; oštećenje vegetacije; formiranje smoga; oštećenje materijala. <i>Zdravlje ljudi:</i> Indirektan uticaj preko oštećenja ozonskog omotača; negativan uticaj na rad respiratornih organa, izaziva astmu.
Hlorovodonik (HCl)	Produkt sagorevanja svih vrsta biomase koje sadrže hlor	<i>Životna sredina:</i> Kisele kiše; oštećenje vegetacije; korozija i oštećenje materijala. <i>Zdravlje ljudi:</i> Negativan uticaj na rad respiratornih organa; toksičan.
Dioksini i furani (PCDD/PCDF)	Manje količine mogu biti emitovane kao rezultat hemijskih reakcija ugljenika, hlora i kiseonika u prisustvu katalizatora (Cu)	<i>Zdravlje ljudi:</i> Izrazito toksični; izazivaju oštećenje jetre, centralnog nervnog sistema; dovode do slabljenja imunog sistema; akumuliraju se u lancu ishrane.

Emisije NO_x i SO_x koje se javljaju pri sagorevanju biomase su generalno znatno niže u odnosu na emisije koje se javljaju prilikom sagorevanja uglja i tečnih goriva. U većini slučajeva, na smanjenje emisija NO_x može se uticati primarnim merama (intervenisanjem u ložištu uređaja/sistema za sagorevanje), ali su, ukoliko je potrebno, na raspolaganju i sekundarne mere za redukciju emisija (posebna postrojenja za smanjenje emisija). Slično važi i za emisije SO_x, koje su generalno niske kada je u pitanju sagorevanje drvene biomase, prvenstveno usled niskog sadržaja sumpora u samom gorivu. Međutim, pri sagorevanju poljoprivredne biomase emisije sumpornih oksida mogu biti značajne, pa se zato u velikim sistemima skoro obavezno primenjuju primarne mere za njihovu redukciju (npr. ubrizgavanje krečnjaka u komoru za sagorevanje). Generalno gledano, pri sagorevanju drvene biomase najveći problem predstavljaju emisije CO i praškastih materija. Povećane emisije CO i praškastih materija mogu se javiti usled nedovoljno visoke temperature u ložištu, nedovoljne količine kiseonika u ložištu ili nedovoljnog boravka goriva u zoni sagorevanja. Primarne mere za smanjenje emisija CO i praškastih materija odnose se na aktivnosti kojima će se izbeći iznad pomenuti uzroci nepotpunog sagorevanja. Međutim, praškaste materije nastaju i u slučaju potpunog sagorevanja goriva i to kao rezultat sadržaja pepela u samom gorivu. Zato se za smanjenje emisija praškastih materija mogu primeniti i sekundarne mere koje obuhvataju ugradnju elektrostatičkih ili vrećastih filtera. Ipak, potrebno je napomenuti da se sekundarne mere smanjenja emisija štetnih

materija uglavnom primenjuju kod postrojenja srednje ili velike snage, dok njihova primena kod uređaja male snage, koji su namenjeni za primenu u domaćinstvima, obično nije finansijski opravdana.

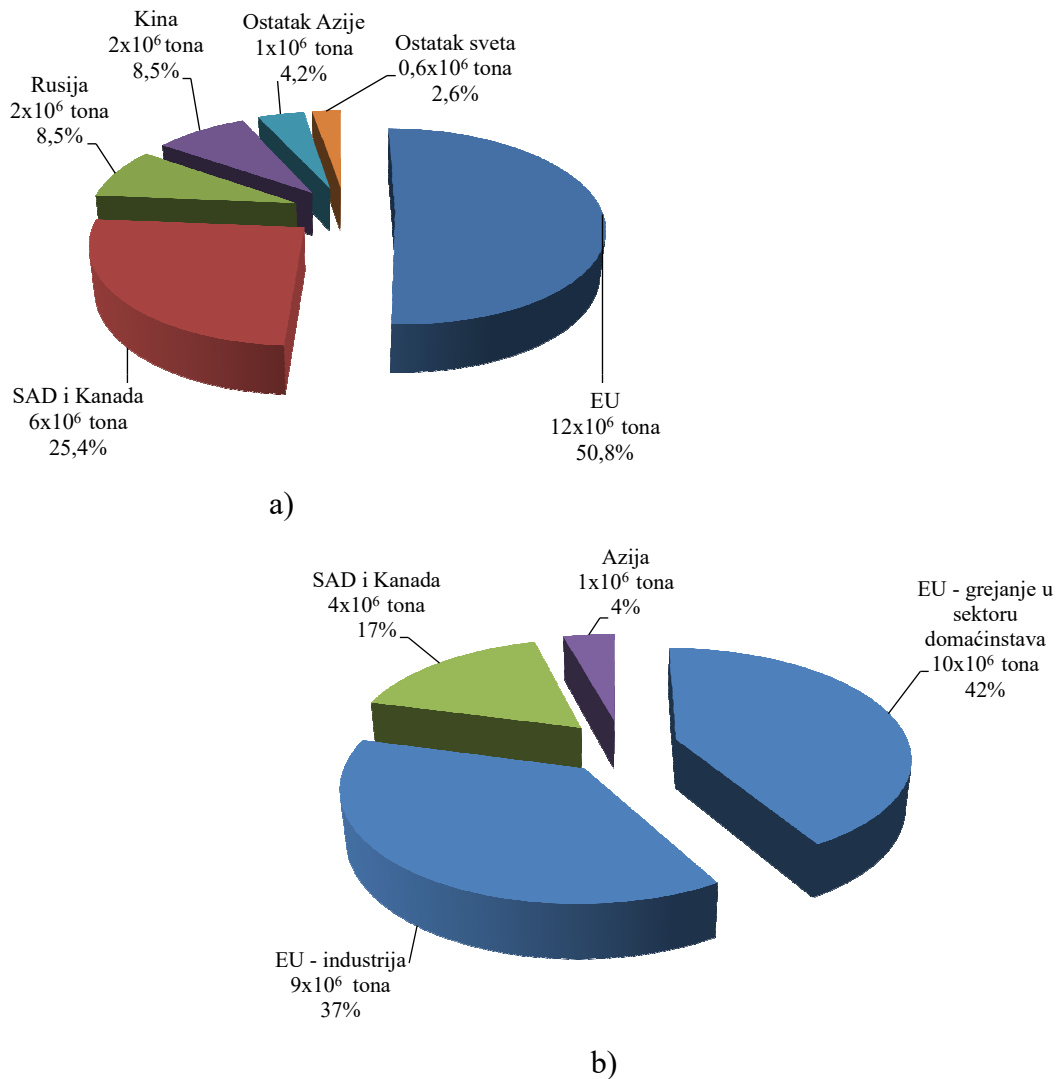
Kao što je već ranije rečeno, pored vrste goriva, emisije zagađujućih materija zavise i od tipa uređaja za sagorevanje biomase [41]. Kada su u pitanju postrojenja za sagorevanje drvene biomase namenjena za zagrevanje domaćinstava, navedeni uređaji obuhvataju peći na drvnu biomasu, ugradne kamine, manje kotlove na drva, akumulacione peći, kao i peći i kotlove na pelet. Podaci iz literature ukazuju da su emisije zagađujućih materija koje se javljaju iz automatski upravljanih sistema, kao što su peći i kotlovi na pelet, više od reda veličine niže nego iz uređaja sa ručnim loženjem [42, 43, 44, 45], što predstavlja rezultat automatizovanog rada i mogućnosti regulacije procesa sagorevanja. Ipak, pomenute emisije u velikoj meri zavise i od karakteristika samog goriva (peleta), pri čemu samo razlike u kvalitetu sagorevanih paleta mogu uticati na oscilacije u emisijama praškastih materija čak i do deset puta [45].

Mnogobrojna istraživanja ukazuju na činjenicu da se adekvatnim konstrukcionim rešenjima uređaja za sagorevanje i kontrolom procesa sagorevanja, kao i izborom adekvatnog goriva, može značajno uticati na smanjenje emisija zagađujućih materija koje nastaju sagorevanjem čvrste biomase [43-47]. Pri tome se korišćenje drvene biomase izdvaja kao ekološki povoljnija opcija, jer se u slučaju poljoprivredne biomase, usled većeg sadržaja N, S, Cl i K poreklom od đubriva i pesticida/herbicida koji se koriste u poljoprivrednoj proizvodnji, a koji dovode do značajnijih emisija NO_x, SO_x i HCl i problematičnijeg sagorevanja razmatranih materijala u pećima (uključujući i probleme vezane za koroziju unutrašnjih površina kotla ili peći), poljoprivredna biomasa predlaže za korišćenje u većim postrojenjima koja su opremljena složenim upravljačkim sistemima i sistemima za sprečavanje prekomerne emisije zagađujućih materija u vazduh. U pećima male snage, koje se koriste za zagrevanje domaćinstava, predlaže se sagorevanje ekološki i procesno povoljnije drvene biomase. Međutim, kako uređaji za sagorevanje male snage obično nisu opremljeni specijalnim sistemima za sprečavanje ili smanjenje emisija zagađujućih materija, posebna pažnja mora se posvetiti primarnim merama smanjenja emisija tj. optimizaciji procesa sagorevanja, kako bi se postiglo što efikasnije sagorevanje goriva uz što manje lokalno zagađenje životne sredine.

**5. PELETI OD BIOMASE I UREĐAJI
ZA NJIHOVO SAGOREVANJE**

5.1 Prednosti korišćenja peleta od biomase

Kao što je već pomenuto u prethodnom poglavlju, osnovni nedostaci korišćenja biomase kao goriva odnose na njen heterogeni sastav, visok sadržaj vlage i malu energetska gustinu. Navedene karakteristike u značajnoj meri poskupljuju manipulaciju, transport i skladištenje goriva, kao i rad uređaja za sagorevanje, kako u pogledu očekivanih energetska, tako i u pogledu pratećih ekoloških parametara. Kao odgovor na pomenute izazove, krajem 70-ih godina prošlog veka u Sjedinjenim Američkim Državama predložen je novi oblik pripremljene biomase, kao biogoriva koje se odlikuje većom energetska gustinom, homogenijim sastavom i formom, manjim sadržajem vlage i mogućnošću lakšeg i ekonomičnijeg transporta i manipulacije. Novo gorivo, nazvano peleti, je u značajnoj meri omogućilo prevazilaženje ranije pomenutih nedostataka korišćenja nepripremljene biomase. Interesovanje za korišćenje peleta izuzetno je poraslo tokom poslednjih dvadeset godina, naročito u EU, gde peleti beleže veliku primenu, naročito u sektoru proizvodnje toplotne energije. Pojedini podaci ukazuju na zaključak da se skoro 80% globalne proizvodnje peleta koristi upravo u Evropskoj Uniji [48]. Sa Slike 5-1, na kojoj su prikazane globalna proizvodnja i potrošnja peleta, uočava se da grejanje domaćinstava u EU predstavlja najrasprostranjeniji vid korišćenja pomenutog goriva. Homogen i pre svega konstantan oblik, veličina i kvalitet peleta, kao i mogućnost potpune automatizacije procesa sagorevanja, omogućili su njihovu primenu u širokom opsegu snaga postrojenja za proizvodnju toplotne energije, počevši od uređaja za grejanje male snage, pogodnih za korišćenje u domaćinstvima, preko većih sistema daljinskog grejanja, pa sve do velikih toplana ili potrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije. Podaci Evropskog saveta za pelete takođe potvrđuju da oko 45% ukupne potrošnje peleta u EU odlazi na proizvodnju toplotne energije u uređajima koji se koriste u domaćinstvima [49]. Navedeni uređaji obuhvataju peći na pelet, koje se koriste kao dodatni izvor toplote u domaćinstvima tj. za zagrevanje manjih prostora, kao i kotlove na pelet, koji se koriste kao osnovni izvor energije u sistemima malih i srednjih snaga za grejanje domaćinstava i stambenih/poslovnih objekata.



Slika 5-1 Globalna: a) proizvodnja i b) potrošnja peleta [48]

Standardizacija kvaliteta peleta kao posebne vrste biogoriva omogućila je njihovu popularizaciju i razvoj međunarodnog tržišta ovog energenta, tako da se danas peletima slobodno trguje i peleti koriste na lokacijama daleko od izvora osnovnih sirovina, što je takođe uočljivo ako se pogledaju dijagrami prikazani na Slici 5-1. Navedeno je posebno značajno ako se ima u vidu da su ranije pomenute karakteristike nepripremljene biomase predstavljale glavni razlog zašto se korišćenje biomase smatralo opravdanim samo ukoliko je lokacija njenog korišćenja bila udaljena do 50 km od lokacije porekla biomase. Kada su u pitanju mali potrošači, peleti se do mesta korišćenja isporučuju u vrećama (kada su u pitanju peći na pelet) ili se iz posebnih dostavnih kamiona-cisterni istovaruju u skladišta čiji je kapacitet dovoljan za skladištenje godišnje potrošnje

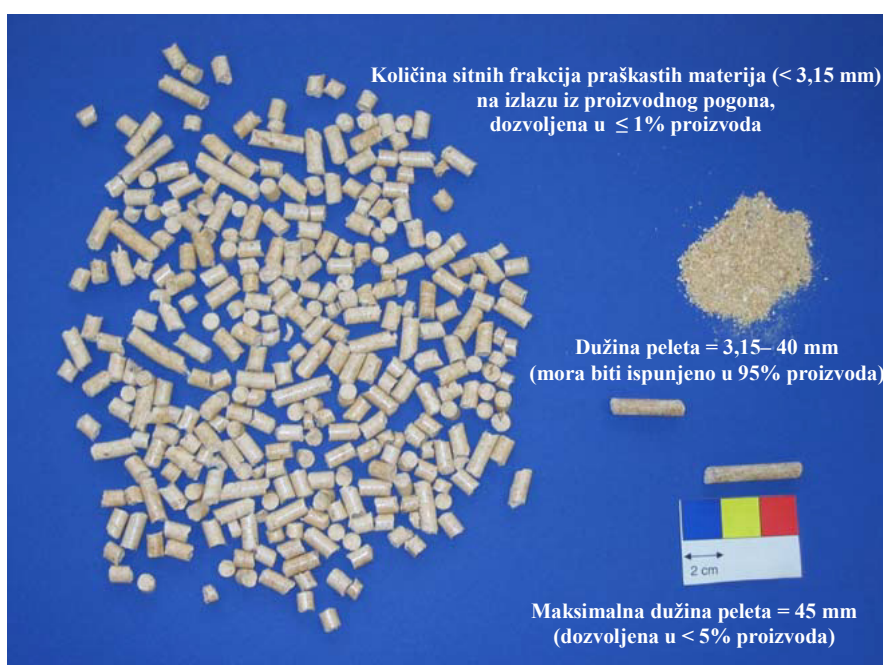
pomenutog goriva. Takođe je potrebno napomenuti da su za pelete koji se koriste u uređajima male snage, do 100 kWt, propisani najstrožiji zahtevi u pogledu kvaliteta goriva, prvenstveno kako bi se garantovala bezbednost i nesmetan rad odgovarajućih ložnih uređaja, ali i kako bi se smanjio uticaj štetnih emisija na okruženje, imajući u vidu da razmatrani uređaji uglavnom ne poseduju posebne sisteme za smanjenje emisija zagađujućih materija. Najfleksibilniji zahtevi u pogledu kvaliteta propisani su za pelete koji se koriste u velikim elektroenergetskim postrojenjima u kojima je primenjena tehnologija kosagorevanja peleta od biomase sa ugljem.

5.2 Zahtevi u pogledu kvaliteta peleta i sirovina korišćenih za njihovu proizvodnju

Peleti predstavljaju oblik posebno pripremljene komprimovane biomase, najčešće cilindričnog oblika i propisanih dimenzija. Za izradu peleta od biomase mogu se koristiti različiti oblici drvene biomase (lignocelulozne sirovine i energetske zasadi brzorastućih šuma, najčešće topole i vrbe) i poljoprivredne biomase (ostaci poljoprivredne proizvodnje, kao i cele biljke namenski gajenih energetskih brzorastućih zasada). Peleti se mogu proizvoditi i od ogranske frakcije komunalnog otpada, ali se to u praksi retko koristi.

Kako su rane faze korišćenja peleta bile povezane sa velikim oscilacijama u kvalitetu goriva koje su dovodile do značajnih problema u radu sistema za njihovo sagorevanje i nepoverenja korisnika, tokom vremena su usvojeni mnogobrojni standardi kako bi se precizno definisali zahtevi u pogledu kvaliteta krajnjeg proizvoda, kao i zahtevi u pogledu neophodnog kvaliteta korišćenih sirovina. Kako su mnoge evropske zemlje u cilju uređenja oblasti proizvodnje i korišćenja peleta razvile sopstvene standarde [50-53], koji su se u pojedinim aspektima značajno razlikovali jedni od drugih, CEN je započeo proces donošenja standarda za čvrsta biogoriva, pa i posebnih standarda za pelete, koji su postali vežeći standardi za sve članice Evropske Unije. Sledeći korak predstavljalo je preuzimanje pomenutih standarda od strane Međunarodne organizacije za standardizaciju, čime su evropski standardi iz oblasti biogoriva postali međunarodni ISO standardi.

Kada su u pitanju peleti od čvrste biomase i njihov kvalitet, od posebnog značaja je ranije pomenuti EN ISO 17225-1:2014, kojim su definisani osnovni zahtevi u pogledu čvrstih biogoriva, uključujući i zahteve koji se odnose na kvalitet peleta, zatim EN ISO 17225-2:2014, kojim se detaljnije definišu zahtevi u pogledu kvaliteta drvnih peleta, kao i EN ISO 17225-6:2014, kojim se definišu zahtevi u pogledu kvaliteta ne-drvnih peleta. Normativni zahtevi u pogledu karakteristika peleta u skladu sa EN ISO 17225-1:2014 obuhvataju, između ostalog, propisan sadržaj vlage, veličinu peleta / dimenzije, sadržaj pepela i nasipnu gustinu. Na Slici 5-2 prikazan je proizvod dobijen u skladu sa zahtevima pomenutog standarda.



Slika 5-2 Karakteristike drvnih peleta prečnika 8 mm, proizvedenih u skladu sa zahtevima relevantnog standarda [54]

Peleti proizvedeni od drvene biomase predstavljaju ubedljivo najpopularniji oblik peleta, prvenstveno usled najmanje problema koji se javljaju tokom njihovog sagorevanja. Pokazalo se da peleti od poljoprivredne biomase imaju lošije karakteristike usled visokog sadržaja N, S, Cl i K u korišćenoj sirovini, što dovodi do korozije i stvaranja naslaga na izmenjivačkim površinama uređaja za sagorevanje, kao i do emisija zagađujućih materija u okolinu (sumpornih i azotnih oksida, jedinjenja hlora). Pored toga, peleti od poljoprivredne biomase odlikuju se većim sadržajem pepela, kao i

niskom tačkom topljenja pepela, što dovodi do problematičnijeg sagorevanja goriva i većih emisija praškastih materija, posebno sitnih frakcija, PM₁₀, koje izuzetno negativno utiču na rad respiratornih organa ljudi [55]. Iz navedenog razloga korišćenje peleta od poljoprivredne biomase obično se preporučuje samo u većim energetske sistemima koji su opremljeni složenijom opremom za regulaciju procesa sagorevanja, kao i posebnim sistemima za smanjenje emisija zagađujućih materija u okolinu. Slična je situacija i sa peletima koji se mogu proizvoditi od različitih kombinacija drvne i poljoprivredne biomase u cilju prevazilaženja pomenutih nedostataka poljoprivredne biomase, sa dodavanjem neophodnih aditiva kako bi se smanjio problem zašljakivanja i poboljšalo sagorevanje goriva. Imajući u vidu predmet ove disertacije, koja se odnosi na korišćenje peći i kotlova male snage, pogodnih za zagrevanje domaćinstva, posebna pažnja posvećena je peletima od drvne biomase koji se po pravilu koriste u navedenom tipu ložnih uređaja. Podela prema snazi uređaja za sagorevanje peleta prikazana je u Tabeli 5-1, iz koje se vidi da se uređajima male snage koji se koriste u domaćinstvima mogu smatrati ložni uređaji čija toplotna snaga ne prelazi 100 kWt.

Tabela 5-1 Podela uređaja za sagorevanje peleta od biomase na osnovu nominalne snage

<i>Nominalna snaga uređaja</i>	<i>< 100 kWt</i>	<i>100 kWt – 1.000 kWt</i>	<i>> 1.000 kWt</i>
Sektor primene	domaćinstva, manji poslovni objekti, objekti iz sektora javne i komercijalne delatnosti	stambeni blokovi, veće poslovne zgrade, veći objekti javne namene, sistemi daljinskog grejanja	elektroenergetska postrojenja (kosagorevanje sa ugljem), kogenerativna postrojenja

U skladu sa literaturom [56], drvni peleti za ne-industrijsku upotrebu mogu se proizvoditi samo od sledećih sirovina: 1) deblo drveta, 2) hemijski netretirani drvni ostaci, 3) celo drvo bez korena, 4) drvni ostaci nastali tokom seče šuma, 5) kora drveta, 6) hemijski netretirano šumsko drvo ili drvo sa namenskih šumskih zasada, 7) nusproizvodi i drvni ostaci nastali u drvno-prerađivačkoj industriji i 8) korišćeno drvo (ali ne i otpadno drvo preostalo nakon rušenja objekata). Navedene grupe sirovina odnose se kako na drvenu masu poreklom od listopadnog i četinarskog drveća, tako i na

energetske zasade brzorastućih šuma. U skladu sa relevantnim standardom EN ISO 17225-2:2014, drvni peleti podjeljeni su na tri klase kvaliteta:

- klasu A1 kao najkvalitetniju,
- klasu A2 kao nešto manje kvalitetnu i
- klasu B kao najniži dozvoljeni kvalitet drvnih peleta.

Razlike između definisanih klasa kvaliteta odnose na: 1) poreko sirovine, 2) maksimalno dozvoljen sadržaj pepela, 3) donju toplotnu moć i 4) maksimalno dozvoljen sadržaj azota, sumpora i hlora.

Peleti klase A1, kao najkvalitetniji, namenjeni su za korišćenje u pećima za domaćinstva, za koje se zahteva najviši standard kvaliteta goriva. Drvni peleti klase A1 mogu se proizvoditi samo od debla drveta ili od hemijski netretiranih drvnih ostataka tj. od sirovina koje imaju nizak sadržaj pepela, azota, sumpora i hlora. Sirovine sa nešto višim sadržajem pepela i azota (takođe deblo drveta, celo drvo bez korena, drvni ostaci nastali tokom seče šuma, kora drveta, hemijski netretirani drvni ostaci) koriste se za proizvodnju klase A2 peleta, dok se za proizvodnju peleta klase B, namenjenih za korišćenje u većim energetskim postrojenjima snage preko 100 kWt, može koristiti hemijski netretirano šumsko drvo ili drvo sa namenskih šumskih zasada, nusproizvodi i drvni ostaci nastali u drvno-prerađivačkoj industriji i otpadno drvo (ali ne i otpadno drvo nastalo rušenjem objekata). Takođe, standardom je definisan i maksimalno dozvoljen sadržaj pojedinih teških metala u drvnim peletima, koji je isti za sve tri navedene klase kvaliteta. Proizvođač peleta je u obavezi da na deklaraciji proizvoda jasno definiše vrednosti parametara koje su predmet navedenog standarda, u skladu sa primerom prikazanim na Slici 5-3, čime se dokazuje da su predmetni peleti odgovarajuće klase kvaliteta.

Zahtevi u pogledu maksimalno dozvoljenih vrednosti pojedinih parametara peleta direktno se odnose i na sirovine koje se koriste za njihovu proizvodnju. Pored hemijskog sastava i maksimalno dozvoljenih vrednosti pojedinih elemenata, granulacija korišćene sirovine takođe se mora uskladiti sa zahtevom u pogledu dozvoljenih dimenzija peleta. Za proces proizvodnje peleta najpoželjnije je da sirovina bude što sitnija i što homogenijeg sastava, jer u slučaju da sirovina ima veću granulaciju od zahtevane, potrebno je pristupiti njenom usitnjavanju što zahteva utrošak dodatne energije i samim tim povećava troškove proizvodnog procesa i cenu krajnjeg proizvoda.

Šumska drvena sečka i sečka nastala tokom drvno-prerađivačkih procesa moraju se obavezno usitniti i samleti pre peletiranja. Drvna piljevina i drvna prašina nastala u procesima obrade drveta u okviru drvno-prerađivačke industrije predstavljaju sirovine koje se najčešće koriste za dobijanje peleta jer ne zahtevaju usitnjavanje pre peletiranja, mada to ne znači da ovakva sirovina takođe ne mora proći kroz određenu pripremu pre postupka peletiranja. Naprotiv, drvna piljevina i drvna prašina često se podvrgavaju procesu mlevenja kako bi se dobio homogeniji materijal od kog će se proizvoditi peleti. U Tabeli 5-2 prikazani su kriterijumi na osnovu kojih se procenjuje podobnost sirovine za peletiranje, kao i uticaj pojedinih parametara na kvalitet peleta. Iz prikazanih podataka može se videti da maksimalno dozvoljena veličina komada korišćene sirovine iznosi 4 mm, tako da se sve sirovine čije dimenzije prevazilaze definisani maksimum moraju pre peletiranja usitniti.

Wood pellet	Producer	EAA Biofuels, Box 1603, FI-40101 Jyväskylä Tel. +358 20 722 2550 E-mail: info@eaabiofuels.com
	Origin and source	1.2.1.2 Wood without bark (sawdust)
	Traded form	Pellet
	Country and location	Jyväskylä, Finland
	Normative (EN 14961-2) Class A1	
	Dimensions (mm) Diameter (D) and length (L)	D08 (8 mm ± 1mm, and 3,15 ≤ L ≤ 40 (95%), all ≤ 45 mm)
	Moisture (w-% as received)	M10 (< 10 w-%)
	Ash (w-% dry basis)	A0.7 (< 0,7 w-%)
	Mechanical durability	DU97.5
	Fines (w-% < 3.15 mm)	F1.0 (1 w-% at factory gate when loading)
	Additives (w-% of pressing mass)	< 1 w-% (starch)
	Net calorific value as received	Q4.7 [kWh/kg]
	Bulk density (kg/m³)	600 (≥ 600 kg/m ³)
	Nitrogen (w-% of dry)	N0.3 (< 0,3 w-%)
	Sulphur (w-% of dry)	S0.03 (< 0,03 w-%)
Chlorine (w-% of dry)	Cl0.02 (< 0,02 w-%)	
Arsenic (mg/kg dry)	≤ 1 mg/kg	
Cadmium (mg/kg dry)	< 0,5 mg/kg	
Chromium, (mg/kg dry)	< 10 mg/kg	
Copper, (mg/kg dry)	< 10 mg/kg	
Lead, (mg/kg dry)	≤ 10 mg/kg	
Nickel (mg/kg dry)	< 10 mg/kg	
Mercury (mg/kg dry)	< 0,1 mg/kg	
Zinc (mg/kg dry)	< 100 w-%	

Slika 5-3 Primer deklaracije za proizvedene pelete [57]

Tabela 5-2 Pregled evaluacionih kriterijuma sa aspekta proizvodnje peleta [54], [55]

Parametar	Jedinica**	Gr. vred.	Značaj*	Uticaj
Dužina	mm	< 40	P	Način transporta i tehnologija sagorevanja; vreme sagorevanja
Nasipna gusina	kg/m ³	> 600	P	Energetska gustina; troškovi transporta i skladištenja
Komadna gustina	kg/dm ³	> 1,12	P	Vreme sagorevanja; nasipna gustina
Mehanička čvrstoća	% m/m (s.m.)	> 97,5	P	Ponašanje tokom transporta; emisija praškastih materija; gubici u transportu
Prirodne vezivne materije	% m/m (s.m.)	što viši	S/P	Čvrstoća peleta; učinak i ekonomski parametri peletiranja
Vlaga	% m/m (s.m.)	8 – 12 10	S P	Adekvatnost sirovine za peletiranje; čvrstoća peleta; sadržaj vlage preko 15% predstavlja opasnost od biološke razgradnje materijala
Pepeo	% m/m (s.m.)	0,7	S/P	Veća količina pepela zahteva češće pražnjenje nakupljenog pepela u ložnom uređaju; povećan rizik od zašljakivanja ložišta
Gornja toplotna moć	MJ/kg (s.m.)	što viša	S/P	Dimenzije postrojenja i regulacija rada, ekonomski parametri rada postrojenja; zavisi isključivo od korišćene sirovine i ne može se korigovati
Donja toplotna moć	MJ/kg (v.m.)	što viša	S/P	Dimenzije postrojenja i regulacija rada; energetska gustina
Energetska gustina	MJ/m ³	što viša	P	Dimenzije postrojenja i regulacija rada; kapacitet transportnih i skladišnih sistema
Ugljenik, vodonik i kiseonik	% m/m (s.m.)		S/P	Gornja i donja toplotna moć; zavise isključivo od korišćene sirovine i ne mogu se korigovati
Volatili	% m/m (s.m.)		S/P	Termička razgradnja; ponašanje pri sagorevanju; zavisi isključivo od korišćene sirovine i ne može se korigovati
Azot	% m/m (s.m.)	0,3	S/P	Indikator upotrebe zabranjenih materija; povećane emisije NOx
Sumpor	% m/m (s.m.)	0,03	S/P	Indikator upotrebe zabranjenih materija; povećan rizik od korozije i emisija SOx
Hlor	% m/m (s.m.)	0,02	S/P	Indikator upotrebe zabranjenih materija; povećan rizik od korozije i emisija HCl, Cl ₂ , dioksina i furana
Materije koje utiču na obrazovanje pepela	% m/m (s.m.)		S/P	Od značaja su Ca, Mg, Si, K i P; uticaj na topivost pepela i posredno na pouzdanost rada sistema na pelet; Ca i Mg povećavaju, dok K snižava temperaturu topljenja pepela; K utiče na obrazovanje aerosoli; povećane koncentracije Si i P u kombinaciji sa K mogu dovesti do zašljakivanja
Teški metali	% m/m (s.m.)	što niži	S/P	Kvalitet pepela; mogućnost korišćenja pepela; emisije sitnih frakcija praškastih materija; regulatorni zahtevi
Mineralne zagađujuće materije	% m/m (s.m.)	što niži	S	Snižavaju donju toplotnu moć, povećavaju sadržaj pepela i habanje mlina u postojenju za proizvodnju peleta
Temperatura toplj. pepela	°C		S/P	Niske temperature dovode do povećane opasnosti od zašljakivanja i formiranja naslaga na unutrašnjim površinama uređaja za sagorevanje
Veličina čestica sirovine	mm	< 4	S	Ključno za proces peletiranja; navedena vrednost približno odgovara veličini komada drvene strugotine; sirovine većih dimenzija moraju proći proces mlevenja.

* S – sirovina, P – pelet; ** s.m. – suva materija, v.m. – vlažna materija

Kao što je prikazano u Tabeli 5-2, pored granulacije, značajne karakteristike sirovina koje se koriste za proizvodnju peleta obuhvataju i sadržaj vlage, pepela, aditiva, C, H, N, O, S, Cl i isparljivih materija, sadržaj elemenata koji utiču na formiranje pepela (Ca, Mg, K, Si i P), teških metala i mineralnih materija. Parametri koji se odnose na dimenzije proizvoda, gustinu i nasipnu gustinu, kao i mehaničku čvrstoću, značajni su za same pelete. Iako se za proizvodnju peleta generalno može koristiti i listopadno i četinarsko drvo, upotreba četinarskog drveta i ostataka obrade četinarskog drveta danas predstavlja najčešći slučaj u praksi, prvenstveno zbog lošijeg kvaliteta listopadnog drveta koji je prouzrokovan manjim sadržajem lignina u poređenju sa četinarskim drvetom, pa samim tim i manjom mehaničkom čvrstoćom. Podaci iz literature ukazuju na zaključak da su peleti od četinarskog drveta bolji izbor kada su u pitanju peći namenjene za zagrevanje domaćinstva [58].

Manja mehanička čvrstoća proizvedenih peleta utiče na probleme pri dovođenju goriva u ložište, intenzivnije zaprljanje površina uređaja za sagorevanje, smanjenje efikasnosti sagorevanja i povećanje emisija štetnih materija. Pored toga, proizvodnja peleta klase A1 zahteva korišćenje sirovina sa maksimalnim sadržajem pepela od 0,7% m/m. Prosečan sadržaj pepela u pojedinim vrstama drvene biomase iznosi:

- četinarsko drvo $A = 0,4-0,8\%$ m/m (svedeno na suhu materiju)
- listopadno drvo $A = 1,0-1,3\%$ m/m (svedeno na suhu materiju)
- kora drveta $A = 2,0-5,0\%$ m/m (svedeno na suhu materiju)

Iz navedenog se može zaključiti da je pelete klase A1 nemoguće dobiti od listopadnog drveta usled prevelikog sadržaja pepela. Listopadno drvo može se koristiti za dobijanje peleta klase A2 i B. Eventualno mešanje četinarskog i listopadnog drveta u cilju dobijanja sirovine boljeg kvaliteta je moguće, ali treba imati u vidu da se listopadno drvo zbog svoje veće gustine mnogo teže obrađuje, što zahteva utrošak veće količine energije potrebne za mlevenje drvene mase koja će se koristiti za peletiranje. Pored toga, mora se voditi računa i o ispunjavanju zahteva standarda u pogledu mehaničke čvrstoće proizvedenih peleta, s obzirom na prethodno pomenutu činjenicu koja se odnosi na manju mehaničku čvrstoću listopadnog drveta i generalno manju pogodnost listopadnog drveta za peletiranje. Kora drveta takođe sadrži suviše visok sadržaj pepela da bi bila pogodna za proizvodnju peleta klase A1. Njeno korišćenje

standardnom je dozvoljeno za proizvodnju peleta klase A2, ali ukoliko se ispune zahtevi u pogledu maksimalnog sadržaja pepela od 1,5% m/m.

Na osnovu prikazanih podataka zaključuje se da se najkvalitetniji drveni peleti dobijaju uglavnom od četinarskog drveta tj. od ostataka drvno-prerađivačke industrije (piljevina, strugotina, drvena prašina) u kojoj se koristi četinarsko drvo, ali bez kore. Kao što se može videti iz Tabele 5-2, dozvoljeni sadržaj vlage u sirovini za dobijanje peleta kreće se u opsegu 8-12%, računato na suhu materiju, kako bi se dobili peleti sa sadržajem vlage od maksimalno 10%. Sadržaj vlage ispod 8% dovodi do problema u pogledu izrade peleta jer visoke sile trenja između materijala i prese u kojoj se izrađuju peleti onemogućavaju sabijanje materijala, pa samim tim i izradu peleta. Sa druge strane, sadržaj vlage preko 12% negativno utiče na stabilnost materijala i proizvedenih peleta, kao i na ispunjavanje zahteva u pogledu maksimalno dozvoljenog sadržaja vlage u krajnjem proizvodu. Drvna sečka uglavnom zahteva sušenje pre procesa peletiranja, dok se u slučaju drvene strugotine i drvene prašine nastale tokom drvno-prerađivačkih aktivnosti sušenje najčešće može izbeći.

Sadržaj C, H, N, O, S, Cl i isparivih materija u sirovinama koje se koriste za proizvodnju peleta nije presudan pri definisanju pogodnosti materijala za peletiranje, ali utiče na toplotnu moć materijala, dok sadržaj isparivih materija (volatila) utiče i na proces sagorevanja peleta. Ugljenik, vodonik i kiseonik generalno predstavljaju glavne komponente biomase jer su od njih formirani celulozna, hemicelulozna i ligninska komponenta materijala, pri čemu ugljenik i vodonik predstavljaju glavne elemente koji doprinose energetske vrednosti materijala i čijim sagorevanjem nastaju glavni produkti sagoravanja CO, CO₂ i H₂O. Sadržaj ugljenika i vodonika viši je u drvnj nego u poljoprivrednoj biomasi, usled čega su i toplotne moći drvene biomase veće od toplotne moći poljoprivredne biomase. Sadržaj gorivih isparivih materija u drvnj biomasi varira u opsegu od 70-86% [55]. Ovako visok sadržaj volatila dovodi do veoma brzog isparavanja goriva u procesu sagorevanja, dok ostatak suve materije relativno sporo dogoreva u nastavku procesa sagorevanja. Navedeno upućuje na zaključak da je uticaj volatila na proces termičke degradacije razmatrane vrste goriva i njegovo sagorevanje veoma značajan.

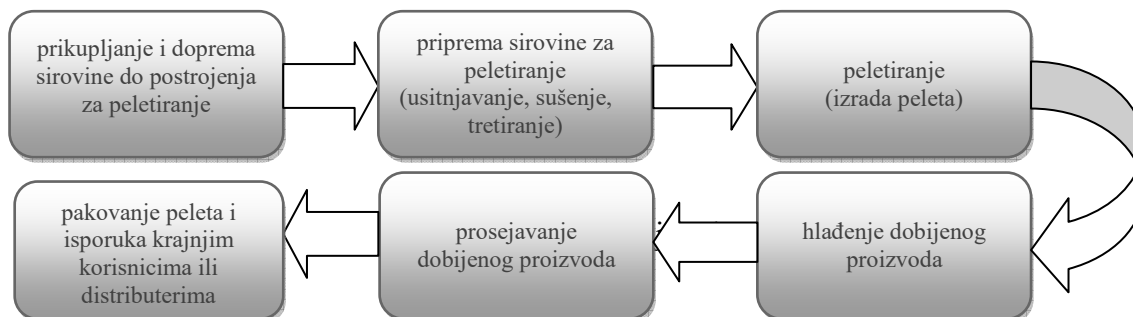
Maksimalno dozvoljen sadržaj N, S i Cl u peletima i sirovinama koje se koriste za proizvodnju peleta takođe je definisan standardom. Navedeni elementi su lako

isparljivi i prilikom sagorevanja prelaze u dimni gas, dovodeći do problema sa aspekta emisije štetnih materija (SO_x , NO_x , N_2O , HCl, dioksina, furana i aerosoli). Sadržaj teških metala ograničen je iz razloga uticaja na karakteristike pepela nastalog procesom sagorevanja i emisije praškastih materija. Ograničavanje maksimalno dozvoljenog sadržaja teških metala posebno je značajno za uređaje za sagorevanje peleta male snage koji nisu opremljeni elektrofiltrima ili sličnim uređajima kojima bi se omogućila kontrola emisija praškastih materija, kao i usled činjenice da se pepeo nastao sagorevanjem biomase u seoskim domaćinstvima često koristi i kao đubrivo u baštama. Povećan sadržaj teških metala u peletima može se javiti kao posledica korišćenja sirovina u kojima je povećan sadržaj teških metala, kao u slučaju hemijski tretiranog otpadnog drveta, pa iz navedenog razloga upotreba ovih sirovina nije dozvoljena za proizvodnju peleta visoke klase kvaliteta. Međutim, čak i kada u korišćenim sirovinama nisu registrovane povećane koncentracije teških metala, do njihove akumulacije može doći tokom procesa proizvodnje peleta (u fazi sušenja sirovine), pa se o tome mora voditi računa. Generalno gledano, strugotina i piljevina nastale u procesu prerade drveta predstavljaju najčešće korišćene sirovine za dobijanje drvnih peleta. Ostali oblici drvnih materijala čije je korišćenje za proizvodnju drvnih peleta dozvoljeno standardom zahtevaju prethodnu pripremu koja podrazumeva usitnjavanje, sušenje, mlevenje, odvajanje kore, odvajanje primesa i slično, u zavisnosti od karakteristika sirovine i željenih karakteristika krajnjeg proizvoda. Zahtevi u pogledu dimenzije peleta (prečnika i dužine) postižu se adekvatnom tehnologijom njihove izrade o kojoj će više reči biti u nastavku.

5.3 Tehnologija proizvodnje drvnih peleta

Tehnologija proizvodnje peleta može se smatrati relativno jednostavnom i obuhvata nekoliko glavnih koraka, prikazanih na Slici 5-4: skupljanje i transport sirovine do postrojenja za proizvodnju peleta, priprema sirovine za proces peletiranja, izrada samih peleta, kao i tretman dobijenog proizvoda i njegovo pakovanje i isporuka krajnjim korisnicima ili distributerima. U skladu sa ranije navedenim podacima, kao i temom ove disertacije, u nastavku će biti detaljnije razmatrana tehnologija proizvodnje

drvnih peleta, kao glavne vrste peleta koja se predlaže za korišćenje u uređajima snage do 100 kWt tj. uređajima namenjenim za korišćenje u domaćinstvima.



Slika 5-4 Glavni koraci u tehnologiji proizvodnje peleta

Sirovine za proizvodnju peleta prikupljaju se na mestu nastanka, tako da, u slučaju proizvodnje peleta klase A1, gde se najčešće koriste strugotina, piljevina i drvena prašina, navedena mesta predstavljaju lokacije drvno-prerađivačkih aktivnosti u okviru kojih pomenute sirovine nastaju. Kako su u navedenom slučaju u pitanju centralizovana postrojenja, prikupljanje sirovine je ovde najjednostavnije, jer se sirovina generiše u okviru definisanog prostora i relativno kontrolisanog tehnološkog procesa. Za proizvodnju peleta klase A1 mogu se koristiti i debla stabala, dok je za proizvodnju peleta klase A2 dozvoljeno korišćenje i šumskih ostataka, čije prikupljanje predstavlja logistički zahtevniji i organizovaniji pristup. Nakon dopreme sirovina na lokaciju postrojenja za peletiranje, potrebno je obezbediti adekvatan prijem i skladištenje, kako bi se sprečila njihova kontaminacija, kao i zaštita od atmosferskih padavina koje mogu povećati vlažnost materijala. Koraci koji se sprovode u fazi pripreme sirovine zavise od vrste sirovine koja se koristi za izradu peleta i generalno obuhvataju usitnjavanje, sušenje i po potrebi tretiranje sirovine. Na Slici 5-5 prikazan je tok tehnološkog procesa proizvodnje peleta.

Usitnjavanje sirovine omogućava smanjenje dimenzija korišćene sirovine na veličinu zahtevanu tehnologijom proizvodnje peleta. Kao što je navedeno na kraju Tabele 5-2, ciljna veličina komadića biomase koja se zahteva nakon faze grubog mlevenja tj. usitnjavanja za potrebe izrade peleta klase A1, iznosi 4 mm, što odgovara veličini drvne piljevine. Za potrebe proizvodnje peleta većih prečnika, dozvoljena su

izvesna odstupanja od navedene vrednosti. Potrebno je takođe imati u vidu da proizvodnja peleta klase A1 obavezno zahteva odstranjivanje kore drveta, u slučaju korišćenja drvnih debala, koja usled visokog sadržaja pepela ne može biti korišćena kao sirovina. Odstranjena kora drveta može se, na primer, koristiti kao gorivo za dobijanje toplotne energije kojom se vrši sušenje usitnjene sirovine, kao sledećeg u nizu koraka koji čine tehnološki proces proizvodnje peleta. Kora drveta mora se ukloniti i kada je u pitanju šumska drvena sečka koja se koristi za proizvodnju peleta klase A1. Uklanjanje kore predstavlja korak koji prethodi usitnjavanju sirovine, tj. prvi korak u okviru pripreme sirovine za peletiranje.

Usitnjavanje sirovine i dobijanje materijala odgovarajuće granulacije i strukture predstavlja veoma važan korak u proizvodnji peleta visoke klase kvaliteta, jer suviše veliki komadi sirovine mogu dovesti do mehaničkih problema prilikom procesa izrade peleta u presama za peletiranje, dok suviše sitna granulacija sirovine može dovesti do degradacije kvaliteta proizvedenih peleta usled problema sa vezivnim karakteristikama korišćenog materijala. Sitnija i homogenija struktura proizvedenih peleta obezbeđuje njihovo potpunije sagorevanje i bolju konverziju hemijske energije goriva u toplotnu energiju, tako da je uvek bolje težiti što sitnijim komadima korišćene sirovine. Sa druge strane, usitnjavanje sirovine zahteva utrošak energije, koja je tim veća što je sitnija granulacija materijala koja se želi postići. Iz tog razloga potrebno je naći optimalno rešenje koje u pravoj meri zadovoljava sve pomenute zahteve. Usitnjavanje materijala vrši se u mlinovima čekićarima kojima se ostvaruje odgovarajuća granulacija sirovine, ali postiže i njena homogenizacija. Drvna piljevina i drvna prašina se često, iako bez potrebe za usitnjavanjem sa aspekta veličine, propuštaju kroz mlin čekićar kako bi se dobio homogeniji sastav materijala od koga će se proizvoditi peleti. Ukoliko se za proizvodnju peleta koriste debla ili cepanice većih dimenzija, pre propuštanja sirovine kroz mlin čekićar vrši se njihovo grubo sečenje u odgovarajućim uređajima.

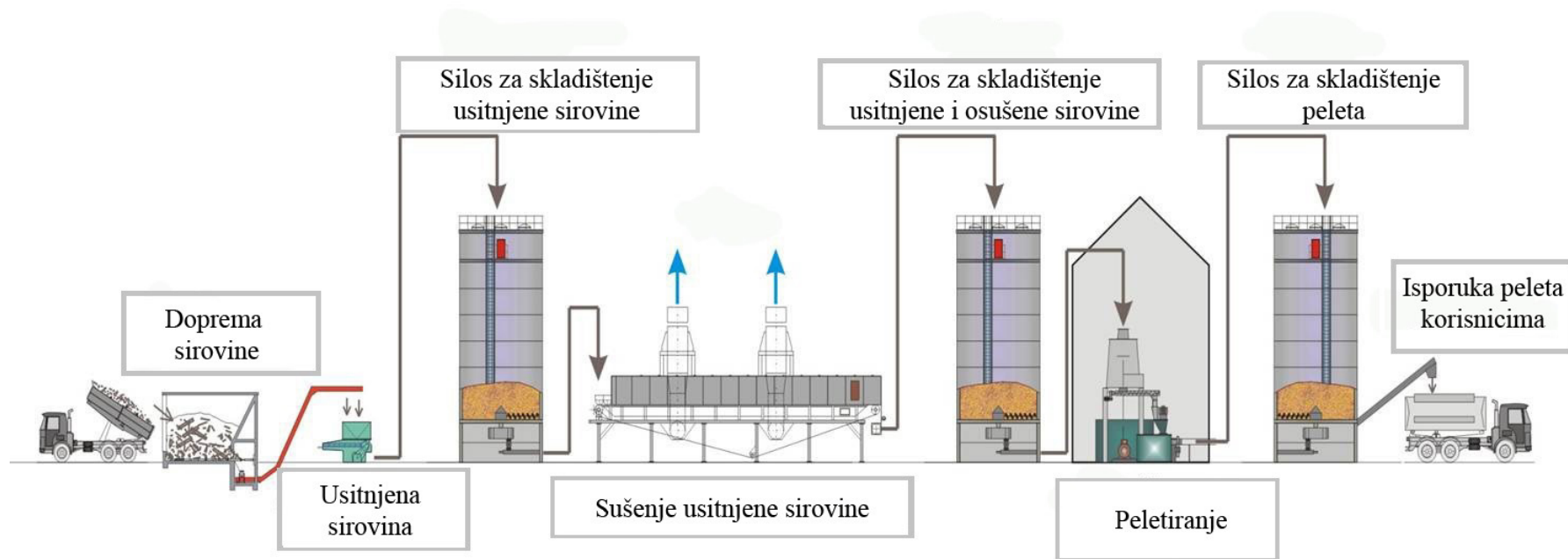
Sušenje usitnjene sirovine predstavlja sledeći korak koji se sprovodi u procesu proizvodnje peleta. Sušenje predstavlja energetske najzahtevniji korak u razmatranom procesu, kojim se sadržaj vlage u materijalu mora svesti na maksimalno 10%, koliko se zahteva standardom za pelete sve tri klase kvaliteta. Pojedine studije ukazuju na podatak da je za sušenje potrebno čak 70% ukupne količine energije koja se troši u procesu proizvodnje peleta [59]. Nizak sadržaj vlage ključan je za adekvatno sagorevanje

proizvedenih peleta i njihove termičke karakteristike. Pored toga, vlaga u sirovini utiče i na sam proces peletiranja. Ukoliko dopremljena sirovina sadrži prihvatljivo malu količinu vlage, kao što može biti slučaj kada je u pitanju strugotina ili drvena prašina, onda se korak sušenja može izbeći. Navedeno predstavlja i jedan od glavnih razloga zašto su pomenute sirovine najpoželjnije kada je u pitanju proizvodnja drvnih peleta.

Sušenje sirovine može se sprovesti na dva načina:

- procesom prirodnog sušenja,
- procesom prinudnog sušenja u sušarama.

Kako proces prirodnog sušenja, koji podrazumeva sušenje materijala na ambijentalnom vazduhu, zahteva dosta vremena kada su u pitanju drvene sirovine, prinudno sušenje predstavlja uobičajenu praksu koja se koristi kako bi se sadržaj vlage u vlažnim sirovinama sveo na dozvoljeni nivo. Prinudno sušenje materijala odvija se u sušarama u kojima se kao medijum za sušenje mogu koristiti vodena para, topla voda ili termo ulje, zagrejani na temperaturu od 90-110°C, ukoliko je u pitanju sporiji režim sušenja, ili na temperature i do 600°C, ukoliko je u pitanju intenzivniji režim sušenja [54]. Konstrukcija i tip sušare, kao u medijum za sušenje, prilagođeni su materijalu koji se suši. Proces sušenja tj. obezbeđenje visokotemperaturnog medijuma za sušenje, zahteva značajnu količinu energije koja se do sada najčešće generisala sagorevanjem fosilnog goriva, ali se sve češće za navedene potrebe koristi upravo dopremljena biomasa. Već je pomenuto da se kora odstranjena u postupku pripreme sirovine za proizvodnju peleta klase A1 može iskoristiti kao energent u fazi sušenja sirovine pre peletiranja.



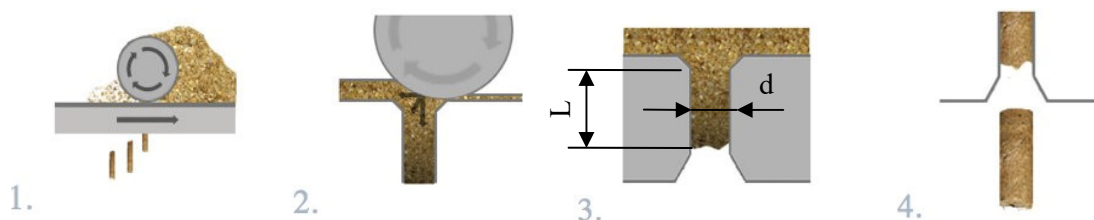
Slika 5-5 Tehnološki proces proizvodnje drvnih peleta

Redosled operacija sušenja i usitnjavanja zavisi od vrste sirovine, zahtevane pripreme i analize sa aspekta utroška energije potrebne za sprovođenje razmatranih koraka. Iako sušenje sirovine sitnije granulacije omogućava da se proces sušenja odvija brže i uz manji utrošak energije, mlevenje prekomerno vlažne sirovine sa druge strane takođe može zahtevati značajne količine energije i tako dovesti do nepovoljnijeg energetskog bilansa procesa pripreme sirovine. Zbog toga je za svaku sirovinu potrebno sprovesti odgovarajuću analizu i definisati optimalan redosled pomenutih operacija. U idealnom slučaju, kada se za proizvodnju peleta koristi sirovina koja sadrži zadovoljavajuće mali sadržaj vlage i adekvatnu granulaciju, proces proizvodnje peleta svodi se samo na peletiranje i hlađenje dobijenog proizvoda, što predstavlja ogromnu uštedu energije, koja se direktno odražava na troškove proizvodnje i cenu krajnjeg proizvoda.

Kao završni korak u fazi pripreme sirovine za peletiranje sprovodi se tretiranje tj. kondicioniranje usitnjene i osušene sirovine neposredno pre peletiranja. Kondicioniranje podrazumeva tretiranje pripremljenog materijala vodenom parom u cilju ujednačavanja karakteristika i dodatnog vezivanja materijala. Navedeno se ostvaruje stvaranjem tankog filma na površini materijala koji nastane u postupku tretiranja materijala. Vodena para takođe omogućava i regulaciju temperature materijala neposredno pre peletiranja. Potrebno je imati u vidu da se u koraku kondicioniranja, sadržaj vlage u materijalu poveća za oko 2%, tako da je u fazi sušenja, koje prethodi kondicioniranju, potrebno predvideti da se sadržaj vlage u materijalu svede na 2% niže od optimalne vrednosti, kako bi se u fazi peletiranja obrađivao materijal koji ima potrebni tj. optimalan nivo vlažnosti. Kondicioniranje sirovine može se, osim vodenom parom, vršiti i korišćenjem bioloških aditiva.

Peletiranje pripremljene sirovine vrši se u presama za peletiranje. Postupak peletiranja podrazumeva sabijanje samlevenog i osušenog materijala njegovim propuštanjem kroz odgovarajuću matricu na kojoj se nalazi veliki broj kružnih otvora odgovarajućeg prečnika tj. prečnika koji odgovara prečniku peleta koji se proizvode (6 mm ili 8 mm, u skladu sa zahtevima standarda). Materijal se najpre u sloju određene debljine raspoređuje po površini matrice, da bi preko njega potom prelazili valjci koji, pritiskajući materijal, kroz kružne matične otvore istiskuju pelete od biomase karakterističnog cilindričnog oblika. Nakon toga, na matricu se nanosi novi sloj

materijala kojim se, u identičnom postupku, istiskuje i materijal koji je u prethodnom istiskivanju ostao u cilindričnim otvorima matrice. Zahtevana dužina peleta, u dozvoljenom opsegu od 3,15 mm do 40 mm obezbeđuje se pomoću noževa kojima se istiskivani, peletirani materijal preseca na odgovarajućoj dužini. Na Slici 5-6 prikazan je postupak peletiranja materijala pomoću prese za peletiranje i valjaka za istiskivanje peleta. U prvom koraku prikazano je rotaciono kretanje valjka po površini prese za peletiranje i pritiskanje sloja sirovine koji se nalazi na površini prese. U drugom koraku prikazano je istiskivanje pritisnutog materijala kroz cilindrične otvore na presi, pri čemu će, u skladu sa ilustrovanim korakom broj tri, prečnik otvora na presi, odgovarati prečniku proizvedenog peleta. U četvrtom koraku prikazan je gotov proizvod čija se dužina reguliše presecanjem istiskivanog materijala za to predviđenim noževima.



Slika 5-6 Peletiranje drvnog materijala pomoću matrice prese za peletiranje i valjaka za istiskivanje peletiranog materijala

Pritisna sila kojom valjci deluju na sloj materijala koji je raspoređen po površini matrice primorava materijal da prolazi kroz cilindrične otvore na matrici. Sa porastom sile pritiska raste i sila trenja između biljnih vlakana u strukturi korišćene biomase, što dovodi do porasta temperature i dalje do omekšavanja ligninskog vezivnog materijala koji povezuje celulozna vlakna pripremljene sirovine. Temperatura na kojoj dolazi do pomenutog omekšavanja lignina može se podesiti odgovarajućim konstruktivnim rešenjem matrice. Otpor koji matrica sa druge strane pruža kretanju istiskivanog materijala, dovodi do porasta pritiska i temperature u samom istiskivanom materijalu. Krajnji rezultat je omekšani materijal koji omogućava dobijanje peleta zadovoljavajućeg kvaliteta. Kada su dimenzije otvora u matrici veće nego što bi trebalo, materijal lako prolazi kroz pomenute otvore, tako da pritisak i temperatura materijala nisu dovoljni da omekšaju lignin u materijalu. Navedeno kao krajnji rezultat ima

dobijanje peleta lošijeg kvaliteta. Sa druge strane, kada su otvori u matrici suviše mali, pritisak i temperatura istiskivanog materijala se naglo povećavaju, što dovodi do usijanja materijala i opet do proizvodnje peleta lošijeg kvaliteta.

Kako bi se poboljšalo vezivanje vlakana u strukturi omekšane biomase, pre početka faze peletiranja pripremljenoj sirovini mogu se dodati odgovarajuća prirodna vezivna sredstva tj. aditivi. Neophodnost korišćenja aditiva zavisi od vrste korišćene biomase, tačnije od odnosa udela celuloze, hemiceluloze, lignina i neorganiskog materijala (pepela) u strukturi biomase. Aditivi se retko koriste u proizvodnji drvnih peleta jer poskupljuju proizvodni proces i njihova upotreba često nije neophodna.

Najvažnije parametre u procesu peletiranja predstavljaju: 1) odnos prečnika otvora na matrici i dužine kanala matrice, 2) broj otvora na matrici (definiše produktivnost prese za peletiranje) i 3) prečnik otvora na matrici, koji je definisan prečnikom peleta koji se proizvode (6 mm ili 8 mm). Odnos prečnika otvora na matrici i dužine kanala matrice, pored materijala koji se podvrgava peletiranju, definiše silu trenja koja se javlja unutar kanala matrice kroz koji se istiskuje peletirani materijal, što, kao što je ranije pomenuto, utiče na omekšavanje lignina u materijalu i na kvalitet proizvedenih peleta. Kako je prečnik otvora matrice definisan prečnikom peleta koji se zahteva standardom, jedini parametar na koji se može uticati kako bi se dobili peleti potrebnih karakteristika sa aspekta čvrstoće, gustine i sličnog, predstavlja dužina kanala kroz koji se istiskuje peletirani materijal. Navedena dužina kanala za istiskivanje materijala mora se definisati na osnovu sirovine koja će se koristiti za peletiranje, jer materijali koji se karakterišu manjom vezivnom čvrstoćom zahtevaju duže kanale za istiskivanje kako bi se postiglo odgovarajuće povećanje temperature koje će dovesti do omekšavanja lignina (temperatura u kanalima raste sa porastom dužine kanala). Zbog navedene činjenice potrebno je imati u vidu da se optimizacija rada prese za peletiranje vrši za tačno određenu sirovinu koja će se peletirati i da je njeno naknadno prilagođavanje za rad sa nekom drugom sirovinom izuzetno složeno.

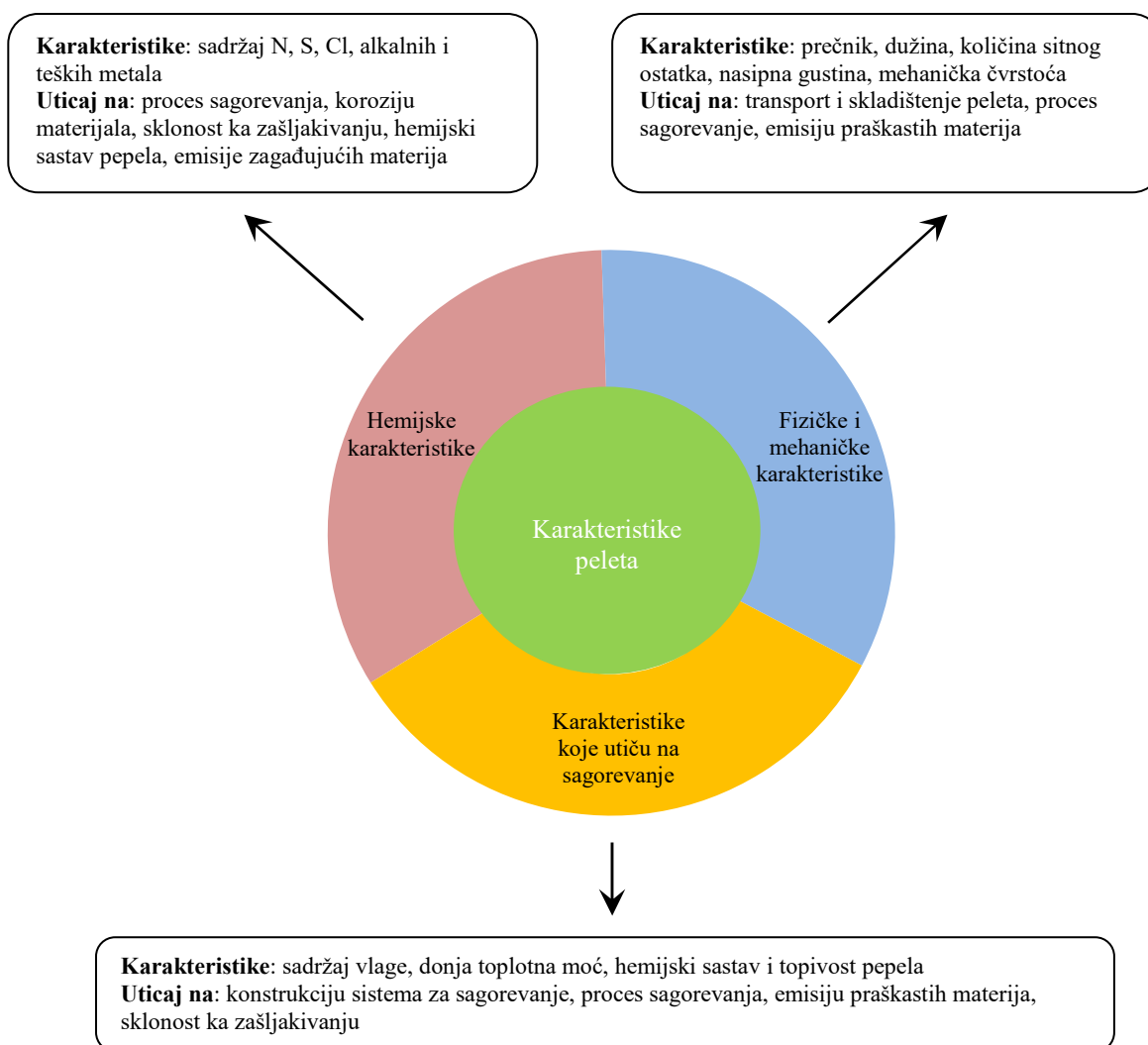
Nakon proizvodnje peleta potrebno je izvršiti njihovo hlađenje i prosejavanje. Peleti proizvedeni u opisanom postupku peletiranja su topli i meki, što predstavlja posledicu omekšanog lignina u strukturi materijala. Hlađenjem peleta postiže se snižavanje visoke temperature dobijenih proizvoda, koja varira u opsegu 80-130°C [54] i predstavlja posledicu kondicioniranja sirovine vodenom parom, ali i rezultat sila trenja

koje se javljaju u postupku istiskivanja materijala kroz otvore matrice prese za peletiranje. Hlađenjem peleta, koje se vrši strujom hladnog vazduha, obezbeđuje se stabilizacija i ponovno stvrđivanje omekšanog lignina u materijalu peleta, čime se postižu potrebna mehanička svojstva (mehanička čvrstoća) krajnjeg proizvoda koja se zahtevaju standardom. Pored toga, hlađenje proizvedenih peleta takođe omogućava i uklanjanje vlage oslobođene u postupku sabijanja i istiskivanja materijala kroz otvore matrice prese za peletiranje.

Nakon hlađenja peleta neophodno je sprovesti prosejavanje dobijenog proizvoda kako bi se omogućilo uklanjanje praškastih materija tj. sitnog ostatka nastalog u procesu proizvodnje peleta. Sitni ostatak, nastao u fazama mlevenja i sušenja sirovine, hlađenja peletiranog proizvoda i pre pakovanja proizvoda za isporuku korisniku, izdvaja se od ostatka proizvoda korišćenjem vibracionog sita. Izdvojeni sitni ostatak vraća se u proizvodni proces kako bi se smanjili gubici materijala i povećao stepen konverzije sirovine u krajnji proizvod. Maksimalna dozvoljena količina sitnog ostatka u finalnom proizvodu takođe je definisana standardom EN ISO 17225-2:2014 i to u iznosu od maksimalno 1% m/m (računato na radnu masu) na izlazu krajnjeg proizvoda iz proizvodnog pogona. Dalja manipulacija peletima u procesu transporta i isporuke krajnjem potrošaču mora se vršiti sa velikom pažnjom, kako se nepažljivim rukovanjem ne bi prouzrokovalo lomljenje peleta i njihovo usitnjavanje.

Karakteristike proizvedenih peleta se nakon završenog procesa proizvodnje moraju prekontrolisati kako bi se potvrdili parametri koji će biti naznačeni na deklaraciji i korisnicima garantovao željeni kvalitet proizvoda. Karakteristike proizvedenog goriva dominantno utiču na proces sagorevanja, a samim tim i na zadovoljstvo krajnjeg korisnika. Na Slici 5-7 dat je sumarni prikaz uticaja različitih parametara peleta na različite aspekte njihovog korišćenja za potrebe proizvodnje energije. Fizičke i mehaničke karakteristike peleta, kao što su prečnik, dužina, nasipna gustina i slično, utiču na lakoću manipulacije gotovim materijalom i u slučaju usitnjavanja tokom transporta mogu povećati emisiju praškastih materijala. Hemijske karakteristike peleta utiču na proces sagorevanja i na sve prateće pojave koje su u vezi sa karakteristikama procesa sagorevanja: opasnost od zašljakivanja ložišta, hemijski sastav i topivost pepela, emisiju zagađujućih materija i slično. Konačno, ključne karakteristike koje utiču na konstrukciju uređaja za sagorevanja i sam proces sagorevanja u ložištu su toplotna moć,

sadržaj vlage, topivost pepela i hemijski sastav pepela. Iz navedenog razloga posebno je važno napomenuti da se svaki uređaj za sagorevanje peleta projektuje i izrađuje za tačno predviđeni kvalitet goriva, čime se obezbeđuje postizanje garantovanih radnih karakteristika ložnog uređaja. Svako korišćenje alternativnog goriva se neminovno odražava na energetske i ekološke performanse rada pomenutog uređaja [60].



Slika 5-7 Uticaj karakteristika peleta na njihovu manipulaciju i proces sagorevanja

Kako bi se na nivou cele Evropske Unije omogućilo lako prepoznavanje kvalitetnih proizvoda, obezbedila adekvatna primena usvojenih standarda i olakšala trgovina peletima, Evropski centar za pelete (European Pellet Council – EPC) je u saradnji sa Evropskim udruženjem za biomasu (European Biomass Association – AEBIOM) definisao sistem sertifikacije drvnih peleta namenjenih za proizvodnju

toplotne energije. Predloženi sistem, nazvan ENplus sistem sertifikacije, definiše tri klase kvaliteta peleta, ENplus-A1, ENplus-A2 i EN-B koje odgovaraju klasama kvaliteta definisanim u literaturi [61]. Sertifikacioni sistem ENplus oslanja se na sve evropske standarde usvojene iz oblasti drvnih peleta, tako da obezbeđuje kontinuitet u ispunjavanju zahteva zakonske regulative, omogućavajući krajnjem korisniku lakše prepoznavanje kvalitetnih, ali i manje kvalitetnih proizvoda. Osnovni cilj navedene sertifikacije jeste da ENplus znak postane prepoznatljiva oznaka kvaliteta proizvoda koja označava odgovarajući kvalitet peleta sa aspekta njihove proizvodnje, karakteristika, privremenog skladištenja i načina dostave krajnjim korisnicima. Proizvođač peleta koji je uspešno prošao proces sertifikacije ostvaruje pravo da koristi ENplus znak kako bi označavao i reklamirao svoj proizvod. Do sada je ENplus sistem sertifikacije usvojilo 37 zemalja sveta, uključujući i Republiku Srbiju [62].

5.4 Uređaji male snage za sagorevanje drvnih peleta

Povoljne karakteristike peleta kao visokokvalitetnog goriva garantovanog kvaliteta omogućile su značajne pogodnosti sa aspekta tehnoloških rešenja predviđenih za njihovo sagorevanje, naročito u poređenju sa konvencionalnim tehničkim rešenjima koja se primenjuju za sagorevanje čvrstih goriva. Uvođenje peleta omogućilo je automatizaciju procesa sagorevanja i primenu rešenja koja su do tada bila moguća samo u slučajevima kada je kao energent korišćeno tečno gorivo ili prirodni gas.

Imajući u vidu da sagorevanje peleta za potrebe grejanja domaćinstava predstavlja dominantan vid korišćenja peleta, postrojenja snage do 100 kWt u Evropi predstavljaju najvažniju ciljnu grupu za primenu peleta od biomase [63]. Iz razloga koji su već ranije pomenuti, u uređajima snage do 100 kWt savetuje se korišćenje peleta od drvene biomase [55].

Podela uređaja male snage za sagorevanje peleta od biomase, koji predstavljaju predmet ove doktorske disertacije, može se izvršiti na osnovu tri kriterijuma:

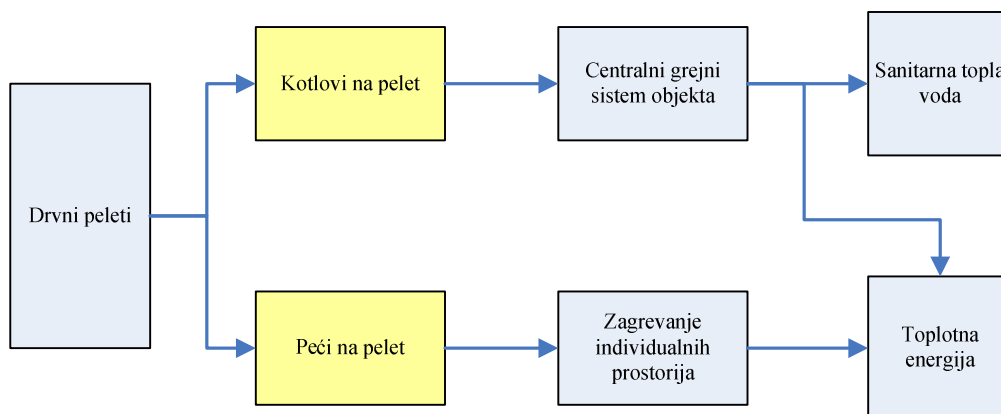
- 1) prema vrsti ložnog uređaja,
- 2) prema načinu dovoda goriva i
- 3) prema konstrukcionim karakteristikama ložnog uređaja.

U Tabeli 5-3 prikazana je podela uređaja male snage za sagorevanje peleta od biomase na osnovu svakog od navedena tri kriterijuma.

Tabela 5-3 Podela uređaja za sagorevanje peleta snage do 100 kWt [54]

<i>Kriterijum</i>	<i>Vrsta uređaja</i>
Vrsta ložnog uređaja	<ul style="list-style-type: none"> ▪ peći na pelet ▪ kotlovi na pelet
Način dovoda goriva	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dovod goriva sa donje strane ▪ dovod goriva sa bočne strane ▪ dovod goriva sa gornje strane
Konstrukcione karakteristike ložnog uređaja	<ul style="list-style-type: none"> ▪ uređaji sa retortom ▪ uređaji sa rešetkom

Kao što je prikazano u Tabeli 5-3 i ilustrovano na Slici 5-8, uređaji za sagorevanje peleta snage do 100 kWt se prema vrsti generalno mogu podeliti na peći na pelet i kotlove na pelet, pri čemu peći na pelet obično imaju snagu do 50 kWt i namenjene su za zagrevanje individualnih prostorija, dok su kotlovi na pelet obično veće snage i omogućavaju zagrevanje radnog medijuma (tople vode) u centralnim grejnim sistemima stambenih ili poslovnih objekata, kao i obezbeđivanje sanitarne tople vode.



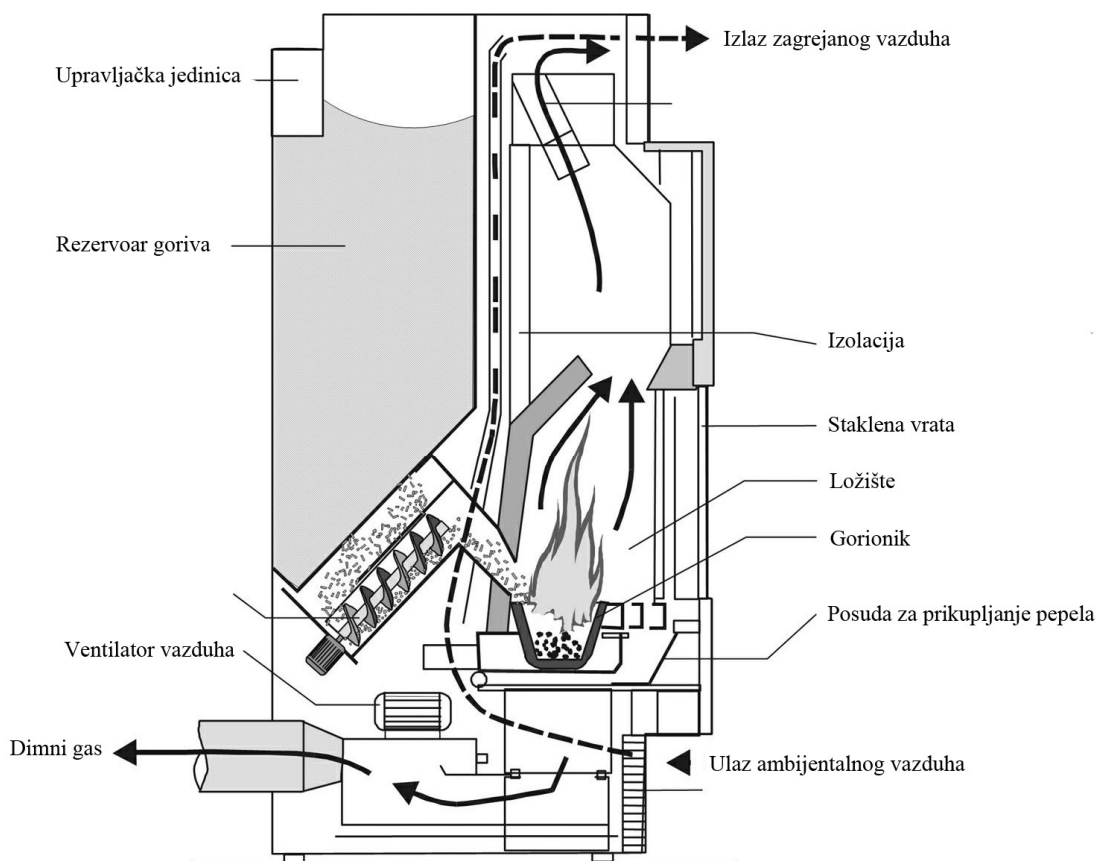
Slika 5-8 Namena peći i kotlova male snage za sagorevanje peleta

Peći na pelet

Peći na pelet predstavljaju automatske uređaje za sagorevanje koji zahtevaju odgovarajući dovod goriva, ali i napajanje električnom energijom u cilju iniciranja procesa sagorevanja. Njihova konstrukcija je znatno složenija u odnosu na tradicionalne uređaje za sagorevanje konvencionalnih oblika biomase, sa upravljačkim sistemom koji omogućava regulaciju rada peći i kontrolu zagrevanja prostorije. Osim kao generator toplotne energije, peć na pelet istovremeno služi i kao direktno grejno telo koje je opremljeno ventilatorom za izduvavanje toplog vazduha u zagrevanu prostoriju. Kako su smeštene u prostoru u kom se boravi, peći na pelet pored funkcionalne uloge, moraju zadovoljiti i odgovarajuće estetske kriterijume. Peći na pelet mogu se koristiti kao glavni ili kao dodatni izvor toplote u kućama koje su opremljene drugim sistemima grejanja (npr. električnim).

U konstruktivnom pogledu peći na pelet sastoje se iz kućišta, rezervoara za pelete, dodavača peleta u ložište, ventilatora vazduha, sistema za odvod dimnog gasa, kasete za prikupljanje pepela i prilično složenog upravljačkog sistema. Kao što je prikazano na Slici 5-9, u gornjoj zoni uređaja nalazi se rezervoar za gorivo u koji se može smestiti 10-30 kg goriva, zavisno od konstruktivne izvedbe peći, što je obično dovoljno za 1-3 dana rada peći prosečnim intenzitetom. U donjoj zoni peći smešten je pužni dodavač kojim se peleti iz rezervoara dovode do rešetke za sagorevanje u prednjoj zoni peći. Ipak, peleti se pužnim dodavačem ne dovode direktno na rešetku, već na nju padaju gravitaciono, čime se sprečava da se u slučaju kvara uređaja plamen prenese na rezervoar peleta. Vazduh za sagorevanje u ložište se dovodi vakuumski, gde je vakuum ostvaren preko kanala dimnog gasa kojim se dimni gasovi odvođe iz ložišta, prirodnom ventilacijom ili pomoću posebno predviđenog ventilatora kojim se uspostavlja prinudna ventilacija. U unutrašnjosti peći nalazi se termostat pomoću koga se automatski reguliše potreba za dovodom goriva u ložište. Na prednjoj strani peći nalaze se staklena vrata koja omogućavaju vizuelni uvid u proces sagorevanja. U gornjoj zoni peći nalazi se izmenjivač toplote, dok je u donjoj zoni smešten ventilator vazduha kojim se ambijentalni vazduh usisava iz prostorije i zagreva u izmenjivaču toplote, da bi se potom izduvavao nazad u zagrevani prostor. Peć je takođe opremljena i upravljačkom jedinicom za regulaciju rada uređaja, koja je najčešće montirana na njegovoj bočnoj ili

prednjoj strani. Preko upravljačke jedinice korisnik je u mogućnosti da direktno reguliše intenzitet zagrevanja prostorije. Startovanje peći vrši se pritiskom na odgovarajući taster upravljačke jedinice, čime se inicira paljenje goriva električnom varnicom. Gorivo u rezervoaru koji se nalazi unutar peći mora se dopunjavati ručno, što takođe važi i za pražnjenje kasete za prikupljanje pepela koja se nalazi na dnu uređaja.



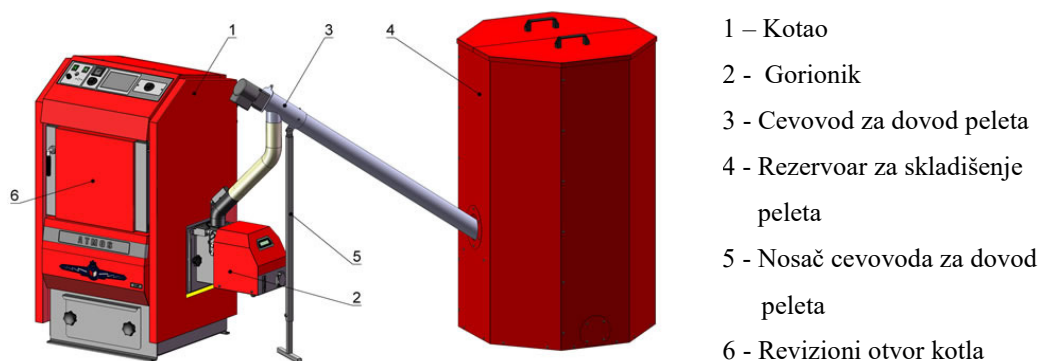
Slika 5-9 Konstrukcija peći za sagorevanje peleta od biomase

Prednosti korišćenja peći na pelet ogledaju se u jednostavnosti njihove upotrebe, maloj količini proizvedenog pepela (što je direktno povezano i sa najvišom klasom kvaliteta peleta koja se zahteva kada su u pitanju peći na pelet), veoma brzom zagrevanju prostorije nakon startovanja uređaja i mogućnosti jednostavnog i automatskog regulisanja zagrevanja.

Kotlovi na pelet

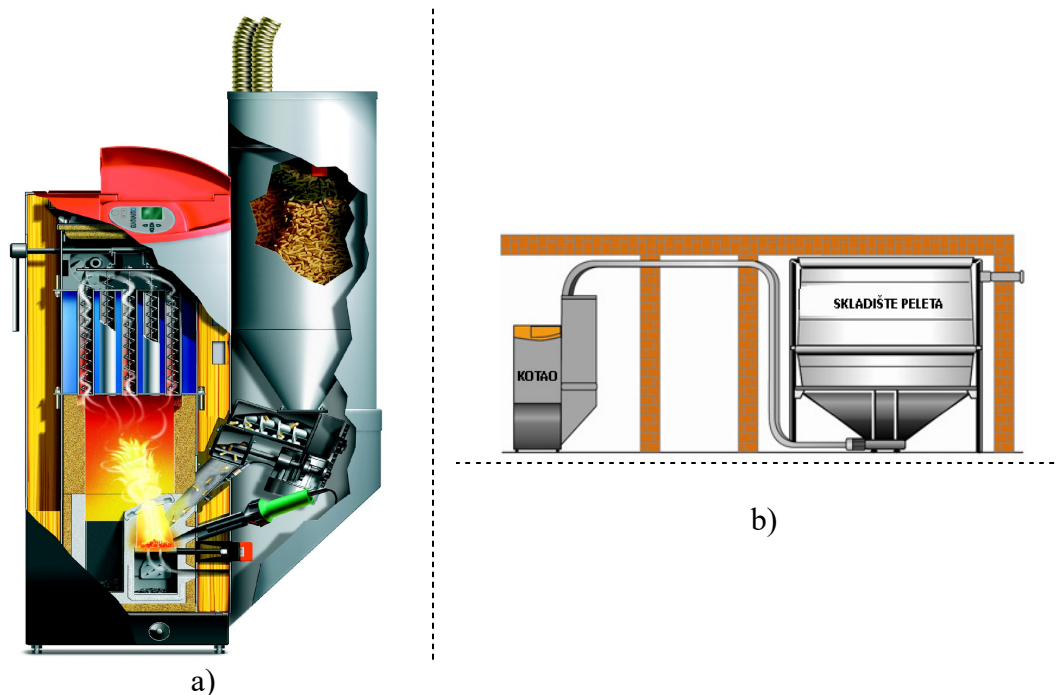
Za razliku od peći na pelet, kotlovi na pelet su uređaji koji generišu toplotnu energiju koja se putem proizvedenih dimnih gasova prenosi na radni medijum (voda) u sistemu centralnog grejanja stambenog ili poslovnog objekta ili objekta javne namene (npr. škole, medicinske ili socijalne ustanove i slično). Na taj način, kotlovi na pelet najčešće nisu smešteni u prostorijama u kojima se boravi, već u tehničkim prostorijama objekta u kom se nalaze i ostali elementi sistema centralnog grejanja, kao i prostor predviđen za skladištenje peleta. Konstrukcija kotla na pelet u velikoj meri odgovara konstrukciji klasičnog kotla na tečno gorivo. Gorivo se iz odgovarajućeg rezervoara transportuje do gorionika u kom dolazi do njegovog paljenja i sagorevanja. Dimni gasovi nastali sagorevanjem goriva prolaze kroz izmenjivač toplote, prenoseći toplotu grejnom medijumu - vodi. Zagrejana voda pomoću pumpe odgovarajuće snage cirkuliše kroz instalaciju grejanja zagrevanog objekta. Ceo kotao mora biti termički izolovan kako bi se sprečili gubici toplote u okolinu. Kod kotlova na pelet, gorionik može biti ugrađen u konstrukciju samog kotla ili izveden kao spoljašnji element. Na Slici 5-10 prikazan je kotao na pelet sa spoljašnjim gorionikom i rezervoarom za pelete.

Kod kotlova sa spoljašnjim gorionikom sagorevanje peleta odvija se u gorioniku koji je smešten izvan kotla, tako da se u kotao dovode samo dimni gasovi nastali sagorevanjem goriva koji svoju toplotu predaju radnom medijumu koji cirkuliše u sistemu centralnog grejanja. Na navedeni način, ključni deo opreme koji omogućava korišćenje peleta predstavlja gorionik, tako da je navedena konstrukcija adekvatna kada se kotao na ugalj, tečno gorivo, gas ili klasičnu, nepripremljenu drvenu biomasu želi rekonstruisati u kotao na pelet. Dovod goriva u komoru za sagorevanje u gorioniku, kao i proces sagorevanja goriva u potpunosti je automatizovan, pri čemu rezervoar za gorivo i gorionik mogu činiti jedinstvenu konstruktivnu celinu (u ovom slučaju korisnik periodično mora ručno dopunjavati gorivo u rezervoaru) ili rezervoar za gorivo može biti izveden kao zaseban element povezan sa gorionikom, kao što je prikazano na Slici 5-10.



Slika 5-10 Kotao na pelet sa spoljašnjim gorionikom i rezervoarom za pelete [64]

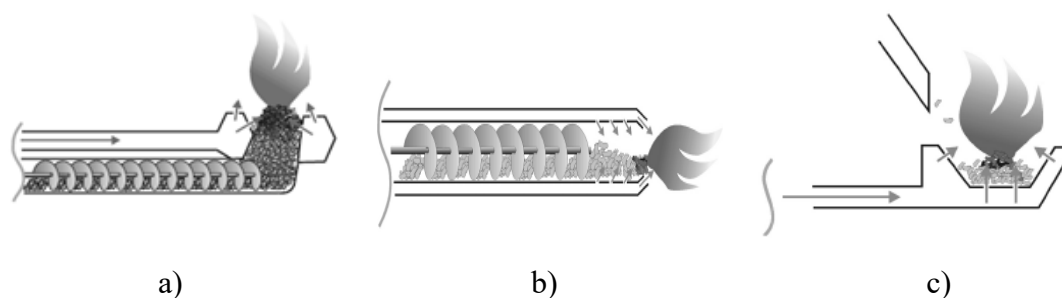
Kod kotlova sa ugrađenim gorionikom, Slika 5-11, celokupna kotlovska konstrukcija izvedena je kao kompaktna jedinica koja obuhvata rezervoar goriva, gorionik za sagorevanje goriva i kotao za prenos generisane toplotne energije sa dimnih gasova nastalih sagorevanjem goriva na toplotni medijum koji cirkuliše u centralnom grejnom sistemu. Navedena kompaktna rešenja obezbeđuju najveću efikasnost procesa sagorevanja, najviši stepen automatizacije procesa i najmanje zahtevno održavanje u poređenju sa ostalim varijantama izvedbe kotlova na pelet. Individualne komponente prilagođene su jedne drugima, što kao krajnji rezultat ima bolje i efikasnije funkcionisanje celog sistema, što nije uvek slučaj u prethodno opisanom slučaju kada se gorionik za sagorevanje peleta uglavnom dodaje na već postojeći kotao, a u cilju rekonstrukcije postojećih grejnih sistema i prelaska sa fosilnog na obnovljivo gorivo. Dovod goriva u rezervoar vrši se automatski, pomoću vakuum sistema kojim se gorivo “usisava“ iz prostora u kom se skladišti, kao što je prikazano na Slici 5-11b. Naravno, za razmatrane kotlove sa ugrađenim gorionikom potrebno je obezbediti značajan prostor za njihovu instalaciju, kao i značajna investiciona sredstva.



Slika 5-11 Kotao na pelet sa ugrađenim gorionikom: (a) konstrukcija,
(b) veza sa skladištem peleta [65]

U skladu sa podelom prikazanom u Tabeli 5-3, uređaji male snage za sagorevanje peleta od biomase se prema načinu dovoda goriva u ložište mogu podeliti na uređaje sa dovodom goriva sa: 1) donje strane, 2) bočne strane i 3) gornje strane. Uređaji sa dovodom goriva u ložište sa donje strane inicijalno su razvijeni za potrebe sagorevanja drvene sečke, ali se danas koriste i za sagorevanje peleta. U razmatranom rešenju, peleti se pomoću pužnog dodavača transportuju kroz cev gorionika i dovode do podnožja tj. donje strane retorte (ploče na kojoj se vrši sagorevanje), kao što je prikazano na Slici 5-12a, odakle se gorivo usmerava nagore i dalje podleže procesu primarnog sagorevanja (tzv. gasifikacije). Primarni vazduh dovodi se zajedno sa gorivom ili kroz otvore na vrhu gorionika. Sekundarni vazduh, koji obezbeđuje sagorevanje nastalih dimnih gasova, dovodi se na samu retortu ili neposredno iznad nje. Navedeni način uvođenja goriva u ložište najpogodniji je za goriva sa malim sadržajem pepela, kao što su peleti. Povoljna karakteristika pomenutog rešenja ogleda se u mnogo manjem vrtloženju čestica letećeg pepela i čađi u ložištu u poređenju sa ostala dva načina dovoda goriva. Iako navedeni način uvođenja goriva u ložište omogućava stabilan proces sagorevanja goriva, kao negativna strana ističe se dug period dogorevanja goriva nakon isključenja kotla od strane korisnika.

Uređaji sa dovodom goriva sa bočne strane, ilustrovani na Slici 5-12b, slični su prethodno opisanim uređajima sa dovodom goriva sa donje strane, sa jedinom razlikom što umesto retorte sadrže rešetku za sagorevanje, tako da se gorivo, koje se dovodi pužnim dodavačem, horizontalno uvodi u komoru za sagorevanje. Gorivo se na taj način tokom procesa sagorevanja kreće u horizontalnom pravcu od zone dovoda goriva u ložište do rešetke za sagorevanje.



Slika 5-12 Način dovoda goriva u ložište uređaja za sagorevanje peleta:

a) sa donje strane, b) sa bočne strane i c) sa gornje strane [66]

Konačno, uređaji sa dovodom goriva sa gornje strane razvijeni su specijalno za sagorevanje peleta. U navedenom rešenju, prikazanom na Slici 5-12c, peleti se u ložište dovode sa gornje strane i to tako što sa pužnog dodavača padaju na rešetku ili retortu na kojoj se odvija sagorevanje. Fizička razdvojenost sistema za dovod goriva i zone sagorevanja pruža adekvatnu zaštitu od povratnog plamena, koji se u prethodno dve opisane varijante dovoda goriva može vratiti nazad sve do rezervoara za gorivo i tako izazvati požar. Zbog toga se kod uređaja sa dovodom goriva sa donje i sa bočne strane zahteva preduzimanje adekvatnih mera zaštite. Dovod goriva sa gornje strane omogućava precizno doziranje peleta u skladu sa trenutnim potrebama za toplotnom energijom. Negativne karakteristike pomenutog načina dovoda goriva u ložište odnose se na nepovoljan uticaj koji “padajući” peleti imaju na održavanje plamena u ložištu, veće podizanje pepela i čađi u kotlu, kao i nestabilniji proces sagorevanja.

Na kraju, u skladu sa podelom prikazanom u Tabeli 5-3, uređaji male snage za sagorevanje peleta od biomase se prema njihovim konstrukcionim karakteristikama mogu podeliti na: 1) uređaje sa retortom i 2) uređaje sa rešetkom za sagorevanje. Retorta predstavlja perforiranu ploču na kojoj se odvija sagorevanje goriva. Uređaji sa retortom izvode se isključivo sa dovodom goriva sa donje strane, dok se uređaji sa

rešetkom za sagorevanje izvode sa dovodom goriva sa gornje i bočne strane, pri čemu rešetka može biti pokretna, fiksna, kosa itd.

5.5 Standardizacija uređaja male snage za sagorevanje peleta

Kao što je ranije objašnjeno, na nivou EU velika pažnja posvećena je donošenju i usvajanju standarda kojima se propisuje zahtevani kvalitet i poreklo peleta kao goriva. Međutim, standardizacija je neophodna i u ostalim koracima u lancu njihove primene, uključujući transport, skladištenje, trgovinu i korišćenje, pri čemu je kao posebno važna prepoznata standardizacija uređaja za sagorevanje peleta. Uvođenje standardnih zahteva po pitanju performansi rada uređaja za sagorevanje peleta predstavlja izuzetno važan aspekt koji omogućava iskorišćenje svih prednosti koje pruža upotreba razmatrane vrste obnovljivog goriva, doprinoseći popularizaciji i pouzdanosti njihove upotrebe, većem poverenju korisnika, boljem iskorišćenju energije goriva, uštedi resursa i otklanjanju negativnih ekoloških aspekata koji su povezivani sa tradicionalnim načinom korišćenja biomase.

Jedan od osnovnih regulatornih dokumenata u segmentu standardizacije uređaja za sagorevanje predstavlja Direktiva 2009/125/EC o ekološkom dizajnu proizvoda [67] kojom je uspostavljen zakonodavni okvir za definisanje pravila ekološkog projektovanja proizvoda koji koriste bilo koji vid energije. Kao osnovni cilj navedene direktive definisano je povećanje energetske efikasnosti uređaja koji koriste energiju, kao i ekoloških performansi njihovog rada. Direktivom se definišu aspekti koji se moraju sagledati prilikom projektovanja i izrade uređaja koji koriste energiju, uz analizu celog radnog veka proizvoda. Direktivom se takođe uvodi jedinstven sistem označavanja proizvoda koji su usaglašeni sa zahtevima Direktive, tzv. CE znak.

U ranije pomenutoj Direktivi 2009/28/EC o promovisanju korišćenja obnovljivih izvora, u članu 13. naglašava se neophodnost uvođenja šema sertifikacije za peći i kotlove male snage namenjene sagorevanju biomase, pri čemu se takođe definišu i kriterijumi za njihovo uspostavljanje. Pri tome se navodi da svaka zemlja članica EU može imati sopstveni sertifikacioni sistem, ali da individualni sertifikacioni sistemi zemalja članica moraju biti prepoznati i u svim ostalim zemljama članicama. Takođe, u pomenutoj direktivi navodi se i da se zemlje članice ohrabruju da uvedu subvencije za

korišćenje OIE, ali da pri tom u svojim sertifikacionim sistemima obavezno moraju definisati tehničke zahteve koje moraju zadovoljiti oprema i sistemi za iskorišćenje OIE kako bi bili uključeni u sistem subvencionisanja. Ukoliko na nivou EU već postoji odgovarajući sistem sertifikacije, tehnički normativi, sistem označavanja i slični elementi kojima se propisuju navedeni zahtevi, EU članice imaju obavezu da pomenute propise integrišu u svoje zakonodavstvo i uspostavljene sertifikacione sisteme.

U Prilogu III prikazan je pregled standarda koji se odnose na razmatrane uređaje za sagorevanje male snage, a koji su usvojeni na osnovu tehničkih specifikacija Evropskog komiteta za standardizaciju, kao i standarda čije se usvajanje očekuje u narednom periodu [68]. Navedenim standardima definišu se konstruktivne karakteristike, tehničke performanse (efikasnost rada i nivo emisija zagađujućih materija), bezbednost rada i puštanje u rad uređaja male snage za sagorevanje čvrstih goriva, kao i metodologije testiranja i način instalacije i rukovanja pomenutim uređajima. Navedena grupa standarda uglavnom se odnosi na uređaje koji su namenjeni za direktno zagrevanje prostora u kom se nalaze, tj. za uređaje tipa peći ili ugradnih kamina.

Imajući u vidu temu ove doktorske disertacije, posebno je važno izdvojiti EN 14785:2006 [69] koji definiše zahteve koji se odnose na projektovanje, rad i ispitivanje karakteristika ložnih uređaja za sagorevanje drvnih peleta namenjenih za zagrevanje domaćinstava, sa mehaničkim punjenjem i nominalnom toplotnom snagom od maksimalno 50 kWt. Posebno je važno istaći da se standardom definišu zahtevane energetske i ekološke karakteristike rada ovih uređaja i to kroz propisanu minimalnu efikasnost rada i maksimalnu dozvoljenu emisiju CO, u skladu sa Prilogom IV.

Usvojeni standardi i standardi čije se usvajanje očekuje u narednom periodu omogućavaju bolje razumevanje uticaja koje različiti procesni parametri i konstruktivne karakteristike ložnih uređaja imaju na sagorevanje goriva od drvne biomase. Naročito je značajno raditi na unapređenju prakse u pogledu sertifikacije razmatranih uređaja kako bi se krajnjim korisnicima pružila mogućnost da razlikuju dobre od loših proizvoda i dobiju garancije da će uređaj koji se odluče da instaliraju u svom domaćinstvu raditi u skladu sa zahtevima savremene inženjerske prakse. U zemljama EU trenutno su na snazi različiti sertifikacioni sistemi i načini obeležavanja uređaja male snage za sagorevanje biogoriva, od kojih su pojedini navedeni u Prilogu V [70]. Međutim, na nivou EU ulažu

se veliki naponi kako bi se definisao jedinstveni sistem označavanja uređaja za sagorevanje peleta za sve zemlje članice EU. Jedan od predloga razvijen je u okviru projekta BIOHEATLABEL od strane renomiranog austrijskog centra za ispitivanje biogoriva, *Bioenergy 2020+*, kojim je predložen način označavanja grejnih uređaja male snage za sagorevanje biomase. Princip označavanja uređaja nalikovao bi dobro poznatim energetske klasama električnih uređaja, ali bi u ovom slučaju bila definisana tri klasifikaciona indikatora [71]:

- indikator potrošnje energije, koji ukazuje na energetske efikasnost rada uređaja tokom cele grejne sezone,
- indikator potrošnje resursa, koji ukazuje na tzv. eko-efikasnost, iskazanu kroz potrebnu količinu primarne energije procenjenu za ceo radni vek uređaja za sagorevanje (količina primarne energije potrebna za proizvodnju, rad i odlaganje uređaja za sagorevanje),
- indikator emisije štetnih materija, koji ukazuje na uticaj rada uređaja na zagađenje životne sredine.

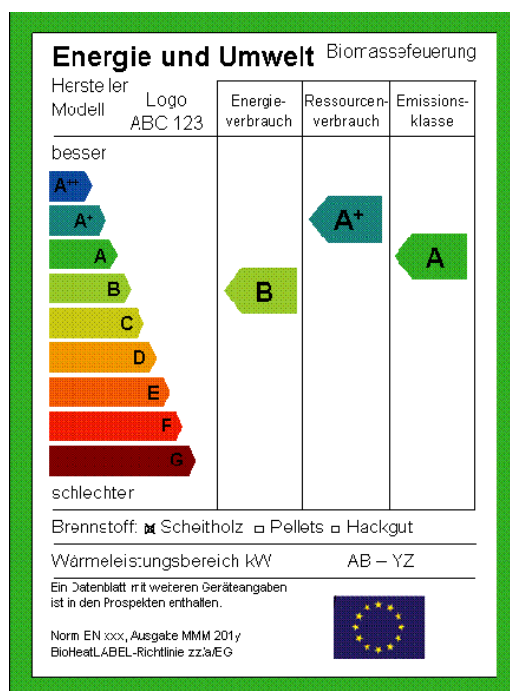
U okviru predloženog načina označavanja uređaja za sagorevanje biomase definisani su kriterijumi i način utvrđivanja energetske razreda po svakom od iznad navedena tri kriterijuma. U Tabeli 5-4 data je predložena klasifikacija na osnovu navedenih kriterijuma, dok je na Slici 5-13 prikazan predloženi način označavanja uređaja male snage za sagorevanje biomase za potrebe proizvodnje toplotne energije. Uređaj bi na svojoj oznaci nosio klasifikaciju po svakom od pomenuta tri kriterijuma.

Usaglašeno i unificirano označavanje uređaja za sagorevanje biomase predstavlja ključni faktor koji će omogućiti adekvatno upravljanje kvalitetom razmatranih proizvoda i njihov lakši plasman na različita tržišta. Sa korisničke strane, ujednačeni zahtevi u pogledu visoko-efikasnog i ekološki prihvatljivog rada ložnih uređaja, koji bi se uveli razmatranim sistemom sertifikacije, doneli bi višestruke prednosti za same korisnike, prvenstveno sa aspekta veće ponude različitih proizvoda i ozbiljnije tržišne utakmice, koja bi proizvođače motivisala da u cilju bolje konkurentnosti ponude visoko kvalitetne uređaje po što povoljnijoj ceni. Pored toga, visoka efikasnost uređaja korisniku bi omogućila i dodatne ekonomske pogodnosti koje bi se reflektovale kroz smanjenu potrošnju goriva, dok bi bolje ekološke performanse imale pozitivan efekat na

smanjanje zagađenja mikrolokacije stambenog/poslovnog objekta u kom korisnik boravi, čime bi se doprinelo i poboljšanom kvalitetu življenja.

Tabela 5-4 Predložena klasifikacija uređaja na biomasu male snage [71]

Energetski razred uređaja	Energetska efikasnost uređaja	Efikasnost potrošnje resursa	Emisione norme (mg/MJ goriva)		
			CO	Nesagoreli ugljovodonici	Prašaste materije
A++	90%	68%	40	4	4
A+	85%	63%	80	8	8
A	80%	57%	150	15	15
B	75%	50%	300	30	30
C	70%	42%	600	45	45
D	60%	33%	1200	60	60
E	50%	23%	2400	120	120
F	30%	12%	4800	240	240
G	10%	0%	9600	480	480



Slika 5-13 Predlog unificirane eko-oznake uređaja za sagorevanje biomase na nivou cele Evropske Unije [71]

5.6 Pregled istraživanja u oblasti uređaja male snage za sagorevanje peleta

Imajući u vidu opisani značaj i veliko interesovanje za pelete i uređaje za njihovo sagorevanje, tokom protekle decenije sproveden je veliki broj istraživanja u ovoj oblasti. Istraživanja su uglavnom bila usmerena na sagledavanje karakteristika peleta u zavisnosti od sirovina korišćenih za njihovu proizvodnju, kao i radnih parametara procesa peletiranja, sa ciljem dobijanja goriva odgovarajućeg kvaliteta. Utvrđeno je da kvalitet goriva predstavlja posebno bitan parametar u slučaju peći i kotlova za sagorevanje peleta male snage, pa je s toga veliki broj istraživanja sproveden upravo u ovoj oblasti [60, 72-75]. Za pomenutu grupu uređaja kvalitet peleta posebno je važan zbog relativno malog toplotnog kapaciteta usled kog se svaka promena u kvalitetu goriva odražava na dostizanje deklarisanе snage i stepena korisnosti ovih uređaja. Istovremeno, dodatni razlog zbog kog se problemi sa kvalitetom peleta tako izraženo odražavaju na rad pomenute grupe uređaja predstavlja i sistem automatskog upravljanja koji kod uređaja male snage nije tako sofisticiran kao kod velikih postrojenja za sagorevanje peleta, gde kompleksni regulacioni sistemi obezbeđuju veoma brzo intervenisanje pri bilo kakvom poremećaju procesnih parametara. Istraživanja sprovedena u cilju boljeg razumevanja i unapređenja rada peći i kotlova male snage motivisana su i projekcijama intenzivnog korišćenja ove vrste uređaja za podmirivanje potreba za toplotnom energijom u EU do 2020. tj. 2030. godine, a u skladu sa podacima prikazanim u Poglavlju 3 ove disertacije. Pored toga, imajući u vidu planove EU koji se tiču primene mera energetske efikasnosti i izgradnje zgrada sa niskom ili nultom potrošnjom energije, koji su između ostalog definisani u Direktivi 2010/31/EC o energetskim performansama zgrada [76], peći i kotlovi snage do 2-3 kW prepoznati su kao uređaji koji će imati poseban značaj u ostvarivanju energetskih ciljeva EU u sektoru zgradarstva, na taj način zauzimajući sve značajnije mesto u aktuelnim naučnim i tehničkim istraživanjima. Kao posebno interesantne izdvojene su opcije ugradnje peći na pelet u kombinaciji sa solarnim sistemima za generisanje tople vode, čime se omogućava da energetske i ekološke performanse ovakvih sistema budu značajno unapređene, prvenstveno kao rezultat veće pouzdanosti u radu [55, 77, 78]. Istraživači su takođe ukazali i na jednu veoma bitnu činjenicu koja se odnosi na podatak da su za razliku od entuzijasta koji su pelete koristili u inicijalnim fazama njihove primene i koji

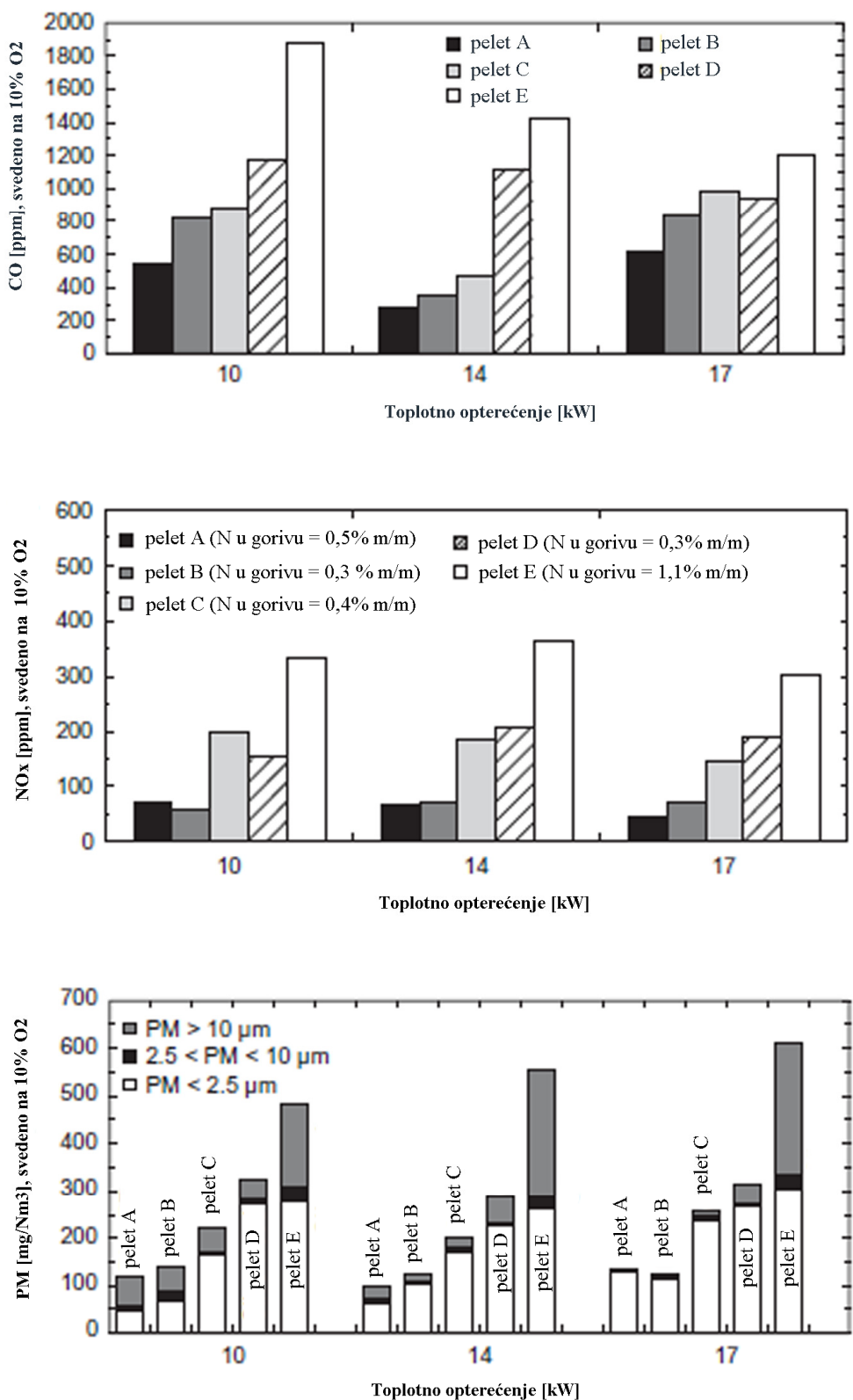
su bili tolerantni na eventualne probleme u radu uređaja za njihovo sagorevanje, savremeni korisnici prilično netolerantni na operativne probleme, kvarove i druge poteškoće koje se mogu javiti u radu sistema za sagorevanje peleta, očekujući da ponuđeni proizvodi obezbede zadovoljavajući nivo komfora, pouzdanost u radu, ispunje regulatorne norme, kao i da omoguće smanjenje troškova grejanja. Imajući u vidu da se individualni korisnici često odlučuju za jednu od više ponuđenih opcija grejanja, u okviru kojih se često nalaze i rešenja koja se zasnivaju na sagorevanju fosilnih goriva, veoma je važno da problemi u radu ložnih uređaja na pelet budu svedeni na minimum. Veoma obimna analiza identifikovala je da se najčešći problemi odnose na iznenadno gašenje uređaja za sagorevanje (najčešće prouzrokovano prestankom rada sistema za dovod goriva ili neadekvatnom signalizijom potrošnje goriva iz rezervoara peleta, kao i pojavom dima i/ili plamena izvan ložišta i dr.), zatim na probleme pri manipulaciji (promenljiva ili veća količina pepela nastala sagorevanjem peleta, veća količina prašine koja se javlja pri manipulaciji gorivom i dr.), kao i na probleme sa smanjenom efikasnošću rada ložnih uređaja (do koje dolazi usled promenljive komadne gustine peleta, kvara na instalacijama i dr.) [79]. Pomenuta analiza ukazala je da je najveći broj operativnih problema prouzrokovao kvalitetom goriva, prvenstveno njihovim drobljenjem i visokom količinom prašine, kao i neadekvatnom instalacijom i inicijalnim podešavanjem opreme. Kao jedno od mogućih rešenja predložena je izmena standarda kojim se propisuje zahtevani kvalitet peleta za korišćenje u sektoru domaćinstava.

Različita istraživanja takođe su ukazala na veću ili manju podobnost korišćenja pojedinih vrsta peleta u uređajima za sagorevanje male snage, upoređujući osobine različitih komercijalno raspoloživih peleta ili eksperimentalnih peleta proizvedenih u cilju testiranja podobnosti tako dobijenog goriva za sagorevanje u uređajima za zagrevanje domaćinstava [58, 72-75]. Kako peleti mogu biti proizvedeni od veoma širokog spektra sirovina, karakterizacija i ispitivanje osobina pomenutih goriva sprovodi se u cilju boljeg razumevanja procesa koji se odvijaju tokom sagorevanja svake vrste peleta ponaosob, kao i uticaja koje tako utvrđene karakteristike goriva imaju na energetske karakteristike uređaja za sagorevanje i emisiju zagađujućih materija. Imajući u vidu da uređaji male snage nisu opremljeni sistemima za sprečavanje emisija zagađujućih materija, adekvatan izbor vrste goriva i optimizacija procesa sagorevanja predstavljaju jedine faktore kojima se može uticati na krajnje performanse razmatranih

uređaja. Pored potvrde da kvalitet peleta ima veoma veliki uticaj na rad ložnih uređaja, ispitivanja su takođe pokazala da peleti lošeg kvaliteta mogu dovesti do niza operativnih problema u radu sistema za sagorevanje, uključujući zašljakivanje, koroziju i probleme u funkcionisanju, kao i da mogu biti uzrok značajnih emisija gasovitih i praškastih zagađujućih materija [80-87]. Sa druge strane, analiza i optimizacija radnih parametara uređaja za sagorevanje, kao i pažljiv odabir konstruktivnih karakteristika, u prvom redu mesta uvođenja primarnog i sekundarnog vazduha u zone sagorevanja, ali i mesta dovoda goriva u ložište, pokazali su se kao adekvatan način za optimizaciju procesa sagorevanja razmatrane vrste goriva u uređajima male snage [88-91]. U istraživanju sprovedenom u cilju ispitivanja realnih performansi rada kotlova male snage na drveni pelet sa aspekta ispunjenosti zahteva relevantnog standarda u pogledu efikasnosti rada i emisije zagađujućih materija, utvrđeno je da kotlovi sa dovodom goriva sa gornje strane imaju niži stepen korisnosti i višu emisiju CO u odnosu na kotlove sa dovodom goriva sa donje i sa bočne strane [92]. Takođe, pokazano je i da emisije CO zavise od toplotnog opterećenja peći tj. kotla i to tako što je utvrđeno da su emisije zagađujućih materija najniže pri nominalnom toplotnom opterećenju [93]. Različite tehnologije sagorevanja biomase (sagorevanje na rešetci, sagorevanje u fluidizovanom sloju) takođe su ispitivane sa aspekta specifičnosti uslova sagorevanja i odražavanja na energetske i ekološke karakteristike uređaja ili sistema u kojima se koristi biomasa [94-96].

Istraživanje kojim je bilo obuhvaćeno i utvrđivanje zavisnosti između kvaliteta peleta i koncentracija gasovitih i praškastih zagađujućih materija koje se emituju iz kotla na pelet koji se koristi za zagrevanje domaćinstava, obuhvatilo je analizu sagorevanja pet vrsta peleta dobijenih od različitih sirovina (pelet A – borovina, pelet B – alternativna borovina, pelet C – pluta, pelet D – maslinovo drvo, pelet E – ostaci obrezivanja maslinovog drveta) i ispunjenost zahteva relevantnog standarda u pogledu propisanih karakteristika ložnog uređaja [60]. Iako su analizirane vrste goriva pokazale zadovoljavajuće osobine sa aspekta zahtevanih mehaničkih i fizičkih karakteristika, sadržaj pojedinih materija (sumpora, azota) u pojedinim vrstama peleta prekoračivao je maksimalno dozvoljene vrednosti. Nakon sprovedene karakterizacije goriva, peleti su sagorevani u kotlu maksimalne toplotne snage 22 kWt uz praćenje ključnih parametara procesa sagorevanja (potrošnje goriva, protoka vode - kao medijuma za prenos toplote, temperature dimnog gasa, sadržaja O₂, CO, CO₂, NO_x i praškastih materija u dimnom

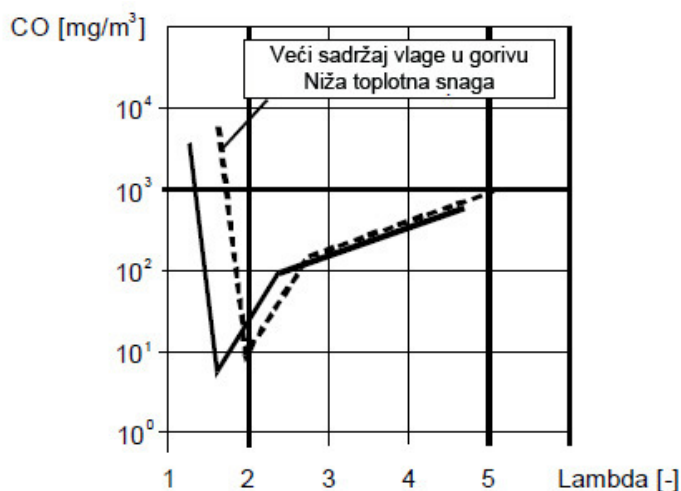
gasu) za tri režima toplotnog opterećenja kotla: nominalni (17 kWt), redukovani (14 kWt) i minimalni (10 kWt). Dobijeni rezultati ukazali su na veoma veliki uticaj kvaliteta goriva na emisiju zagađujućih materija. Kao što se može videti na Slici 5-14, emisije CO varirale su u širokom opsegu u zavisnosti od ispitivanog goriva. Visoka komadna gustina peleta i visok L/D odnos tj. odnos dužine prema prečniku peleta koji se kretao od 1,5 do 4,5 identifikovani su kao razlozi visokih emisija CO koje su dostizale koncentracije od 1900 ppm u slučaju sagorevanja pojedinih vrsta goriva. Dobijeni rezultati pokazali su i da su za pojedine vrste peleta minimalne koncentracije CO i NO_x registrovane pri nominalnom toplotnom opterećenju, dok su za druge pelete emisije štetnih materija bile minimalne za redukovano ili minimalno toplotno opterećenje. Kako u slučaju sagorevanja biomase emisije azotnih oksida uglavom potiču od azota iz goriva i neznatno od azota prisutnog u vazduhu za sagorevanje, izmerene koncentracije NO_x u dimnom gasu koje su dostizale vrednost od 360 ppm objašnjene su odgovarajućim sadržajem azota u korišćenim peletima. Što se tiče emisija praškastih materija, utvrđeno je da su se emisije ovog polutanta odlikovale dominantnim prisustvom čestica manjih od 2,5 μm na koje značajno utiče hemijski sastav pepela tj. sadržaj isparljivih neorganskih materija K i Na. Istraživanje je takođe identifikovalo operativne probleme koji se javljaju pri sagorevanju peleta sa visokim sadržajem pepela koji uzrokuje visoke emisije praškastih materija, a koji se mogu prevazići optimizacijom rada analiziranog ložnog uređaja.



Slika 5-14 Izmerene emisije CO, NO_x i praškastih materija za analizirane vrste peleta i različito toplotno opterećenje kotla [60]

U optimizaciji rada uređaja za sagorevanje peleta značajnu ulogu imaju sistemi automatskog upravljanja koji predstavljaju integralni deo svakog sistema za sagorevanje. Ovi sistemi imaju zadatak da kompenzuju uticaj različitih promena ili fluktuacija ulaznih promenljivih do kojih dolazi tokom rada uređaja za sagorevanje i da putem regulacije predefinisanih ključnih parametara obezbede pouzdan i zadovoljavajući rad uređaja za sagorevanje. Upravljački sistemi uređaja za sagorevanje male snage najčešće sadrže četiri upravljačka kola kojima se reguliše toplotno opterećenje, proces sagorevanja goriva, temperatura i potpritisak u kanalu dimnog gasa uređaja za sagorevanje [55]. Upravljanje toplotnim opterećenjem vrši se regulacijom potrošnje goriva tj. doziranja količine goriva koja se dovodi u ložište, kao i regulacijom protoka primarnog vazduha za sagorevanje. Proces sagorevanja goriva reguliše se kontrolom sadržaja O_2 i/ili CO u dimnom gasu na koje se utiče promenom protoka sekundarnog vazduha za sagorevanje (regulacijom koeficijenta viška vazduha λ , regulacijom CO ili regulacijom odnosa CO/λ). Temperatura u ložištu može se regulisati recirkulacijom dimnog gasa, hlađenjem zidova ložišta ili regulacijom protoka sekundarnog vazduha za sagorevanje. Potpritisak u kanalu dimnog gasa obično se reguliše promenom brzine obrtanja ventilatora dimnog gasa. Najbolje radne performanse tj. najviši stepen korisnosti uz najmanje emisije zagađujućih materija postižu se kombinovanom regulacijom toplotnog opterećenja uređaja za sagorevanje i regulacijom procesa sagorevanja peleta. Mogućnost ostvarivanja minimalnih emisija CO generalno nije uslovljena samo vrednošću koeficijenta viška vazduha, već i karakteristikama goriva, u prvom redu sadržajem vlage, kao i stepenom toplotnog opterećenja peći ili kotla. Na Slici 5-15 prikazan je primer zavisnosti emisija CO od koeficijenta viška vazduha λ u uređajima sa sagorevanje male snage, iz kog se zaključuje da su emisije CO pri niskim vrednostima O_2 u dimnom gasu tj. pri niskim vrednostima λ visoke i to kao rezultat nedovoljne količine kiseonika u zonama sagorevanja goriva. Takođe, kada je u zonama sagorevanja prisutno više vazduha nego što je optimalno potrebno, temperatura u ložištu se snižava, što usporava odvijanje procesa sagorevanja i dovodi do porasta emisija CO usled nedovoljno dugog vremena za odvijanje reakcija potpunog sagorevanja. Odnos CO/λ značajan je sa aspekta ostvarivanja potpunosti sagorevanja i zavisi od vrste i karakteristika ložišta, tako da se za svako ložište mora posebno definisati. Većina peći na pelet koja je raspoloživa na

tržištu koristi princip indirektno regulacije λ preko merenja i regulacije sadržaja O_2 u izlaznom dimnom gasu. Regulacijom sadržaja O_2 u dimnom gasu omogućava se optimizacija procesa sagorevanja (imajući u vidu da stepen korisnosti raste sa smanjenjem sadržaja O_2). Alternativna opcija bila bi regulacija λ uz održavanje konstantnog sadržaja O_2 u dimnom gasu, ali u ovom slučaju promena karakteristika goriva (u prvom redu sadržaja vlage) i toplotnog opterećenja, negativno utiče na proces regulacije razmatranih parametara. Regulacija procesa sagorevanja može se sprovoditi i putem merenja koncentracije CO u dimnom gasu i regulacije protoka sekundarnog vazduha za sagorevanje. Međutim, kako postizanje minimalnih emisija CO pored λ zavisi i od sadržaja vlage u gorivu i od toplotnog opterećenja uređaja za sagorevanje, regulacija odnosa CO/λ predstavlja optimalnu upravljačku strategiju za peći i kotlove male snage, pri čemu se vrednost λ varira dok se ne ostvari minimalna emisija CO. Čim se emisija CO promeni u odnosu na definisanu minimalnu vrednost, bilo usled većeg sadržaja vlage u gorivu ili promene toplotnog opterećenja, procedura korekcije odnosa CO/λ se ponavlja.



Slika 5-15 Primer međusobne zavisnosti koeficijenta viška vazduha (λ) i emisija CO iz peći i kotlova male snage [55]

Neka od istraživanja sprovedena u pomenutoj oblasti [97-101] ukazala su na značaj upravljačkih sistema na povećanje stepena korisnosti rada uređaja male snage namenjenih za sagorevanje biomase, takođe identifikujući intervencije na upravljačkom

sistemu ovih uređaja kao primarnu meru koja se sprovodi u cilju smanjenja emisija zagađujućih materija. Pravilnim izborom upravljačkih parametara i primenom odgovarajuće upravljačke strategije, emisije CO mogu se redukovati i do 3,5 puta u odnosu na vrednosti koje bi bile emitovane pri manje adekvatnom rešenju sistema automatskog upravljanja [97]. Ipak, kako je ekonomičnost jedan od ključnih kriterijuma za uspešan plasman peći i kotlova male snage na tržištu, konfiguracija i kompleksnost upravljačkog sistema moraju biti takvi da obezbede zahtevanu optimizaciju procesa sagorevanja, ali bez dramatičnog povećanja troškova samog uređaja za sagorevanje.

Istraživanje koje se bavilo uticajem vrste korišćenog goriva i toplotnog opterećenja na stepen korisnosti i emisije zagađujućih materija kotlova na pelet [102] analiziralo je uticaj nominalnog i redukovanog opterećenja na karakteristike sagorevanja šest vrsta peleta (proizvedenih od treseta, travnate, poljoprivredne i drvene biomase) u kotlu deklarisanе snage 40 kWt. Dobijeni rezultati, prikazani u Tabeli 5-5, pokazali su značajne razlike u izmerenim emisijama CO pri nominalnom i redukovanom opterećenju, pri čemu su emisije pri redukovanom opterećenju i sagorevanju peleta od travnate i poljoprivredne biomase bile od 2 do 7,5 puta više nego pri sagorevanju drvnih peleta. Sa druge strane, pri nominalnom opterećenju, emisije nastale sagorevanjem peleta od travnate i poljoprivredne biomase bile su zanemarljivo niske. Niže emisije CO za drvene pelete generalno predstavljaju rezultat više temperature sagorevanja, manjeg sadržaja vlage i adekvatnijeg koeficijenta viška vazduha u ložištu. Niže temperature sagorevanja, nedovoljna količina kiseonika potrebnog za sagorevanja goriva, neadekvatno mešanje goriva i vazduha i/ili nedovoljno vreme boravka sagorivih gasova u zoni sagorevanja predstavljaju razloge koji dovode do viših emisija CO. Utvrđeno je takođe da su emisije CO pri sagorevanju tresetnih peleta pri nominalnom opterećenju bile najviše od svih analiziranih vrsta goriva i da su dostizale $4.221,1 \text{ mg/m}^3$, što je 12 puta više nego emisije koje su registrovane u slučaju sagorevanja drvnih peleta. Najviše emisije NO_x registrovane su za pelete od poljoprivedne biomase, a najniže za drvene pelete, što potvrđuje uticaj elementarnog azota na emisije NO_x . Emisije SO_x bile su najviše u slučaju korišćenja poljoprivrednih i tresetnih peleta, a najniže pri sagorevanju drvnih peleta, što predstavlja rezultat prisustva sumpora u izvornoj sirovini. Međutim, sagorevanje drvnih peleta rezultovalo je višim emisijama praškastih materija u odnosu na sagorevanje peleta od travnate

biomase. Generalno, emisije praškastih materija bile su niže pri redukovanim nego pri nominalnim toplotnim opterećenjima. Što se tiče stepena korisnosti rada kotla, najviši stepen korisnosti postignut je pri sagorevanju drvnih peleta, kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju kotla. Zanimljivo je da je za sva ispitivana goriva pri redukovanom toplotnom opterećenju zabeležen viši stepen korisnosti nego pri nominalnom toplotnom opterećenju, što nije bilo očekivano. Pri nominalnom toplotnom opterećenju najviši stepen korisnosti od 92,2% zabeležen je pri sagorevanju drvnih peleta, dok je pri redukovanom toplotnom opterećenju najveća efikasnost kotla od 94,1% registrovana pri sagorevanju tresetnih peleta. U slučaju sagorevanja peleta od poljoprivredne i travnate biomase zabeleženi su približno isti stepeni korisnosti od oko $89 \pm 1\%$, kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju kotla.

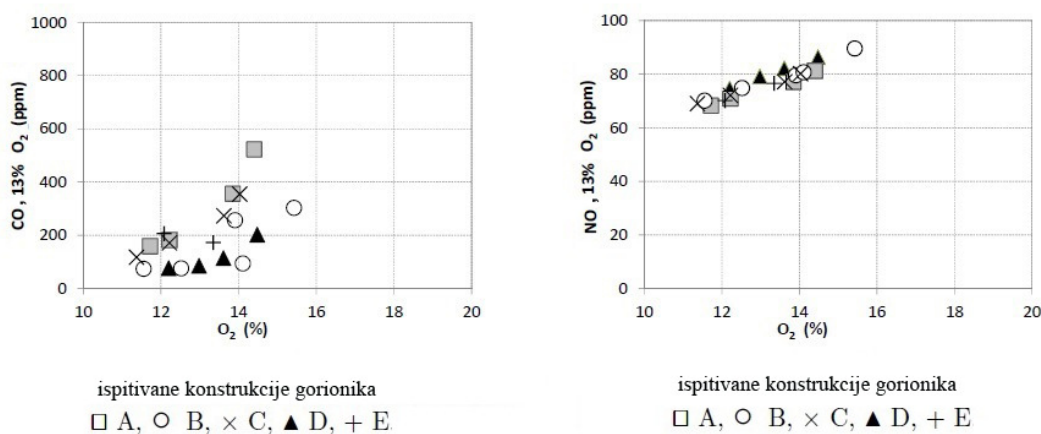
Tabela 5-5 Rezultati ispitivanja kotla deklarisanе snage 40 kWt za različite vrste peleta pri nominalnom/redukovanom toplotnom opterećenju [102]

Parametar	Drvni pelet		Tresetni pelet		Pelet od travnate biomase		Pelet od cistrusnog ostatka		Pelet od ljuske suncokreta		Pelet od pšenične slame	
	NO*	RO*	NO*	RO*	NO*	RO*	NO*	RO*	NO*	RO*	NO*	RO*
Ostvarena toplotna snaga kotla [kW]	42,40	18,30	44,70	20,66	35,55	11,21	29,88	14,18	34,10	10,11	35,5	13,07
Temp. dimnog gasa [°C]	186,6	126,0	190,8	124,7	185,2	105,0	164,1	114,0	188,0	133,0	174,0	114,5
Sadržaj O ₂ u dimnom gasu [%]	3,04	8,99	1,35	5,65	6,30	11,85	8,67	12,78	7,41	10,74	8,50	12,28
Emisija SO _x (mg/m ³)	0-3,55	0-0	200-229	174-201	67-76	42-56	90-108	89-124	40-180	63-192	204-246	145-171
Emisija CO (mg/m ³)	350	300	4221	~ 0	~ 0	520	~ 0	1120	1510	1500	~ 0	2100
Emisija NO _x (mg/m ³)	52	50	89	128	106	83	172	219	158	161	172	179
Emisija prašk. materija (mg/m ³)	16,7	13,3	71,7	18,3	11,7	3,3	50,0	66,7	666,7	488,3	105,0	96,7
Stepen korisnosti kotla [%]	92,24	92,99	90,75	94,12	89,85	91,74	89,77	89,87	89,12	89,12	89,14	89,80

*NO – nominalno toplotno opterećenje; RO – redukovano toplotno opterećenje

U dodatnom istraživanju razmatrani su efekti promene toplotnog opterećenja peći, veličine komore za sagorevanje i geometrije gorionika na emisije CO i NO iz peći na pelet deklarisanе toplotne snage 12 kWt [103]. Geometrija gorionika varirana je tako što je menjana njegova veličina, kao i broj otvora za dovod vazduha na dnu (tzv. otvori za dovod primarnog vazduha za sagorevanje) i na stranama gorionika (tzv. otvori za dovod sekundarnog vazduha za sagorevanje). Na osnovu sprovedenih ispitivanja utvrđeno je da se promenom geometrije gorionika, tj. promenom broja i rasporeda otvora za dovod vazduha utiče na brzinu strujanja vazduha za sagorevanje, koeficijent viška vazduha, kao i na kompletnu strujnu sliku u analiziranoj peći. Gorionici sa većim brojem otvora za dovod sekundarnog vazduha za sagorevanje obezbeđuju dostizanje veće temperature u ložištu, jer utiču na manji koeficijent viška vazduha, samim tim poboljšavajući uslove sagorevanja i smanjujući emisije CO. U okviru ispitivanja registrovana je i direktna zavisnost između emisija CO i koncentracije O₂ u dimnom gasu, pri čemu je zaključeno da su veće koncentracije CO povezane sa većim koncentracijama O₂. Ukazano je da je za svaki tip gorionika moguće pronaći optimalan interval vrednosti koeficijenta viška vazduha (preko promene količine vazduha za sagorevanje) kako bi se uticalo na smanjenje emisija CO za širok opseg toplotnih opterećenja. Navedeno se može postići intervenisanjem u sistemu automatskog upravljanja radom uređaja za sagorevanje. Pored toga, utvrđeno je takođe da geometrija gorionika ne utiče na emisije NO, jer su za sve ispitivane varijante gorionika registrovane iste koncentracije NO u dimnom gasu, kao što je prikazano na Slici 5-16. Sa aspekta analize uticaja toplotnog opterećenja peći na emisije pomenutih zagađujućih materija, konstatovano je da savremene peći na pelet rade tako što se preko korisničkog interfejsa bira odgovarajući režim rada uređaja. U sistemu automatskog upravljanja uređajem, za izabrani režim (nominalni/redukovani/minimalni) određene su predefinisane vrednosti potrošnje goriva i protoka vazduha za sagorevanje koji dovode do postizanja željene izlazne snage tj. snage koja odgovara izabranom režimu rada uređaja. Sprovedena eksperimentalna ispitivanja analizirala su uticaj promene protoka vazduha za sagorevanje u određenom opsegu pri odabranom toplotnom opterećenju tj. potrošnji goriva na prethodno pomenute parametre. Utvrđeno je da se za svako toplotno opterećenje podešavanjem i regulacijom viška vazduha u komori za sagorevanje preko sistema za kontrolu protoka vazduha može adekvatno regulisati proces sagorevanja u

peći u cilju smanjenja emisija CO. U okviru razmatranih ispitivanja analiziran je i uticaj veličine komore za sagorevanje na pomenute ekološke karakteristike rada peći. Zaključeno je da ložište nedovoljne visine utiče na nemogućnost adekvatnog razvoja plamena koji se iz tog razloga prenosi na hladnije unutrašnje zidove ložišta i pogoršava proces sagorevanja u peći. Sa druge strane, ložište veće visine omogućava adekvatan razvoj plamena, postizanje viših temperatura, potpunosti sagorevanja i doprinosi nižim emisijama CO.



Slika 5-16 Funkcionalna zavisnost emisija CO i NO od sadržaja O₂ u dimnom gasu za različite geometrije gorionika [103]

Kao rezultat ispitivanja rada kotla na pelet deklarisanе snage 24 kWt [104], razvijen je statistički model u okviru koga su definisane funkcionalne zavisnosti energetskih i ekoloških karakteristika rada kotla od tri uticajna parametra: koeficijenta viška vazduha (n), potrošnje goriva (m_p) i temperature vode koja služi kao toplotni medijum u grejnom sistemu (t_w). U Tabeli 5-6 prikazane su predložene funkcionalne zavisnosti određene na osnovu ispitivanja dve vrste peleta i ukupno dvadeset serija eksperimentalnih ispitivanja. Predložene zavisnosti pokazale su veoma dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima, sa koeficijentima korelacije koji su se kretali od 98,7 do 99,9%. Analiza je pokazala da na proces sagorevanja dominantno utiču potrošnja goriva i koeficijent viška vazduha, dok temperatura vode nema veći značaj. Takođe je pokazano da je maksimalni stepen korisnosti ostvaren za koeficijent viška vazduha od

1,16, dok je najbolja efikasnost sagorevanja ostvarena za koeficijent viška vazduha od 1,87.

Tabela 5-6 Rezultati ispitivanja kotla snage 40 kWt za različite vrste peleta pri nominalnom/redukovanom toplotnom opterećenju [104]

Karakteristike rada kotla		Predložena funkcionalna zavisnost
Energetske	Toplota predata vodi [kW]	$Q_w = 10,070 \cdot m_p - 4,211 \cdot m_p \cdot (n - 1,6)^2$
	Gubitak toplote sa dimnim gasom [kW]	$Q_s = -3,058 + 4,977 \cdot m_p + 2,299 \cdot m_p \cdot (n-1,6)$
	Sadržaj O ₂ u dimnom gasu [%]	$O_2 = 6,439 \cdot n - 0,299 \cdot n \cdot m_p^2$
	Efikasnost procesa sagorevanja [%]	$\eta_c = 0,248 \times (3,781 - n) \times (n + 0,0363) - 0,18 \times m_p^{-1}$
	Stepen korisnosti kotla [%]	$\eta = 0,592 - 0,248 \times (n-1,6)^2$
Ekološke	Sadržaj CO u dimnom gasu [ppm]	$CO = 26022 - 7630 \cdot n^2 + 36054 \cdot (n-1,6)^2$
	Sadržaj NO _x u dimnom gasu [ppm]	$NO = 186,883 \cdot n + 61,6 \cdot n \cdot (m_p - 1,5)$

Moguće je navesti još veliki broj istraživanja koja bi demonstrirala interes i napore koji se sprovode u cilju boljeg razumevanja korišćenja različitih vrsta peleta kao goriva, kao i unapređenja rada uređaja za njihovo sagorevanje. Prethodno navedena istraživanja i radovi predstavljaju izbor koji po svom sadržaju i konceptu odgovara predmetu ove disertacije. Takođe je potrebno naglasiti da autori predmetnih istraživanja naglašavaju neophodnost daljih ispitivanja u cilju boljeg razumevanja razmatranih procesa ili detaljnijeg razmatranja analiziranih fenomena, ukazujući da naučna delatnost u razmatranoj oblasti pred sobom ima velike izazove i odgovore koje tek treba da pronađe. Ključna istraživanja koja se očekuju u narednom periodu odnose se na dodatne analize i optimizaciju rada peći i kotlova snage do 2-3 kWt, mogućnost zamene fosilnih goriva peletima od biomase i odgovarajućih adaptacija/rekonstrukcija sistema za sagorevanje, korišćenje peleta proizvedenih od različitih sirovina, naročito od poljoprivredne i travnate biomase koji usled povećanog sadržaja pepela, više temperature topljenja pepela, značajnih emisija sumpornih oksida, azotnih oksida i policikličnih ugljovodonika predstavljaju poseban izazov kada su u pitanju uređaji male snage, kao i na unapređenu automatizaciju rada ložnih uređaja male snage u cilju poboljšanja njihovih energetske i ekološke performansi.

**6. MODELOVANJE I NUMERIČKA SIMULACIJA SAGOREVANJA
PELETA U UREĐAJIMA MALE SNAGE**

6.1 Uloga numeričkih simulacija u sagledavanju problematike sagorevanja biomase

Numeričke simulacije procesa sagorevanja primenom savremenih programskih paketa predstavljaju veoma koristan alat koji se često primenjuje u optimizaciji i poboljšanju karakteristika rada postrojenja i uređaja za sagorevanje različitih vrsta goriva. Razvoj i optimizacija postrojenja za sagorevanje koji se postižu primenom modelovanja stvaraju osnov za značajno smanjenje investicionih i operativnih troškova jer omogućavaju najpre ispitivanje, a potom i projektovanje i izradu postrojenja/uređaja čije konstruktivne karakteristike i optimizovani parametri rada (kao što su protok goriva i vazduha za sagorevanje, konfiguracija i geometrija ložišta, način dovoda goriva u ložište i slično) utiču na poboljšanje procesa sagorevanja, veću efikasnost rada i manju emisiju štetnih materija u okolinu. Pored toga, simulacijom procesa sagorevanja u uređajima i sistemima različitih snaga pri različitim uslovima rada mogu se dobiti strujni profili i vrednosti parametara procesa sagorevanja na mestima na kojima bi njihovo merenje bilo izuzetno teško ukoliko se ne žele remetiti uslovi rada celog sistema. Modelovanje omogućava i da se sagledaju i izbegnu problemi u radu koji se najčešće odnose na prekomerno zagrevanje ili prekomernu turbulenciju koja se može javiti u pojedinim delovima uređaja, čime se sprečavaju neželjeni efekti kao što su kvarovi, zašljakivanje ili korozija delova sistema za sagorevanje. Sa naučne strane, kroz variranje uticajnih faktora i analizu dobijenih rezultata, modelovanje omogućava bolje razumevanje procesa sagorevanja i uticaja koje pojedini parametri imaju na njegovo odvijanje. Kvalitet i pouzdanost razvijenog matematičkog modela zavisi od kvaliteta ulaznih parametara, pa se zato mora voditi računa da polazne fizičke i hemijske postavke, domen modela i naročito granični uslovi i dodatni pod-modeli, koji se ponekad moraju integrisati u osnovni model kako bi se adekvatno predstavili sagledavani fenomeni i omogućilo rešavanje polaznih matematičkih jednačina, budu adekvatno definisani. Međutim, potrebno je imati u vidu da suviše kompleksni modeli zahtevaju veoma dugo vreme za sprovođenje svake numeričke simulacije, tako da je potrebno naći optimalan odnos između tačnosti rezultata modela i vremena potrebnog za simuliranje analiziranog procesa sagorevanja.

Validacija razvijenog modela vrši se kroz proveru slaganja rezultata dobijenih numeričkom simulacijom sa rezultatima odgovarajućih eksperimentalnih ispitivanja, a u cilju potvrde adekvatnosti primene modela za određeni slučaj sagorevanja goriva.

Modelovanje sagorevanja biomase predstavlja posebno veliki izazov imajući u vidu kompleksnost procesa razgradnje pomenutog goriva pri turbulentnim uslovima koji se ostvaruju u ložištima uređaja za sagorevanje, heterogenost reakcija koje se odvijaju između čvrste i gasovite faze tokom procesa sagorevanja, hemijske reakcije gasne faze koje se odvijaju unutar ložišta i povezanosti razmatranog fenomena sa prenosom toplote zračenjem na zidove ložišta. Modelovanje sagorevanja biomase takođe zahteva i razvoj odgovarajućih pod-modela kojima će se opisati svi procesi koji se odnose na fenomene sagorevanja, strujanje fluida i prenos toplote i mase, ali i međusobne interakcije ovih procesa. Usled svega navedenog, broj razvijenih modela za sisteme sagorevanja biomase koji detaljno sagledavaju hemijske procese koji se tokom sagorevanja odvijaju kako u čvrstoj fazi sagorevanog goriva, tako i u gasnoj fazi gorivih isparivih komponenti, je relativno ograničen. U literaturi se može pronaći prilično detaljan pregled različitih modela koji su razvijani za potrebe simuliranja sagorevanja biomase u sloju [105]. Ovi modeli u osnovi se zasnivaju na modelovanju dva zasebna fenomena: konverzije čvrstog goriva, koje se najčešće nalazi u sloju na rešetci unutar ložišta, kao i mešanja i sagorevanja sagorivih gasova, ali i formiranje zagađujućih materija u gasovima iznad sloja. Istraživači se uglavnom odlučuju za jedan od tri pristupa:

- Pristup br. 1: model poroznog medijuma u softverskom paketu FLUENT koristi se kako bi se razmotrili procesi u sloju biomase u ložištu, pri čemu se granični uslovi definišu na osnovu eksperimentalno određenih podataka, a tako dobijeni rezultati dalje koriste kao ulazni parametri za modelovanje procesa sagorevanja sagorivih gasova u ložištu;
- Pristup br. 2: najveći broj istraživača odlučuje se za modelovanje procesa sagorevanja volatila u okviru čega se procesi u ložištu definišu preko kompleta ulaznih i graničnih podataka (temperatura, brzina strujanja, koncentracija gasova i dr.) određenih putem eksperimentalnih ispitivanja;
- Pristup br. 3: u poslednje vreme prisutne su i numeričke analize u okviru kojih se razvijaju posebni pod-modeli kako bi se u obzir uzeli procesi konverzije biomase u sloju goriva na rešeci, u okviru koga se prati napredovanje fronta plamena i

sagorevanje u sloju goriva, uz definisanje promene temperatura, hemijskih reakcija i brzina strujanja na površinskom delu sloja; pomenuti parametri se zatim koriste kao ulazni podaci za modelovanje sagorevanja sagorivih gasova; razvoj podmodela vrši se preko posebnih korisnički razvijenih funkcija (*UDF – user defined functions*) u okviru komercijalnih softverskih paketa; ovakav pristup je kompleksan i u sebi sadrži različite interpretacije i pretpostavke istraživača, tako da se ne može govoriti o opštim načelima modelovanja primenom pomenute metodologije.

Za potrebe modelovanja procesa sagorevanja biomase najčešće se koriste softverski paketi FLUENT, STAR-CD, CFX, COMSOL, BARRACUDA VR i dr., pri čemu se procesi koji se odvijaju u gasnoj fazi modeluju direktno u korišćenom softveru, dok se procesi koji se odvijaju u čvrstoj fazi najčešće modeluju u posebnim podprogramima, najčešće uz korišćenje podataka prikupljenih putem eksperimentalnih ispitivanja, da bi se zatim preko masenog i energetskog bilansa povezali sa procesima koji se odvijaju u gasnoj fazi [106, 107]. Pri tome, prilikom matematičke postavke modela i njegovog rešavanja, istraživači usvajaju različite pretpostavke kako bi pojednostavili kompleksan proces sagorevanja biomase, pri čemu usvojene pretpostavke zavise od konkretnog cilja koji se želi postići modelovanjem, kao i od eksperimentalnih rezultata koji su raspoloživi pri definisanju modela.

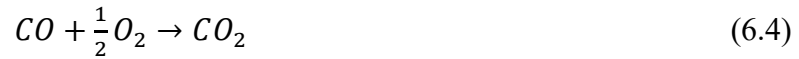
U nastavku je dat pregled nekoliko razvijenih matematičkih modela koji po problematici koju tretiraju i po svojim karakteristikama predstavljaju značajnu literaturu za potrebe definisanja modela sagorevanja peleta u peći male snage koja je predmet ove disertacije. Iako u literaturi postoji veći broj radova koji se bave problematikom modelovanja sagorevanja biomase, relativno mali broj tretira upravo peći i kotlove male snage koje kao gorivo koriste drveni pelet.

6.2 Pregled matematičkih modela razvijenih za simulaciju sagorevanja peleta u uređajima male snage

U matematičkom modelu predloženom za prikaz procesa sagorevanja peleta u kotlu deklarisanе toplotne snage 18 kWt [108], izvršena je simulacija sagorevanja drvnih peleta u uređaju složene konfiguracije, uz dovod primarnog vazduha za sagorevanje sa donje strane sloja goriva i dovod sekundarnog vazduha kroz posebne otvore koji se nalaze neposredno iznad tankog sloja goriva. Za razvoj trodimenzionalnog modela korišćen je komercijalni softverski paket Ansys Fluent 13, koji je dopunjen pod-programom razvijenim u programskom jeziku C++ u cilju definisanja doprinosa procesa koji se odvijaju u koksnom ostatku energetskim i masenim bilansima sagorevanja goriva. Sagorevanje goriva u razmatranom slučaju predstavlja kompleksan proces koji se u cilju analize razlaže na proces sušenja goriva, devolatilizaciju i sagorevanje koksnog ostatka. Domen modela je geometrija razmatranog kotla, koja je numeričkom mrežom podeljena na ukupno četiri miliona ćelija. Autori su prepoznali da se usled kompleksnosti geometrije ložišta mogu očekivati različiti strujni profili unutar ložišta, od gotovo statičnih gasova u pojedinim delovima ložišta, do izuzetno turbulentnog strujanja u zonama plamena ili zonama dovoda vazduha u ložište. Usvojen je k-ε model turbulencije, kao i *eddy-dissipation* pod-model (model disipacije tj. rasipanja turbulentnih fluktuacija) kojim su definisani mehanizmi odvijanja hemijskih reakcija u turbulentnom strujanju, pretpostavljajući da se hemijske reakcije odvijaju trenutno, neposredno po dovođenju goriva u ložište (što predstavlja aproksimaciju jer situacija u praksi nije takva).

Proces sagorevanja produkata devolatilizacije tj. sagorivih gasova definisan je višestepenim procesom sagorevanja, predstavljen jednačinama 5.1-5.5, gde je u obzir uzeta oksidacija teških ugljovodonika (C₆H₆), lakih ugljovodonika (CH₄), CO, H₂, kao i termičko razlaganje CO₂ [109, 110]:





Prenos toplote zračenjem u ložištu modelovan je preko koeficijenta apsorpcije zračenja koji predstavlja funkciju veličine ćelije definisanog domena i koncentracije gasova koji su osetljivi na zračenje. U obzir je uzet i uticaj čađi na prenos toplote zračenjem i to preko koeficijenta apsorpcije zračenja čađi, kao i zračenje koje apsorbuje gorivo u sloju. Na taj način, ukupan koeficijent zračenja definisan je na sledeći način:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_{gas} + \alpha_{čađ} + \alpha_{sloj} = \\ &= \alpha_{gas} + \left[0,03 \times (1,6 \times 10^{-3} \times T - 0,5) \times (2 - \lambda) \times \frac{C^R}{H^R} \times L \right] + \left[-\frac{1}{d_{eq} \log \epsilon} \right] \end{aligned} \quad (6.6)$$

gde je d_{eq} ekvivalentni prečnik sferične čestice goriva, izračunat na osnovu prečnika i dužine cilindričnog peleta definisanog putem karakterizacije korišćenog goriva i to kao $d_{eq} = D_p \times \left(\frac{3Lp}{2Dp}\right)^{1/3}$, C^R i H^R označavaju sadržaj ugljenika i vodonika (%) u gorivu, dok je λ koeficijent viška vazduha.

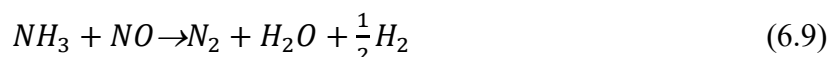
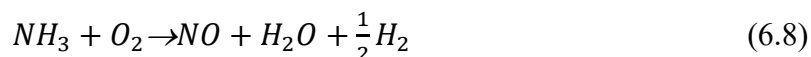
Modelovanje procesa koji se odvijaju u sloju goriva zasnovano je na pretpostavci da je sloj porozan medijum i da čvrsta faza u sloju ima iste karakteristike kao korišćeni pelet. Kao kriterijum za brzinu odvijanja složenih reakcija u sloju goriva uveden je bezdimenzionalni Damkelerov broj (Da) koji dovodi u vezu brzinu mešanja reaktivnih komponenti goriva usled turbulencije i vremena odvijanja hemijskih reakcija u sloju goriva. Na taj način, Da definisan je na sledeći način:

$$Da = \frac{S_b \times l_b}{|\bar{v}_0|} = \frac{\tau_{conv}}{\tau_{reac}} \quad (6.7)$$

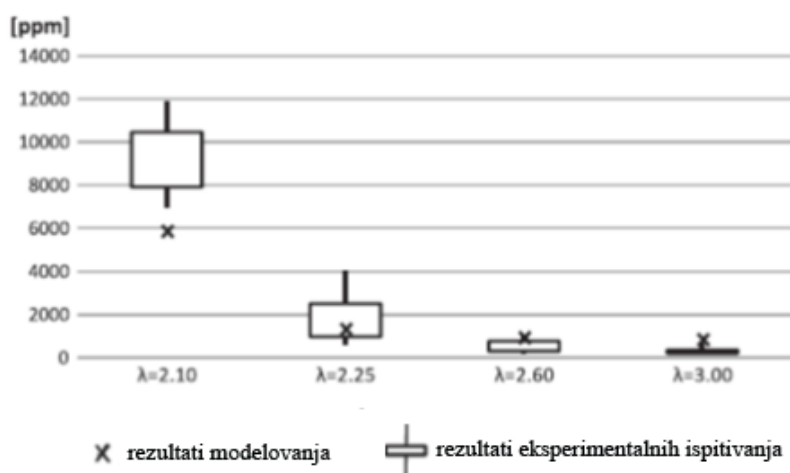
gde je $S_b = \frac{\phi \times \dot{m}_f}{V_{bed}}$ odnos nastajanja gasova iz sloja goriva, u okviru koga je ϕ stehiometrijski koeficijent potrošnje peleta u sloju, \dot{m}_f je potrošnja goriva (peleta) i V_{bed} je zapremina sloja peleta, l_b je karakteristična dužina sloja i \bar{v}_0 je srednja brzina gasova

u sloju goriva. Pri tome, visina sloja odabrana je kao karakteristična veličina procesa koja je određena vizuelno i u stacionarnom režimu rada utvrđeno da iznosi 12 mm, što odgovara visini sloja formiranog od dva reda peleta (prečnika 6 mm). Deljenjem visine sloja sa brzinom gasova u sloju moguće je odrediti prosečno vreme koje gasovi provedu prolazeći kroz sloj. Primenom usvojenih pretpostavki određeno je da iznosi 0,1 što znači da je vreme mešanja reaktanata 10 puta veće od vremena boravka gasova u sloju, što dalje navodi na zaključak da je transport gasova u sloju dovoljan da se može smatrati da su skoro sve čestice goriva u sloju okružene gasovima sličnih karakteristika.

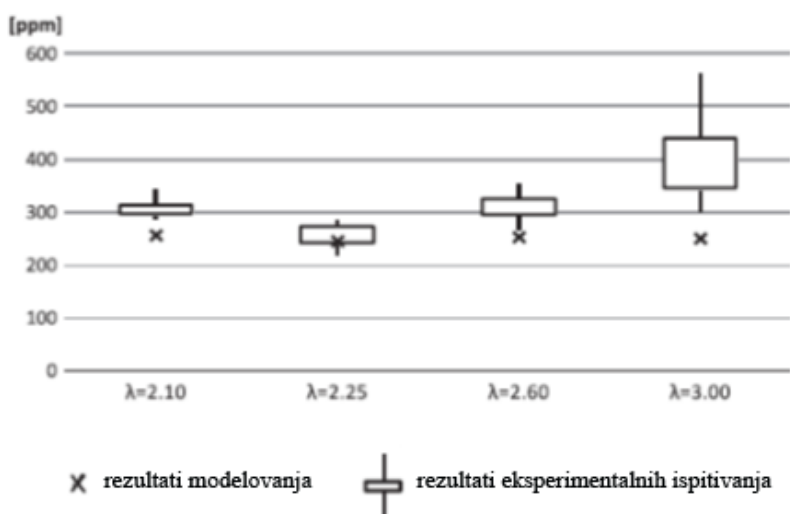
Sa aspekta modelovanja formiranja zagađujućih materija, u obzir je uzeto formiranje CO i NO_x. Pri tome, pretpostavljeno je da se azotni oksidi formiraju samo od azota iz goriva, dok je proces obrazovanja NO_x od azota iz vazduha zanemaren. Navedena pretpostavka objašnjena je činjenicom da su temperature koje se razvijaju u ložištu uređaja za sagorevanje biomase niže nego u slučaju sagorevanja ostalih goriva, tako da formiranje termičkog NO ne predstavlja poseban problem [111]. Azot iz goriva se oslobađa tokom procesa devolatilizacije u vidu amonijaka (NH₃), pri čemu je model oksidacije NH₃ u NO i zatim u N₂ predstavljen sledećim dvostepenim mehanizmom:



Model razvijen u softverskom paketu FLUENT [112] je tako obuhvatio niz podmodela koji su integrisani u sam model (*energy, species transport, reactions, standard k-ε model, discrete phase, radiation* podmodeli). Upoređivanjem rezultata dobijenih primenom modela sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja zaključeno je da je postignuto zadovoljavajuće slaganje dve grupe podataka. Na Slici 6-1 prikazano je slaganje eksperimentalnih i rezultata dobijenih numeričkom simulacijom za emisije zagađujućih materija iz razmatranog kotla i to za različite vrednosti koeficijenta viška vazduha. Za emisije CO postignuto je zadovoljavajuće slaganje podataka u svim slučajevima osim za slučaj $\lambda = 2,1$ kada je primećeno odstupanje koje je pripisano relativno gruboj aproksimaciji infiltracije u modelu. Odstupanje koje je registrovano u slučaju emisija NO_x pripisano je pretpostavci koje se odnosi na stvaranje azotnih oksida samo oksidacijom azota iz goriva, dok su ostali mehanizmi formiranja NO_x zanemareni.



a)

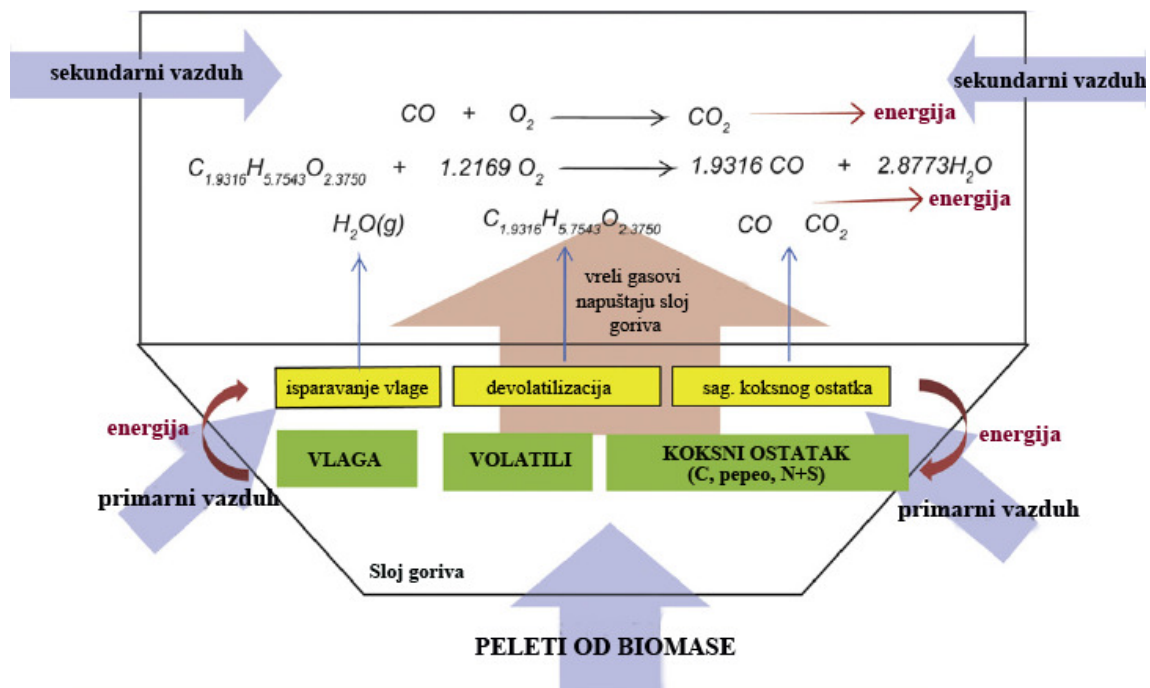


b)

Slika 6-1 Prikaz slaganja rezultata razvijenog modela i eksperimentalnih ispitivanja za: a) emisije CO i b) emisije NO_x [108]

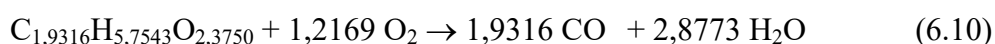
U naučnom radu u kom je predstavljen numerički model sagorevanja peleta u uređajima male snage [113], sprovedena je simulacija sagorevanja drvnih peleta u kotlu snage 50 kWt. Gorivo se u kotao dovodi sa donje strane rešetke za sagorevanje, pri čemu se primarni vazduh u ložište uvodi u zoni formiranog sloja goriva, dok se sekundarni vazduh dovodi u gornju zonu ložišta, tj. u zonu sagorevanja sagorivih dimnih gasova. Za numeričku simulaciju procesa u kotlu korišćen je softverski paket FLUENT, uz korišćenje dodatnih korisnički definisanih funkcija (*user defined functions*)

- UDF) kojima je opisana termička degradacija peleta i njihova interakcija sa gasnom fazom. Pomenute funkcije napisane su u specijalizovanom programskom jeziku “C” kojima je nadograđen osnovni programski kod. Reakcije sagorevanja sagorivih gasova opisane su pod-modelom transporta hemijskih komponenti (*Species Model*) u okviru FLUENT-a. Domen modela je geometrija kotla, uz relativno retku numeričku mrežu koja je usvojena kako bi se vreme obrade podataka ubrzalo. Sloj goriva na rešetci modelovan je kao porozni sloj, sa diskretnim zonama devolatilizacije za koje je definisan stepen devolatilizacije po jedinici zapremine svake pojedinačne zone. Pretpostavljeno je odvijanje potpunog sagorevanja u sloju, sa pepelom kao krajnjim produktom. Svi procesi u sloju koji učestvuju u masenom bilansu (isparavanje vlage, devolatilizacija i sagorevanje koksnoeg ostatka) smatrani su stacionarnim za usvojene vrednosti protoka vazduha, odnosa protoka primarnog i sekundarnog vazduha i definisane karakteristike goriva. Na Slici 6-2 dat je šematski prikaz postavke modela. U cilju pojednostavljenja razmatranog problema, svi volatili predstavljeni su jednim fiktivnim ugljovodonikom ($C_{1,9316}H_{5,7543}O_{2,3750}$), čiji su indeksi određeni iz masenog bilansa i na osnovu rezultata karakterizacije goriva.



Slika 6-2 Šematski prikaz modela sagorevanja peleta u kotlu snage 50 kWt [113]

Procesi u gasnoj fazi smatrani su kinetički intenzivnim u odnosu na potrebno vreme mešanja goriva i vazduha, pa je tako brzina mešanja hemijskih komponenti iskorišćena da se definišu brzine odvijanja hemijskih reakcija. Na taj način, u FLUENT-u je izabran *eddy-dissipation* pod-model (model disipacije turbulentnih fluktuacija) turbulentnog mešanja hemijskih komponenti. Sagorevanje volatila koji se izdvajaju iz sloja sagorevanog goriva predstavljeno je sledećom dvostepenom reakcijom:



Pretpostavljeno je da se devolatilizacija odvija u gornjem delu sloja i to konstantnom brzinom u svim zonama sloja goriva. Turbulentno strujanje u ložištu modelovano je primenom k-ε modela turbulencije, dok je za prenos toplote zračenjem korišćen P1 pod-model u sklopu FLUENT-a.

Razvijeni model testiran je za četiri varijante dovoda primarnog i sekundarnog vazduha u ložište kotla, počevši od slučaja dovođenja samo primarnog vazduha (bez sekundarnog vazduha), preko odnosa protoka primarnog i sekundarnog vazduha od 0,8, zatim 0,6 i na kraju od 0,4. Kao rezultat modela dobijeni su temperaturski i strujni profili, kao i raspodela koncentracija O₂ i CO za razmatrana četiri slučaja tj. režima rada kotla. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da veći protok primarnog vazduha pogoduje razvoju plamena viših temperatura, što je i očekivano imajući u vidu da veća količina primarnog vazduha pogoduje odvijanju potpunog sagorevanja iznad sloja goriva na rešetci i većem oslobađanju energije oksidacionih reakcija, pa samim tim i višim temperaturama. Takođe, u slučaju značajnog protoka sekundarnog vazduha (odnos 0,6) dolazi do pojave visokih temperatura u gornjim zonama ložišta i to kao rezultat oksidacije CO usled uvođenja sekundarnog vazduha. Koncentracija O₂ na izlasku iz ložišta iznosila je 6,8% za sve ispitivane slučajeve. Koncentracije CO dobijene numeričkom simulacijom odgovaraju situaciji koja se može očekivati u praksi: za odnos protoka primarnog i sekundarnog vazduha od 0,6 (što je smatrano standardnim uslovima rada kotlova ove vrste) koncentracija CO iznosila je 208 ppm, za odnos od 0,4 koncentracija CO iznosila je 2.045 ppm, dok je za odnos od 0,8 koncentracija CO iznosila svega 0,0012 ppm. Iako je dobijeni trend očekivan i potvrđuje da se porastom

protoka primarnog vazduha ostvaruje potpunije sagorevanje i niže emisije CO, apsolutne vrednosti koje su dobijene sprovedenim simulacijama daleko su niže od onih koje se sreću u praksi. To je u prvom redu posledica pojednostavljenja usvojenih u modelu (samo jedna vrsta ugljovodonika koja predstavlja volatile, dvostepene reakcije koje simuliraju sve faze hemijskih reakcija i dr.), kao i lokacije uvođenja sekundarnog vazduha u ložište, koja je u realnosti nešto niža od položaja koji je definisan u modelu. Takođe, u k- ϵ modelu korišćeni su predefinisani koeficijenti iz FLUENT-a za koje je pokazano da mogu dovesti do previše agresivnog mešanja u zoni sagorevanja [107]. Nakon pomenutih korekcija i unapređenja modela, autori očekuju da će se dobiti veoma koristan alat za optimizaciju odnosa protoka primarnog i sekundarnog vazduha koji ima veliki uticaj na energetske i ekološke performanse uređaja za sagorevanje.

Posebna numerička simulacija sagorevanja drvnih peleta u sloju sprovedena je u cilju implementacije specijalno razvijenih podmodela kojima je uzeta u obzir termička konverzija sloja čvrstog goriva i njegova interakcija sa sagorivim gasovima [114]. Podmodeli su razvijeni u programskom jeziku C++ i integrisani u 3D model eksperimentalnog ložišta koji je definisan korišćenjem komercijalnog softverskog paketa Ansys Fluent 13.0. Sagorevanje goriva modelovano je za različite vrednosti protoka vazduha za sagorevanje.

Model se zasniva na nekoliko usvojenih pretpostavki:

- porozni sloj predstavljen je kao disperzni medijum, sa odgovarajućim usrednjenim karakteristikama u svakoj ćeliji domena koji pokriva pomenuti sloj goriva;
- sabijanje goriva usled ispravanja vlage, devolatilizacije i sagorevanja koksnog ostatka predstavlja jedino kretanje koje se u sloju goriva odvija tokom procesa sagorevanja;
- sloj goriva sastoji se od sferičnih čestica koje imaju iste termičke karakteristike po celoj svojoj površini;
- gustina goriva se tokom faza ispravanja vlage, devolatilizacije i sagorevanja koksnog ostatka menja, dok se udeo čvrste faze u sloju goriva menja samo tokom sagorevanja koksnog ostatka;
- isparavanje vlage odvija se na određenoj temperaturi i termički je kontrolisano;
- devolatilizacija goriva predstavljena je trostepenim mehanizmom izdvajanja volatila;

- isparavanje volatila iz čestica goriva dešava se veoma brzo tj. trenutno;
- razmena toplote između čvrste i gasovite faze odvija se konvekcijom i zračenjem;
- volatili iz sloja goriva prelaze u zonu sagorivih gasova na temperaturi koju imaju i čestice goriva (čvrsta faza) ;
- sagorivi gasovi smatraju se idealnim, nestišljivim gasom.

Domen modela podeljen je na dve zone: 1) zonu sloja goriva u kojoj dolazi do interakcije čvrstog materijala i isparivih sagorivih gasova, i 2) zonu sagorevanja sagorivih gasova. Za potrebe opisa procesa koji se odvijaju u čvrstoj komponenti sloja goriva, definisano je ukupno šest procesnih parametara: temperatura čvrste faze sloja (T_s), udeo čvrste faze u sloju (ϵ), gustina vlage u sloju goriva (ρ_m), gustina suve drvene biomase (ρ_w), gustina koksnog ostatka (ρ_c) i zapremina čestice goriva (d_p^3 , gde je d_p prečnik sferične čestice goriva). Iako komercijalni softveri nemaju integrisane podmodele kojima bi se uzela u obzir termička degradacija goriva u sloju, oni dozvoljavaju intervenisanje preko posebnih programskih podmodela, što je u razmatranom slučaju urađeno u programskom jeziku C++. Jednačine kojima su opisane promene parametara koji su usvojeni kao indikativni za procese koji se odvijaju u čvrstoj fazi sloja goriva su sledeće:

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_p c_p T_s)}{\partial t} = \nabla(k_{s,eff} \cdot \nabla T_s) + S_s \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = -\frac{\dot{\omega}_{c,char}'''}{\rho_p} \epsilon \quad (6.13)$$

$$\frac{\lambda d_p^3}{\lambda t} = -\frac{\dot{\omega}_{c,char}'''}{\rho_p} d_p^3 \quad (6.14)$$

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_m)}{\partial t} = -\dot{\omega}_{moist}''' \epsilon \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_w)}{\partial t} = -\dot{\omega}_w''' \epsilon \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial(\epsilon\rho_c)}{\partial t} = (\dot{\omega}_{G,char}''' - \dot{\omega}_{c,char}''') \epsilon \quad (6.17)$$

$$\rho_{moist} + \rho_{wood} + \rho_{char} = \rho_p \quad (6.18)$$

gde su $k_{s,eff}$ efektivna toplotna provodnost sloja, a $\dot{\omega}_i'''$ brzina oslobađanja ili trošenja pojedinih komponenti drvene biomase.

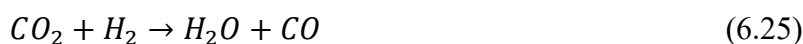
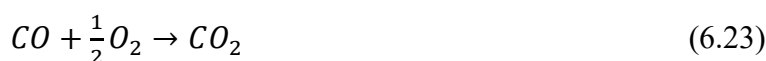
Energetski bilans čvrste faze u sloju goriva modelovan je na sledeći način:

$$S_s = S_s^{reac} + S_s^{conv} + S_s^{rad} + S_s^{loss} \quad (6.19)$$

gde S_s predstavlja tzv. *source* član tj. ukupnu oslobođenu energiju koja obuhvata energiju hemijskih reakcija isparavanja vlage, devolatilizacije i sagorevanja koksnog ostatka, energiju razmenjenu konvekcijom, energiju razmenjenu zračenjem i gubitke energije usled promene gustine i udela čvrste materije u sloju goriva.

Svaka od ranije pomenutih faza (isparavanje vlage, devolatilizacija i sagorevanje koksnog ostatka) opisana je odgovarajućim diferencijalnim jednačinama. Za heterogene hemijske jednačine kojima je opisan proces sagorevanja koksnog ostatka određeni su kinetički parametri kojima je definisana difuzija i termička difuzija O_2 , CO i vodene pare.

Procesi u gasnoj fazi opisani su jednačinama 6.20-6.25 kojima je definisana parcijalna oksidacija ugljovodonika (benzena, metana i vodonika) oslobođenih u procesu devolatilizacije drvene biomase u ugljen monoksid. Procesne reakcije kompletirane su reakcijom oksidacije CO u CO_2 , kao i reakcijama reagovanja H_2O i CO , kao i molekularnog vodonika:

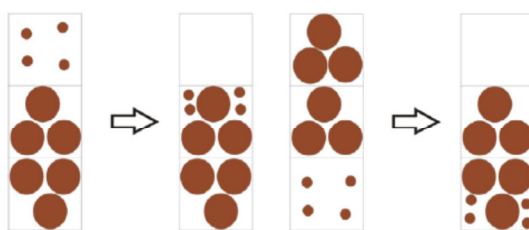


Za navedene homogene reakcije definisani su odgovarajući kinetički parametri.

Za procese koji se odvijaju u zoni sagorivih gasova definisane su jednačine održanja mase, momenta količine kretanja, energije, hemijskih komponenata, turbulentnog strujanja i formiranja čađi. Pomenute jednačine rešavane su algoritmom koji je integrisan u softverski paket FLUENT, kao i u sličnim numeričkim simulacijama [107,

109, 115]. Za modelovanje turbulencije korišćen je $k-\varepsilon$ model, dok je formiranje čađi modelovano Mos-Bruksovim modelom [116]. Uticaj turbulencije na kinetiku procesa sagorevanja gasova modelovan je putem kombinovanog modela konačne brzine hemijskih reakcija i modela disipacije turbulentnih fluktuacija (*finite-rate / eddy disipation model*).

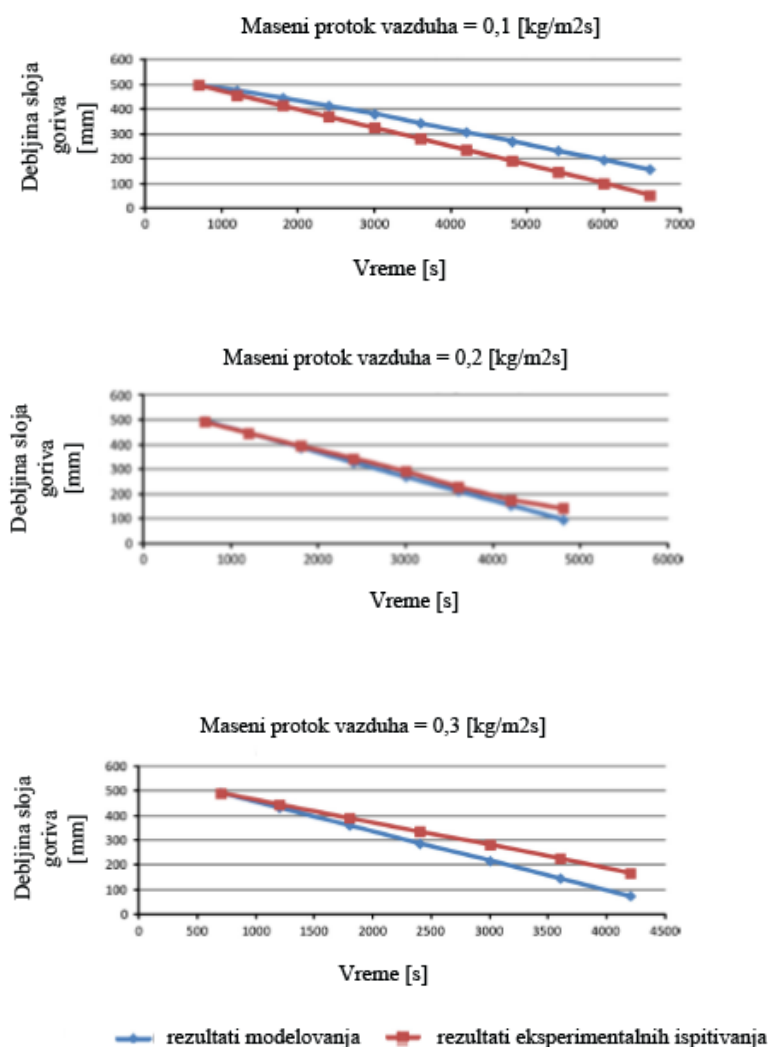
Kao posebni novitet opisanog istraživanja definisan je model sabijanja sloja peleta, u okviru koga se površina sloja pomera (sabija) na dole, shodno dinamici isparavanja gorivih materija i smanjenju debljine i zapremine sloja. Model pomenutog procesa obrazovan je tako što je u obzir uzeta razmena mase između ćelija goriva u sloju, pri čemu se numerički definisane ćelije u gornjim delovima sloja “prazne” na račun “punjenja” ćelija u donjem delu sloja, kao što je prikazano na Slici 6-3. Model takođe obuhvata promene u količini vlage, volatila i udela koksnog ostatka koje su prouzrokovane svakim pomeranjem ćelija u sloju.



Slika 6-3 Šematski prikaz modelovanog sabijanja goriva u sloju [114]

Serijska simulacija sprovedena je za različite vrednosti masenog protoka vazduha od $0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ do $0,40 \text{ kg/m}^2\text{s}$ kako bi se ispitala usaglašenost sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja. Dobijeni rezultati ukazuju da je pri niskim protocima vazduha temperatura sagorivog gasa bila relativno niska (1000-1100 K) i to kao posledica nedovoljne količine kiseonika za odvijanje homogenih reakcija. Nedostatak kiseonika takođe dovodi do primetne zone nesagorelog koksnog ostatka koja je registrovana numeričkom simulacijom procesa sagorevanja. Veći protok vazduha u gorioniku dovodi do smanjenja zone nesagorelog koksnog ostatka, pa je temperatura čvrste faze unutar sloja viša. Temperatura sagorivih gasova je takođe viša usled homogenih reakcija koje se odvijaju u gornjoj zoni ložišta. Simulacija sabijanja biomase u sloju goriva i smanjenje debljine sloja sa vremenom ukazala je na linearnu zavisnost

razmatranog parametra za sve ispitane vrednosti masenog protoka vazduha (početni period sagorevanja nije uzet u obzir usled karakterističnih nestabilnosti koje se javljaju do dostizanja stacionarnih uslova sagorevanja), što se poklapa sa trendom utvrđenim tokom eksperimentalnih ispitivanja. Za male vrednosti protoka vazduha od $0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ nagib numeričke krive manji je od nagiba eksperimentalne krive. Za protok od $0,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$ nagibi dveju kriva se skoro poklapaju, dok za veći protok vazduha od $0,3 \text{ kg/m}^2\text{s}$ numerička kriva ima nešto veći nagib od eksperimentalne krive promene debljine sloja goriva. Zaključeno je da je razvijenim modelom postignuto dobro slaganje sa eksperimentalnim podacima, naročito za niže vrednosti protoka vazduha za sagorevanje.



Slika 6-4 Poređenje eksperimentalnih rezultata i rezultata modelovanja promene debljine sloja goriva [114]

U okviru istraživanja sagorevanja ogrevnog drveta (bukve) u peći snage 8 kWt [117], sprovedena je matematičko-numerička simulacija procesa koji se odvijaju u ložištu peći, pri čemu su u obzir uzeti konvektivni fenomeni i prenos toplote zračenjem od zone sagorevanja ka zidovima ložišta. Za ove namene korišćen je softverski paket FLUENT 6.3.26, kojim je modelovano sagorevanje jednog komada goriva tj. cepanice bukve kvadratnog poprečnog preseka u pojednostavljenoj geometriji peći u kojoj se vazduh za sagorevanje dovodi sa donje strane, ispod rešetke na kojoj je smešteno gorivo, dok se u gornjoj zoni ložišta odvija sagorevanje sagorivih gasova. Domen modela predstavlja opisana, uprošćena geometrija razmatrane peći. Problematika je definisana postavljanjem parcijalnih diferencijalnih jednačina održanja mase, momenta količine kretanja i održanja hemijskih komponentata:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6.26)$$

$$\frac{\partial(U_j U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + g \quad (6.27)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_j Y_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} J_i + R_i + S_i \quad (6.28)$$

gde je R_i intenzitet nastajanja hemijske vrste i , a Y_i maseni udeo hemijske vrste i .

Navedene jednačine proširene su i jednačinom održanja energije u sklopu paketa FLUENT. Jednačine su rešavane numeričkom metodom konačnih zapremina. Bukva, kao sirovina koja se sagoreva, okarakterisana je kao gorivo koje sadrži 73% volatila i 27% fiksnog ugljenika. Autori su pretpostavili da se komad goriva sastoji iz dva dela: unutrašnjeg dela koji ima karakteristike izvorne sirovine i spoljašnjeg dela koji predstavlja izvor sagorivih gasova.

Proces sagorevanja goriva je uprošćen i predstavljen samo sagorevanjem isparivih sagorivih materija (volatila). Hemijske komponente volatila definisane su na osnovu jednačina sagorevanja okarakterisanog goriva i korigovane za realan sadržaj vlage. Teorijska potrošnja kiseonika za sagorevanje, kao i sadržaj izlaznih dimnih gasova određeni su stehiometrijski za toplotnu snagu peći od 8 kWt. U Tabeli 6-1 dati su izračunati maseni udeli pojedinih komponenti gasovitih produkata sagorevanja. Model razmene energije obuhvatio je pod-model zračenja koji je integrisan u softverski paket FLUENT (tzv. *discrete ordinates* pod-model). U ovom podmodelu definisane su

termičke karakteristike materijala izrade peći kako bi se prenos toplote zračenjem adekvatno simulirao.

Tabela 6-1 Teorijska količina dimnih gasova i realna količina vazduha za sagorevanje [117]

Toplotna snaga peći	Maseni protok volatila	Protok vazduha	Komponente izlaznog dimnog gasa			
			H ₂ O	CO ₂	N ₂	O ₂
P [kW]	kg/s	[kg/kg]	maseni udeo [% m/m]			
8	0,000502	6,29	10,97	13,95	66,27	8,82
		kg/s	kg/s			
		0,003156	0,000401	0,00051	0,002424	0,000322

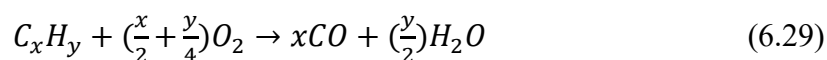
Dobijeni rezultati numeričke simulacije obuhvatili su definisanje temperaturskog polja unutar domena modela, kao i koncentracije komponenti izlaznog dimnog gasa. Dobijeno temperatursko polje u ložištu peći pokazalo je da temperatura plamena dostiže maksimalnu vrednost od 1480°C. Što se tiče sadržaja pojedinih komponenti u izlaznom dimnom gasu i ostvarene toplotne snage, numeričkom simulacijom dobijene su vrednosti koje odgovaraju analitički određenom sastavu gasovitih produkata sagorevanja, što ukazuje da predloženi model adekvatno odražava analiziranu problematiku. U Tabeli 6-2 dato je poređenje analitički i numerički određenih parametara.

Tabela 6-2 Poređenje analitički određenih parametara sa rezultatima numeričkog modela [117]

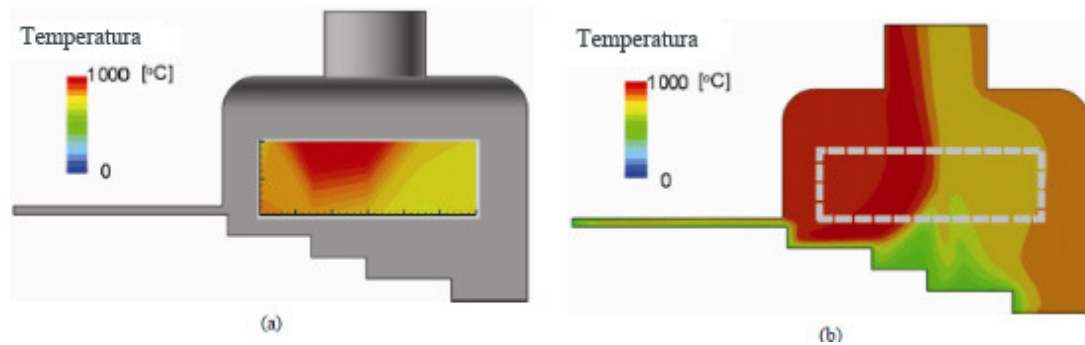
Parametar	Analitički određena vrednost	Vrednost dobijena numeričkom simulacijom
Toplotna snaga peći [kW]	8,000	7,892
Sadržaj H ₂ O u dimnom gasu [% m/m]	10,97	10,10
Sadržaj CO ₂ u dimnom gasu [% m/m]	13,95	12,80
Sadržaj N ₂ u dimnom gasu [% m/m]	66,27	67,20
Sadržaj O ₂ u dimnom gasu [% m/m]	8,82	9,90

Na kraju ovog pregleda, potrebno je pomenuti i relativno jednostavan model sagorevanja peleta u kotlu na pelet snage 279 kWt, gde je proces sagorevanja modelovan reakcijama homogenog sagorevanja sagorivih gasova u ložištu kotla [118]. Kotoa za sagorevanje goriva na rešetci konstruisan je tako da gorivo, koje se dovodi sa gornje strane, gravitaciono pada na rešetku, dok se vazduh za sagorevanje dovodi sa bočne strane rešetke. Rešetka je izvedena kao četvorostepena, sa četiri nivoa duž poprečnog preseka ložišta. Prvi nivo rešetke nalazi se u ravni bočnog dovoda vazduha za sagorevanje, dok je svaki sledeći nivo rešetke niži od prethodnog. Usled simetričnosti kotla, sa obe strane kotla pretpostavljeni su isti granični uslovi, tako da je domen modela definisan samo za jednu polovinu kotla. Količina goriva na svakom nivou rešetke određena je na osnovu eksperimentalno određene količine pepela koja nakon sagorevanja goriva preostane na svakom od četiri nivoa rešetke. Utvrđeno je da se pomenute količine goriva nalaze u međusobnom odnosu 1:4:4:1. Pretpostavljen je ravnomeran dovod vazduha za sagorevanje na sva četiri nivoa rešetke.

Za modelovanje je korišćen softverski paket FLUENT u kom su rešavane parcijalne diferencijalne jednačine održanja mase, momenta količine kretanja, energije i hemijskih komponenata. U jednačini održanja momenta količine kretanja korišćen je k-ε model turbulencije, dok je za modelovanje prenosa toplote zračenjem u okviru jednačine održanja energije korišćen metod diskretnih ordinata (*discrete ordinate*). U jednačini održanja hemijskih vrsta za potrebe definisanja intenziteta nastajanja hemijskih komponenata primenjen je model disipacije turbulentnih fluktuacija (*eddy disipation*). Procesi pirolize i sagorevanja drvene materije modelovani su uz pretpostavku da produkte procesa čine vlaga, volatili i koksni ostatak. Uz dodatnu pretpostavku homogenosti ovih reakcija, intenzitet formiranja/razgradnje hemijskih komponenata procenjen je na osnovu Arenijusove jednačine, koja daje zavisnost konstante brzine hemijske reakcije od temperature i energije aktivacije, gde su kinetički parametri definisani na osnovu podataka iz literature [119]. Hemijske reakcije sagorevanja volatila u uslovima turbulentnog strujanja modelovane su dvostepenim mehanizmom oksidacije:

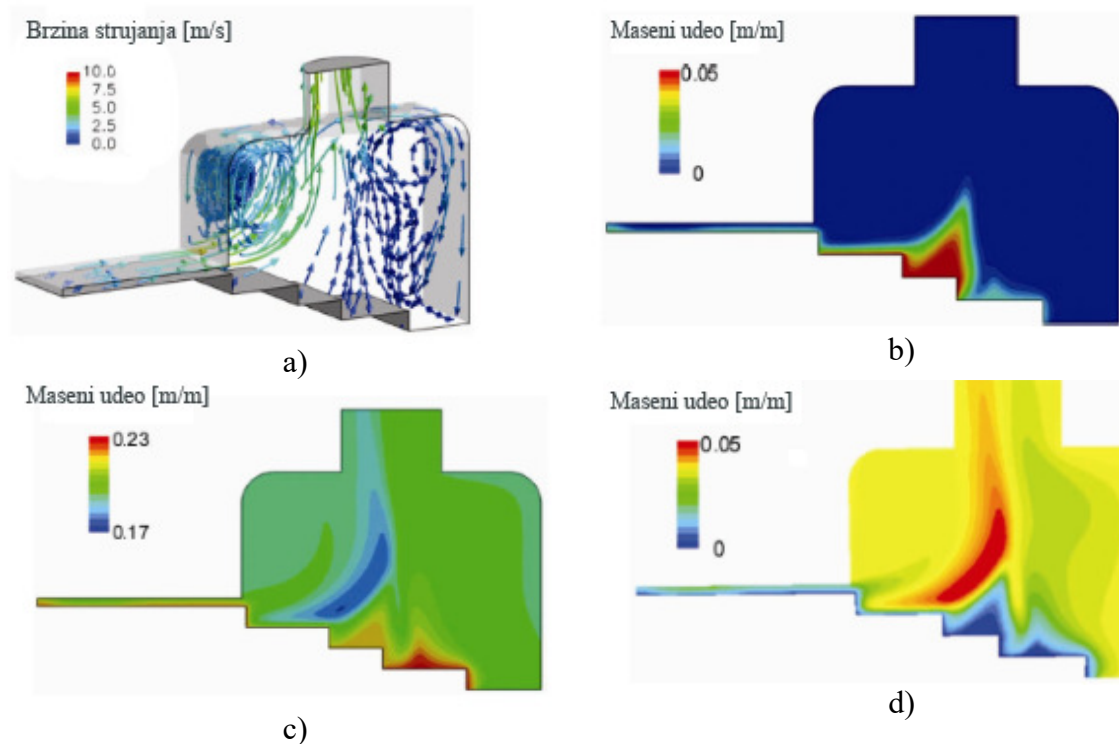


Rezultati sprovedene simulacije predstavljeni su kroz temperatursko i strujno polje unutar domena modela, položaja fronta plamena, kao i distribucije O_2 i CO unutar ložišta kotla. Upoređivanjem temperaturskog polja utvrđenog merenjem temperatura na karakterističnim mestima u ložištu sa rezultatima modela, zaključeno je da je razvijeni numerički model uspešno predvideo zonu visokih temperatura i pravac prostiranja plamena, Slika 6-5.



Slika 6-5 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata temperaturnog polja:
a) eksperimentalni podaci, b) numerička simulacija [118]

Što se tiče strujnog polja, model je adekvatno simulirao kretanje struje vazduha za sagorevanje, ukazujući da se najveći deo gasne struje kreće ka izlazu iz ložišta, uz formiranje zona recirkulacije u uglovima ložišta. Takođe, utvrđeno je da se sagorevanje goriva uglavnom odvija na drugom nivou rešetke, kao što se može videti na Slici 6-6b. Zona nižih koncentracija O_2 identifikovana je u zoni rasprostiranja plamena, Slika 6-6c, dok su više koncentracije registrovane na četvrtom nivou rešetke, gde je utvrđeno da je količina goriva manja od količine vazduha koja dolazi na taj nivo rešetke. Što se tiče formiranja CO , sa Slike 6-6d je uočljivo da je zona visokih koncentracija CO prisutna u blizini zone niskih koncentracija O_2 . Na osnovu sprovedenih simulacija autori su došli do značajnih zaključaka o neravnomernosti odvijanja procesa sagorevanja peleta na različitim nivoima rešetke, položaju zona recirkulacije gasova unutar ložišta, kao i neadekvatnom sagorevanju goriva na nižim nivoima rešetke. Na osnovu dobijenih rezultata numeričkog modela autori su predložili konstruktivna unapređenja kotla kojima bi se postigle bolje performanse razmatranog uređaja za sagorevanje peleta.

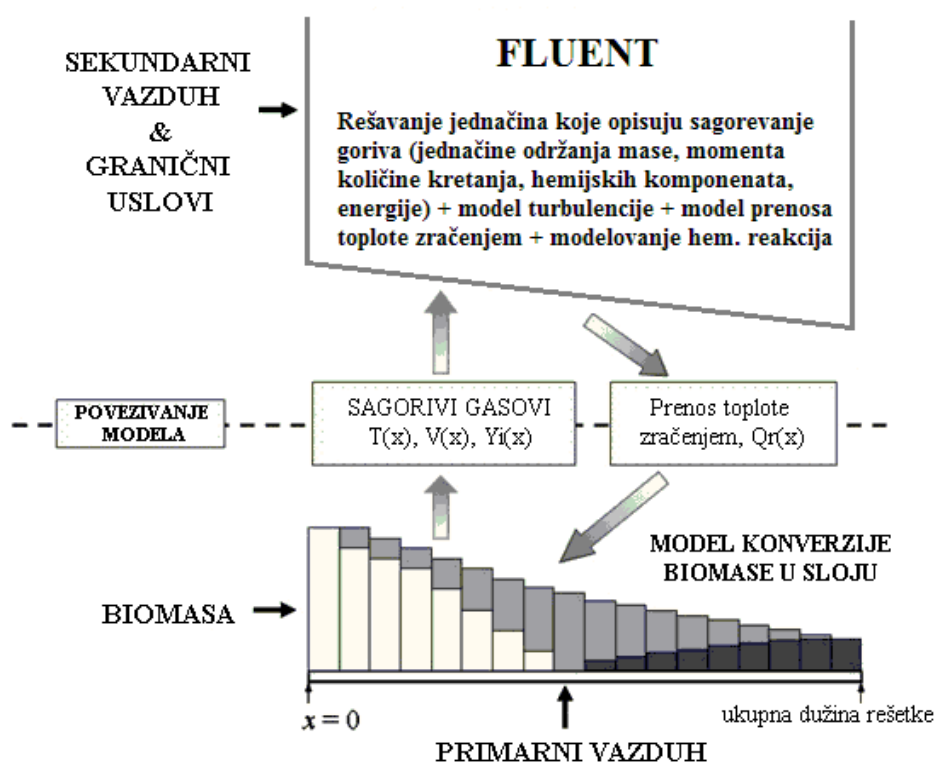


Slika 6-6 Numerička simulacija: a) strujnog polja, b) raspodele goriva, c) raspodele O₂ i c) raspodele CO u ložištu kotla [118]

6.3 Analiza matematičkih modela razvijenih za simulaciju sagorevanja peleta u uređajima male snage

Na osnovu analize matematičkih modela razvijenih za sagorevanje biomase tj. peleta u pećima i kotlovima male snage, može se zaključiti da u literaturi postoji relativno mali broj razvijenih modela koji su se bavili predmetnom problematikom. Kompleksnost procesa sagorevanja prouzrokovana širokim spektrom raspoloživih goriva, heterogenom prirodom sagorevanja biomase, fenomenima koji nisu do kraja objašnjeni, različitim konstrukcijama uređaja za sagorevanje i značajnom ulogom sistema automatskog upravljanja koji regulišu rad ovih uređaja, dovode do nemogućnosti razvoja univerzalnog modela sagorevanja peleta u pećima i kotlovima male snage. Podaci iz literature [105-111, 116-115, 117-119] ukazuju da se u okviru numeričkog modelovanja uglavnom primenjuje metodologija u okviru koje se proces konverzije biomase u sloju goriva simulira posebnim modelom, dok se za procese

sagorevanja gorivih gasova koristi neki od komercijalno raspoloživih softverskih paketa. Pomenuta dva modela se zatim povezuju preko jednačina prenosa toplote i mase kroz graničnu površinu koja razdvaja pomenute dve zone u ložištu uređaja (gornja površina sloja goriva koje se nalazi na rešetci za sagorevanje). Na taj način, simuliranje procesa sagorevanja čvrstog goriva u sloju obezbeđuje početne uslove za procese koji se odvijaju u zoni sagorivih gasova (koncentraciju gasova, strujno i temperaturno polje duž rešetke na kojoj se nalazi sloj goriva), dok simulacija procesa u zoni sagorivih gasova daje toplotni fluks koji se sloju goriva predaje od strane fronta plamena i zračenjem zidova ložišta, kao što je šematski prikazano na Slici 6-7.



Slika 6-7 Prikaz najčešće primenjivane metodologije modelovanja sagorevanja biomase u sloju [105]

Analiza referentnih matematičkih modela sagorevanja peleta u pećima i kotlovima male snage omogućila je sagledavanje polaznih pretpostavki koje istraživači usvajaju kako bi omogućili rešavanje parcijalnih diferencijalnih jednačina u okviru numeričkog modela. Pored toga, identifikovani su najčešće korišćeni pod-modeli, pojednostavljeno razmatranje odvijanja hemijskih reakcija u ložištu uređaja za

sagorevanje, način modelovanja fenomena prenosa toplote, formiranja zagađujućih materija i ostali relevantni aspekti koji su pomogli razvoju sopstvenog matematičkog modela koji je opisan u Poglavlju 9. Razvijanje sopstvenog modela za analiziranu peć omogućilo je jasnije sagledavanje uticaja pojedinih parametara na proces sagorevanja, u prvom redu kvaliteta goriva i konstruktivnih rešenja uređaja za sagorevanja (konstrukcija gorionika kojom je određena raspodela vazduha za sagorevanje u zoni sagorevanja goriva), ali i efekata koji bi se mogli postići promenom podešavanja u sistemu automatskog upravljanja razmatrane vrste uređaja. Razvijeni model može se koristiti za potrebe optimizacije rada analizirane peći na pelet, a u cilju provere mogućnosti unapređenja energetske i ekološke performansi uređaja koji bi bili rezultat promene nekog od parametara procesa sagorevanja, kao i kumulativnih efekata koji bi se mogli postići istovremenom promenom više uticajnih parametara.

**7. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA RADNIH KARAKTERISTIKA
PEĆI NA PELET SA ASPEKTA PROMENE PARAMETARA
PROCESA SAGOREVANJA**

7.1 Cilj sprovođenja eksperimentalnih ispitivanja

Eksperimentalna ispitivanja sprovedena u okviru ove doktorske disertacije vršena su na specijalno projektovanoj i izvedenoj eksperimentalnoj instalaciji Laboratorije za goriva i sagorevanje Mašinskog fakulteta u Beogradu. U skladu sa glavnim ciljem ove doktorske disertacije, ispitivanja su sprovedena kako bi se utvrdili i kvantifikovali uticaji pojedinih radnih i konstruktivnih parametara peći na pelet na energetske i ekološke karakteristike ispitivanog uređaja za sagorevanje.

Eksperimentalna ispitivanja sprovedena su i sa dodatnim ciljem razvoja i verifikacije matematičkog modela predloženog za numeričku simulaciju procesa sagorevanja peleta od drvene biomase u pećima male snage. Kako sprovođenje eksperimentalnih ispitivanja često zahteva značajna finansijska sredstva, korišćenje matematičkih modela i numeričkih simulacija koje verodostojno opisuju istraživane fenomene, a čija je verodostojnost proverena eksperimentalnim putem, omogućava jednostavan i ekonomičan način ispitivanja uticaja i promene pojedinih parametara na razmatrane procese. Ukoliko rezultati predloženog modela pokažu prihvatljivi nivo slaganja sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, numerički model može se smatrati prihvatljivim i odgovarajućim za sprovođenje daljih istraživanja. Iz navedenog se jasno može sagledati važnost eksperimentalnih ispitivanja, kako sa aspekta konkretne analize ispitivanih fenomena, tako i za potrebe validacije numeričkih modela čije se korišćenje predlaže za potrebe daljeg ispitivanja razmatrane problematike.

7.2 Eksperimentalna instalacija

Ispitna instalacija izvedena je u skladu sa zahtevima navedenim u Prilogu A, Deo A.2 standarda EN 14785 [120], poštujući uputstva koja se odnose na konstruktivne karakteristike eksperimentalnog uređaja i metodologiju vršenja ispitivanja. Eksperimentalna instalacija na kojoj su sprovedena ispitivanja sastoji se iz sledećih ključnih komponenti:

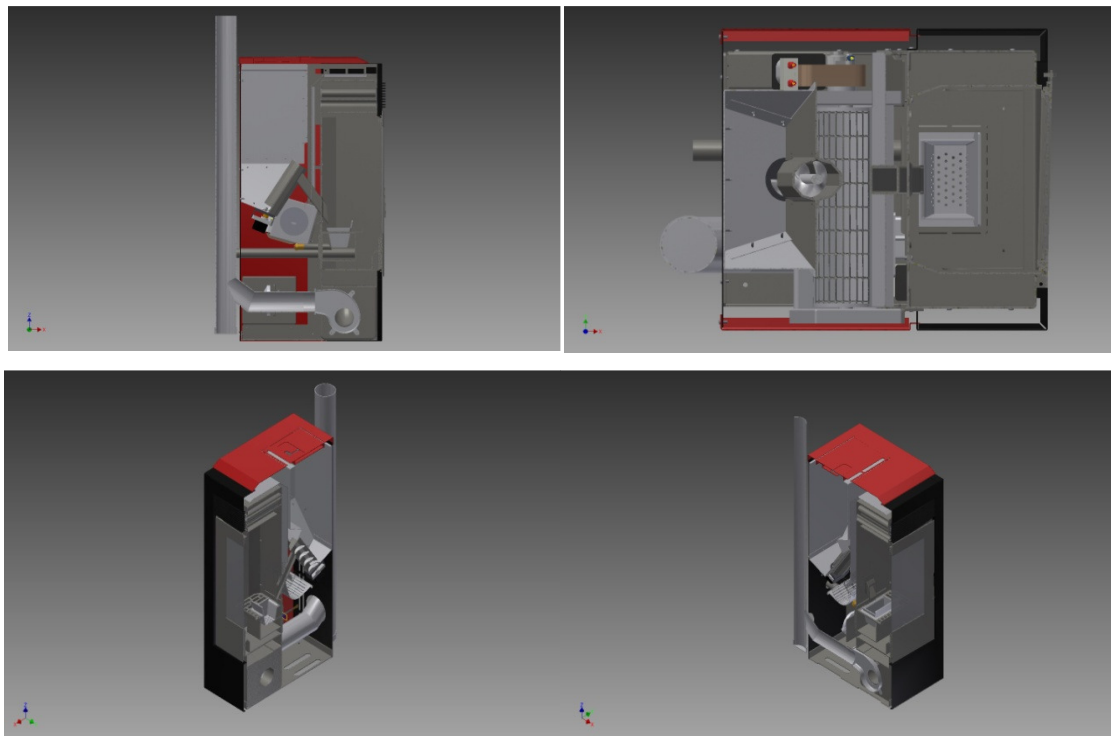
- peći za sagorevanje drvnih peleta, deklarisanе toplotne snage 8 kWt,
- sistema za odvođenje dimnog gasa, koji obuhvata kanal dimnog gasa, ventilator dimnog gasa i klapnu za regulaciju potpritiska u kanalu dimnog gasa,
- vage za merenje trenutne mase peći i
- sistema za akviziciju tj. prikupljanje merenih parametara.

U skladu sa deklaracijom proizvođača, ispitivana peć za sagorevanje drvnih peleta inicijalno je projektovana i podešena tako da zadovolji zahteve relevantnog evropskog standarda koji definiše zahtevane performanse ložnih uređaja na pelet [120]. U Tabeli 7-1 date su glavne karakteristike ispitivanog ložnog uređaja, u skladu sa tehničkim specifikacijama proizvođača. U specifikacijama se navodi da peć ispunjava zahteve relevantnog evropskog standarda u pogledu efikasnosti rada za predloženi kvalitet goriva, ali bez navođenja parametara koji bi se odnosili na ekološke karakteristike njenog rada.

Tabela 7-1 Deklarisane karakteristike ispitivane peći na pelet [121]

<i>Parametar</i>	<i>Vrednost</i>
Dimenzije, dužina x širina x visina [mm x mm x mm]	420×516×915
Masa [kg]	90
Toplotna snaga [kWt]	4-8
Stepen korisnosti [%]	83
Potrošnja goriva [kg/h]	0,9-1,9
Kapacitet rezervoara za gorivo [kg]	17
Zapremina grejanog prostora [m ³]	195

Na Slici 7-1 dat je 3-D prikaz ispitivane peći na pelet. Rad peći zasniva se na principu konvektivnog prenosa toplote u okviru koga se toplota dimnih gasova nastalih sagorevanjem peleta prenosi na hladan ambijentalni vazduh koji se usisava u peć, zagreva i tako zagrejan koristi za zagrevanje stambenog prostora. Rezervoar za pelet nalazi se u gornjem delu peći i služi za prihvatanje goriva čija je količina definisana deklarisanim kapacitetom rezervoara. Gorivo se u ložište dozira automatski, pužnim dozatorom, kao što je prikazano na Slici 7-2.



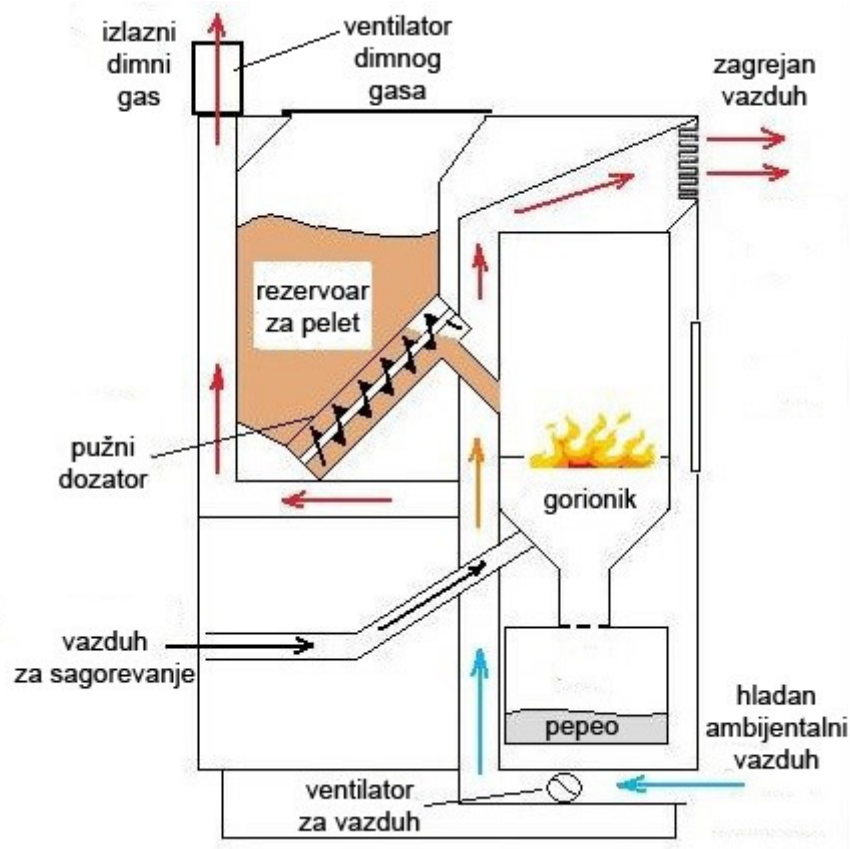
Slika 7-1 Ispitivana peć na pelet

U okviru sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja razmatran je rad ložnog uređaja pri nominalnom i pri redukovanom toplotnom opterećenju. Sva merenja za odgovarajuće toplotno opterećenje (nominalno ili redukovano) sprovedena su pri konstantnom dovodu goriva u ložište tj. pri konstantnoj brzini pužnog dozatora i konstantnom vremenskom intervalu ubacivanja goriva u ložište. Rad pužnog dozatora zasniva se na radnim ciklusima, pri čemu svaki radni ciklus traje 250 ms i sastoji se iz radnog perioda dozatora τ_1 , tokom kog se pelet dovodi u gorionik, i perioda mirovanja dozatora τ_2 , tokom kog se gorivo ne dovodi u gorionik. Dužine trajanja radnog perioda i perioda mirovanja pužnog dozatora podešene su u upravljačkom sistemu peći u skladu sa preporukama proizvođača za nominalno/redukovano toplotno opterećenje peći deklarisanе toplotne snage 8 kWt u kojoj je instalisan gorionik toplotne snage 8 kWt. Pomenuti periodi za nominalne radne režime iznose $\tau_1 = 10$ ms i $\tau_2 = 240$ ms, dok su za redukovane radne režime podešeni na $\tau_1 = 6,25$ ms i $\tau_2 = 243,75$ ms.

Pelet se iz rezervoara za gorivo na pomenuti način gravitaciono dovodi u gorionik u ložištu peći. Inicijalno paljenje goriva vrši se pomoću električne varnice koju na

komandu korisnika generiše uređaj za paljenje koji čini integralni deo konstrukcije peći. Upravljanje radom peći vrši se preko elektronskog programatora kojim korisnik bira toplotno opterećenje i intenzitet rada ventilatora zagrejanog vazduha koji obezbeđuje izduvavanje toplog vazduha u zagrevani prostor. Omogućen je izbor između tri predefinisana radna režima: nominalnog, redukovanog i minimalnog. Hladan ambijentalni vazduh usisava se pomoću ventilatora hladnog vazduha koji je smešten u donjem delu peći, i dalje se vodi u smeru na gore, posebno predviđenim kanalom, kako bi se obezbedila razmena toplote sa toplog dimnog gasa, nastalog sagorevanjem goriva u ložištu peći, na hladan ambijentalni vazduh koji usisava ventilator za vazduh. Na taj način, a u skladu sa šemom prikazanom na Slici 7-2, dimni gas i zagrevani ambijentalni vazduh tokom procesa razmene toplote struje u međusobno suprotnim smerovima. Potrebna vrednost potpritiska u kanalu dimnog gasa, u skladu sa programom merenja koji će biti opisan u nastavku, održavana je posebno projektovanim sistemom za regulaciju potpritiska koji se sastoji iz ventilatora dimnog gasa, instalisanog u kanalu dimnog gasa, i regulacione klapne koja je postavljena u dimnom kanalu u cilju neophodne regulacije protoka dimnog gasa.

Pepeo koji nastaje kao čvrsti produkt sagorevanja goriva u peći prikupljan je u posudi za pepeo smeštenoj ispod ložišta peći. Posuda za pepeo pražnjena je nakon svakog pojedinačnog merenja, uz uzorkovanje nastalog pepela u cilju analize sadržaja nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja i izračunavanja odgovarajućih toplotnih gubitaka, kao i ostvarene toplotne snage i stepena korisnosti ložnog uređaja.



Slika 7-2 Šematski prikaz rada ispitivane peći na pelet

7.3 Plan i program merenja

Planom i programom merenja predviđeno je prikupljanje svih podataka potrebnih za analizu uticaja promene radnih i konstruktivnih parametara peći na energetske i ekološke performanse rada analiziranog ložnog uređaja. Planom merenja predviđeno je ispitivanje sledećih uticajnih parametara:

- 1) vrste goriva,
- 2) toplotne snage gorionika i
- 3) vrednosti potpitiska u kanalu dimnog gasa,

kao i kombinovanog efekta variranja iznad pomenutih parametara na performanse rada analizirane peći. Uticaj navedenih parametara analiziran je kako za nominalno, tako i za redukovano toplotno opterećenje peći. Redukovano toplotno opterećenje peći ostvarivano je izborom predefinisiranog radnog režima peći koji odgovara smanjenom

intenzitetu doziranja goriva u gorionik i redukovanom radu ventilatora zagrevanog vazduha. Na pomenuti način, tokom eksperimentalnog ispitivanja sprovedeno je i analizirano ukupno 36 radnih režima sa različitim kombinacijama prethodno pomenutih parametara.

7.3.1 Ispitivanje uticaja vrste goriva na radne performanse peći na pelet

U cilju ispitivanja uticaja vrste goriva na radne performanse razmatrane peći korišćene su dve različite vrste peleta:

- pelet A koji predstavlja (uvozno) gorivo preporučeno od strane proizvođača peći, za koje predmetni uređaj ostvaruje deklarisanе karakteristike sa aspekta efikasnosti rada i
- pelet B koji je izabran kao lokalno raspoloživo gorivo kako bi se ispitaо rad peći za alternativno gorivo koje je lako dostupno na tržištu u Srbiji.

Program merenja podrazumevao je karakterizaciju korišćenog goriva tj. sprovođenje tehničke i elementarne analize, kao i određivanje dodatnih fizičkih karakteristika peleta (dimenzija, gustine i nasipne gustine) na osnovu kojih bi se izvršila klasifikacija goriva u neku od standardom definisanih klasa kvaliteta. Takođe, utvrđene karakteristike goriva korišćene su i za izračunavanje toplotnih gubitaka u procesu sagorevanja i određivanje energetskih i ekoloških karakteristika rada ispitivanog ložnog uređaja, kao i za definisanje polaznih parametara numeričke simulacije analiziranog procesa sagorevanja.

7.3.2 Ispitivanje uticaja toplotnog kapaciteta gorionika na radne performanse peći na pelet

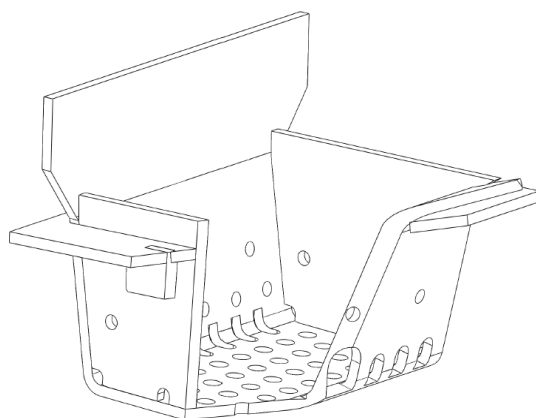
U cilju analize uticaja toplotnog kapaciteta gorionika na radne karakteristike analizirane peći deklarisanе toplotne snage 8 kWt, ispitan je uticaj tri gorionika različitih toplotnih kapaciteta (6, 8 i 10 kWt). Ispitivanje uticaja variranja kapaciteta gorionika na radne performanse peći posebno je interesantno ako se ima u vidu težnja proizvođača razmatranih uređaja da uz malu intervenciju na samoj konfiguraciji peći

(izmenom gorionika) omogućuje serijsku proizvodnju peći različitih deklariranih snaga i time značajno smanje troškove proizvodnje pomenutih uređaja. Navedena ušteda u troškovima proizvodnje omogućila bi nižu cenu krajnjeg proizvoda, što bi doprinelo većoj atraktivnosti i popularizaciji razmatranih ložnih uređaja kod krajnjih korisnika.

Gorionici su konstruktivno izvedeni kao horizontalno postavljeni elementi pravougaone osnove, sa perforiranim otvorima raspoređenim po dnu i bočnim zidovima konstruktivnog elementa u cilju postizanja boljeg mešanja goriva i vazduha i ostvarivanja potpunijeg procesa sagorevanja. U Tabeli 7-2 prikazane su konstruktivne karakteristike svakog od ispitivanih gorionika, dok je na Slici 7-3 dat šematski prikaz gorionika kapaciteta 8 kWt. Kako se dovod vazduha u gorionik ostvaruje i kroz otvore na dnu i na stranama gorionika, peleti u samom gorioniku praktično ne dodiruju ivice gorionika, već lebde i ponašaju se kao neka vrsta fluidizovanog sloja. Nova količina peleta se periodično, u skladu sa automatski podešenom učestalošću doziranja goriva, dovodi u gorionik i pada u lebdeći sloj peleta koji sagoreva u gorioniku.

Tabela 7-2 Konstruktivne karakteristike ispitivanih gorionika

<i>Red. br.</i>	<i>Toplotni kapacitet gorionika [kWt]</i>	<i>Veličina gorionika, dužina x širina x visina [mm]</i>	<i>Zapremina gorionika [mm³]</i>	<i>Broj otvora</i>	<i>Ukupna površina otvora [mm²]</i>
1.	6	75 x 57 x 55	235.125	45	883
2.	8	90 x 57 x 55	282.150	65	1.671
3.	10	105 x 57 x 55	329.175	65	1.671



Slika 7-3 Konstrukcija gorionika toplotnog kapaciteta 8 kWt

7.3.3 Ispitivanje uticaja potpritiska u kanalu dimnog gasa na radne performanse peći na pelet

Sprovedena istraživanja i analize obuhvatili su i razmatranje uticaja promene potpritiska u kanalu dimnog gasa u cilju sagledavanja mogućnosti uticanja na kvalitet procesa sagorevanja i dalje na energetske i ekološke performanse rada analiziranog uređaja. Prilikom ispitivanja pošlo se od pretpostavke da se povećanjem protoka dimnog gasa, koji bi se ostvario promenom položaja regulatora protoka dimnog gasa, smanjuju otpori strujanju u dimnom kanalu i na taj način utiče na povećanje potpritiska u kanalu dimnog gasa i na efikasnije odvođenje gasova iz ložišta. Pretpostavljeno je takođe da veća brzina dimnog gasa pri povećanom potpitisaku utiče na brže odvijanje hemijskih reakcija u ložištu peći i da dovodi do nepotpunijeg sagorevanja, prevashodno usled nedovoljno vremena za završetak reakcija sagorevanja i dogorevanja ugljen monoksida (CO) u ugljen dioksid (CO₂). Kao rezultat navedenog očekivano je da emisije CO budu veće pri većem potpitisaku u kanalu dimnog gasa i obratno.

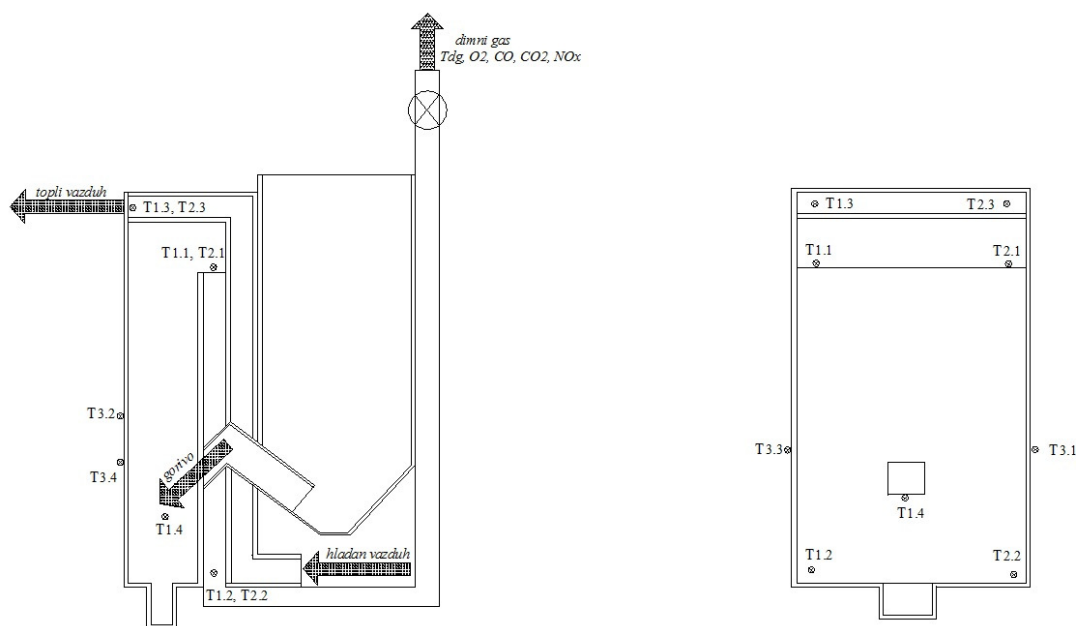
U literaturi [120] je definisan zahtev da potpitisak u kanalu dimnog gasa tokom ispitivanja rada uređaja za sagorevanje peleta iznosi 12 ± 2 Pa. Ipak, proizvođačima razmatranih ložnih uređaja omogućeno je da definišu alternativnu vrednost potpitisaka u kanalu dimnog gasa ukoliko to doprinosi boljim radnim performansama njihovog uređaja. Shodno tome, u cilju analize i kvantifikovanja uticaja potpitisaka na radne performanse ispitivane peći razmotren je uticaj tri različite vrednosti potpitisaka i to: 8 ± 2 Pa, 12 ± 2 Pa i 16 ± 2 Pa.

7.4 Mereni parametri i korišćena merna oprema

Tokom eksperimentalnih ispitivanja kontinualno su praćene sledeće merne veličine, a u skladu sa šemom datom na Slici 7-4, kao i Tabelom 7-3:

- masa peći (sa gorivom) [kg],
- temperatura u ložištu peći, merno mesto označene sa $T_{1,4}$ [°C],
- temperatura dimnog gasa na različitim mestima u kanalu dimnog gasa, merna mesta označena sa $T_{1,1}$, $T_{1,2}$, $T_{2,1}$, $T_{2,2}$ [°C],
- temperatura dimnog gasa na izlazu iz peći [°C],

- temperatura toplog vazduha za zagrevanje grejnog prostora, merna mesta označena sa $T_{1.3}$, $T_{2.3}$ [°C],
- temperature frontalne površine peći, merna mesta označena sa $T_{3.2}$, $T_{3.4}$ [°C],
- temperature bočnih površina peći, merna mesta označena sa $T_{3.1}$, $T_{3.3}$ [°C],
- potpritisak u kanalu dimnog gasa [Pa],
- temperatura u zagrevanoj prostoriji, T_a [°C],
- sastav dimnog gasa (sadržaj O_2 , CO_2 , CO , NO_x).



Slika 7-4 Raspored mernih mesta za merenje karakterističnih parametara:
a) poprečni presek peći, b) pogled sa prednje strane

Tabela 7-3 Identifikacija merenih temperatura

Merena veličina*	Oznaka
Temperatura dimnog gasa u kanalu dimnog gasa (leva strana, gore)	$T_{1.1}$
Temperatura dimnog gasa u kanalu dimnog gasa (leva strana, dole)	$T_{1.2}$
Temperatura toplog vazduha (leva strana)	$T_{1.3}$
Temperatura u ložištu	$T_{1.4}$
Temperatura dimnog gasa u kanalu dimnog gasa (desna strana, gore)	$T_{2.1}$
Temperatura dimnog gasa u kanalu dimnog gasa (desna strana, dole)	$T_{2.2}$
Temperatura toplog vazduha (desna strana)	$T_{2.3}$
Temperatura bočne površine peći (desna strana)	$T_{3.1}$
Temperatura frontalne površine peći (gore)	$T_{3.2}$
Temperatura bočne površine peći (leva strana)	$T_{3.3}$
Temperatura frontalne površine peći (dole)	$T_{3.4}$

* položaj odgovarajućih termoparova definisan je u odnosu na prednju stranu peći

Masa peći merena je pomoću elektronske vage CAS BI-II sa dilatacionim mernim trakama i opsegom merenja 0-150 kg. Promena mase peći merena je u vremenskim razmacima od po 5 minuta, na taj način omogućavajući određivanje potrošnje goriva tokom referentnog perioda ispitivanja.

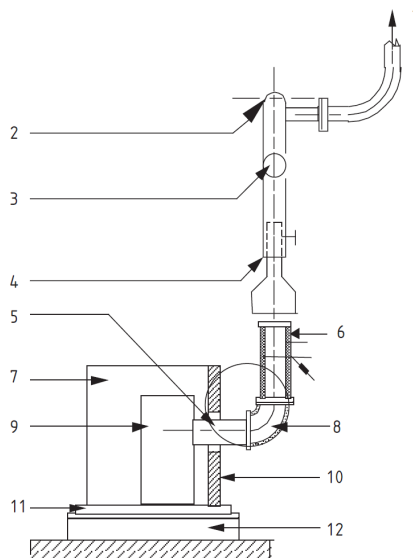
Temperatura dimnog gasa na različitim mestima u kanalu dimnog gasa i temperatura toplog vazduha za zagrevanje prostorije merene su pomoću termoparova tipa K (Ni-Cr-Ni), dok su temperature karakterističnih površina peći merene odgovarajućim termoparovima za kontaktna merenja, u ovom slučaju kontaktnim termoparovima sa magnetom. Potpritisak u kanalu dimnog gasa održavan je na željenom nivou pomoću ventilatora dimnog gasa i položaja regulacione klapne postavljene u kanalu dimnog gasa. Svi termoparovi za merenje karakterističnih temperatura peći i zagrejanog vazduha, kao i merna sonda za merenje potpritisaka u kanalu dimnog gasa, povezane su na komercijalni sistem za akviziciju podataka TESTO 454.

Parametri dimnog gasa, uključujući temperaturu, sadržaj O₂, CO, CO₂ i NO_x u dimnom gasu, kao i ambijentalna temperatura u zagrevanoj prostoriji prikupljeni su komercijalnim gasnim analizatorom TESTO 350. Merna sonda za akviziciju parametara dimnog gasa postavljena je u dimnom kanalu, na mernoj stazi eksperimentalne instalacije. Svi navedeni parametri mereni su sa periodom uzorkovanja od 10 sekundi. Merna staza, kao i izgled merne instalacije prikazani su na Slici 7-5. Merenje sadržaja kiseonika u dimnom gasu omogućilo je određivanje koeficijenta viška vazduha, dok su merenja ostalih mernih parametara poslužila za određivanje energetske i ekološke indikatora rada peći: ostvarene toplotne snage peći, efikasnosti rada peći i emisije CO.

Prilikom izbora merne opreme uvaženi su zahtevi u pogledu maksimalno dozvoljene greške merenja korišćenih mernih instrumenata. Greške merenja iznosile su redom:

- za merenje sadržaja kiseonika u dimnom gasu: $\pm 0,2\%$,
- za merenje sadržaja CO u dimnom gasu: ± 10 ppm za koncentracije ispod 100 ppm, u ostalim slučajevima $\pm 5\%$ merenja,
- za merenje sadržaja NO_x u dimnom gasu: ± 5 ppm za koncentracije ispod 100 ppm, u ostalim slučajevima $\pm 5\%$ merenja,

- za merenje temperatura: $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ za temperature od -40 do $+375^{\circ}\text{C}$ tj. $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ za temperature od $+375$ do 1000°C .



Slika 7-5 Merna staza: 1-ispust dimnog gasa u atmosferu, 2-regulator potpritiska u kanalu dimnog gasa, 3-podesiva klapna, 4-podesiv regulator protoka, 5-kolenasta veza, 6-merna deonica, 7-peć na pelet, 8- kolenasti element, 9-ložište, 10-zadnji zid, 11-postolje peći, 12-digitalna merna vaga

7.5 Procedura sprovođenja eksperimentalnih ispitivanja

Eksperimentalna ispitivanja sprovedena su u skladu sa zahtevima i uputstvima navedenim u literaturi [120] koji se odnose na ispitivanje rada uređaja za sagorevanje peleta pri nominalnoj i redukovanoj toplotnoj snazi.

Ispitivanje rada peći sprovodi se u skladu sa preporukama proizvođača peći u pogledu podešavanja i startovanja ložnog uređaja i mora obuhvatiti sledeće karakteristične periode:

- period paljenja (u trajanju od 5-10 minuta), koji je potreban da bi se gorivo upalilo i da bi se vizuelno konstatovao početak procesa sagorevanja,

- jedan ili više perioda predispitivanja (u trajanju od minimum 30 minuta) tokom koga uređaj dostiže stacionarni režim rada i
- period glavnog ispitivanja (u trajanju od 60 minuta), koji se sprovodi u stacionarnim uslovima rada ispitivanog ložnog uređaja.

U skladu sa zahtevima standarda, ispitivanje rada peći može započeti iz tzv. “hladnog” stanja ili iz tzv. “toplog” stanja tj. kao nastavak prethodnog ispitivanja. Za potrebe izrade ove disertacije, eksperimentalna ispitivanja započinjana su iz tzv. “hladnog” stanja, što znači da je svako naredno merenje sprovedeno posle dovoljno dugog vremena proteklog nakon završetka prethodnog ispitivanja (minimalno 8 sati) u cilju omogućavanja hlađenja peći do ambijentalne temperature.

Period paljenja započinje startovanjem ventilatora dimnog gasa i električnog grejača predviđenog za iniciranje paljenja goriva. Na elektronskom programatoru koji predstavlja korisnički interfejs za korišćenje ispitivanog ložnog uređaja, bira se režim rada peći tj. toplotno opterećenje peći i intenzitet rada ventilatora toplog vazduha. Po iniciranju električne varnice započinje proces doziranja goriva iz rezervora i njegovo dopremanje na gorionik. Odmah potom startuje se i sistem za akviziciju podataka TESTO 454 kako bi se pratile promene karakterističnih temperatura i potpritiska u kanalu dimnog gasa. Merena vrednost potpritiska praćena je i kontrolisana kako bi se promenom položaja podesive klapne u dimnom kanalu obezbedilo održavanje zahtevane vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa, u skladu sa ispitivanim režimom rada ložnog uređaja.

Period paljenja smatra se uspešno završenim nakon vizualizacije plamena u ložištu i početka rada ventilatora toplog vazduha. Tokom sprovedenih ispitivanja utvrđeno je da je period paljenja trajao oko 10 minuta za sve ispitivane režime rada.

Nakon završetka paljenja započinje period predispitivanja. Osnovni cilj predispitivanja je stabilizacija parametara rada peći i dostizanje stacionarnih uslova rada koji su potrebni za sprovedenje glavnog ispitivanja. Period paljenja i predispitivanja moraju trajati minimalno 30 minuta, dok se sa glavnim ispitivanjem može krenuti kada se utvrdi da temperatura dimnog gasa prestaje značajnije da se menja tokom vremena, već osciluje oko određene vrednosti i to ne više od ± 5 K. Kada se postigne navedena stabilnost u promeni temperature dimnog gasa, smatra se da su dostignuti stacionarni

uslovi rada ispitivanog ložnog uređaja. Tokom sprovedenih ispitivanja period predispitivanja iznosio je 60 minuta.

Nakon dostizanja stacionarnih uslova rada peći počinje period glavnog ispitivanja. Sa početkom glavnog ispitivanja startuje se i gasni analizator TESTO 350 u cilju prikupljanja parametara dimnog gasa (T_{dg} , O_2 , CO_2 , CO , NO_x) i ambijentalne temperature u zagrevanoj prostoriji. Imajući u vidu definisani cilj ispitivanja, period glavnog ispitivanja u stacionarnom režimu rada trajao je 60 minuta. Sve analize i proračuni rađeni u cilju ispitivanja uticaja promene pojedinih parametara na energetske i ekološke karakteristike rada peći vršeni su isključivo na osnovu podataka prikupljenih tokom perioda glavnog ispitivanja tj. u stacionarnom režimu rada peći.

Shodno navedenom, a u cilju adekvatog razumevanja rezultata merenja koja će biti prikazana u Poglavlju 8 ove disertacije, potrebno je takođe konstatovati da je merenje potrošnje peleta praćeno počevši od inicijalnog trenutka paljenja peći (trenutak $\tau=0s$), do završetka perioda glavnog ispitivanja (trenutak $\tau=7800 s$ u slučaju kada je period paljenja trajao 600 s, što je uglavnom bio slučaj kod svih analiziranih režima rada). Merenje karakterističnih temperatura površina peći, ložišta peći, temperatura u kanalu dimnog gasa, kao i temperatura vazduha koji se izduvava u zagrevanu prostoriju vršena su od početka perioda predispitivanja tj. nakon što je konstatovano da je uspešno došlo do paljenja peći (vremenski trenutak $\tau=600 s$). Pored toga, vrednost potpritiska u kanalu dimnog gasa praćena je tokom celokupnog ispitivanja, od trenutka $\tau=0 s$, kako bi se osiguralo da potpritisak uvek bude podešen na unapred definisanu vrednost. Međutim, i pored toga što su pojedini parametri praćeni od inicijalnog trenutka startovanja peći u cilju obezbeđenja adekvatne procedure ispitivanja, srednje vrednosti merenih parametara korišćene za proračune i analize uticaja variranih parametara na energetske i ekološke karakteristike rada peći dobijene su obradom podataka prikupljenih isključivo tokom perioda glavnog ispitivanja tj. tokom stacionarnog režima rada peći (od trenutka $\tau=4200 s$ do trenutka $\tau=7800 s$). Kao što je već pomenuto, parametri dimnog gasa, uključujući temperaturu, sadržaj O_2 , CO , CO_2 i NO_x u dimnom gasu, kao i ambijentalna temperatura u zagrevanoj prostoriji prikupljeni su samo tokom perioda glavnog ispitivanja.

Po završetku perioda glavnog ispitivanja pristupalo se gašenju peći. Nakon gašenja, ispitna instalacija ostavljena je na sobnoj temperaturi kako bi se postepeno ohladila do

početnog hladnog stanja i spremila za sledeću seriju merenja. Nakon hlađenja peći, a neposredno pred početak sledeće serije merenja, iz peći je uklanjan pepeo nastao tokom sprovedenog ispitivanja, uz prikupljanje odgovarajućih uzoraka za potrebe njihove analize.

7.6 Ispitivani radni režimi

Kao što je ranije pomenuto, tokom sprovedenih ispitivanja varirani su vrsta goriva, toplotni kapacitet gorionika i potpritisak u kanalu dimnog gasa, kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju peći. Shodno tome, na ranije opisan način, ispitano je ukupno 36 radnih režima, označenih u skladu sa usvojenim identifikacionim oznakama prikazanim u Tabeli 7-4.

Podaci prikupljeni tokom sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja omogućili su izračunavanje energetske i ekološke indikatore rada analizirane peći u cilju poređenja sa zahtevanim performansama rada peći koje su definisane u literaturi [120] (minimalno zahtevani stepen korisnosti rada peći, maksimalno dozvoljena emisija CO), kao i donošenja zaključaka u pogledu veličine uticaja svakog od razmatranih parametara na pomenute indikatore rada ložnog uređaja. Pored toga, prikupljeni podaci omogućili su i bolji uvid u fenomene i procese koji se odvijaju tokom sagorevanja ispitivanog goriva pri svakom od analiziranih radnih režima, kao i verifikaciju odgovarajućeg matematičkog modela razvijenog u okviru ove doktorske disertacije.

Tabela 7-4 Identifikacija ispitivanih radnih režima analizirane peći na pelet

Br.	Vrsta peleta	Toplotno opterećenje peći	Toplotni kapacitet gorionika [kWt]	Potpritisak u kanalu dimnog gasa [Pa]	Oznaka ispitivanog radnog režima*
1.	A	nominalno	6	8	PA-N-B6-D8
2.				12	PA-N-B6-D12
3.				16	PA-N-B6-D16
4.			8	8	PA-N-B8-D8
5.				12	PA-N-B8-D12
6.				16	PA-N-B8-D16
7.			10	8	PA-N-B10-D8
8.				12	PA-N-B10-D12
9.				16	PA-N-B10-D16
10.		redukovano	6	8	PA-R-B6-D8
11.				12	PA-R-B6-D12
12.				16	PA-R-B6-D16
13.			8	8	PA-R-B8-D8
14.				12	PA-R-B8-D12
15.				16	PA-R-B8-D16
16.			10	8	PA-R-B10-D8
17.				12	PA-R-B10-D12
18.				16	PA-R-B10-D16

Tabela 7-4 Identifikacija ispitivanih radnih režima analizirane peći na pelet (nastavak)

Br.	Vrsta peleta	Toplotno opterećenje peći	Toplotni kapacitet gorionika [kWt]	Potpritisak u kanalu dimnog gasa [Pa]	Oznaka ispitivanog radnog režima*
19.	B	nominalno	6	8	PB-N-B6-D8
20.				12	PB-N-B6-D12
21.				16	PB-N-B6-D16
22.			8	8	PB-N-B8-D8
23.				12	PB-N-B8-D12
24.				16	PB-N-B8-D16
25.			10	8	PB-N-B10-D8
26.				12	PB-N-B10-D12
27.				16	PB-N-B10-D16
28.		redukovano	6	8	PB-R-B6-D8
29.				12	PB-R-B6-D12
30.				16	PB-R-B6-D16
31.			8	8	PB-R-B8-D8
32.				12	PB-R-B8-D12
33.				16	PB-R-B8-D16
34.			10	8	PB-R-B10-D8
35.	12			PB-R-B10-D12	
36.	16			PB-R-B10-D16	

* Oznake radnih režima definisane su u skladu sa sledećom simbolikom: oznaka peleta (pelet A (PA) ili pelet B (PB)) – toplotno opterećenje peći (nominalno N ili redukovano R) – toplotna snaga gorionika (slovni karakter B od engl. reči “burner“ koja označava gorionik i numerički karakter koji odgovara toplotnom kapacitetu gorionika od 6, 8 ili 10 kWt) – vrednost potpritiska u kanalu dimnog gasa (slovni karakter D od engl. reči “draft“ koja označava potpritisak i numerički karakter koji odgovara vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa od 8 ± 2 , 12 ± 2 ili 16 ± 2 Pa).

8. PREGLED I ANALIZA REZULTATA EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

8.1 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

U ovom poglavlju biće prikazani rezultati sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja, a sa ciljem kvantifikovanja uticaja analiziranih parametara na energetske i ekološke karakteristike rada peći na pelet, kao i za potrebe poređenja izmerenih vrednosti sa graničnim vrednostima koje su definisane relevantnim standardom. Pored toga, rezultati merenja poslužili su i za definisanje početnih i graničnih uslova neophodnih za rešavanje parcijalnih diferencijalnih jednačina na kojima se zasniva predloženi matematički model sagorevanja peleta u analiziranoj peći, kao i za validaciju sprovedene numeričke simulacije razmatranog procesa sagorevanja. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja dodatno su omogućili i bolje sagledavanje i razumevanje fenomena koji se odvijaju tokom procesa sagorevanja drvnih peleta u analiziranom uređaju za sagorevanje.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja dobijeni su obradom podataka prikupljenih tokom 36 kampanja merenja sprovedenih za 36 ispitivanih režima rada peći. U cilju preglednijeg i jasnijeg prikaza, rezultati merenja grupisani su na sledeći način:

- a) rezultati ispitivanja kvaliteta goriva, dobijeni tehničkom i elementarnom analizom, kao i određivanjem fizičkih karakteristika korišćenih vrsta peleta;
- b) rezultati ispitivanja procesa sagorevanja goriva, dobijeni na osnovu kontinualnog praćenja sledećih parametara:
 - potrošnje goriva,
 - karakterističnih temperatura spoljašnjih površina peći,
 - temperature toplog vazduha koji se izduvava u zagrevani prostor,
 - temperature u ložištu peći i
 - temperature u zagrevnom prostoru;
- c) rezultati ispitivanja produkata sagorevanja, dobijeni na osnovu kontinualnog praćenja sledećih parametara:
 - temperature i sastava dimnog gasa (sadržaj O_2 , CO , CO_2 , NO_x),
 - sadržaja nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja.

Pored toga, obradom rezultata merenja dobijeni su energetske i ekološki indikatori rada uređaja za sagorevanje i to:

- realno ostvarena toplotna snaga peći,

- ukupni stepen korisnosti peći i
- emisija ugljen monoksida svedena na 13% O₂ (v/v) u dimnom gasu.

Pomenuti energetske i ekološki indikatori izračunati su u cilju poređenja sa zahtevanim vrednostima koje za analizirane vrste uređaja propisuje relevantna literatura [120].

8.1.1 Rezultati ispitivanja kvaliteta goriva

U cilju ispitivanja kvaliteta peleta A i B izvršena je njihova tehnička i elementarna analiza. Pored toga, za svaku analiziranu vrstu peleta određene su i dodatne fizičke karakteristike i to: dimenzije, gustina i nasipna gustina peleta. Karakterizacija ispitivanih goriva sprovedena je u skladu sa zahtevima EN ISO 17225-2:2014. U Tabeli 8-1 prikazani su rezultati ispitivanja kvaliteta korišćenih peleta.

Tabela 8-1 Rezultati ispitivanja kvaliteta goriva

Karakteristika	Pelet A			Pelet B		
	ar*	db**	daf***	ar*	db**	daf***
TEHNIČKA ANALIZA						
Vrsta drvene biomase	bukva			bukva		
Vlaga, W [% m/m]	6,30	-	-	9,85	-	-
Pepeo, A [% m/m]	1,07	1,14	-	1,76	1,95	-
Volatili, Vg [% m/m]	78,1	83,4	84,3	75,28	83,5	85,2
Fiksni ugljenik, C [% m/m]	14,5	15,5	15,7	13,11	14,5	14,8
Gornja toplotna moć [kJ/kg]	18.792	20.055	20.286	17.928	19.887	20.282
Donja toplotna moć [kJ/kg]	17.147	18.300	18.511	16.265	18.041	18.400
ELEMENTARNA ANALIZA						
C [% m/m]	45,49	48,5	49,1	45,39	50,3	51,3
H [% m/m]	6,61	7,1	7,1	6,30	7,0	7,1
O [% m/m]	40,41	43,1	43,6	36,6	40,6	41,4
N [% m/m]	0,12	0,13	0,13	0,10	0,11	0,11
S [% m/m]	0,00	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0
FIZIČKE KARAKTERISTIKE						
Gustina [kg/m ³]	1090			909		
Nasipna gustina [kg/m ³]	648			548		
Prečnik, D [mm]	6,4			6,4		
Dužina, L [mm]	14,4 – 27,5			13,2 – 30,7		
KLASA KVALITETA						
Klasa kvaliteta	A2			B		

* ar (engl. as received) – radna masa, ** db (engl. dry basis) – apsolutno suva masa

*** daf (engl. dry, ash free basis) – čista goriva masa

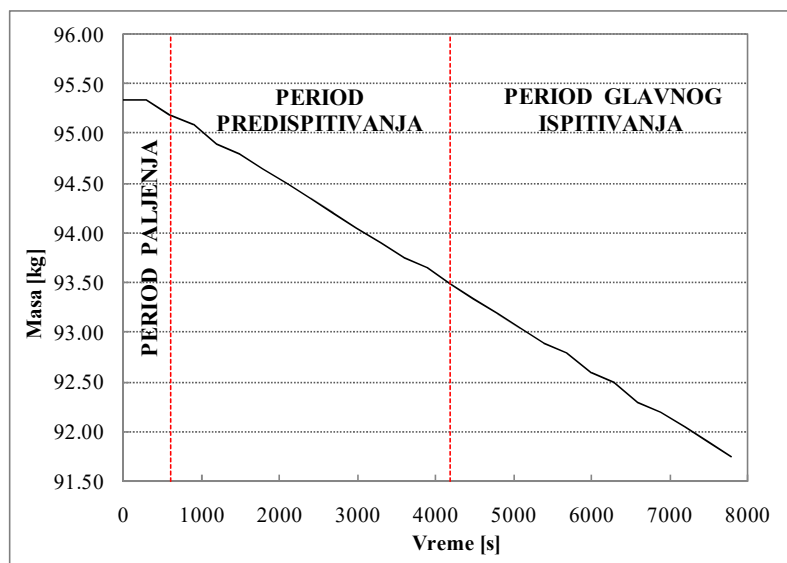
8.1.2 Rezultati ispitivanja procesa sagorevanja i produkata sagorevanja peleta

Imajući u vidu da je praćenje procesa sagorevanja goriva sprovedeno za 36 režima rada peći (koji su identifikovani u Poglavlju 7), u nastavku će, kao ilustracija, biti prikazani tzv. "sirovi" rezultati merenja samo za odabrane režime rada. Smatrano je da bi prikazivanje rezultata svih serija merenja bilo preobimno, a da ne bi doprinelo dodatnom sagledavanju ključnih aspekata sprovedenih eksperimentalnih aktivnosti. Ipak, obrada i analiza rezultata eksperimentalnih ispitivanja biće prikazane za svih 36 serija merenja sa ciljem jasnog sagledavanja rezultata ostvarenih tokom celokupnog eksperimentalnog istraživanja i donošenja odgovarajućih zaključaka. Na osnovu rezultata sprovedenih analiza usvojeni su konačni zaključci u pogledu uticaja pojedinih radnih parametara na energetske i ekološke karakteristike rada analizirane peći.

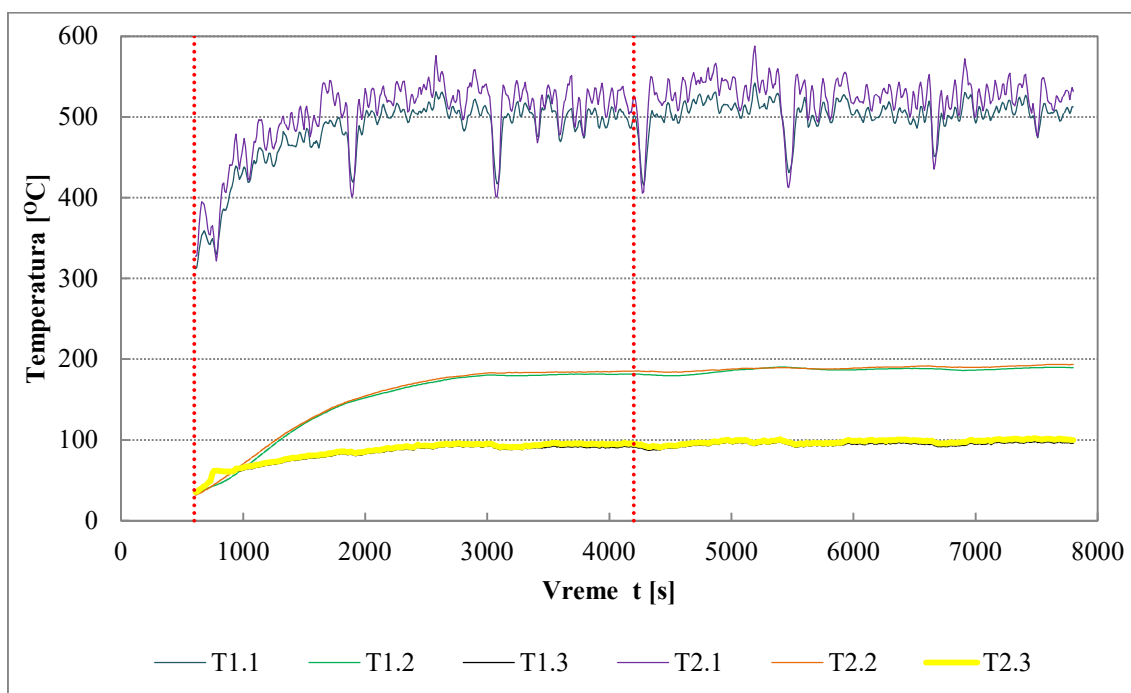
Na Slikama od 8-1 do 8-4 prikazani su dijagrami sa rezultatima kontinualnih merenja dobijenih za slučaj sagorevanja peleta A, pri nominalnom toplotnom opterećenju, upotrebi gorionika toplotnog kapaciteta 8 kWt i pri potpritisku u kanalu dimnog gasa od 12 ± 2 Pa (merni režim PA-N-B8-D12). Slika 8-1 daje pregled rezultata kontinualnog merenja promene ukupne mase peći, dok su na Slici 8-2 prikazani rezultati merenja temperature dimnog gasa u kanalu dimnog gasa, $T_{1,1}$, $T_{1,2}$, $T_{2,1}$ i $T_{2,2}$, kao i temperature toplog vazduha koji se izduvava u zagrevani prostor, $T_{1,3}$, $T_{2,3}$. Rezultati merenja temperature u ložištu, $T_{1,4}$ prikazani su na Slici 8.3. Crvene vertikalne linije označavaju kraj perioda paljenja tj. početak perioda predispitivanja, kao i kraj perioda predispitivanja tj. početak perioda glavnog ispitivanja, a u skladu sa vremenskim intervalima datim u Poglavlju 7.5.

Na Slici 8-4 prikazani su rezultati kontinualnog merenja temperatura karakterističnih površina peći i to temperatura bočnih površina peći, $T_{3,1}$ i $T_{3,3}$ i temperatura frontalnih površina peći, $T_{3,2}$ i $T_{3,4}$. Kao što je ranije pomenuto, navedena merenja vršena su od početka perioda predispitivanja tj. od vremenskog trenutka $\tau = 600$ s do završetka perioda glavnog ispitivanja tj. do trenutka $\tau = 7800$ s.

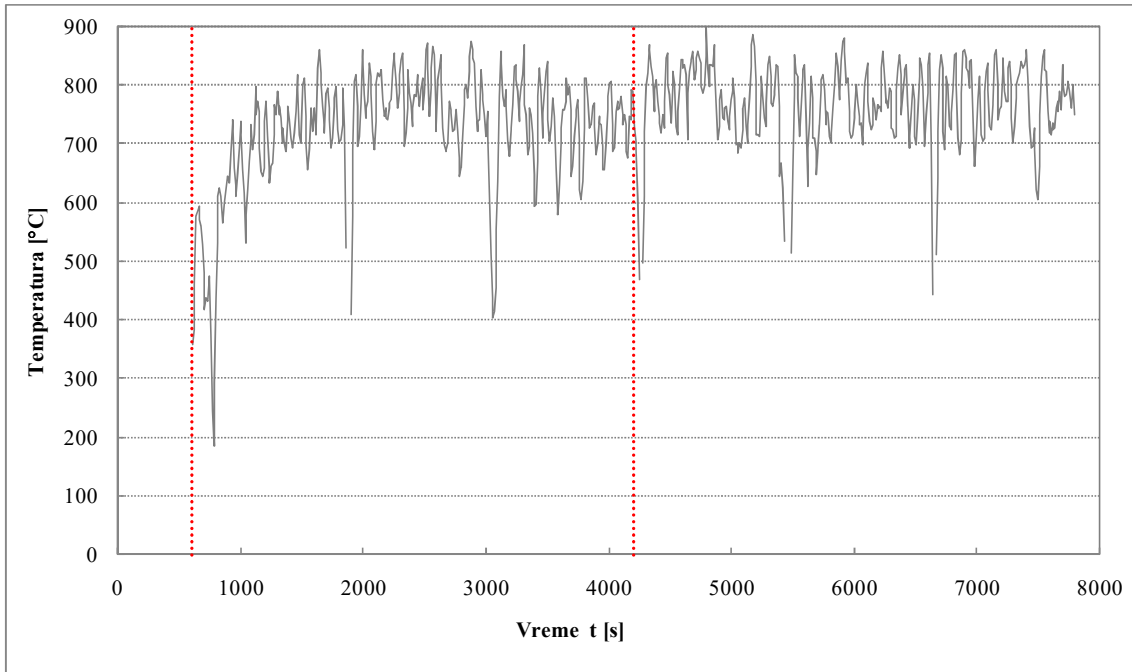
Slika 8-5 daje pregled rezultata merenja karakteristika dimnog gasa tokom perioda glavnog ispitivanja. Iz navedenog razloga vremenska skala na dijagramu počinje od trenutka početka glavnog ispitivanja (što u konkretnom slučaju predstavlja vremenski trenutak $\tau = 4200$ s) i traje do završetka perioda glavnog ispitivanja (trenutak $\tau = 7800$ s).



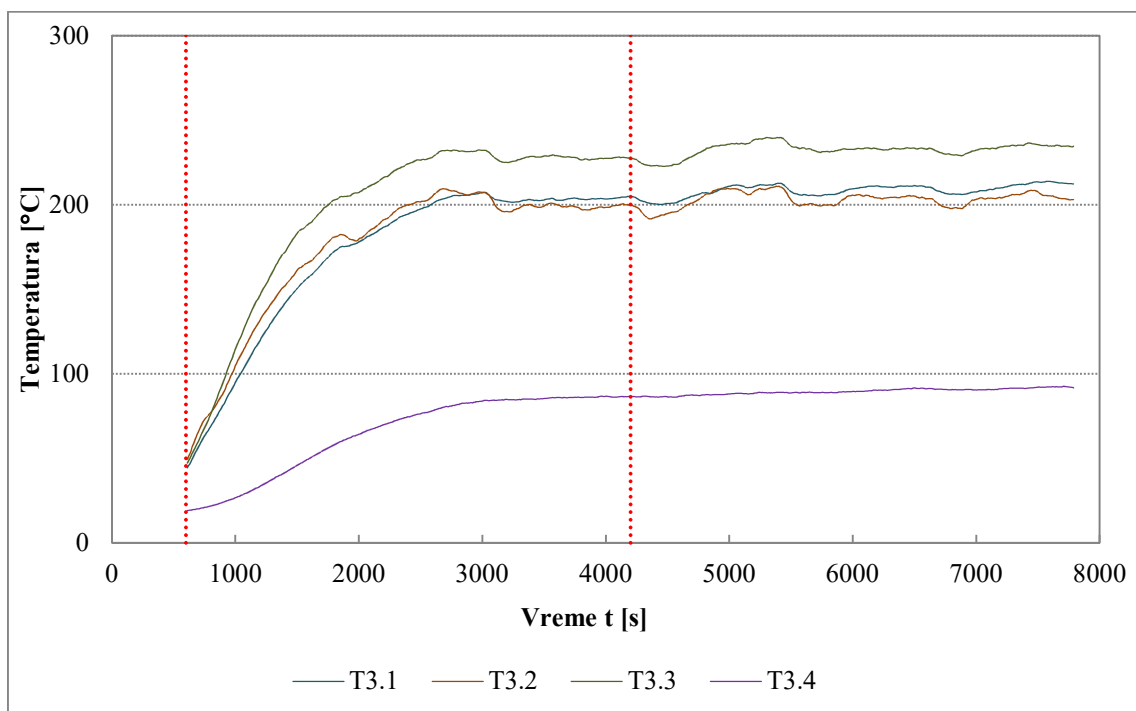
Slika 8-1 Promena ukupne mase peći za režim PA-N-B8-D12



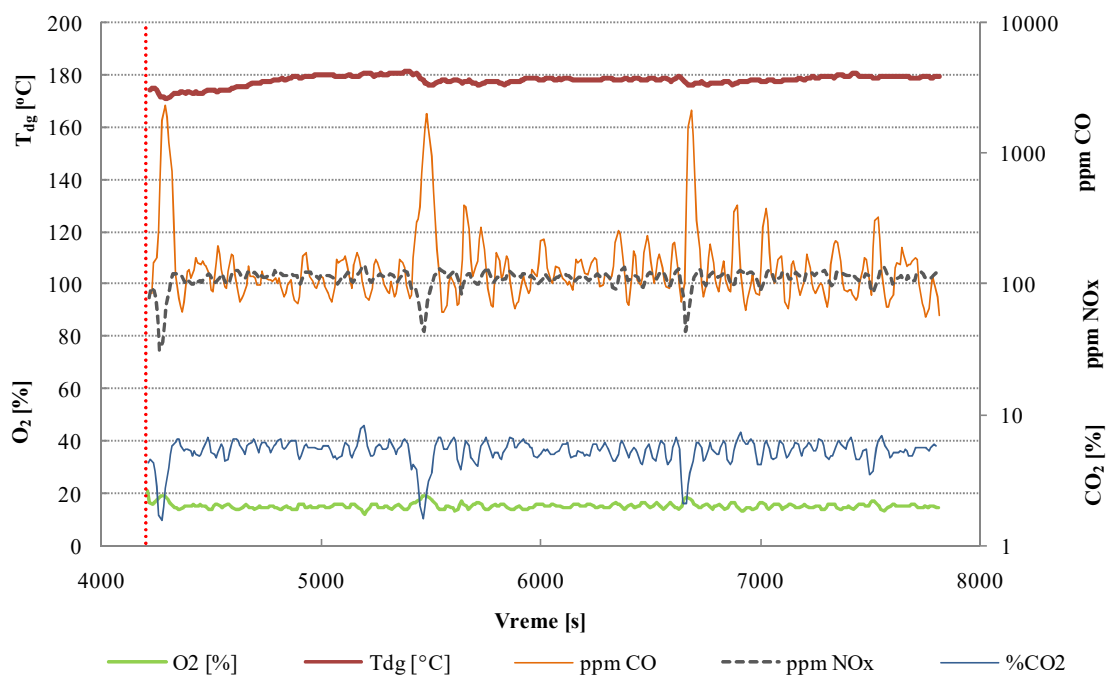
Slika 8-2 Promena temperature dimnog gasa i temperature toplog vazduha za režim PA-N-B8-D12



Slika 8-3 Promena temperature u ložištu peći za režim PA-N-B8-D12

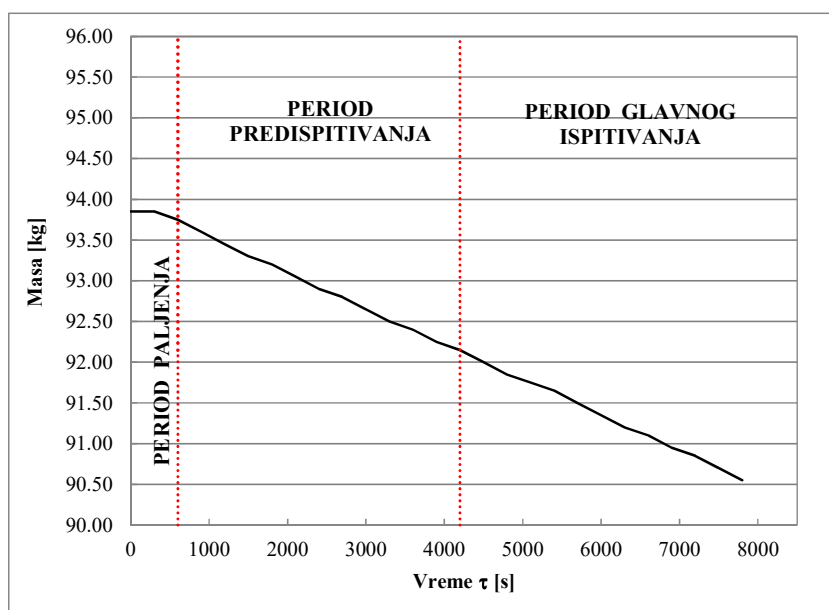


Slika 8-4 Promena temperatura karakterističnih površina peći za režim PA-N-B8-D12

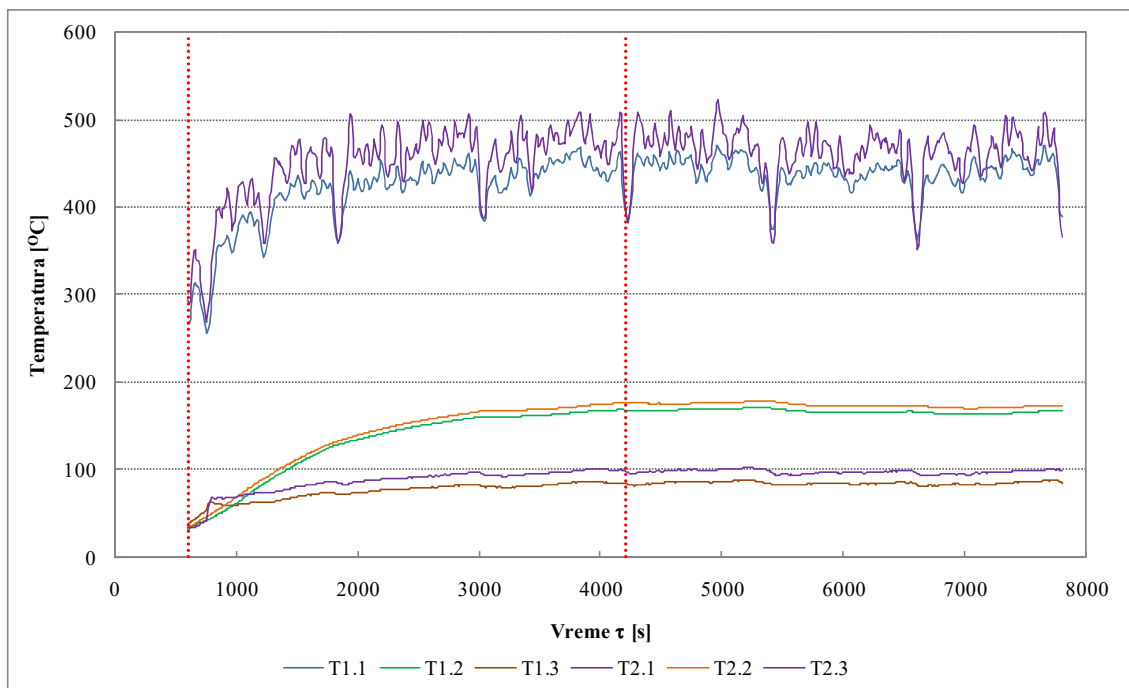


Slika 8-5 Promena temperature i sastava gasovitih produkata sagorevanja za režim PA-N-B8-D12

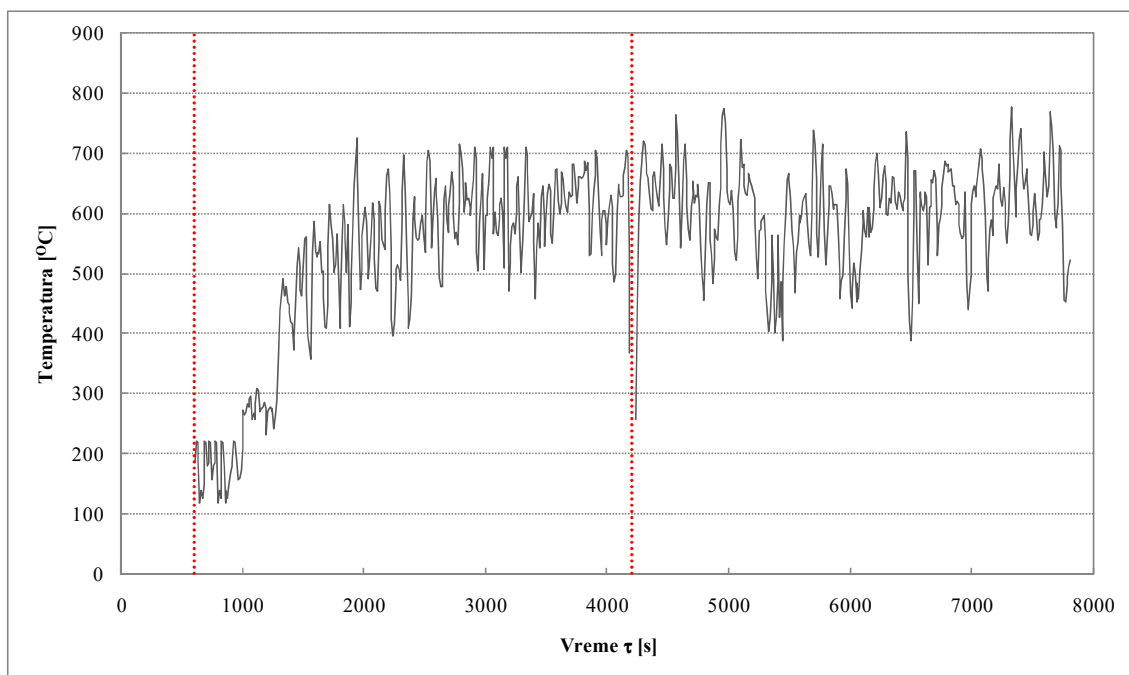
U nastavku će, na Slikama od 8-6 do 8-11, biti prikazani rezultati merenja dobijeni za merni režim koji odgovara korišćenju alternativnog goriva - peleta B, pri nominalnom toplotnom opterećenju, upotrebi gorionika kapaciteta 8 kWt i pri potpritisku u kanalu dimnog gasa od 12 ± 2 Pa tj. za merni režim PB-N-B8-D12.



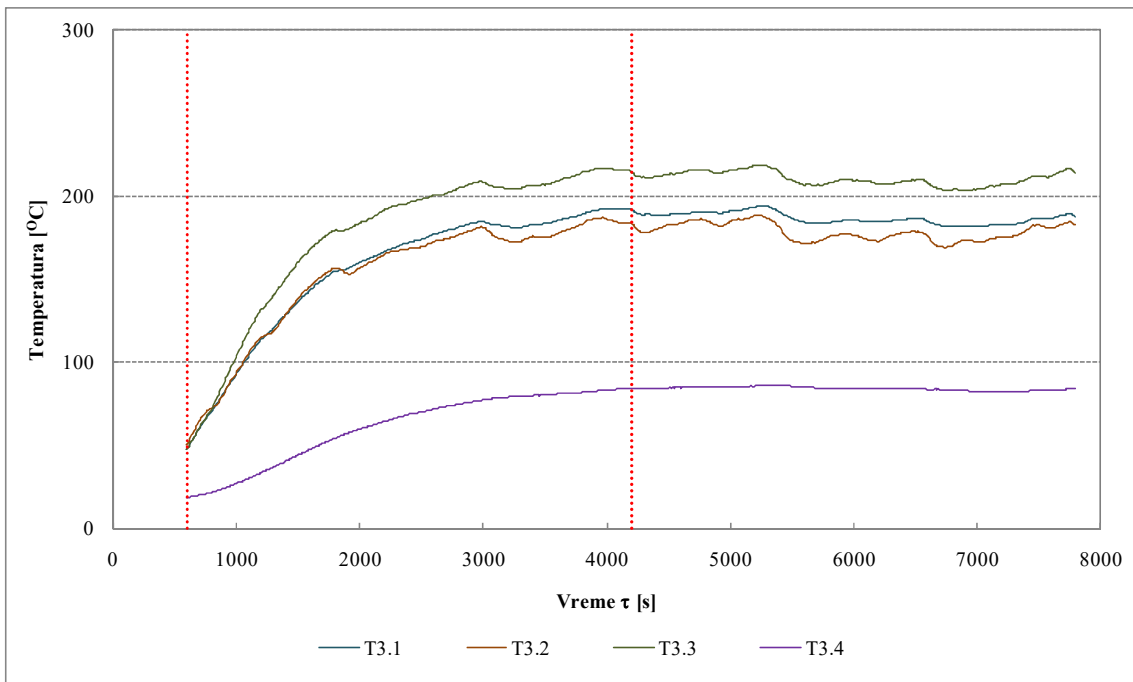
Slika 8-6 Promena ukupne mase peći za režim PB-N-B8-D12



Slika 8-7 Promena temperature dimnog gasa i temperature toplog vazduha za režim PB-N-B8-D12



Slika 8-8 Promena temperature u ložištu peći za režim PB-N-B8-D12



Slika 8-9 Promena temperatura karakterističnih površina peći za režim PB-N-B8-D12



Slika 8-10 Promena temperature i sastava gasovitih produkata sagorevanja za režim PB-N-B8-D12

8.1.3 Prikaz srednjih vrednosti rezultata kontinualnih merenja mernih parametara

U nastavku su date srednje vrednosti merenih parametara dobijene praćenjem procesa sagorevanja za svaki od ispitivanih režima. Pomenute srednje vrednosti poslužile su za definisanje graničnih uslova pri definisanju matematičkog modela sagorevanja peleta u razmatranoj peći, kao i za određivanje performansi rada peći. Prikazane srednje vrednosti dobijene su na osnovu podataka koji su prikupljeni samo tokom perioda glavnog ispitivanja tj. u stacionarnom režimu rada peći.

U Tabeli 8-2 prikazani su rezultati merenja potrošnje goriva, dok su rezultati ispitivanja temperaturskih parametara i karakteristika dimnog gasa prikazani u Tabelama 8.3-8.6. Potrebno je napomenuti da je usled velikog broja izvršenih merenja, tokom eksperimentalnog ispitivanja došlo do otkazivanja termopara koji je merio temperaturu u ložištu peći ($T_{1.4}$), kao i termopara koji je korišćen za merenje temperature u kanalu dimnog gasa sa gornje leve strane ($T_{1.1}$). Pomenuti slučajevi prikazani su u tabelama rezultata merenja oznakom N/A.

Tabela 8-2 Rezultati ispitivanja potrošnje goriva

Oznaka radnog režima	Potrošnja goriva [kg/h]	Oznaka radnog režima	Potrošnja goriva [kg/h]
PA-N-B6-D8	1,85	PB-N-B6-D8	1,65
PA-N-B6-D12	1,75	PB-N-B6-D12	1,65
PA-N-B6-D16	1,90	PB-N-B6-D16	1,60
PA-N-B8-D8	1,80	PB-N-B8-D8	1,55
PA-N-B8-D12	1,75	PB-N-B8-D12	1,60
PA-N-B8-D16	1,75	PB-N-B8-D16	1,60
PA-N-B10-D8	1,95	PB-N-B10-D8	1,40
PA-N-B10-D12	1,75	PB-N-B10-D12	1,65
PA-N-B10-D16	1,90	PB-N-B10-D16	1,35
PA-R-B6-D8	1,20	PB-R-B6-D8	1,05
PA-R-B6-D12	1,25	PB-R-B6-D12	0,90
PA-R-B6-D16	1,10	PB-R-B6-D16	1,10
PA-R-B8-D8	1,10	PB-R-B8-D8	1,00
PA-R-B8-D12	1,10	PB-R-B8-D12	1,00
PA-R-B8-D16	1,10	PB-R-B8-D16	1,05
PA-R-B10-D8	1,15	PB-R-B10-D8	0,95
PA-R-B10-D12	1,25	PB-R-B10-D12	1,10
PA-R-B10-D16	1,15	PB-R-B10-D16	0,90

Tabela 8-3 Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet A, nominalno toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa

Oznaka mernog parametra	Oznaka mernog režima								
	PA-N-B6-D8	PA-N-B6-D12	PA-N-B6-D16	PA-N-B8-D8	PA-N-B8-D12	PA-N-B8-D16	PA-N-B10-D8	PA-N-B10-D12	PA-N-B10-D16
T1.1 [°C]	N/A	473,7	N/A	497,5	504,1	496,3	N/A	479,0	N/A
T1.2 [°C]	198,7	195,5	222,0	185,5	186,6	187,0	195,2	173,8	178,7
T1.3 [°C]	87,1	91,5	87,6	91,3	94,2	93,4	90,2	89,4	94,0
T1.4 [°C]	691,0	679,8	632,3	715,3	769,6	723,9	671,3	688,0	706,2
T2.1 [°C]	471,7	472,1	503,8	527,0	524,9	516,9	552,5	495,8	497,8
T2.2 [°C]	201,5	186,3	193,4	191,3	189,0	193,2	181,4	165,0	162,3
T2.3 [°C]	104,4	N/A	100,4	109,4	N/A	107,5	104,6	N/A	205,7
T3.1 [°C]	227,8	212,3	225,8	211,5	208,5	213,3	222,9	192,3	216,5
T3.2 [°C]	199,4	192,1	207,2	206,7	203,1	204,7	222,6	194,8	223,0
T3.3 [°C]	243,9	243,6	259,6	232,4	232,5	235,2	245,2	221,4	260,7
T3.4 [°C]	90,3	84,4	97,9	91,1	89,4	92,0	87,5	79,3	72,5
T _{dg} [°C]	187,2	175,4	183,3	174,9	178,1	176,4	181,0	176,0	179,7
O ₂ [% v/v]	15,09	15,55	15,06	15,42	15,40	15,47	14,82	15,78	15,76
CO* [ppm]	539	306	272	174	187	170	163	411	71
NO _x [ppm]	95	93	108	114	112	110	119	108	86
CO ₂ [% v/v]	5,73	5,28	5,76	5,41	5,43	5,36	5,99	5,06	5,54

* realno izmeren sadržaj CO u produktima sagorevanja, za izmeren sadržaj kiseonika koji je prikazan u tabeli

Tabela 8-4 Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet A, redukovano toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa

Oznaka mernog parametra	Oznaka mernog režima								
	PA-R-B6-D8	PA-R-B6-D12	PA-R-B6-D16	PA-R-B8-D8	PA-R-B8-D12	PA-R-B8-D16	PA-R-B10-D8	PA-R-B10-D12	PA-R-B10-D16
T1.1 [°C]	N/A	N/A	N/A	371,90	372,73	372,6	N/A	N/A	N/A
T1.2 [°C]	147,4	154,41	147,9	131,73	129,53	128,2	140,1	142,5	137,2
T1.3 [°C]	62,4	68,2	62,5	76,17	76,36	75,8	69,3	72,7	67,4
T1.4 [°C]	N/A	305,0	N/A	N/A	N/A	N/A	441,8	335,8	N/A
T2.1 [°C]	342,8	379,4	353,5	393,56	392,27	388,3	387,9	407,4	380,3
T2.2 [°C]	140,8	152,1	142,0	138,87	136,74	135,9	134,5	139,9	134,3
T2.3 [°C]	69,2	76,2	72,4	87,39	87,28	86,8	77,9	81,8	74,5
T3.1 [°C]	143,3	161,4	145,5	153,27	149,92	147,2	146,0	150,3	142,4
T3.2 [°C]	130,0	140,9	132,9	147,01	144,20	140,9	146,0	148,4	139,1
T3.3 [°C]	172,2	180,5	170,9	165,39	163,12	161,3	167,9	172,0	163,5
T3.4 [°C]	65,8	73,6	66,2	67,67	65,53	63,7	63,7	68,5	62,7
T _{dg} [°C]	128,5	139,3	130,6	132,99	132,49	131,8	112,9	140,1	102,1
O ₂ [% v/v]	17,62	17,01	17,52	17,38	17,53	17,59	19,05	17,03	19,43
CO* [ppm]	377	363	159	424	446	460	158	248	146
NO _x [ppm]	76	94	81	88	84	82	47	94	37
CO ₂ [%v/v]	3,32	3,87	3,40	3,51	3,36	3,31	1,96	3,86	1,59

* realno izmeren sadržaj CO u produktima sagorevanja, za izmeren sadržaj kiseonika koji je prikazan u tabeli

Tabela 8-5 Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet B, nominalno toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa

Oznaka mernog parametra	Oznaka mernog režima								
	PB-N-B6-D8	PB-N-B6-D12	PB-N-B6-D16	PB-N-B8-D8	PB-N-B8-D12	PB-N-B8-D16	PB-N-B10-D8	PB-N-B10-D12	PB-N-B10-D16
T1.1 [°C]	N/A	463,95	N/A	438,9	439,9	457,3	N/A	466,8	N/A
T1.2 [°C]	194,3	187,50	167,6	166,5	167,7	171,1	173,5	174,1	150,3
T1.3 [°C]	78,4	87,34	75,1	85,0	84,2	86,3	84,7	87,6	81,4
T1.4 [°C]	566,9	645,28	536,2	601,8	602,0	610,9	540,9	631,5	465,8
T2.1 [°C]	439,6	453,75	433,6	456,03	464,0	471,9	446,0	489,2	411,8
T2.2 [°C]	174,0	178,55	164,3	174,8	173,5	173,7	169,4	167,0	148,3
T2.3 [°C]	90,4	98,00	86,0	99,3	97,1	98,9	99,2	101,4	91,2
T3.1 [°C]	195,3	203,16	182,5	189,4	186,8	190,6	187,4	196,6	162,2
T3.2 [°C]	177,8	189,70	173,8	178,4	178,4	182,1	180,8	192,1	153,9
T3.3 [°C]	232,2	233,50	208,2	211,4	210,3	216,1	211,6	220,8	184,1
T3.4 [°C]	88,6	87,65	74,8	84,8	84,6	84,7	85,0	81,4	74,0
T _{dg} [°C]	169,00	169,09	167,70	161,0	160,9	164,2	163,0	167,7	149,6
O ₂ [% v/v]	16,25	16,06	16,44	16,50	16,56	16,34	16,79	16,19	17,20
CO* [ppm]	397	274	585	204	282	205	326	284	399
NO _x [ppm]	61	54	49	53	53	55	56	54	51
CO ₂ [% v/v]	4,60	4,79	4,42	4,36	4,31	4,52	4,07	4,67	3,68

* realno izmeren sadržaj CO u produktima sagorevanja, za izmeren sadržaj kiseonika koji je prikazan u tabeli

Tabela 8-6 Pregled srednjih vrednosti parametara sagorevanja za pelet B, redukovano toplotno opterećenje i različite kapacitete gorionika i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa

Oznaka mernog parametra	Oznaka mernog režima								
	PB-R-B6-D8	PB-R-B6-D12	PB-R-B6-D16	PB-R-B8-D8	PB-R-B8-D12	PB-R-B8-D16	PB-R-B10-D8	PB-R-B10-D12	PB-R-B10-D16
T1.1 [°C]	N/A	N/A	N/A	340,4	346,5	343,7	N/A	N/A	N/A
T1.2 [°C]	120,6	133,8	125,1	121,7	123,6	121,4	122,7	131,6	109,7
T1.3 [°C]	53,8	66,0	55,2	68,9	70,8	68,3	57,8	65,9	53,3
T1.4 [°C]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T2.1 [°C]	300,6	293,3	310,6	350,3	355,4	345,2	338,1	360,0	318,3
T2.2 [°C]	119,1	130,6	121,4	129,4	130,7	127,2	120,5	125,0	111,0
T2.3 [°C]	60,4	71,9	62,4	78,4	78,6	76,8	66,1	75,5	60,7
T3.1 [°C]	121,7	131,9	126,1	139,4	140,9	136,3	127,2	132,3	115,0
T3.2 [°C]	107,4	116,5	113,3	128,0	128,2	123,4	120,1	128,0	106,1
T3.3 [°C]	146,6	155,7	152,8	153,4	154,3	151,2	145,5	158,4	136,8
T3.4 [°C]	54,6	66,2	54,3	64,7	64,7	62,3	57,4	60,6	49,5
T _{dg} [°C]	115,7	123,7	119,5	124,6	126,3	124,0	111,7	131,1	114,3
O ₂ [% v/v]	18,33	18,30	18,18	18,00	17,97	18,12	19,24	17,81	18,41
CO* [ppm]	568	285	510	457	450	488	193	220	448
NO _x [ppm]	28	36	31	37	37	35	21	40	29
CO ₂ [% v/v]	2,66	2,67	2,78	2,96	2,99	2,80	1,76	3,12	2,54

* realno izmeren sadržaj CO u produktima sagorevanja, za izmeren sadržaj kiseonika koji je prikazan u tabeli

Takođe, u Tabeli 8-7 prikazan je sadržaj nesagorelog u pepelu, određen na osnovu ispitivanja uzoraka pepela koji su prikupljeni za svaki ispitivani radni režim. Prikazani podaci dati su kao procentualni udeo nesagorelog po jedinici mase čvrstih produkata sagorevanja (pepela). Dobijene vrednosti nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja omogućile su analizu kvaliteta procesa sagorevanja, kao i izračunavanje toplotnih gubitaka usled sadržaja nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja, a u skladu sa postupkom izračunavanja stepena korisnosti rada analizirane peći na pelet koji je definisan u literaturi [120].

Tabela 8-7 Rezultati ispitivanja sadržaja nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja

<i>Oznaka radnog režima</i>	<i>Sadržaj nesagorelog u pepelu [% udeo u pepelu]</i>	<i>Oznaka radnog režima</i>	<i>Sadržaj nesagorelog u pepelu [% udeo u pepelu]</i>
PA-N-B6-D8	14,95	PB-N-B6-D8	28,47
PA-N-B6-D12	44,58	PB-N-B6-D12	36,94
PA-N-B6-D16	42,56	PB-N-B6-D16	26,09
PA-N-B8-D8	51,36	PB-N-B8-D8	25,34
PA-N-B8-D12	40,24	PB-N-B8-D12	22,76
PA-N-B8-D16	50,09	PB-N-B8-D16	27,32
PA-N-B10-D8	12,22	PB-N-B10-D8	8,11
PA-N-B10-D12	15,12	PB-N-B10-D12	16,56
PA-N-B10-D16	15,55	PB-N-B10-D16	9,53
PA-R-B6-D8	41,27	PB-R-B6-D8	6,45
PA-R-B6-D12	47,38	PB-R-B6-D12	18,22
PA-R-B6-D16	49,09	PB-R-B6-D16	21,64
PA-R-B8-D8	23,17	PB-R-B8-D8	11,52
PA-R-B8-D12	22,86	PB-R-B8-D12	15,55
PA-R-B8-D16	21,05	PB-R-B8-D16	11,99
PA-R-B10-D8	17,43	PB-R-B10-D8	14,33
PA-R-B10-D12	6,73	PB-R-B10-D12	19,96
PA-R-B10-D16	11,77	PB-R-B10-D16	8,62

8.2 Obrada rezultata eksperimentalnih ispitivanja

Obrada i analiza rezultata eksperimentalnih ispitivanja procesa sagorevanja drvnih peleta u ispitivanoj peći sprovedena je iz nekoliko razloga: 1) definisanje parametara potrebnih za numeričku simulaciju analiziranog procesa sagorevanja, 2) sagledavanje energetskih i ekoloških karakteristika rada ispitivanog ložnog uređaja i upoređivanje sa zahtevima relevantnog standarda i 3) upoređivanje rezultata numeričke simulacije analiziranog procesa sagorevanja sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja.

8.2.1 Definisanje parametara potrebnih za postavku matematičkog modela sagorevanja peleta u analiziranoj peći

Parametri određivani u cilju numeričke simulacije analiziranog procesa sagorevanja obuhvatili su definisanje sledećih karakteristika:

- potrošnje goriva,
- količine vazduha za sagorevanje i
- temperatura karakterističnih površina peći.

Potrošnja goriva za svaki od ispitivanih režima određena je na osnovu promene ukupne mase peći tokom vremena, a u skladu sa rezultatima prikazanim u Delu 8.1.2. Promena ukupne mase peći određena je za period glavnog ispitivanja i to kao razlika početne vrednosti, koja predstavlja zbir mase same peći i količine peleta u rezervoaru peći u trenutku $\tau=4200$ s i ukupne mase peći utvrđene na kraju ispitivanja, u trenutku $\tau=7800$ s:

$$m_{\text{gor}} = m_{\text{peći}, \tau=4200\text{s}} - m_{\text{peći}, \tau=7800\text{s}} \text{ [kg]} \quad (8.1)$$

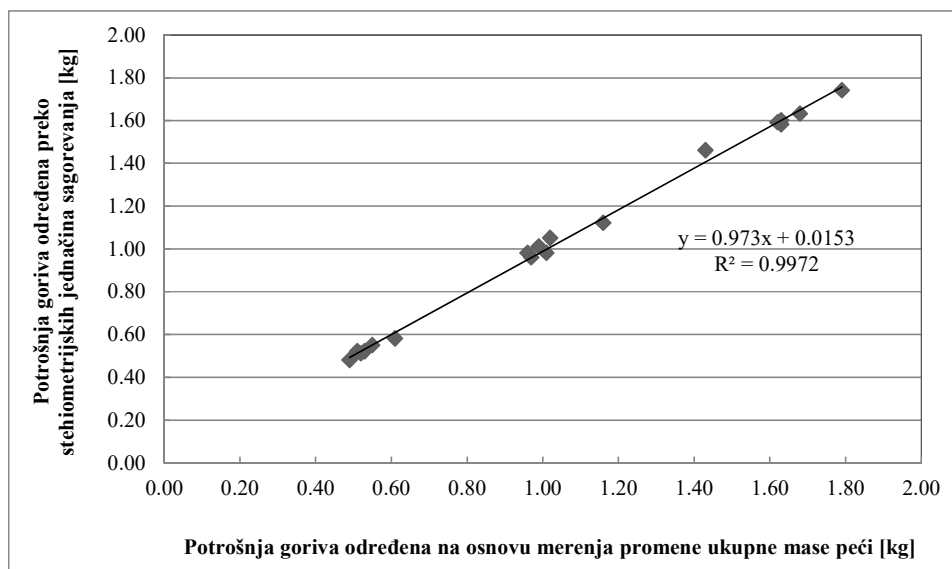
Takođe, na osnovu promene ukupne mase peći koja je beležena u pravilnim vremenskim intervalima tokom celog ispitivanog perioda, dobijena je i kriva potrošnje goriva tokom vremena, na osnovu koje je moguće utvrditi trenutnu potrošnju goriva za svaki vremenski interval $\Delta\tau_i$:

$$\dot{m}_{\text{gor},i} = \frac{\Delta m_{\text{gor},i}}{\Delta\tau_i} \quad (8.2)$$

Izračunavanjem srednje vrednosti svih trenutnih potrošnji goriva za period glavnog ispitivanja takođe je omogućeno određivanje prosečne potrošnje goriva za odgovarajući ispitni režim:

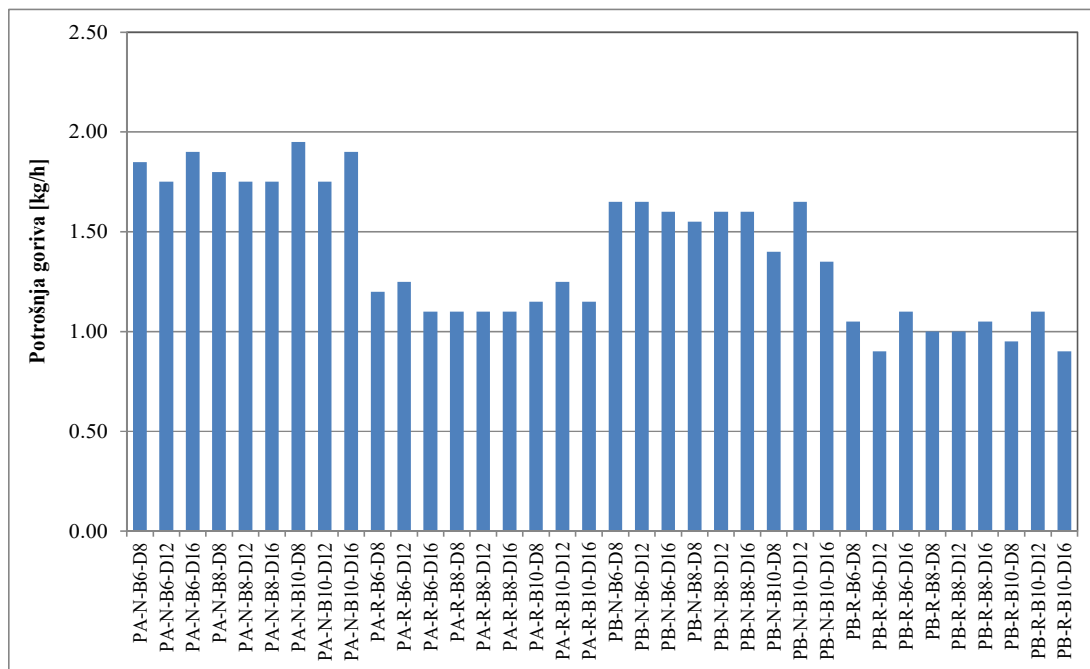
$$\dot{m}_{gor,i} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta m_{gor,i}}{\Delta \tau_i}}{n} \quad (8.3)$$

Potrošnju goriva je, pored na prethodno naveden način, moguće odrediti i korišćenjem stehiometrijskih jednačina sagorevanja. Međutim, s obzirom da je u literaturi [122] već izvršeno određivanje potrošnje goriva na oba pomenuta načina, rezultati koji su dobijeni i prikazani u referentnom ispitivanju iskorišćeni su za uspostavljanje korelacije između potrošnje goriva određene merenjem promene ukupne mase peći i vrednosti dobijenih korišćenjem stehiometrijskih jednačina sagorevanja. Dijagram prikazan na Slici 8-11 ukazuje na izuzetno dobro slaganje vrednosti potrošnje goriva određenih na pomenuta dva načina, uz koeficijent korelacije koji iznosi čak 0,9972. Shodno tome, usvojeno je da potrošnja goriva određena merenjem promene ukupne mase peći predstavlja adekvatan podatak za definisanje parametara korišćenih tokom numeričke simulacije sagorevanja peleta u analiziranoj peći.



Slika 8-11 Poređenje literaturnih podataka za određivanje potrošnje goriva merenjem promene ukupne mase peći i korišćenjem stehiometrijskih jednačina sagorevanja [122]

Potrošnja goriva određena za 36 analiziranih režima rada peći prikazana je na Slici 8-12.



Slika 8-12 Potrošnja goriva za ispitivane radne režime

Određivanje količine vazduha za sagorevanje izvršeno je na osnovu potrošnje goriva i stvarno potrebne količine vazduha za sagorevanje, a u skladu sa sledećim izrazom:

$$\dot{m}_v = L_{stv} \times \dot{m}_{gor} \left[\frac{kg}{s} \right] \tag{8.4}$$

Stvarna količina vazduha za sagorevanje određena je na osnovu teorijske količine vazduha potrebne za stehiometrijsko sagorevanje čvrstog goriva poznatog elementarnog sastava tj. minimalne količine vazduha potrebne za sagorevanje 1 kg goriva, pri poznatoj vrednosti koeficijenta viška vazduha:

$$L_{stv} = L_{min} \times \lambda \tag{8.5}$$

gde je L_{min} teorijska količina vazduha potrebna za stehiometrijsko sagorevanje čvrstog goriva određena na osnovu jednačine:

$$L_{min} = \frac{\frac{8}{3}g_C + 8g_H + g_S - g_O}{0,232} \left[\frac{kg}{kg} \right] \tag{8.6}$$

gde su g_c , g_h , g_s i g_o redom maseni udeli ugljenika, vodonika, sumpora i kiseonika u radnoj masi goriva.

Koeficijent viška vazduha λ određen je na osnovu izraza:

$$\lambda = \frac{21}{21 - 79 \times \frac{O_2 - 0.5 \times CO}{100 - (RO_2 + O_2 + CO)}} \quad (8.7)$$

gde su O_2 i CO zapreminski udeli kiseonika tj. ugljen-monoksida u dimnom gasu, dok je $RO_2 = CO_2 + SO_2$ zapreminski udeo produkata potpunog sagorevanja u dimnom gasu (u ispitivanom slučaju $RO_2 = CO_2$). U Tabeli 8-8 prikazan je koeficijent viška vazduha izračunat za ispitivane režime rada peći.

Tabela 8-8 Vrednosti koeficijenta viška vazduha za ispitivane radne režime

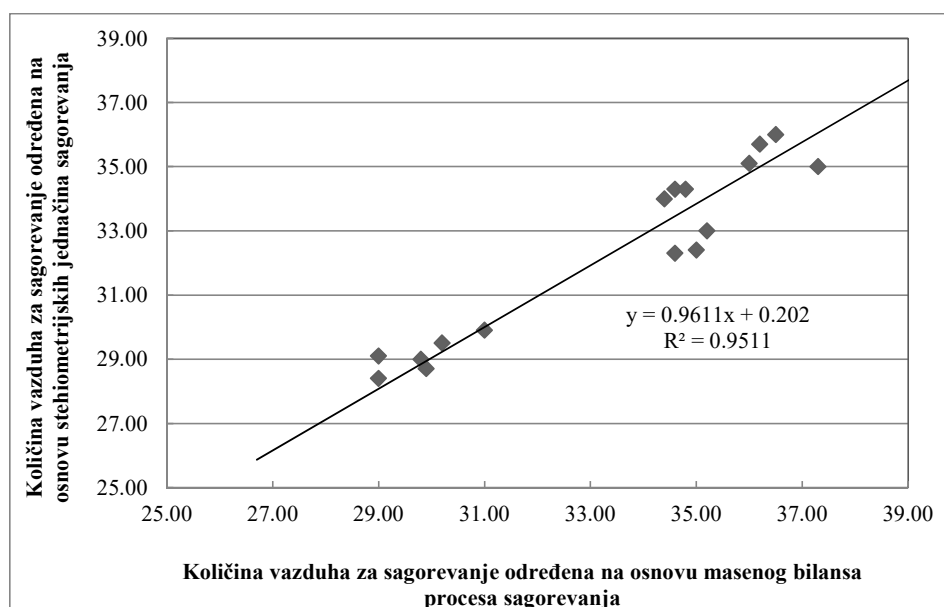
Oznaka radnog režima	Koeficijent viška vazduha, λ	Oznaka radnog režima	Koeficijent viška vazduha, λ
PA-N-B6-D8	3,553	PB-N-B6-D8	4,421
PA-N-B6-D12	3,853	PB-N-B6-D12	4,252
PA-N-B6-D16	3,535	PB-N-B6-D16	4,605
PA-N-B8-D8	3,765	PB-N-B8-D8	4,666
PA-N-B8-D12	3,748	PB-N-B8-D12	4,728
PA-N-B8-D16	3,800	PB-N-B8-D16	4,508
PA-N-B10-D8	3,398	PB-N-B10-D8	4,988
PA-N-B10-D12	4,024	PB-N-B10-D12	4,364
PA-N-B10-D16	4,008	PB-N-B10-D16	5,526
PA-R-B6-D8	6,090	PB-R-B6-D8	7,659
PA-R-B6-D12	5,263	PB-R-B6-D12	7,778
PA-R-B6-D16	5,913	PB-R-B6-D16	7,254
PA-R-B8-D8	5,808	PB-R-B8-D8	7,007
PA-R-B8-D12	6,056	PB-R-B8-D12	6,934
PA-R-B8-D16	6,154	PB-R-B8-D16	7,283
PA-R-B10-D8	10,546	PB-R-B10-D8	11,622
PA-R-B10-D12	5,290	PB-R-B10-D12	6,583
PA-R-B10-D16	13,040	PB-R-B10-D16	7,900

Količina vazduha za sagorevanje može se odrediti i na osnovu masenog bilansa procesa sagorevanja:

$$\dot{m}_{gor} + \dot{m}_v = \dot{m}_{dg} + g_A \times \dot{m}_{gor} \quad (8.8)$$

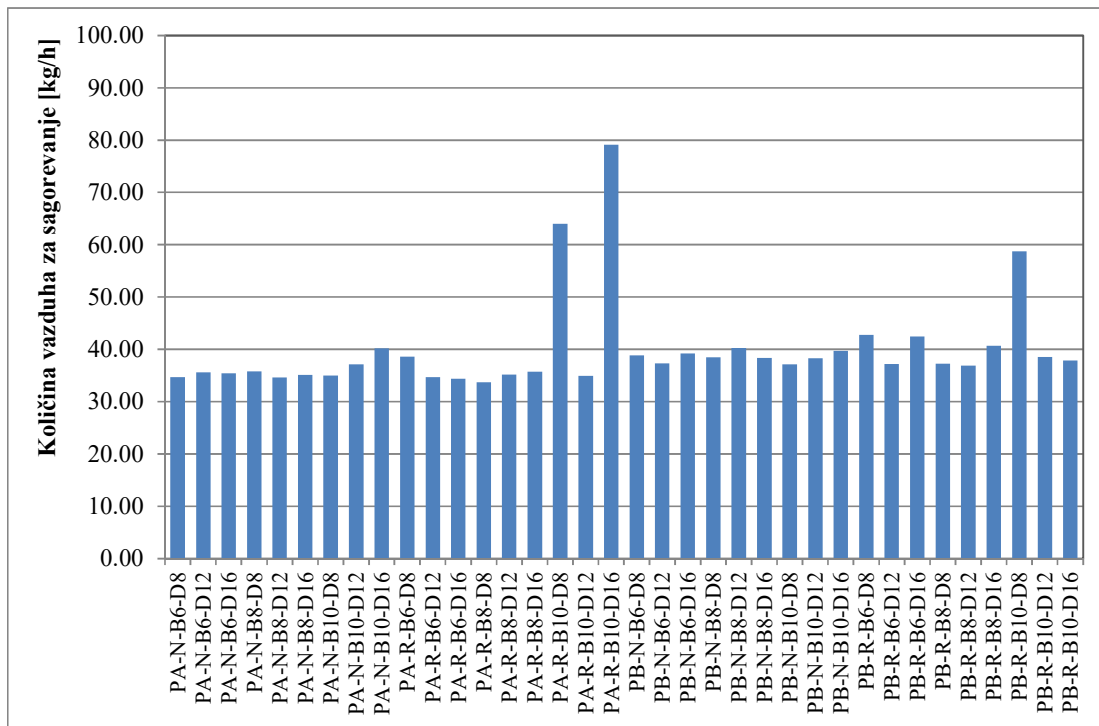
gde su \dot{m}_{gor} potrošnja goriva, \dot{m}_v maseni protok vazduha za sagorevanje, \dot{m}_{dg} maseni protok dimnog gasa i g_A maseni udeo pepela u radnoj masi goriva.

Podaci iz literature [122] u okviru kojih je izvršeno određivanje količine vazduha za sagorevanje preko masenog bilansa procesa sagorevanja, ali i korišćenjem jednačina za koeficijent viška vazduha i minimalne količine vazduha za sagorevanje, iskorišćeni su za uspostavljanje korelacije rezultata dobijenih pomenutim alternativnim metodama određivanja ispitivanog parametra. Dijagram prikazan na Slici 8-13 ukazuje na izuzetno dobro slaganje vrednosti količina vazduha za sagorevanje određenih na pomenuta dva načina, uz koeficijent korelacije koji iznosi 0,9511. Shodno tome, usvojeno je da količina vazduha za sagorevanje određena na osnovu stehiometrijskih jednačina procesa sagorevanja predstavlja adekvatan podatak za definisanje parametara korišćenih tokom numeričke simulacije sagorevanja peleta u analiziranoj peći.



Slika 8-13 Poređenje literaturnih podataka za određivanje količine vazduha za sagorevanje na osnovu stehiometrijskih jednačina sagorevanje i na osnovu masenog bilansa procesa sagorevanja [122]

Količina vazduha za sagorevanja izračunata za analizirane režime rada peći prikazana je na Slici 8-14. Na dijagramu su uočljivi skokovi u izračunatoj količini vazduha za sagorevanje za režime za koje je u Tabeli 8-8 registrovan povećan koeficijent viška vazduha u ložištu peći.



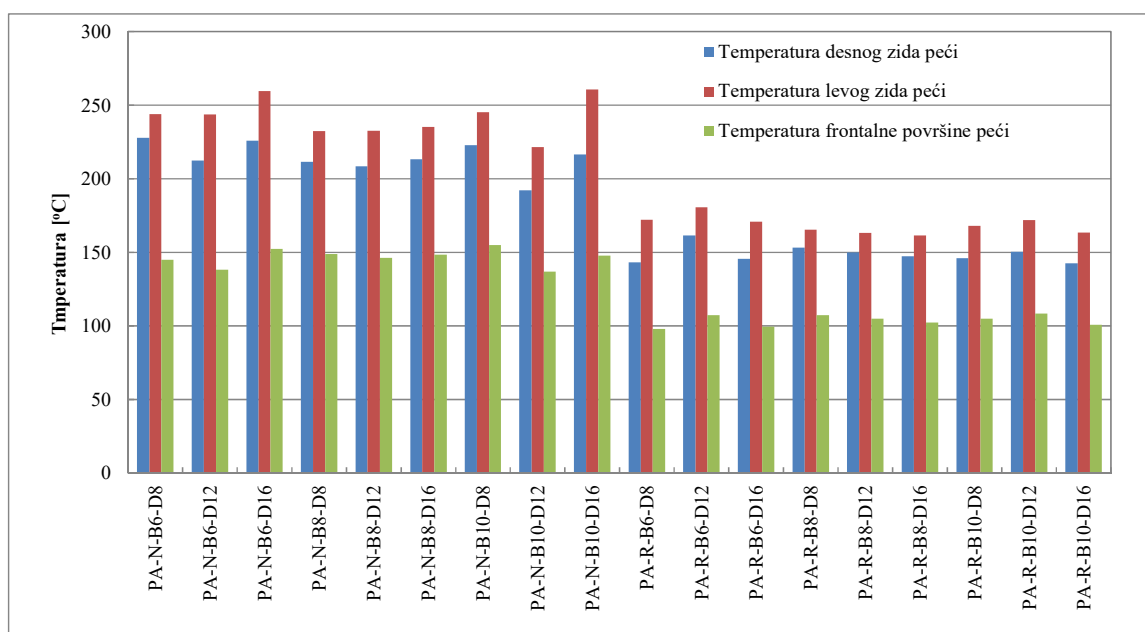
Slika 8-14 Količina vazduha za sagorevanje za ispitivane radne režime

Temperature karakterističnih površina peći određene su na osnovu merenja odgovarajućih termoparova i to kao srednje vrednosti temperatura očitanih tokom perioda glavnog ispitivanja. Pomenute temperature odnose se na temperature bočnih površina peći – desna strana peći $T_{3,1}$ i leva strana peći $T_{3,3}$, kao i na temperature frontalne površine peći – gore $T_{3,2}$ i dole $T_{3,4}$. Izmerene temperature frontalne površine peći su osrednjene i date kao srednja temperatura frontalne površine peći, u skladu sa Tabelom 8-9. Temperature karakterističnih površina peći predstavljaju granične uslove za sprovođenje numeričkih simulacija procesa sagorevanja u usvojenom domenu postavljenog matematičkog modela.

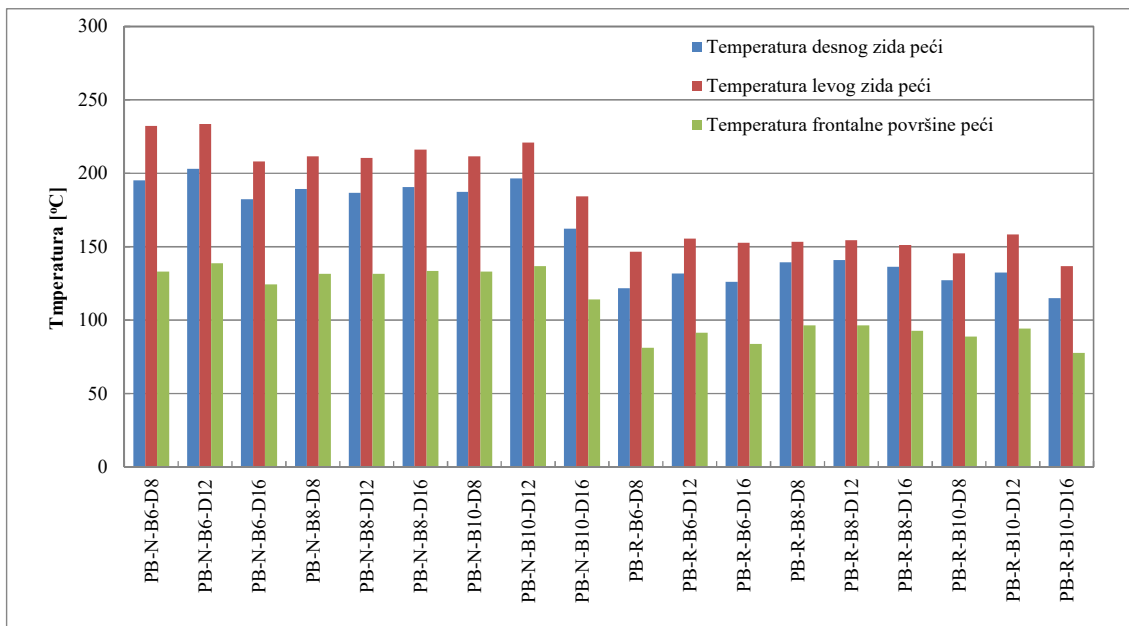
Tabela 8-9 Određivanje srednjih vrednosti temperatura graničnih površina

Granična površina matematičkog modela	Temperatura granične površine
Desni bočni zid peći, $T_{\text{desni zid}}$	$T_{\text{desni zid}} = T_{3.1}$
Levi bočni zid peći, $T_{\text{levi zid}}$	$T_{\text{levi zid}} = T_{3.3}$
Frontalna površina peći, $T_{\text{frontalne površine}}$	$T_{\text{frontalne površine}} = \frac{1}{2} (T_{3.2} + T_{3.4})$

Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura graničnih površina za ispitivane radne režime prikazani su na Slikama 8-15 i 8-16.

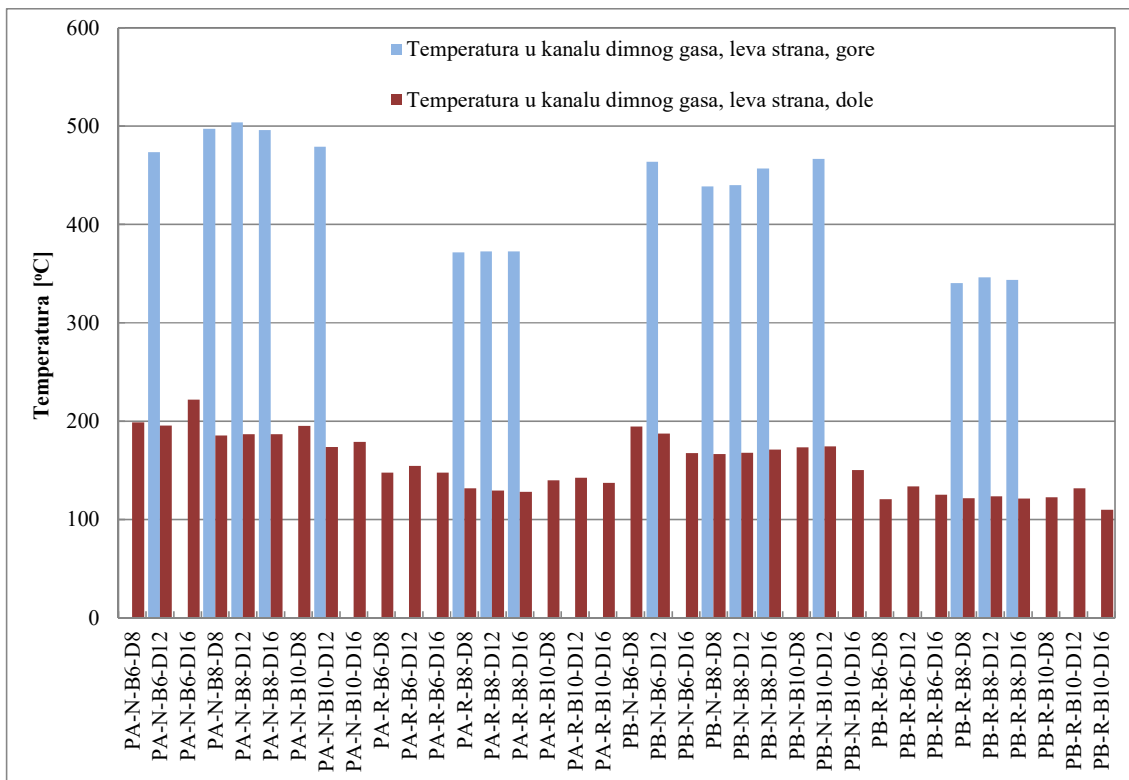


Slika 8-15 Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura graničnih površina za sagorevanje peleta A

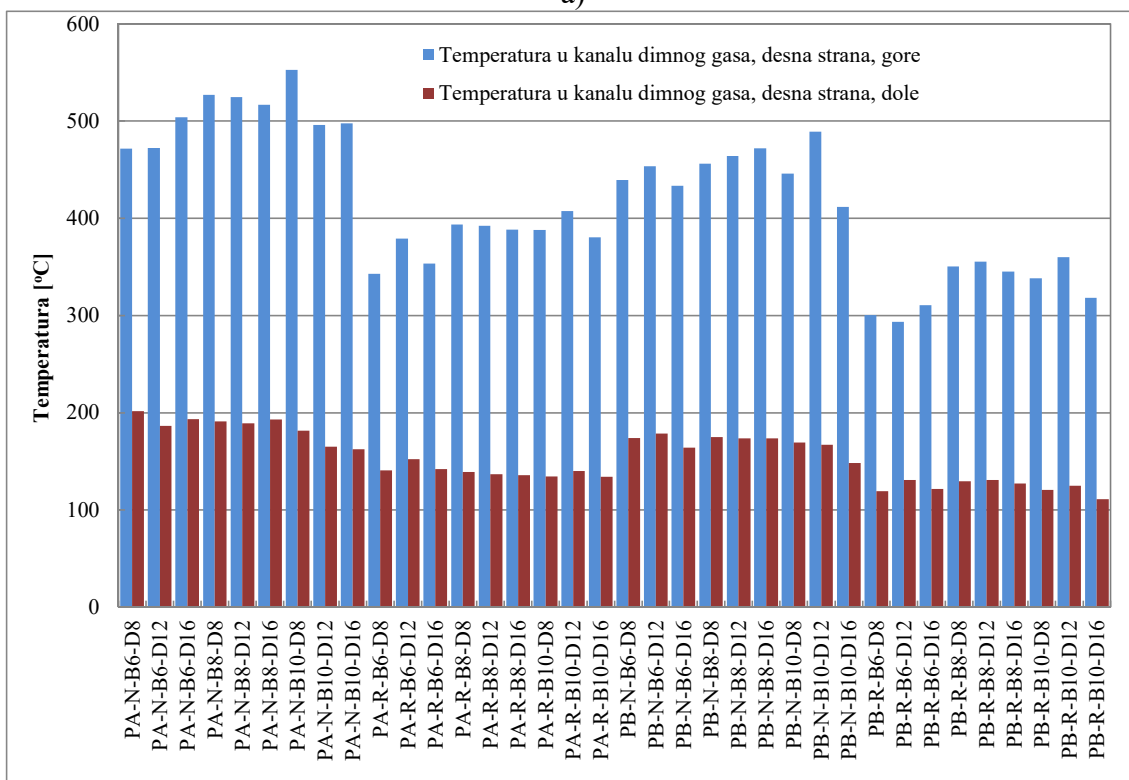


Slika 8-16 Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura graničnih površina za sagorevanje peleta B

Takođe, obradom rezultata merenja dobijene su i temperature dimnog gasa i temperature toplog vazduha na predefinisanim mernim mestima. Na Slikama 8-17 i 8-18 prikazani su rezultati navedenih merenja za obe korišćene vrste peleta. Na Slici 8-17 za pojedine režime primetan je nedostatak podataka koji se odnose na temperaturu u kanalu dimnog gasa sa gornje leve strane, do čega je došlo kao posledica otkazivanja odgovarajućeg termopara tokom eksperimentalnog ispitivanja koji je obuhvatio veliki broj serija merenja.

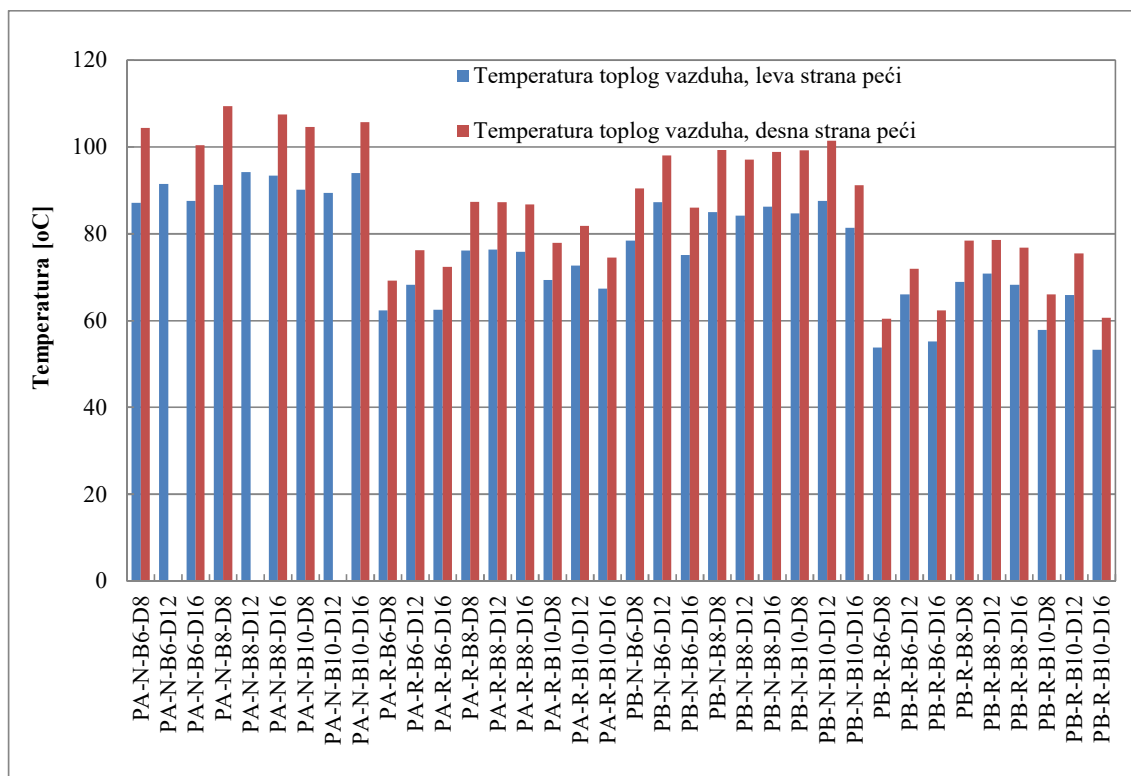


a)



b)

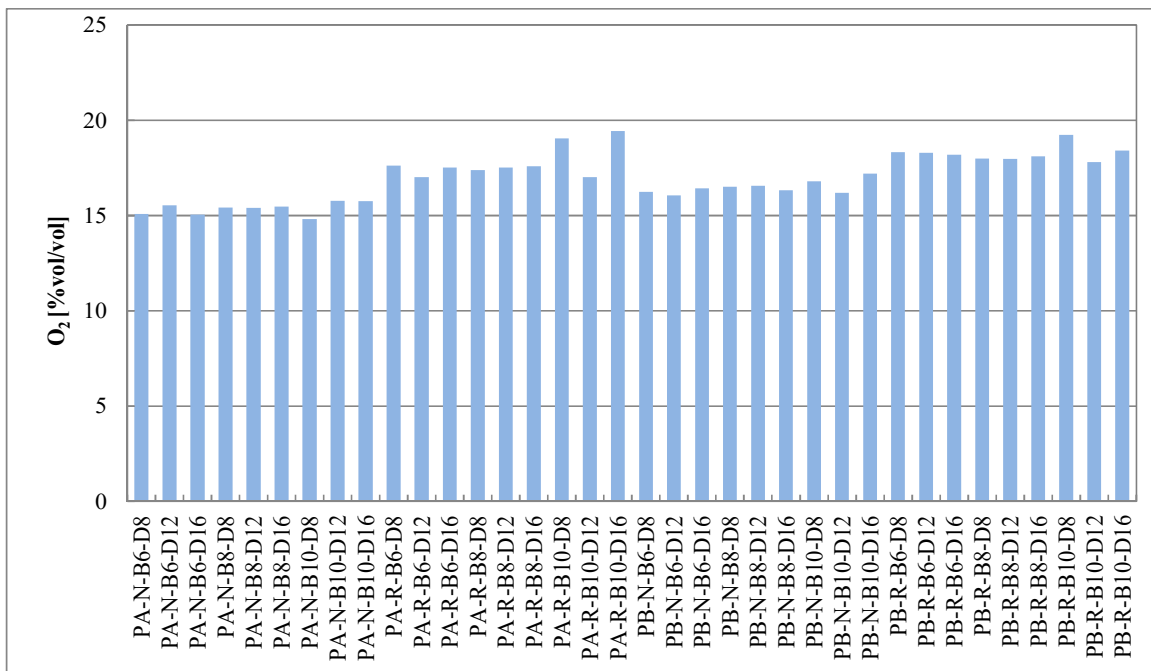
Slika 8-17 Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura dimnog gasa za pelet A i pelet B: a) leva strana peći, b) desna strana peći



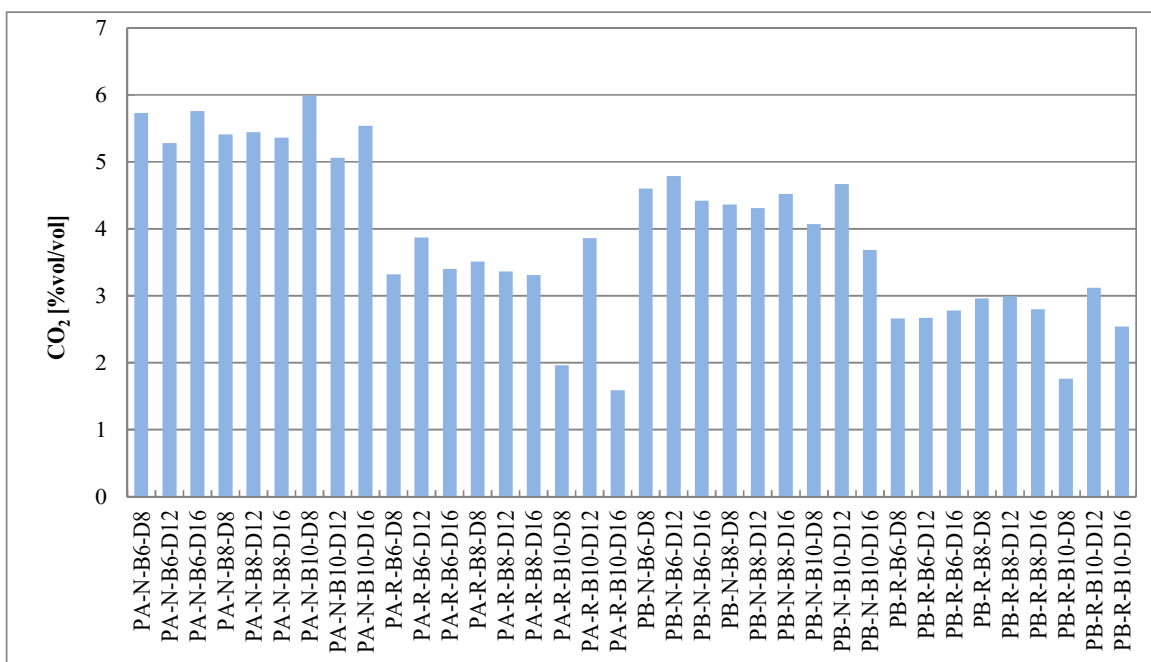
Slika 8-18 Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperatura toplog vazduha za pelet A i pelet B: a) leva strana peći, b) desna strana peći

8.2.2 Sagledavanje energetske i ekološke karakteristika rada razmatrane peći na pelet

U cilju sagledavanja parametara kojima su definisane energetske i ekološke karakteristike rada ispitivane peći na pelet, kao i za potrebe njihovog upoređivanja sa zahtevima relevantnog standarda [120], ali i za validaciju razvijenog matematičkog modela, izvršena je obrada rezultata merenja parametara koji su korišćeni u pomenutoj analizi. Kako bi se adekvatno sagledao proces sagorevanja, obrađeni su podaci dobijeni merenjem sadržaja kiseonika i ugljen dioksida u gasovitim produktima sagorevanja, kao i temperature gasovitim produktima sagorevanja. Na Slici 8-19 prikazane su srednje vrednosti pomenutih parametara procesa sagorevanja prikupljene i izračunate za svaki od 36 ispitivanih režima rada peći.



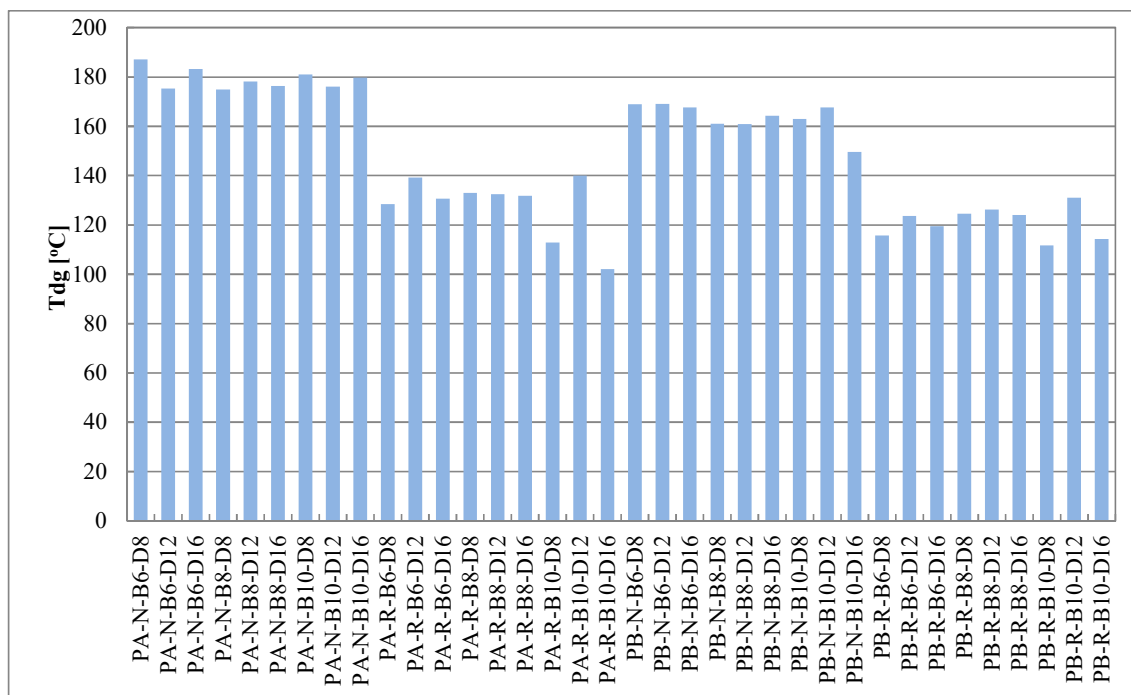
a)



b)

Slika 8-19 Rezultati određivanja srednjih vrednosti parametara procesa sagorevanja:

a) sadržaj kiseonika u gasovitim produktima sagorevanja, b) sadržaj ugljen dioksida u gasovitim produktima sagorevanja



Slika 8-20 Rezultati određivanja srednjih vrednosti temperature gasovitih produkata sagorevanja

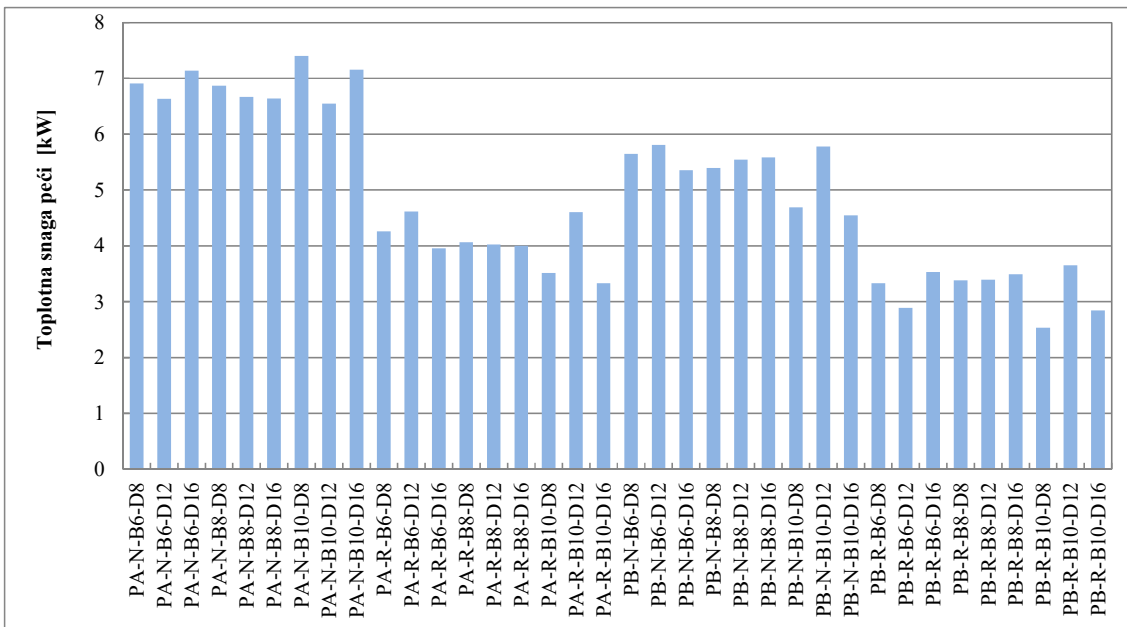
Utvrđivanje energetske karakteristike analizirane peći obuhvatilo je određivanje toplotne snage i stepena korisnosti ispitivanog ložnog uređaja. Metodologija određivanja navedenih parametara preuzeta je iz literature [120], gde je precizno definisan način proračuna svakog od pomenutih energetskih pokazatelja rada peći na pelet. Stepenn korisnosti peći određen je u skladu sa sledećim izrazom:

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad [\%] \quad (8.9)$$

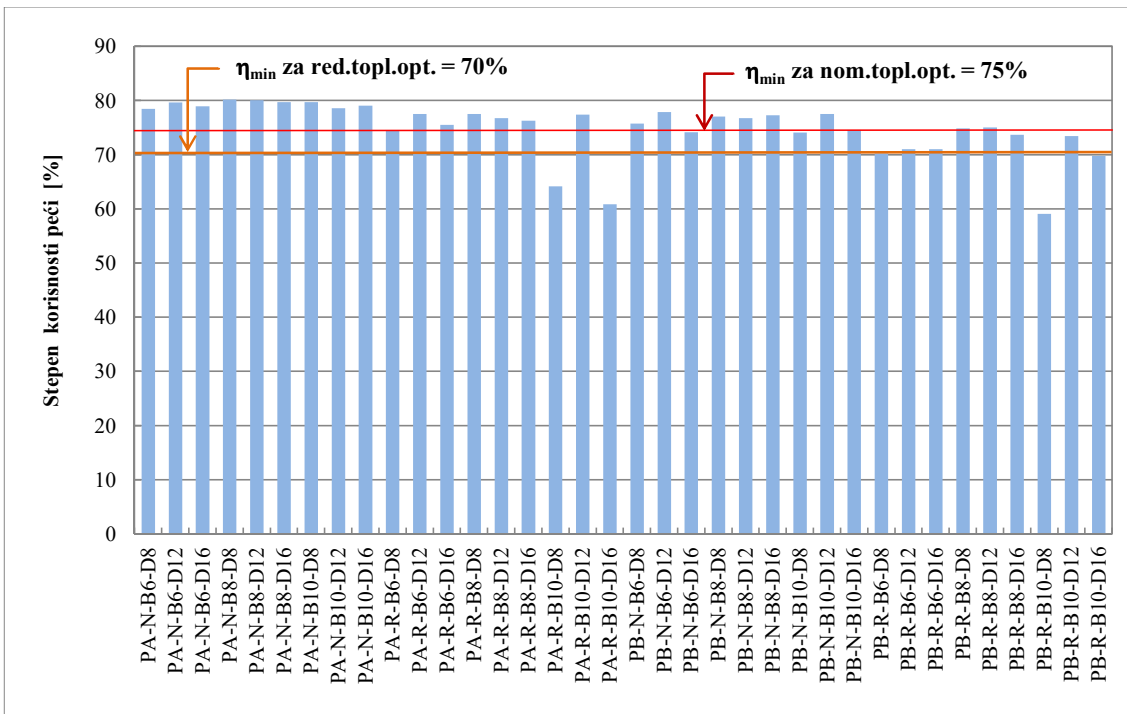
gde je q_a deo toplotnih gubitaka koji se emituju u okolinu preko dimnog gasa, q_b je deo toplotnih gubitaka usled hemijske nepotpunosti procesa sagorevanja, dok je q_r deo toplotnih gubitaka koji nastaju kao rezultat sadržaja nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja.

Izračunate vrednosti stepena korisnosti omogućile su upoređivanje karakteristika rada ispitivane peći sa zahtevima merodavnog standarda i određivanje usaglašenosti rada uređaja sa propisanim tehničkim normativima. U literaturi [120] je definisan zahtev da pri nominalnom toplotnom opterećenju peć na pelet mora ostvarivati efikasnost od minimalno 75%, tj. da pri redukovanom toplotnom opterećenju efikasnost mora iznositi

najmanje 70%. Na Slikama 8-21 i 8-22 prikazane su proračunate vrednosti toplotne snage i stepena korisnosti analizirane peći za ispitivane režima rada.

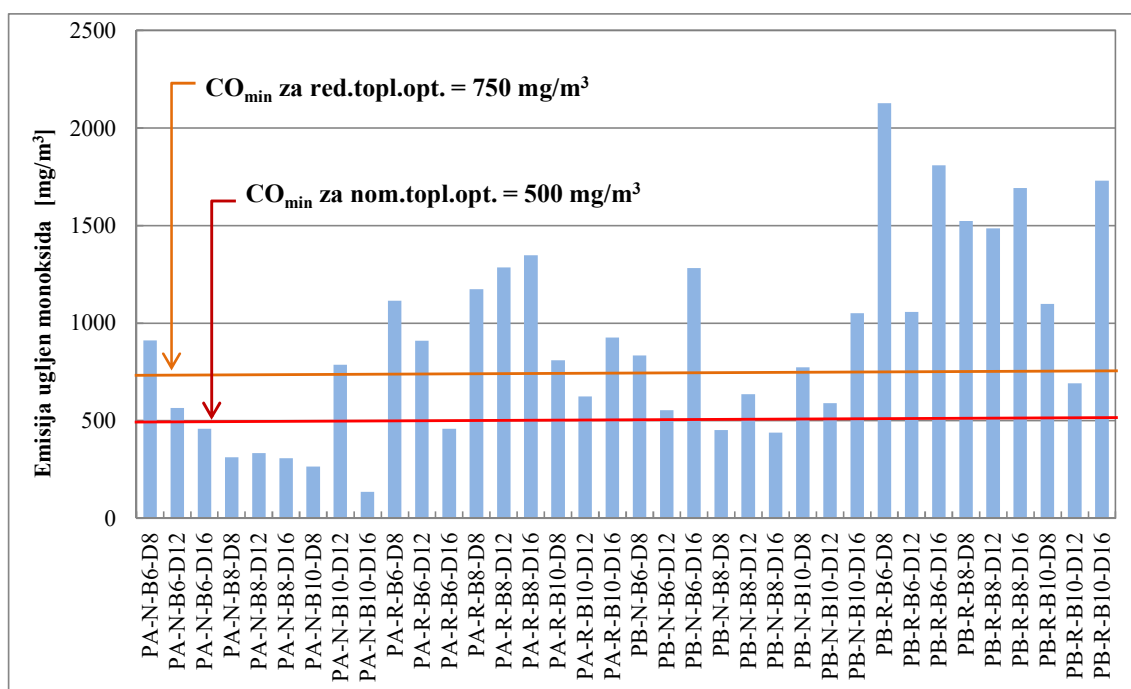


Slika 8-21 Rezultati određivanja toplotne snage peći

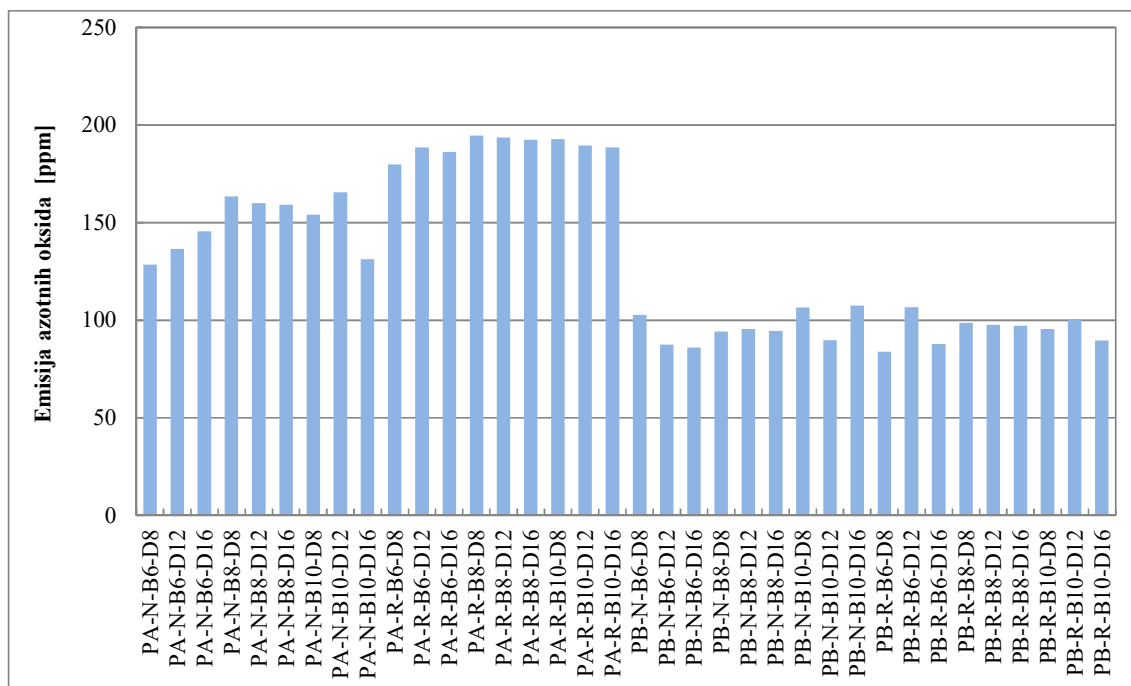


Slika 8-22 Rezultati određivanja stepena korisnosti peći

Utvrđivanje ekoloških karakteristika analizirane peći obuhvatilo je određivanje emisije ugljen monoksida (CO) i emisije azotnih oksida (NO_x), svedenih na referentni sadržaj kiseonika u dimnom gasu od 13%. Navedene emisije proračunate su na osnovu srednjih vrednosti merenja navedenih parametara prikazanih u Tabelama 8-3 do 8-6. Potrebno je pomenuti da se u literaturi [120] sa aspekta zahtevanih ekoloških performansi uređaja za sagorevanje peleta definišu samo maksimalne dozvoljene tj. granične vrednosti emisija ugljen monoksida (CO). Pri tome, maksimalno dozvoljene emisije CO pri nominalnom toplotnom opterećenju iznose 750 mg/m^3 , dok je za redukovano toplotno opterećenje definisan limit od 500 mg/m^3 . Literaturom nije definisan zahtev u pogledu graničnih vrednosti emisija azotnih oksida (NO_x), ali je pomenuta zagađujuća materija ipak praćena tokom sprovedenog eksperimentalnog ispitivanja. Na Slici 8-23 prikazani su rezultati određivanja emisije ugljen monoksida (CO), dok su na Slici 8-24 dati rezultati merenja emisije azotnih oksida (NO_x).



Slika 8-23 Rezultati određivanja emisije ugljen monoksida (CO), svedeni na referentnu vrednost od 13% O_2 (v/v) u dimnom gasu



Slika 8-24 Rezultati određivanja emisije azotnih oksida (NO_x), svedenih na referentnu vrednost od 13% O₂ (v/v) u dimnom gasu

8.3 Analiza rezultata eksperimentalnih ispitivanja

8.3.1 Analiza kvaliteta goriva

Na osnovu rezultata sprovedene analize goriva, prikazanih u Tabeli 8-1, zaključeno je da pelet A može biti klasifikovan kao A2 klasa peleta, dok pelet B, usled sadržaja pepela koji prevazilazi 1,5% m/m, može biti klasifikovan samo kao pelet klase B. Toplotna moć peleta B je oko 5% niža od toplotne moći peleta A. Dobijeni podaci takođe ukazuju i na dodatne razlike između dve analizirane vrste peleta: pelet B ima oko 18% nižu nasipnu gustinu od peleta A, što je posledica većeg opsega dimenzija peleta B i prisustva komada veće dužine. Takođe, (komadna) gustina peleta A je za oko 20% veća u odnosu na gustinu peleta B, što će se pokazati kao značajan faktor prilikom analize karakteristika procesa sagorevanja razmatranih goriva pri različitim uslovima rada analizirane peći. Dakle, na osnovu prikupljenih podataka može se zaključiti da iako su peleti proizvedeni od iste sirovine (bukva), postoje značajne razlike u njihovom kvalitetu. Pelet A može se smatrati gorivom boljeg kvaliteta u odnosu na pelet B, jer se

odlikuje većom toplotnom moći, manjim sadržajem vlage i pepela, kao i manjom veličinom komada peleta i većom (komadnom) gustoćom i nasipnom gustoćom.

8.3.2 Analiza energetske i ekološke karakteristike rada razmatrane peći

U okviru analize rezultata eksperimentalnih ispitivanja izvršeno je poređenje izračunatih energetske i ekološke karakteristike rada peći (stepen korisnosti rada peći i emisija CO), prikazanih na Slikama 8-22 i 8-23, sa zahtevima koje za navedene parametre propisuje literatura [120]. Pored toga, analiza je obuhvatila i razmatranje uticaja promene vrste peleta na energetske i ekološke karakteristike rada peći, kao i uticaja koje na iste parametre imaju promena toplotnog kapaciteta gorionika i promena potpritiska u kanalu dimnog gasa.

Generalno gledano, stepen korisnosti peći kretao se u rasponu od 59,06 do 80,18%. Najviše vrednosti stepena korisnosti ostvarene su za radne režime u kojima je korišćen pelet A i to za režim PA-N-B8-D8, kada je stepen korisnosti iznosio 80,18% i za radni režim PA-N-B8-D12 kada je ostvarena efikasnost rada peći od 80,03%. Visok stepen korisnosti za režim PA-N-B8-D12 je i očekivan, imajući u vidu da je to režim koji je preporučen od strane proizvođača peći. Sa druge strane, snižavanje potpritiska u kanalu dimnog gasa na 8 ± 2 Pa rezultovalo je dodatnim povećanjem efikasnosti rada peći, što ukazuje na mogućnost da za ispitivanu peć niži potpritisk od onog koji je propisan standardom omogućava bolje iskorišćenje energije goriva. Kao što je pomenuto u Poglavlju 7, standard ostavlja mogućnost da proizvođač peći definiše potpritisk u kanalu dimnog gasa koji odstupa od propisane vrednosti, ukoliko to pogoduje boljim performansama rada uređaja za sagorevanje. Što se tiče peleta B, sagorevanje alternativnog goriva dovelo je do niže efikasnosti rada peći, pri čemu je maksimalno postignuta efikasnost iznosila 77,85%, dok je minimalni stepen korisnosti iznosio 59,06%, što predstavlja najnižu vrednost registrovanu tokom celokupnog eksperimentalnog ispitivanja. Ukoliko se uporede rezultati ostvareni za režime koje definiše standard tj. koji odgovaraju korišćenju gorionika toplotnog kapaciteta 8 kWt i pri potpritisku u kanalu dimnog gasa od 12 ± 2 Pa, a za dve analizirane vrste peleta (režimi PA-N-B8-D12 i PB-N-B8-D12), može se konstatovati da je korišćenje peleta B dovelo do smanjenja ostvarene toplotne snage peći za 1,13 kWt tj. do snižavanja

efikasnosti rada za 3,34%. U slučaju redukovanog toplotnog opterećenja, smanjenje ostvarene toplotne snage peći prouzrokovano sagorevanjem peleta B iznosilo je 0,63 kWt, pri čemu je efikasnost rada smanjena za dodatnih 1,72%. Navedeno upućuje na zaključak da kvalitet peleta ima veoma veliki uticaj na energetske performanse rada uređaja za sagorevanje.

U Tabeli 8-10 dat je sumarni prikaz ispunjenosti zahteva standarda za ispitivane režime rada peći na pelet. Zahtevi u pogledu energetske karakteristika tj. minimalnog stepena korisnosti peći koji definiše literatura [120] ispunjeni su za većinu radnih režima kada je korišćen pelet A tj. pelet koji je preporučen od strane proizvođača peći. Od osamnaest ispitivanih režima u kojima je sagorevan pelet A, samo u dva slučaja nije zadovoljen zahtev u pogledu minimalnog stepena korisnosti od 75% pri nominalnom tj. od 70% pri redukovanom toplotnom opterećenju peći. Nevedena dva režima odnose se na režime PA-R-B10-D8 i PA-R-B10-D16 tj. na režime rada pri redukovanom toplotnom opterećenju i korišćenju gorionika toplotnog kapaciteta 10 kWt. U prvom slučaju primenjen je potpritisk u kanalu dimnog gasa od 8 ± 2 Pa, dok je u drugom potpritisk održavan na 16 ± 2 Pa, tako da se oba slučaja odnose na nestandardne vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa. Ostvareni stepeni korisnosti od 64,16% tj. 60,85% za režim PA-R-B10-D8 tj. za PA-R-B10-D16 jedni su od najniže ostvarenih u celokupnom eksperimentalnom ispitivanju (jedino je za režim PB-R-B10-D8 ostvaren niži stepen korisnosti od svega 59,06%). Sa Slike 8-22 jasno su uočljiva pomenuta tri režima koji su se odlikovali niskim stepenom korisnosti rada analiziranog uređaja za sagorevanje.

Sa druge strane, pelet B pokazao je lošije karakteristike u odnosu na pelet A, tako da zahtev standarda u pogledu minimalnih energetske karakteristika nije ispunjen u pet od ukupno osamnaest ispitivanih režima. Pored istih režima rada za koje ni u slučaju peleta A nije ispunjen zahtev standarda (PB-R-B10-D8 i PB-R-B10-D16), korišćenje peleta B je i u dodatna tri režima bilo povezano sa nezadovoljavajućim energetskim performansama rada peći (režimi PB-N-B6-D16, PB-N-B10-D8 i PB-N-B10-D16). Primećuje se da su u pitanju opet režimi gde toplotni kapacitet gorionika odstupa od projektovane vrednosti i gde vrednost potpritiska u kanalu dimnog gasa odstupa od vrednosti definisane standardom.

Tabela 8-10 Pregled ispunjenosti zahteva EN 14785 za ispitivane režime rada peći

Oznaka radnog režima	Ispunjenost zahteva standarda		Oznaka radnog režima	Ispunjenost zahteva standarda	
	stepen korisnosti rada peći	emisija ugljen monoksida		stepen korisnosti rada peći	emisija ugljen monoksida
PA-N-B6-D8	DA	NE	PB-N-B6-D8	DA	NE
PA-N-B6-D12	DA	NE	PB-N-B6-D12	DA	NE
PA-N-B6-D16	DA	DA	PB-N-B6-D16	NE	NE
PA-N-B8-D8	DA	DA	PB-N-B8-D8	DA	DA
PA-N-B8-D12	DA	DA	PB-N-B8-D12	DA	NE
PA-N-B8-D16	DA	DA	PB-N-B8-D16	DA	DA
PA-N-B10-D8	DA	DA	PB-N-B10-D8	NE	NE
PA-N-B10-D12	DA	NE	PB-N-B10-D12	DA	NE
PA-N-B10-D16	DA	DA	PB-N-B10-D16	NE	NE
PA-R-B6-D8	DA	NE	PB-R-B6-D8	DA	NE
PA-R-B6-D12	DA	NE	PB-R-B6-D12	DA	NE
PA-R-B6-D16	DA	DA	PB-R-B6-D16	DA	NE
PA-R-B8-D8	DA	NE	PB-R-B8-D8	DA	NE
PA-R-B8-D12	DA	NE	PB-R-B8-D12	DA	NE
PA-R-B8-D16	DA	NE	PB-R-B8-D16	DA	NE
PA-R-B10-D8	NE	NE	PB-R-B10-D8	NE	NE
PA-R-B10-D12	DA	DA	PB-R-B10-D12	DA	DA
PA-R-B10-D16	NE	NE	PB-R-B10-D16	NE	NE

DA

ispunjava zahteve EN 14785

NE

ne ispunjava zahteve EN 14785

Što se tiče ispunjenosti zahteva standarda sa aspekta propisanih ekoloških karakteristika tj. emisija ugljen monoksida (CO), situacija je značajno lošija. Emisija CO nalazila se u rasponu od 135 mg/m³ do čak 2.127 mg/m³. Sagorevanje peleta A je u odnosu na korišćenje peleta B rezultiralo boljim performansama i sa ovog aspekta, jer su registrovane generalno niže emisije CO, kao što se može videti na Slici 8-23.

U slučaju peleta A, emisije su bile ispod maksimalno dozvoljenih u osam od osamnaest ispitivanih režima, dok su čak u deset slučajeva prekoračivale maksimalne

vrednosti emisija koje su definisane standardom (750 mg/m^3 za nominalno toplotno opterećenje i 500 mg/m^3 za redukovano toplotno opterećenje, svedeno na 13% O_2 u dimnom gasu). U okviru režima koji su pokazali zadovoljavajuće ekološke karakteristike nalaze se nominalni režimi kod kojih je korišćen gorionik toplotnog kapaciteta 8 kWt i to za sve tri vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa (PA-N-B8-D8, PA-N-B8-D12 i PA-N-B8-D16), jedan nominalni režim sa gorionikom toplotne snage 6 kWt (PA-N-B6-D16) i dva sa gorionikom toplotne snage 10 kWt (PA-N-B10-D8 i PA-N-B10-D16) i dva režima pri redukovanom toplotnom opterećenju peći (PA-R-B6-D16 i PA-R-B10-D16).

Korišćenje peleta B pokazalo je još dramatičnije odstupanje od zahteva standarda, tako da je samo u tri slučaja postignuta emisija koja je niža od maksimalno dozvoljene i to za slučaj nominalnog opterećenja pri režimima PB-N-B8-D8 i PB-N-B10-D12, kao i za redukovano opterećenje za režim PB-R-B10-D12. U svim drugim slučajevima emisija CO prekoračivala je maksimalnu vrednost propisanu standardom. Potrebno je naglasiti da zahtev standarda u pogledu ekoloških performansi rada ložnog uređaja nije ispunjen ni za projektovani toplotni kapacitet gorionika od 8 kWt i preporučeni potpritisak u kanalu dimnog gasa od $12 \pm 2 \text{ Pa}$.

Generalno gledano, režimi kod kojih je za pelet A registrovano odstupanje od zahteva standarda bili su uvek problematični i pri korišćenju peleta B, s tim što je pelet B imao i dodatne režime kod kojih su registrovana odstupanja, naročito sa aspekta prekoračenja dozvoljenih emisija CO. Od ukupno 36 ispitivanih radnih režima, ispunjenost standarda po oba kriterijuma, energetskom i ekološkom, zabeležena je u 11 slučajeva, od čega se 8 režima odnosi na korišćenje peleta A i svega 3 režima na sagorevanje peleta B. Režimi pri nominalnom toplotnom opterećenju, korišćenju gorionika kapaciteta 8 kWt i potpriticima u kanalu dimnog gasa od 8 ± 2 i $16 \pm 2 \text{ Pa}$, kao i režimi pri redukovanom toplotnom opterećenju, korišćenju gorionika snage 10 kWt i potpritisaku u kanalu dimnog gasa od $12 \pm 2 \text{ Pa}$ zadovoljavaju sve zahteve standarda, kako u slučaju korišćenja peleta A, tako i u slučaju sagorevanja peleta B (režimi PA-N-B8-D8, PA-N-B8-D16, PB-N-B8-D8 i PB-N-B8-D16 tj. režimi PA-R-B10-D12 i PB-R-B10-D12).

8.3.3 Analiza uticaja variranja radnih parametara na proces sagorevanja peleta u razmatranoj peći

U nastavku je sprovedena dodatna analiza u cilju kvantifikovanja uticaja koje promena vrste goriva, toplotne snage gorionika i potpritiska u kanalu dimnog gasa ima na karakteristike procesa sagorevanja i dalje na razmatrane energetske i ekološke performanse rada peći.

Na Slici 8-25 prikazane su energetske i ekološke karakteristike rada peći za režime sa potpritiskom u kanalu dimnog gasa od 12 ± 2 Pa i pri različitim kapacitetima gorionika (6, 8 i 10 kWt), kako za korišćenje peleta A, tako i za sagorevanje peleta B. Pomenuti režimi obuhvatili su ispitivanja pri nominalnom i redukovanom toplotnom opterećenju peći. U Prilogu VI, na Slikama VI-1 i VI-2, takođe su dati i uporedni dijagrami za režime ispitivane pri potpritisku u kanalu dimnog gasa od 8 ± 2 Pa i 16 ± 2 Pa, kao i za režime u kojima su korišćeni gorionici toplotnog kapaciteta 6 i 10 kWt. Iako podaci iz literature ukazuju da su istraživači sprovodili ispitivanja sa ciljem optimizacije konstrukcije gorionika za određenu konstrukciju peći na pelet [103], do sada nije razmatrana mogućnost izmene toplotnog kapaciteta gorionika i njen uticaj na performanse rada peći. Jednostavna izmena gorionika u nepromenjenoj konstrukciji peći omogućila bi da se peći približnih deklariranih snaga konstruktivno razlikuju jedino po kapacitetu korišćenog gorionika [123].

Na osnovu prikazanih dijagrama može se zaključiti da deklarirana snaga peći nije postignuta ni u jednom od ispitivanih režima. Deklarirana snaga peći definisana je na 8 kWt pri korišćenju gorionika toplotnog kapaciteta 8 kWt i sagorevanju peleta preporučenog kvaliteta tj. peleta A. Međutim, sprovedena merenja i analize su pokazale da realno ostvarena snaga pri prethodno definisanim uslovima iznosi 6,67 kWt, kao što se može videti sa Slike 8-25. U slučaju korišćenja alternativnog peleta tj. peleta B, toplotna snaga peći redukovana je za dodatnih 1,13 kWt tj. za 16,95%. Navedeno smanjenje toplotne snage predstavlja direktnu posledicu sagorevanja peleta B, kao peleta lošijeg kvaliteta, većeg opsega veličina i manje nasipne gustine. Nemogućnost dostizanja deklarirane snage čak ni za pelet preporučenog kvaliteta ukazuje na potrebu za daljim istraživanjima u cilju analize mogućnosti da se eventualno većom potrošnjom goriva ostvare deklarirani parametri rada peći. Navedeno bi se moglo postići

promenom predefinisanih brzina kretanja pužnog dozatora i učestalosti doziranja goriva u ložište, tako što bi se, na primer, u okviru radnog ciklusa pužnog dozatora, trajanje radnog perioda τ_1 , tokom kog se gorivo dovodi u gorionik, zadržalo nepromenjeno, ali bi se smanjio period mirovanja dozatora τ_2 . Pretpostavlja se da bi optimizacija odnosa vremena τ_1/τ_2 omogućila da veća količina goriva dolazi u ložište, ali bi takođe zahtevala dodatna ispitivanja u pogledu pratećih uticaja koje bi pomenuta intervencija u sistemu automatskog upravljanja ložnim uređajem imala na energetske i ekološke karakteristike njegovog rada.

Prikazani rezultati još jednom potvrđuju važnost korišćenja goriva čiji kvalitet odgovara kvalitetu preporučenom od strane proizvođača uređaja za sagorevanje. Pomenuti parametar direktno se odražava kako na energetske, tako i na ekološke karakteristike rada uređaja za sagorevanje, izdvajajući se kao jedan od najvažnijih uticajnih faktora na performanse rada uređaja male snage.

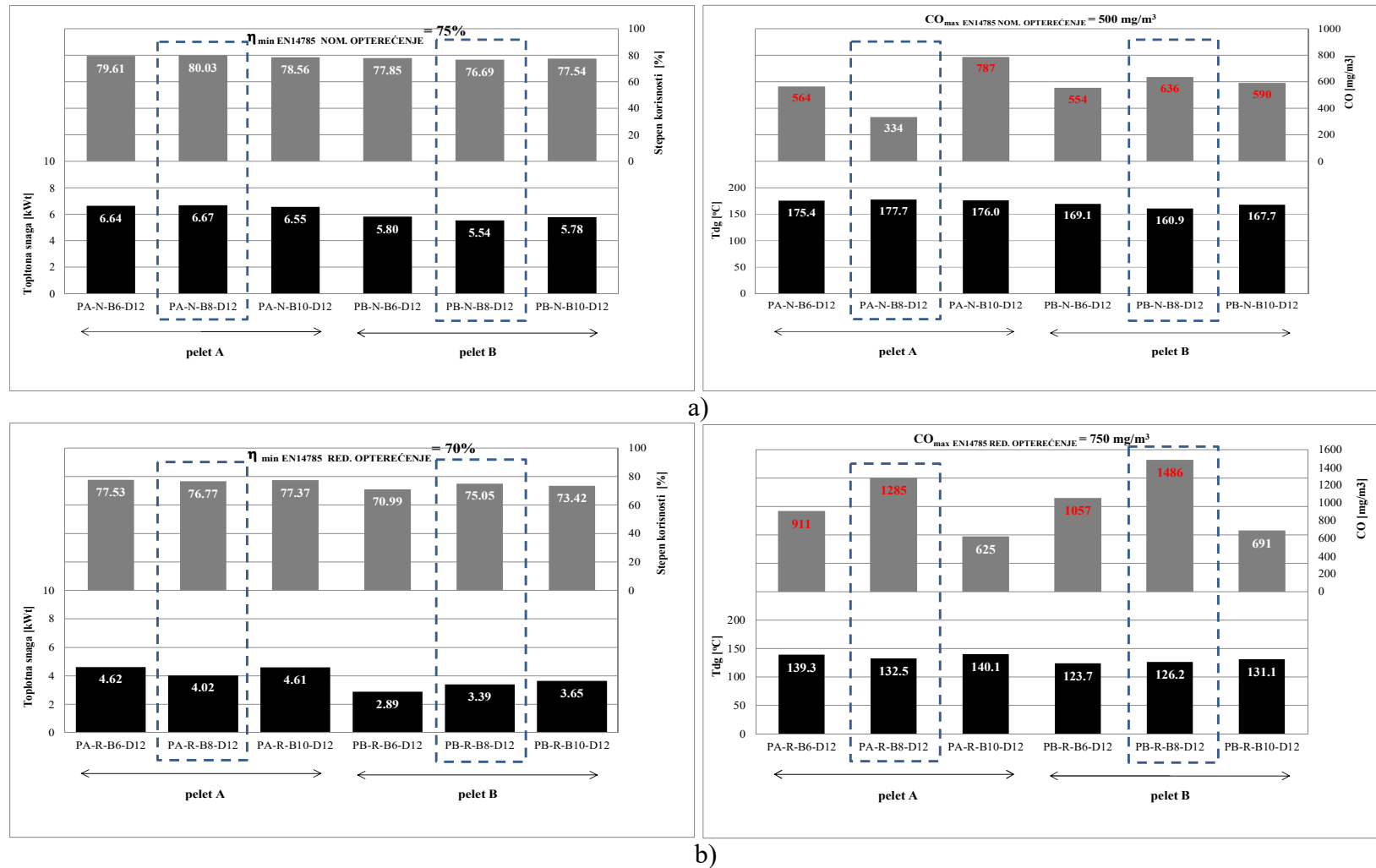
Pored nemogućnosti dostizanja deklarisanе snage peći, deklarisani stepen korisnosti od 83% takođe nije dostignut ni u jednom ispitivanom radnom režimu, čak ni kada je korišćeno preporučeno gorivo i preporučene konstrukcione karakteristike gorionika. U režimu PA-N-B8-D12, dakle za preporučeno gorivo i preporučeni kapacitet gorionika, ostvaren je stepen korisnosti od 80,03%, što je ujedno bio i drugi najviši stepen korisnosti postignut tokom celokupnog eksperimentalnog ispitivanja.

Takođe, podaci prikazani u Tabeli 8-2 upućuju na zaključak da je potrošnja goriva veća u slučaju korišćenja peleta A nego peleta B, uz prosečnu razliku od oko 14% pri nominalnom i 13% pri redukovanom toplotnom opterećenju. Kako su brzina kretanja pužnog dozatora i vremenski periodi ubacivanja goriva u ložište bili isti u svim ispitivanim nominalnim tj. redukovanim režimima, uočena razlika u potrošnji predstavlja posledicu razlike u (komadnoj) gustini i nasipnoj gustini korišćenih peleta. Pored toga, kako brzina ventilatora vazduha i dimnog gasa takođe nije menjana pri ispitivanim nominalnim tj. redukovanim režimima, uočene razlike u kvalitetu i karakteristikama peleta A i peleta B, koje su dovele do razlika u njihovom sagorevanju, identifikovane su kao uzrok povećanog koeficijenta viška vazduha za slučaj sagorevanja peleta B u odnosu na slučaj sagorevanja peleta A. Navedeno povećanje iznosilo je prosečno oko 25% pri nominalnim režimima tj. oko 9% pri redukovanim toplotnim opterećenjima. Navedene razlike uticale su na temperature dimnog gasa i tok odvijanja

procesa sagorevanja u ispitivanoj peći, tako da su vrednosti stepena korisnosti koje su postignute u slučaju korišćenja peleta A u proseku bile 4% više u odnosu na režime kada je sagorevan pelet B, kako pri nominalnim, tako i pri redukovanim režimima rada.

Ako se pogleda sadržaj nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja koji je prikazan u Tabeli 8-7, a koji takođe govori o kvalitetu procesa sagorevanja, može se konstatovati da je za redukovane režime rada registrovan manji sadržaj nesagorelog u odnosu na režime pri nominalnom toplotnom opterećenju. Prikazani rezultati su i očekivani imajući u vidu da je pri redukovanim režimima rada potrošnja goriva oko 35% manja u odnosu na nominalna opterećenja, kao i da su hemijske reakcije koje se odvijaju u ložištu uređaja za sagorevanje pri redukovanom opterećenju znatno sporije. Manja količina goriva koja u ložište dospe pri redukovanom toplotnom opterećenju omogućava da sagorevanje goriva za vreme trajanja perioda ispitivanja, a koje je isto i pri nominalnom režimu kada se u ložištu nađe 35% više goriva, bude potpunije. Navedeno je naročito uočljivo u slučaju peleta B, gde je sadržaj nesagorelog u pepelu pri redukovanom toplotnom opterećenju u proseku iznosio oko 63% sadržaja nesagorelog izmerenog u slučaju nominalnog opterećenja. U slučaju sagorevanja peleta A, sadržaj nesagorelog u pepelu pri redukovanom opterećenju u proseku je bio oko 20% manji nego pri nominalnom toplotnom opterećenju peći. Takođe, iz dobijenih rezultata uočava se da je sadržaj nesagorelog u pepelu veći u slučaju sagorevanja peleta A nego peleta B, što se objašnjava većom (komadnom) gustinom peleta A, koja dalje ukazuje na veću sabijenost i otežanu difuziju kiseonika pri sagorevanju pomenutog peleta. Kao krajnji rezultat, sadržaj nesagorelog u pepelu nastalom sagorevanjem peleta A bio je veći. Potrebno je napomenuti da su toplotni gubici koji nastaju kao rezultat prisustva nesagorelog u pepelu za sve ispitivane režime bili neuporedivo manji u odnosu na termičke gubitke usled visoke temperature izlaznog dimnog gasa i hemijske gubitke usled nepotpunosti sagorevanja, kao i da nisu prevazilazili 0,01% (pri čemu su termički gubici dostizali 23%, a hemijski gubici 0,5% ukupno generisane toplotne energije).

Sve navedeno ukazuje na zaključak da kvalitet goriva u velikoj meri utiče na karakteristike procesa sagorevanja i da pored hemijskog sastava i toplotne moći goriva, značajan faktor predstavljaju i fizičke karakteristike peleta, posebno njihova (komadna) gustina i nasipna gustina.



Slika 8-25 Uticaj promene toplotne snage gorionika na energetske i ekološke performanse rada peći pri:
 a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i potpritisku u kanalu dimnog gasa od 12±2 Pa

Dijagrami prikazani na Slici 8-25 upućuju na zaključak da toplotni kapacitet gorionika ne utiče u velikoj mjeri na ostvarene energetske i ekološke karakteristike rada peći na pelet. U slučaju peleta A, korišćenje gorionika od 6 kWt tj. 10 kWt pri nominalnom toplotnom opterećenju peći omogućilo je postizanje toplotne snage od 6,64 kWt tj. 6,55 kWt, što je veoma blisko snazi od 6,67 kWt koja je postignuta sa gorionikom od 8 kWt. Što se tiče emisija CO, jedino je za gorionik od 8 kWt ostvarena emisija koja je niža od maksimalno dozvoljene vrednosti od 500 mg/m^3 . Dakle, najbolje performanse rada peći (najveći stepen korisnosti i najmanja emisija CO) postignute su kada je sistem automatske regulacije rada peći, koji upravlja procesom sagorevanja u uređaju, radio u skladu sa fabričkim podešavanjima za sagorevanje preporučenog goriva i korišćenje gorionika čiji kapacitet odgovara deklarisanom snazi peći. Ostvareni rezultati ukazuju da samo zamena gorionika nije dovoljna da se proporcionalno poveća ili smanji deklarisanu snagu peći, već da su potrebne dodatne mere koje se odnose na novo podešavanje sistema automatskog upravljanja uređajem, koji mora biti iznova podešen za svaku promenu u konstrukciji peći. Šta više, iako izmena gorionika ne doprinosi promeni nazivne snage, ona negativno utiče na emisiju štetnih materija jer se zamenom gorionika utiče na promenu strujnog profila unutar ložišta i na drugačije uslove sagorevanja. Za razliku od preporučenog goriva, sagorevanje peleta B pri nominalnom toplotnom opterećenju omogućilo je ostvarivanje najveće efikasnosti od 77,85% za upotrebu gorionika kapaciteta 6 kWt, što se dovodi u vezu sa lošijim kvalitetom goriva i relativno malim koeficijentom viška vazduha u ložištu. Korišćenje alternativnog gorionika, koji se odlikuje izmenjenom geometrijom, utiče na drugačiju raspodelu vazduha za sagorevanje koja se dovodi u ložište peći, pa samim tim i na drugačije uslove odvijanja procesa sagorevanja. Gorionik manjeg kapaciteta ima manji broj otvora za dovod vazduha, tako da je brzina vazduha kroz pomenute otvore veća, pa je turbulencija u zoni sagorevanja takođe veća. Ipak, pri korišćenju peleta B, ekološki zahtevi u pogledu maksimalno dozvoljene emisije CO prekoračeni su za sva tri ispitivana gorionika.

Pri redukovanom toplotnom opterećenju peći, najbolje performanse za sagorevanje peleta A postignute su za gorionik kapaciteta 10 kWt, kada su ispunjeni zahtevi kako u pogledu stepena korisnosti rada peći, tako i u pogledu emisija CO. Viša temperatura dimnog gasa pogoduje nižim emisijama CO, što se jasno može videti sa

Slike 8-25. Sa druge strane, iako je za pomenuti gorionik od 10 kWt temperatura dimnog gasa najviša, stepen korisnosti ipak je viši nego za gorionik od 8 kWt. Za sagorevanje peleta B pri redukovanom toplotnom opterećenju, gorionik od 10 kWt takođe se pokazao kao najbolji izbor, omogućivši zadovoljenje kako energetske, tako i zahteva koji se odnose na maksimalno dozvoljene emisije CO.

Što se tiče uticaja toplotnog kapaciteta gorionika pri potpritisku od 8 ± 2 Pa, dijagrami prikazani na Slici VI-1 u Prilogu VI pokazuju da je maksimalni stepen korisnosti i zadovoljavajuća emisija CO ostvarena za gorionik od 8 kWt. Ostvareni stepen korisnosti od 80,18% je najviša postignuta efikasnost tokom celokupnih eksperimentalnih ispitivanja, ali je ipak niža od deklariranih 83%. Međutim, ostvarena toplotna snaga peći u ovom režimu iznosila je 6,87 kWt i bila je niža u odnosu na vrednosti ostvarene za gorionike od 6 i 10 kWt, što je posledica veće potrošnje goriva.

Korišćenje gorionika od 6 kWt nepovoljno se odražava na ekološke performanse rada peći, dok gorionik od 10 kWt povoljno deluje na pomenute karakteristike. Za slučaj peleta B, korišćenje gorionika od 8 kWt takođe je najbolje sa aspekta ostvarenih energetske i ekološke performansi rada, dok se gorionicima alternativnih toplotnih kapaciteta ne utiče značajno na promenu toplotne snage peći, ali se narušavaju njene ekološke performanse rada, što je i očekivano imajući u vidu ranije pomenutu konstataciju da je sistem automatskog upravljanja radom peći optimalno podešen za rad sa gorionikom od 8 kWt. Rezultati ostvareni za variranje kapaciteta gorionika pri potpritisku od 16 ± 2 Pa takođe potvrđuju preferencijalni izbor gorionika od 8 kWt, kako za pelet A, tako i za pelet B.

Sve navedeno ukazuje na zaključak da promena toplotnog kapaciteta gorionika nije dovoljna da se poveća/smanji deklarirana snaga peći i da je neophodno izvršiti odgovarajuće podešavanje sistema automatskog upravljanja za svaku konstruktivnu izmenu koja utiče na proces sagorevanja goriva u ložištu uređaja za sagorevanje. S tim u vezi, neophodno je izvršiti optimizaciju rada uređaja i sagledati zajednički uticaj promene konstruktivnih karakteristika i izmenjenih parametara automatske regulacije rada uređaja za sagorevanje peleta.

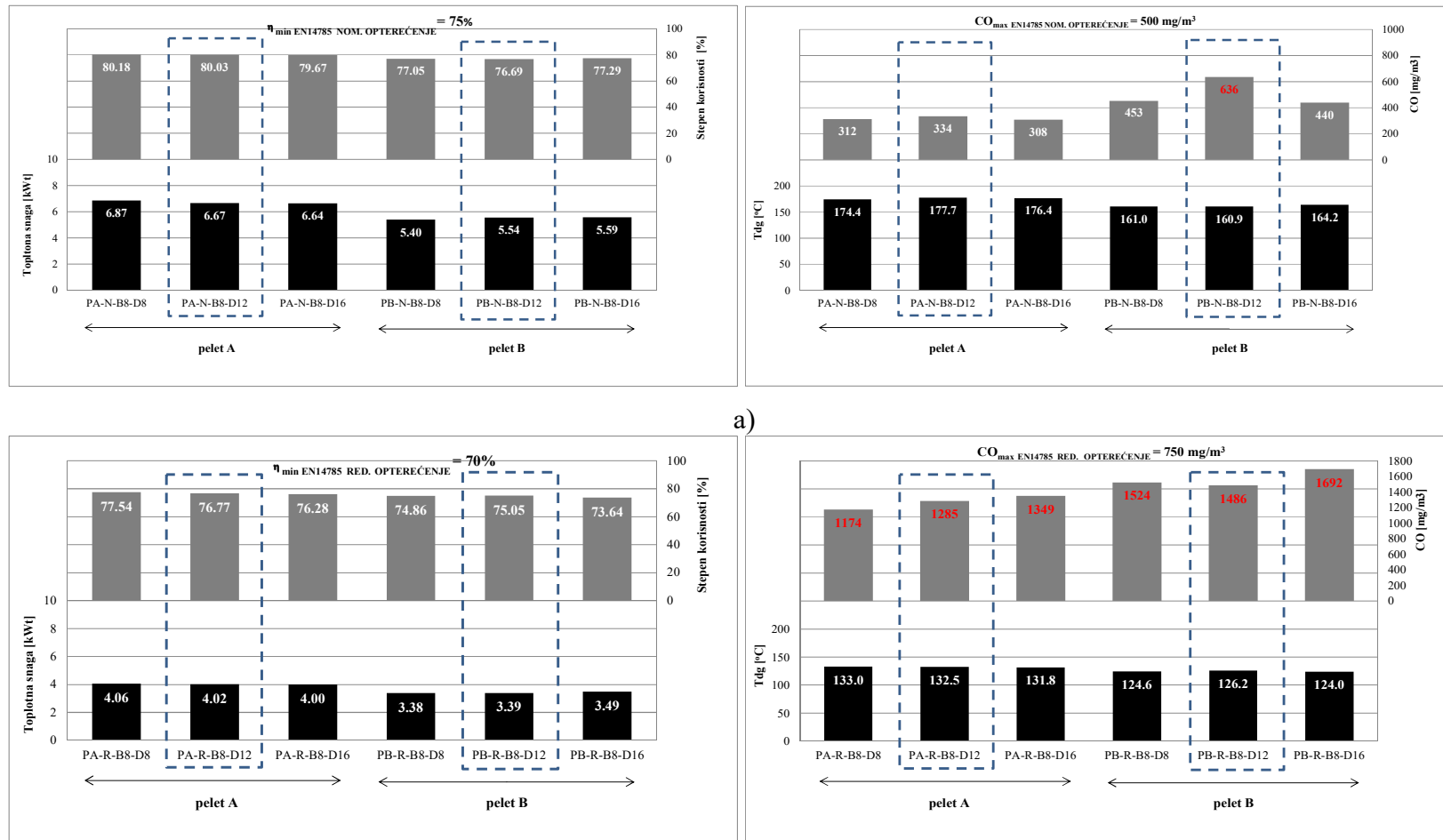
U cilju sagledavanja uticaja koje promena potpritiska u kanalu dimnog gasa ima na kvalitet procesa sagorevanja, na Slici 8-26 prikazane su energetske i ekološke karakteristike peći za režime rada sa gorionikom kapaciteta 8 kWt i pri različitim

vrednostima potpritiska u kanalu dimnog gasa (8 ± 2 , 12 ± 2 i 16 ± 2 Pa). Pomenuti režimi dati su za obe ispitivane vrste peleta, kao i za nominalno i redukovano toplotno opterećenje peći. U Prilogu VI, na Slikama VI-3 i VI-4, takođe su dati i uporedni dijagrami za režime sa radom gorionika toplotnog kapaciteta 6 kWt i 10 kWt, uz variranje vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa.

Sa Slike 8-26 uočljivo je da je za pelet A pri nominalnom toplotnom opterećenju uticaj promene potpritiska u kanalu dimnog gasa na karakteristike rada peći veoma mali. Za potpitisak od 8 ± 2 Pa stepen korisnosti je svega 0,15% viši u odnosu na standardnih 12 ± 2 Pa, što je posledica nešto niže temperature dimnog gasa i manjih toplotnih gubitaka koji se putem dimnog gasa emituju u atmosferu. Kao rezultat nižeg potpritiska u kanalu dimnog gasa, emisija CO je takođe neznatno niža. Sa druge strane, povećanje potpritiska na 16 ± 2 Pa dovelo je do snižavanja stepena korisnosti za zanemarljivih 0,63%, pri skoro nepromenjenoj temperaturi dimnog gasa (niža je za svega $1,3^{\circ}\text{C}$), dok je koncentracija CO u dimnom gasu smanjena sa 334 na 308 mg/m^3 . Slična situacija primećena je i pri redukovanom toplotnom opterećenju, gde je pri potpitisaku od 8 ± 2 Pa stepen korisnosti povećan za oko 0,8% u odnosu na vrednost registrovanu pri standardnih 12 ± 2 Pa, dok je za potpitisak od 16 ± 2 Pa efikasnost bila svega oko 0,5% niža nego za 12 ± 2 Pa. Dakle, uticaj promene potpritiska na stepen korisnosti peći je opet veoma mali (manji od 1%). Ipak, rezultati ukazuju da iako mali, uticaj smanjenja potpritiska u kanalu dimnog gasa ima pozitivan efekat na povećanje stepena korisnosti peći. Pri redukovanom toplotnom opterećenju snižavanje potpritiska na 8 ± 2 Pa povoljno deluje na smanjenje emisija CO, pri skoro nepromenjenoj temperaturi dimnog gasa. Povećanje potpritiska dovodi do dodatnog porasta emisija sa 1.285 mg/m^3 na 1.349 mg/m^3 , pa uz već registrovani niži stepen korisnosti pri posmatranom režimu, predstavlja najnepovoljniji režim za rad peći pri redukovanom opterećenju i sagorevanju peleta A. Navedeni rezultat potvrđuje polaznu hipotezu da se pri povećanju potpritiska u kanalu dimnog gasa peći može očekivati porast koncentracija CO u izlaznom dimnom gasu kao rezultat nepotpunosti procesa sagorevanja. Kako su koncentracije CO pri redukovanom toplotnom opterećenju generalno više, i to kao rezultat niže temperature u ložištu koja zahteva duže vreme za odvijanje reakcija procesa sagorevanja, pomenuti fenomen bolje je uočljiv pri redukovanim režimima rada prikazanim na Slici 8-26. Shodno svemu navedenom, može

se zaključiti da za sagorevanje peleta A u razmatranoj peći najbolji izbor predstavlja potpritisak od 8 ± 2 Pa, jer obezbeđuje najviši stepen korisnosti kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom režimu rada. Takođe, emisije CO pri nominalnom režimu i potpritisaku od 8 ± 2 Pa su u granicama dozvoljenih, dok su za redukovano opterećenje najniže, ali ipak iznad granične vrednosti definisane standardom. Za razliku od nominalnog opterećenja kada su emisije CO za sve tri vrednosti potpritiska bile niže od maksimalno propisane, režimi sa redukovanim toplotnim opterećenjem odlikovali su se emisijama CO koje su značajno prevazilazile maksimalnu dozvoljenu vrednost u sva tri razmatrana slučaja, što je lako uočljivo sa Slike 8-26.

U slučaju peleta B, uticaj potpritiska pokazao se kao nešto veći. Pri nominalnom toplotnom opterećenju, za potpritisak od 12 ± 2 Pa zabeležen je najniži stepen korisnosti u odnosu na alternativne režime pri potpritisaku od 8 ± 2 i 16 ± 2 Pa, u iznosu od 76,69%, kao i najveća emisija CO od 636 mg/m^3 , koja prevazilazi maksimalno dozvoljenu vrednost od 500 mg/m^3 definisanu za nominalno toplotno opterećenje [120]. Snižavanje potpritiska na 8 ± 2 Pa povoljno deluje na snižavanje emisija CO, uz neznatno smanjenje efikasnosti peći i nepromenjenu temperaturu dimnog gasa. Takođe, povećanje potpritiska omogućava veću promaju u ložištu, više kiseonika za sagorevanje nekvalitetnijeg goriva i u ovom konkretnom slučaju omogućava smanjenje emisije CO. I pored činjenice da u pomenuta dva slučaja smanjenja tj. povećanja potpritiska u kanalu dimnog gasa dolazi do povećanja temperature dimnog gasa, pa samim tim i većih termičkih toplotnih gubitaka iz ispitivanog ložnog uređaja, efikasnost peći je ipak veća pri 16 ± 2 Pa i 8 ± 2 Pa nego u slučaju potpritiska od 12 ± 2 Pa. Shodno tome, može se zaključiti da za istu peć koja radi pri nominalnom toplotnom opterećenju, ali sagoreva pelet B, najpovoljniji uticaj na energetske i ekološke karakteristike peći predstavlja potpritisak u kanalu dimnog gasa od 16 ± 2 Pa, mada su komparativne prednosti u odnosu na sniženi potpritisak od 8 ± 2 Pa veoma male. Međutim, pri redukovanom toplotnom opterećenju, najveća efikasnost i najmanja emisija CO zabeležena je za potpritisak od 12 ± 2 Pa. Ipak koncentracija CO u dimnom gasu je i za 12 ± 2 Pa skoro dva puta viša od dozvoljene, pa samim tim ni pomenuti režim ne ispunjava ekološke zahteve standarda. Kao što se i očekivalo, najveće koncentracije CO zabeležene su za potpritisak od 16 ± 2 Pa.



Slika 8-26 Uticaj promene potpritiska u kanalu dimnog gasa na energetske i ekološke performanse rada peći pri:
 a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i za korišćenje gorionika kapaciteta 8 kWt

Dijagrami prikazani u Prilogu VI, na Slici VI-3, pokazuju da pri korišćenju gorionika toplotne snage 6 kWt u slučaju sagorevanja peleta A, variranje potpritiska u kanalu dimnog gasa ima nešto drugačiji uticaj. Najveći stepen korisnosti ostvaren je za potpritisk od 12 ± 2 Pa, ali je emisija CO najmanja za potpritisk od 16 ± 2 Pa, kao i u slučaju gorionika kapaciteta 8 kWt. Veća promaja u ložištu u ovom slučaju povoljno deluje na smanjenje emisije CO usled drugačije raspodele vazduha za sagorevanje u ložištu koja je prouzrokovana izmenjenom geometrijom gorionika (prouzrokovanom, pre svega, drugačijim brojem otvora i ukupnom površinom otvora u gorioniku, Tabela 7-2). Identičan efekat povoljnog uticaja potpritiska od 16 ± 2 Pa i lošijeg uticaja potpritiska od 8 ± 2 Pa na bolje tj. lošije ekološke performanse peći primećen je i pri redukovanom toplotnom opterećenju. Generalno, u slučaju sagorevanja peleta A u gorioniku kapaciteta 6 kWt, potpritisk od 16 ± 2 Pa omogućava postizanje zadovoljavajućih energetskih i ekoloških performansi rada peći, kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju. Pri sagorevanju peleta B, promena potpritiska dovodi do znatno lošije situacije sa aspekta emisije CO, koja, sasvim suprotno od slučaja kada je korišćen gorionik kapaciteta 8 kWt, sada, pri kapacitetu gorionika od 6 kWt, značajno prevazilazi dozvoljene emisione norme. Najpovoljniji slučaj tj. najniže emisije zabeležene su za potpritisk od 12 ± 2 Pa, dok povećanje promaje na 16 ± 2 Pa dovodi do dramatičnog porasta koncentracija koje dostižu vrednost od 1.283 mg/m^3 , kao i do snižavanja stepena korisnosti peći za 3,7%. I dok potpritisk od 16 ± 2 Pa predstavlja najbolju opciju za sagorevanje peleta B u gorioniku toplotnog kapaciteta 8 kWt, navedeni potpritisk pokazao se kao najlošija opcija za gorionik kapaciteta 6 kWt. Pri redukovanom opterećenju, uticaj potpritiska na stepen korisnosti pokazao se kao mali, ali je zato njegov uticaj na emisiju CO izuzetno veliki, sa najnižim emisijama od 1.057 mg/m^3 registrovanim pri 12 ± 2 Pa i izuzetno visokim emisijama od 2.127 mg/m^3 izmerenim za potpritisk od 8 ± 2 Pa.

Konačno, sagorevanje peleta A u gorioniku snage 10 kWt, Slika VI-4 u Prilogu VI, u slučaju nominalnog toplotnog opterećenja dovodi do najboljih energetskih i ekoloških karakteristika rada peći kada se u ložištu održava potpritisk od 8 ± 2 Pa. Potpritisk od 16 ± 2 Pa takođe omogućava zadovoljenje zahteva u pogledu energetskih i ekoloških performansi rada, dok je pri standardnoj vrednosti od 12 ± 2 Pa emisija CO značajno veća i prevazilazi maksimalno dozvoljenu vrednost. Sasvim suprotno, pri

sagorevanju peleta B, potpritisak od 12 ± 2 Pa obezbeđuje najbolje performanse rada, kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju.

Sve navedeno ukazuje da se promenom potpritiska u kanalu dimnog gasa može u određenoj meri uticati na proces sagorevanja goriva u peći na pelet kako bi se poboljšale njene energetske i ekološke karakteristike rada. Takođe, uticaj potpritiska povezan je i sa kvalitetom korišćenog goriva, tako da očekivani efekti promene potpritiska u slučaju jedne vrste goriva ne moraju i najčešće nemaju identične efekte u slučaju sagorevanja alternativnog goriva.

9. MODELOVANJE I NUMERIČKA SIMULACIJA SAGOREVANJA PELETA U ISPITIVANOJ PEĆI NA PELET

9.1 Definisanje metodološke postavke numeričke simulacije

Pored eksperimentalnih istraživanja i analize dobijenih rezultata opisanih u Poglavljima 7 i 8, aktivnosti sprovedene u okviru ove disertacije obuhvatile su i izradu matematičkog modela i numeričku simulaciju procesa sagorevanja peleta u razmatranoj peći na pelet. Numerička simulacija razmatrane problematike obuhvatila je tri ključna koraka:

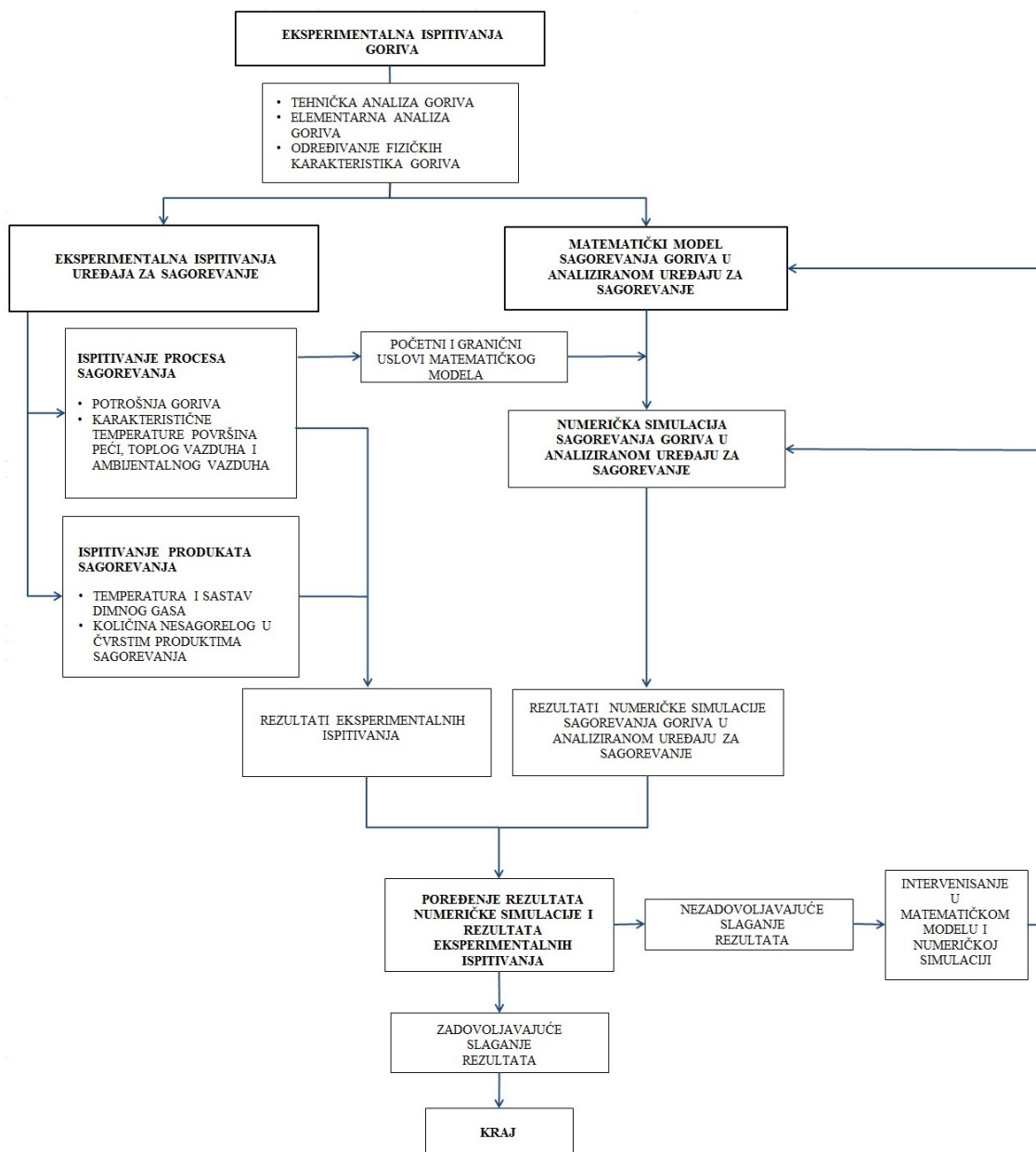
- definisanje metodoloških osnova razmatranog fenomena,
- definisanje matematičke postavke modela tj. opisivanje procesa koji se odvijaju u okviru razmatranog fenomena pomoću matematičkih jednačina,
- numeričku simulaciju razmatranog fenomena korišćenjem komercijalno raspoloživog softverskog paketa.

Prvi od navedenih koraka podrazumeva usvajanje metodologije koja će biti primenjena za analizu i razmatranje ispitivanog fenomena, uz definisanje polaznih pretpostavki po pitanju fizičko-hemijskih karakteristika procesa koji se odvijaju tokom sagorevanja peleta u peći poznatih geometrijskih karakteristika. Usvojene pretpostavke predstavljaju pojednostavljena realnog problema koja omogućavaju da matematičke jednačine kojima će procesi biti opisani budu numerički rešene. Nakon usvajanja polaznih pretpostavki, definisane su osnovne transportne i ostale jednačine kojima su opisani ključni procesi koji se odvijaju tokom sagorevanja peleta. Pored toga, identifikovani su polazni i granični uslovi koji će omogućiti da parcijalne diferencijalne jednačine matematičkog modela budu numerički rešavane. Na kraju, za usvojeni matematički model sproveden je postupak numeričke simulacije u okviru koga je korišćen komercijalni softverski paket Ansys Fluent 15.0 (FLUENT) koji predstavlja najčešće korišćen softverski alat za modelovanje procesa sagorevanja [124].

Na Slici 9-1 prikazana je usvojena metodologija za razvoj matematičkog modela i numeričku simulaciju razmatranog procesa sagorevanja peleta. Kao što se može videti sa Slike 9-1, primenjena metodologija zasniva se na kombinovanom korišćenju rezultata eksperimentalnih ispitivanja, usvajanju polaznih pretpostavki sa aspekta matematičke postavke modela i definisanja jednačina samog matematičkog modela sagorevanja peleta. Kao što je ranije pomenuto, parcijalne diferencijalne jednačine kojima je opisan

fenomen sagorevanja peleta obuhvataju, između ostalog, osnovne transportne jednačine (jednačine održanja mase, momenta količine kretanja, energije i hemijskih komponenata), kao i jednačine kojima se definišu neophodni podmodeli kako bi se u razvijenom modelu u obzir uzela i kinematika procesa, turbulentnost strujanja, prenos toplote zračenjem i svi ostali procesi koji utiču na tok odvijanja sagorevanja goriva u ložištu. Definisane graničnih uslova kojima se omogućava rešavanje matematičke postavke modela podrazumeva dodeljivanje konkretnih vrednosti karakterističnim parametarima procesa sagorevanja u graničnim zonama usvojenog domena numeričkog modela. Definisane ovih uslova, koji imaju veliki uticaj na rešavanje matematičke postavke modela, vrši se na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja. Pored toga, rezultati eksperimentalnih ispitivanja, koji obuhvataju rezultate ispitivanja karakteristika korišćenog goriva i karakteristika rada ispitivanog uređaja za sagorevanje (karakteristika procesa sagorevanja unutar ložišta, kao i analiza gasovitih i čvrstih produkata sagorevanja), takođe obezbeđuju i definisanje ulaznih parametara matematičkog modela (potrošnja goriva, protok vazduha za sagorevanje). U cilju provere validnosti razvijenog modela, rezultati dobijeni numeričkom simulacijom za izabrane parametre procesa sagorevanja upoređeni su sa odgovarajućim rezultatima eksperimentalnih merenja kako bi se doneo zaključak o adekvatnosti primene modela za simulaciju sagorevanja peleta u analiziranom uređaju za sagorevanje. Iterativni postupak definisanja adekvatnog modela podrazumeva intervenisanje u modelu sve do postizanja zadovoljavajućeg slaganja numeričkih rezultata sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja.

U okviru usvojene metodologije sagledavanja analiziranog fenomena usvojene su i odgovarajuće polazne pretpostavke u cilju pojednostavljenja inače kompleksnog procesa sagorevanja peleta i omogućavanja njegove simulacije. Prva od njih odnosi se na pretpostavku da proces sagorevanja goriva u ložištu peći obuhvata sledeće faze: a) zagrevanje tj. sušenje goriva, b) proces devolatilizacije i sagorevanje izdvojenih volatila, c) sagorevanje koksnog ostatka i 4) hlađenje pepela nastalog sagorevanjem koksnog ostatka. Navedeno razmatranje je u skladu sa sličnim sagledavanjima koja su korišćena pri modelovanju sagorevanja biomase, a koja se mogu naći u literaturi [108].



Slika 9-1 Metodologija razvijenog matematičkog modela

Dodatne pretpostavke i pojednostavljenja analizirane problematike odnose se na sledeće:

- matematički model je trodimenzionalan i stacionaran,
- front plamena je nepokretan u odnosu na geometriju ložišta,
- dovod goriva u ložište simuliran je dovodom komada čvrstog ugljeničnog goriva koji se kao disperzna faza uvodi u domen matematičkog modela (“*discrete phase*” model u okviru programskog paketa FLUENT);
- u skladu sa prethodno navedenom pretpostavkom, pri definisanju modela korišćen je Ojler-Lagranžov pristup, u okviru koga se gasovita faza tretira kao kontinualna i definiše osnovnim transportnim jednačinama održanja mase, energije, momenta količine kretanja i hemijskih komponenata, dok komad goriva predstavlja disperznu fazu koja je modelovana posebno, i sa gasovitom fazom povezana preko jednačina razmene mase, toplote i momenta količine kretanja u koje su uvedeni tzv. “izvorni” članovi kao doprinos disperzne faze transportnim jednačinama gasovite faze,
- komad goriva je sferičnog oblika, sa ekvivalentnim prečnikom definisanim na osnovu eksperimentalne karakterizacije goriva i podataka o prečniku i dužini korišćenih peleta,
- komad goriva sferičnog oblika koje se dovodi u gorionik ima uniformnu gustinu po celoj zapremini,
- granulacija goriva uzeta je u obzir preko Rosin-Rammler-ove raspodele prečnika goriva za grupu čestica koje čine simulirani komad čvrstog goriva, a koje se dovode u gorionik čiji je položaj definisan na osnovu poznate geometrije ložišta,
- međusobne interakcije čestice goriva unutar grupe koja se dovodi u gorionik su zanemarene, tako da je u obzir uzeta samo interakcija čestica goriva (disperzne faze) sa gasovitom (kontinualnom) fazom u ložištu,
- otpori sferičnog komada goriva prenošenju toplote i mase zamenařljivo su mali usled malog ekvivalentnog prečnika i malog Biotovog broja (Bi),
- usled malog Biotovog broja, provođenje toplote unutar sferičnog komada goriva se zanemaruje, čime se usvaja da komad goriva ima uniformne termičke karakteristike po celoj zapremini, što odgovara i osnovnoj postavci “*discrete phase*” podmodela u okviru programskog paketa FLUENT koji prepostavlja da čestice disperzne faze nemaju unutrašnjih termičkih otpora,

- sagorevanje komada goriva sagledava se kroz sledeće sukcesivne faze: zagrevanje i sušenje goriva, izdvajanje i sagorevanje volatila (devolatilizacija), sagorevanje koksnog ostatka i hlađenje nastalog pepela; pri tome, kako korišćeni peleti imaju oko 83% udela volatila, uloga faze devolatilizacije se smatra dominantnom,
- po ulasku u ložište, tj. nakon dovoda u gorionik sa gornje strane (u koje dospeva slobodnim padom), komad goriva trenutno dostiže temperaturu u ložištu, čime se faza zagrevanja i sušenja goriva praktično zanemaruje,
- temperatura devolatilizacije usvojena je da iznosi 400-500 K [110, 122], što znači da se po dolasku u ložište, u kome je temperatura znatno iznad 400 K, izdvajanje volatila dešava trenutno,
- usvojen je koncept masenih protoka za dovod goriva i vazduha u zonu sagorevanja,
- maseni protok goriva (disperzne faze) definisan je preko eksperimentalno utvrđene potrošnje goriva za svaki ispitivani režim rada peći,
- maseni protok vazduha definisan je na osnovu koeficijenta viška vazduha izračunatog na osnovu eksperimentalno utvrđene koncentracije O₂ u izlaznom dimnom gasu,
- ugljovodonici nastali devolatilizacijom (volatili) svake od dve korišćene vrste peleta predstavljeni su fiktivnom hemijskom formulom C_xH_yO_zN_w, gde su indeksi x, y, z i w u slučaju sagorevanja svake vrste peleta određeni na osnovu masenog bilansa hemijskih komponenata i eksperimentalne karakterizacije goriva [108, 125, 126],
- sagorevanje volatila predstavljeno je dvostepenim mehanizmom koji je opisan homogenim reakcijama sagorevanja, u okviru kojih se u prvom stepenu formiraju CO, H₂O i N₂, dok u drugom stepenu CO oksidiše u CO₂,
- usvojen je model konačne brzine hemijskih reakcija u okviru koga kinetika procesa definiše brzinu nastajanja hemijskih komponenata (*“finite-rate”* model u okviru programskog paketa FLUENT),
- brzina odvijanja hemijskih reakcija u turbulentnoj struji gasova modelovana je na osnovu kombinovanog modela konačne brzine hemijskih reakcija i modela rasipanja turbulentnih fluktuacija (*“finite-rate/eddy-disipation”* model u okviru programskog paketa FLUENT),

- sagorevanje koksnog ostatka počinje nakon završetka procesa devolatilizacije, gde se u heterogenim reakcijama sagorevanja oslobađaju gasoviti produkti koji podležu procesu oksidacije, dok se dimenzije čestica goriva u čvrstoj komponenti smanjuju i kao krajnji produkt procesa nastaje pepeo.

9.2 Definisanje matematičkog modela

9.2.1 Definisanje osnovnih transportnih jednačina

Matematički model definisan za razmatranu problematiku sagorevanja peleta od drvene biomase polazi od osnovnih transportnih jednačina kojima je opisan fizički proces sagorevanja peleta, a koje obuhvataju:

- jednačinu održanja mase,
- jednačinu održanja momenta količine kretanja,
- jednačinu održanja energije i
- jednačinu održanja hemijskih komponenata.

Uz usvojene polazne pretpostavke i definisane granične uslove sagorevanja peleta u poznatoj geometriji peći, rešavanje iznad navedenih parcijalnih diferencijalnih jednačina omogućeno je kroz softverski paket FLUENT.

Jednačina održanja mase (jednačina kontinuiteta) u opštem obliku može se prikazati na sledeći način:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = S_m \quad (9.1)$$

gde je ρ gustina gasne mešavine, \vec{u} vektor srednje brzine strujanja mešavine i S_m izvor mase unutar geometrije (domena) modela. Član S_m predstavlja masu koja se dodaje kontinualnoj (gasovitoj) fazi na račun razlaganja disperzne faze (čvrstog goriva).

Shodno usvojenoj polaznoj pretpostavci o stacionarnosti modela, član $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ jednak je nuli, pa jednačina (9.1) dobija sledeći oblik:

$$\nabla(\rho\vec{u}) = S_m \quad (9.2)$$

Jednačina održanja momenta količine kretanja definiše se preko *Navier-Stokes*-ove jednačine koja se može napisati na sledeći način:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{u}) + \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (9.3)$$

gde p predstavlja statički pritisak gasovite faze, $\bar{\tau}$ je tenzor viskoznih napona gasovite faze, a $\rho\vec{g}$ i \vec{F} su sile gravitacije i eksterna zapreminska sila koja deluje na struju fluida.

Ukoliko se shodno polaznoj pretpostavci o stacionarnosti modela usvoji da je član $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ jednak nuli, kao i da se dejstvo sile gravitacije i eksterne sile koja deluje na struju fluida mogu zanemariti, jednačina (9.3) može se prikazati u sledećem pojednostavljenom obliku kojim se zapreminska inercija posmatranog strujanja povezuje sa divergencijom brzine tj. odgovarajućom promenom napona (usled promene statičkog pritiska i viskoznih karakteristika strujanja):

$$\nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) \quad (9.4)$$

Tenzor viskoznih (turbulentnih) napona $\bar{\tau}$ je definisan na osnovu sledeće jednačine:

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla\vec{u} + \nabla\vec{u}^T)] \quad (9.5)$$

gde je μ efektivna viskoznost smeše gasova koja obuhvata molekularnu viskoznost koja zavisi od temperature i turbulentnu viskoznost koja predstavlja funkciju usvojenog modela turbulencije. Usvojen je standardni k - ε model turbulencije koji predstavlja polu-empirijski model zasnovan na transportnim jednačinama definisanim za turbulentnu kinetičku energiju k i stepen rasipanja turbulentnih fluktuacija ε . Na taj način, turbulentna viskoznost definisana je na sledeći način:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (9.6)$$

gde je C_μ konstanta koja iznosi 0,09, utvrđena na osnovu eksperimentalnih ispitivanja [116].

Jednačina održanja energije za razmatrani slučaj neadijabatskog modela sagorevanja i bez pred-mešanja goriva i vazduha za sagorevanje, može se prikazati na sledeći način:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho \vec{u} H) = \nabla \left(\frac{\lambda_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (9.7)$$

gde H predstavlja ukupnu entalpiju smeše gasovitih hemijskih komponenta, λ_t je koeficijent toplotne provodljivosti, c_p je specifični toplotni kapacitet pri konstantnom pritisku, a S_h predstavlja enegiju hemijskih reakcija.

Prvi član na desnoj strani jednačine predstavlja transport entalpije usled difuzije, čiji se uticaj procenjuje na osnovu Luis-ovog broja koji je definisan izrazom:

$$\text{Le} = \frac{a}{D} = \frac{\lambda}{\rho c_p D_m} \quad (9.8)$$

gde je a termička difuzivnost, D molekularna difuzivnost, λ toplotna provodnost, dok je D_m srednji koeficijent difuzije smeše gasova.

Ukoliko se pretpostavi da je Luis-ov broj, kao odnos termičke i molekularne difuzivnosti, jednak 1, tada član $\nabla \left(\frac{\lambda_t}{c_p} \nabla H \right)$ u jednačini (9.7) predstavlja doprinos prenosu toplote usled kondukcije i difuzije hemijskih komponenta, dok član S_h predstavlja doprinos prenosu toplote usled turbulentnosti strujanja i pretvaranja kinetičke energije turbulentog strujanja u toplotnu energiju.

Takođe, u skladu sa polaznom pretpostavkom o stacionarnosti modela, član $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ je jednak nuli, tako da se jednačina (9.7) može napisati u obliku:

$$\nabla(\rho \vec{u} H) = \nabla \left(\frac{\lambda_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (9.9)$$

Ukupna entalpija sistema, H definisana je kao zbir individualnih entalpija hemijskih komponenta:

$$H = \sum_j Y_j H_j \quad (9.10)$$

gde je Y_j maseni udeo hemijske komponente j u smeši gasova, dok je H_j entalpija hemijske komponente j u smeši gasova, koja je definisana na sledeći način:

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T C_{p,j} dT + h_j^0(T_{ref,j}) \quad (9.11)$$

gde je $h_j^0(T_{ref,j})$ entalpija formiranja hemijske komponente j na referentnoj temperaturi $T_{ref,j}$.

Jednačina održanja hemijskih komponentata u opštem obliku može se napisati na sledeći način:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (9.12)$$

gde je Y_i maseni udeo hemijske komponente i , član \vec{J}_i predstavlja uticaj molekularne difuzije komponente i u turbulentnim uslovima strujanja, R_i je brzina formiranja hemijske komponente i kao rezultat hemijske reakcije kontinualne faze, dok je S_i brzina formiranja komponente i kao rezultat procesa u disperznoj fazi.

Uticaj molekularne difuzije komponente i kojim se definiše prenos mase u turbulentnim uslovima strujanja definisan je na sledeći način:

$$\nabla \vec{J}_i = -(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{ct}}) \nabla Y_i + D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (9.13)$$

gde je S_{ct} turbulentni Šmit-ov broj definisan kao:

$$S_{ct} = \frac{\mu_t}{\rho D_t} \quad (9.14)$$

u okviru čega su μ_t i D_t turbulentna viskoznost i difuzivnost. Početna vrednost Šmit-og broja podešena je na 0,7, što je tipična vrednost koja se uzima pri simulaciji razmatranih procesa [116].

9.2.2 Definisane osnovnih podmodela disperzne faze

Kao što je pomenuto u Poglavlju 6, procesi koji se odvijaju u čvrstoj tj. disperznoj fazi po pravilu se tokom izrade modela definišu kroz posebne podmodele koji se zatim integrišu u model procesa koji se odvijaju u gasovitoj tj. kontinualnoj fazi. Shodno tome, u modelu razvijenom tokom izrade ove disertacije, sagorevanje goriva (disperzne faze) opisano je preko podmodela osnovnih procesa kroz koje komad goriva prolazi tokom procesa sagorevanja: 1) zagrevanje i sušenje, 2) devolatilizacija, 3) sagorevanje koksnog ostatka i 4) hlađenje/zagrevanje nastalog pepela.

Proces zagrevanja i sušenja komada goriva, kao inicijalni proces sagorevanja, odvija se na temperaturama od početne temperature goriva (ambijentalna temperatura) do dostizanja temperature na kojoj počinje proces izdvajanja gorivih isparljivih materija tj. temperature devolatilizacije. S obzirom na usvojenu pretpostavku da komad goriva predstavlja sferično telo malog prečnika i malih unutrašnjih otpora, koje se gravitaciono dovodi u ložište u kom gotovo trenutno dostiže temperaturu koja vlada u ložištu i s obzirom, takođe, da je tokom eksperimentalnih ispitivanja utvrđeno da je temperatura u ložištu znatno viša od usvojene temperature devolatilizacije, kao i da korišćeno gorivo ima mali sadržaj vlage, početna faza zagrevanja i sušenja goriva je tokom izrade podmodela disperzne faze zanemarena. Samim tim, smatrano je da sagorevanje disperzne faze počinje devolatilizacijom.

Proces devolatilizacije modelovan je jednostepenim kinetičkim modelom, koji predstavlja jedan od četiri modela devolatilizacije koje se mogu definisati u korišćenom softverskom paketu FLUENT [116]. Usvojeni model pretpostavlja da je brzina devolatilizacije direktno zavisna od količine volatila preostalih u komadu goriva:

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})]m_{p,0} \quad (9.15)$$

gde m_p predstavlja trenutnu masu komada goriva, k je konstanta brzine hemijske reakcije, $f_{v,0}$ je maseni udeo volatila u komadu goriva u početnom trenutku (trenutku početka devolatilizacije), $f_{w,0}$ je maseni udeo vlage u komadu goriva u početnom trenutku i $m_{p,0}$ je masa komada goriva u početnom trenutku devolatilizacije.

Konstanta brzine hemijske reakcije, k , određuje se na osnovu Arenijusove jednačine koja daje zavisnost konstante brzine hemijske reakcije od temperature i energije aktivacije:

$$k = A_1 e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (9.16)$$

gde A_1 predstavlja predeksponencijalni faktor, T je temperatura, R je univerzalna gasna konstanta, dok je E energija aktivacije. U okviru jednačine (9.16) vrednosti predeksponencijalnog faktora i energije aktivacije usvojene su na osnovu podataka iz literature i eksperimentalnih ispitivanja [114, 116, 122].

Prenos toplote tokom procesa devolatilizacije obuhvata uticaj konvekcije, zračenja i toplote koja se utroši za odvijanje procesa devolatilizacije, a u skladu sa sledećim izrazom:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (9.17)$$

gde prvi član desne strane jednačine predstavlja konvektivni član, sa α kao koeficijentom prenosa toplote (izračunat na osnovu izraza iz literature [116]), A_p kao površinom komada goriva, T_∞ kao lokalnom temperaturom gasovite faze i T_p kao temperaturom komada goriva. Drugi član jednačine (9.17) označava energiju utrošenu za devolatilizaciju, pri čemu h_{fg} predstavlja latentnu toplotu volatila. Poslednji član desne strane jednačine predstavlja energiju koja se razmeni zračenjem, u okviru koje je A_p površina komada goriva, $\varepsilon_p=0,9$ emisivnost površine komada goriva, $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ Stefan-Boltzmanova konstanta i θ_R karakteristična temperatura gasova koji emituju toplotu zračenjem. U okviru softverskog paketa FLUENT, uticaj razmene toplote zračenjem modelovan je preko P1 modela zračenja.

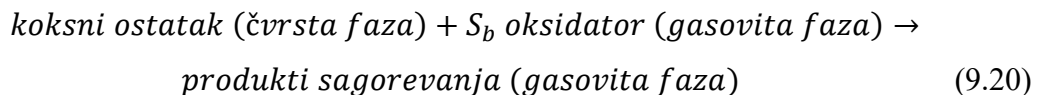
Usvojeni model devolatilizacije ostaje na snazi sve dok je masa komada goriva koji sagoreva veća od mase koksnog ostatka. Nakon završetka izdvajanja volatila, započinje proces površinskog sagorevanja preostalog koksnog ostatka, što matematički definisano znači da sagorevanje koksnog ostatka počinje u trenutku kada je ispunjen sledeći uslov:

$$m_p < (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (9.18)$$

Tada počinje reakcija heterogenog sagorevanja sagorivog dela koksnog ostatka f_c koja se odvija sve do ispunjenja sledećeg uslova:

$$m_p > (1 - f_{v,0} - f_c)(1 - f_{w,0})m_{p,0} \quad (9.19)$$

Heterogeno sagorevanje koksnog ostatka opisano je sledećom opštom jednačinom:



gde je S_b stehiometrijski koeficijent koji definiše odnos mase oksidatora prema masi koksnog ostatka.

Brzina odvijanja navedenog procesa definisana je prema modelu u kom je pomenuti parametar određen difuzijom gasovitog oksidatora kroz površinu čvrstog sferičnog komada goriva:

$$\frac{dm_p}{dt} = -4\pi d_p D_{i,m} \frac{Y_{oks} T_\infty \rho}{S_b (T_p + T_\infty)} \quad (9.21)$$

gde je d_p ekvivalentni prečnik komada goriva izražen preko dimenzija cilindričnog peleta kao $d_p = D_{cil} \left(\frac{3L_{cil}}{2D_{cil}}\right)^{1/3}$, $D_{i,m}$ je koeficijent difuzije oksidatora, Y_{oks} je lokalni maseni udeo oksidatora u gasovitoj fazi, T_∞ je lokalna temperatura gasovite faze, T_p je temperatura koksnog ostatka.

Nakon što sagorljivi deo koksnog ostatka sagori, ostatak komada goriva predstavlja čvrsti produkt procesa sagorevanja tj. pepeo. Hlađenje/zagrevanje pepela odvija se u

skladu sa zakonom hlađenja/zagreivanja inertnog materijala koji je integrisan u softverski paket FLUENT.

U skladu sa prethodno datim jednačinama, opisano heterogeno sagorevanje koksnog ostatka zahteva utrošak određene količine gasovitog oksidatora, čime pomenuti proces predstavlja tzv. ponor u transportnoj jednačini održanja hemijskih komponenata. Na sličan način, heterogene reakcije sagorevanja koksnog ostatka predstavljaju i izvor gasovitih hemijskih komponenata koje nastaju sagorevanjem čvrstog komada goriva preostalog nakon devolatilizacije. Tokom pomenute heterogene reakcije takođe se troši ili emituje određena količina energije, u skladu sa sledećom jednačinom energetskog bilansa komada goriva koje sagoreva:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha A_p (T_\infty - T_p) - f_h \frac{dm_p}{dt} H_{reakc} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (9.22)$$

gde drugi član desne strane jednačine označava energiju oslobođenu tokom heterogenog procesa sagorevanja koksnog ostatka koju ponovo apsorbuje preostali komad čvrstog goriva; pri tome H_{reakc} predstavlja energiju oslobođenu sagorevanjem koksnog ostatka, dok je f_h koeficijent koji definiše udeo oslobođene energije koju ponovo apsorbuje komad goriva. Na osnovu podataka iz literature usvojeno je da je $f_h = 0,2$ [128].

9.2.3 Definisavanje kinetike procesa sagorevanja

Procesi sagorevanja izdvojenih volatila (homogene reakcije sagorevanja) i čvrstog koksnog ostatka (heterogene reakcije sagorevanja) odvijaju se određenom brzinom u skladu sa kinetičkim parametrima procesa sagorevanja. Kinetika procesa sagorevanja definiše brzinu formiranja hemijskih komponenti R_i , koja se pojavljuje u jednačini održanja hemijskih komponenata (9.12), na koju takođe utiče i režim strujanja kontinualne faze. Uobičajeni pristup koji se primenjuje pri modelovanju sagorevanja kontinualne faze odnosi se na usvajanje pretpostavke da su procesi sagorevanja sagorivih gasova intenzivni (brzi) neposredno unutar i oko zone plamena, gde su temperature veoma visoke i gde glavni uticaj ima turbulencija strujanja i mešanje goriva i struje vazduha. Sa druge strane, u blizini zidova ložišta, gde je temperatura niža, procesi sagorevanja odvijaju se sporije, pa kinetički parametri moraju biti uzeti u obzir.

Navedeni problem rešava se usvajanjem kombinovanog modela konačne brzine hemijskih reakcija i modela disipacije tj. rasipanja turbulentnih fluktuacija (tzv. *finite rate-eddy disipation* model u softverskom paketu FLUENT). U navedenom pristupu, brzina formiranja hemijske komponente određuje se na osnovu brzine hemijskih reakcija u kojoj razmatrana komponenta učestvuje. Pomenuta brzina usvaja se kao manja od sledeće dve vrednosti: vrednosti brzine određene na osnovu modela konačne brzine hemijskih reakcija (*finite rate*) i vrednosti brzine ustanovljene na osnovu modela disipacije tj. rasipanja turbulentnih fluktuacija (*eddy disipation*).

$$R_i = \min(R_{i,r1}, R_{i,r2}) \quad (9.23)$$

Navedeno upoređenje vrši se za svaku ćeliju definisanog domena kako bi se odredio dominantni uticaj na brzinu hemijske reakcije. Kao što je pomenuto, u praksi se najčešće javlja slučaj da je uticaj kinetike procesa dominantan u početnim fazama paljenja goriva, kao i u zonama ložišta u kojima je turbulencija manje razvijena (npr. uz zidove ložišta).

Brzina hemijske reakcije definisana po modelu konačne brzine hemijskih reakcija predstavlja slučaj kada se uticaj turbulentnih fluktuacija zanemaruje, pa je brzina hemijske reakcije definisana na osnovu Arenijusovog izraza, gde je ukupna brzina stvaranja hemijske komponente i data kao zbir brzina N_R broja reakcija u kojima komponenta i učestvuje:

$$R_i = M_i \sum_{r=1}^{N_R} \dot{R}_{i,r} \quad (9.24)$$

gde je M_i molarna masa hemijske komponente i , dok je $R_{i,r}$ molarna brzina formiranja komponente i u reakciji r .

Za nepovratne reakcije, molarna brzina formiranja komponente i u reakciji r definisana je na sledeći način:

$$\dot{R}_{i,r} = (v_{i,r}'' - v_{i,r}') (k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{\eta_{j,r}' + \eta_{j,r}''}) \quad (9.25)$$

gde su $\nu_{i,r}''$ i $\nu_{i,r}'$ stehiometrijski koeficijenti za komponentu i u reakciji r , $k_{f,r}$ je konstanta brzine hemijske reakcije, $C_{j,r}$ je molarna koncentracija komponente j u reakciji r , $\eta_{j,r}'$ i $\eta_{j,r}''$ su eksponenti brzine hemijske komponente j u hemijskoj reakciji r .

Konstanta brzine hemijske reakcije u jednačini (9.25) definisana je opštim oblikom Arenijusove jednačine:

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-(E_r/RT)} \quad (9.26)$$

gde je A_r predeksponencijalni faktor, β_r temperaturni eksponent koji se usvaja da je jednak nuli uz pretpostavku da vrednost predeksponencijalnog faktora ne zavisi od temperature, E_r je energija aktivacije i R je univerzalna gasna konstanta.

Model disipacije tj. razgradnje turbulentnih fluktuacija pretpostavlja da se procesi sagorevanja goriva dešavaju brzo i da su definisani turbulentnim mešanjem goriva i vazduha, tako da se kinetika procesa može zanemariti. U tom slučaju brzina hemijske reakcije tj. brzina formiranja komponente i u hemijskoj reakciji r definisana je manjom od dve veličine koje su opisane jednačinama (9.27) i (9.28):

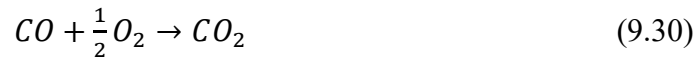
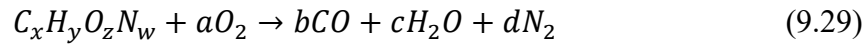
$$R_{i,r} = \nu_{i,r}' M_i A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{M_R \nu_{R,r}'} \right) \quad (9.27)$$

$$R_{i,r} = \nu_{i,r}' M_i A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N \nu_{j,r}'' M_j} \quad (9.28)$$

gde su A i B empirijske konstante koje iznose 4,0 tj. 0,5, Y_R je maseni udeo reaktanta R , dok je Y_P maseni udeo proizvoda reakcija P .

U skladu sa usvojenim polaznim pretpostavkama modela, kinetika sagorevanja tj. oksidacije volatila u struji vazduha (homogeno sagorevanje) u razmatranom slučaju predstavljena je dvostepenim mehanizmom sagorevanja u okviru koga se u prvom stepenu reakcije formiraju CO, H₂O i N₂, dok u drugom stepenu CO oksidiše u CO₂. Volatili su predstavljeni fiktivnom hemijskom formulom C_xH_yO_zN_w, gde su indeksi x , y , z i w u slučaju svake vrste peleta određeni na osnovu masenog bilansa hemijskih

komponentata i eksperimentalne karakterizacije goriva. Reakcije sagorevanja volatila predstavljene su na sledeći način:

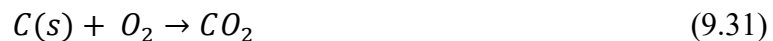


Vrednosti koeficijenata x , y , z i w u okviru hemijske formule volatila, kao i koeficijenti a , b , c i d u jednačinama sagorevanja, za svaku od dve vrste korišćenih peleta prikazani su u Tabeli 9-1. Takođe, usled malog sadržaja vlage korišćenog goriva, katalitički uticaj vodene pare je zanemaren.

Tabela 9-1 Stehiometrijski koeficijenti u jednačinama sagorevanja volatila

Vrsta peleta	Fiktivna hemijska formula volatila $C_xH_yO_zN_w$	Stehiometrijski koeficijenti u jednačinama sagorevanja volatila			
		a	b	c	d
Pelet A	$C_{0,99}H_{2,5}O_{0,96}N_{0,0033}$	0,63	0,99	1,25	0,0016
Pelet B	$C_{1,07}H_{2,48}O_{0,91}N_{0,0027}$	0,70	1,07	1,24	0,0013

Sagorevanje koksnog ostatka (heterogeno sagorevanje) u skladu sa opštom jednačinom (9.20) definisano je uz pretpostavku da kokсни ostatak čini samo ugljenik u čvrstom stanju [128] (tzv. *carbon solid* u programskom paketu FLUENT) koji oksidiše u skladu sa sledećom jednačinom:



Brzine navedenih hemijskih reakcija su, kao što je ranije rečeno, definisane u skladu sa Arenijusovim izrazom za određivanje konstante brzine hemijske reakcije tj. u skladu sa sledećim jednačinama:

$$R_{C_xH_yO_zN_w} = A_1 e^{\left(-\frac{E_{a,1}}{RT}\right)} [C_xH_yO_zN_w]^{0,2} [O_2]^{1,3} \quad (9.32)$$

$$R_{CO} = A_2 e^{\left(-\frac{E_{a,2}}{RT}\right)} [CO][O_2]^{0,25} \quad (9.33)$$

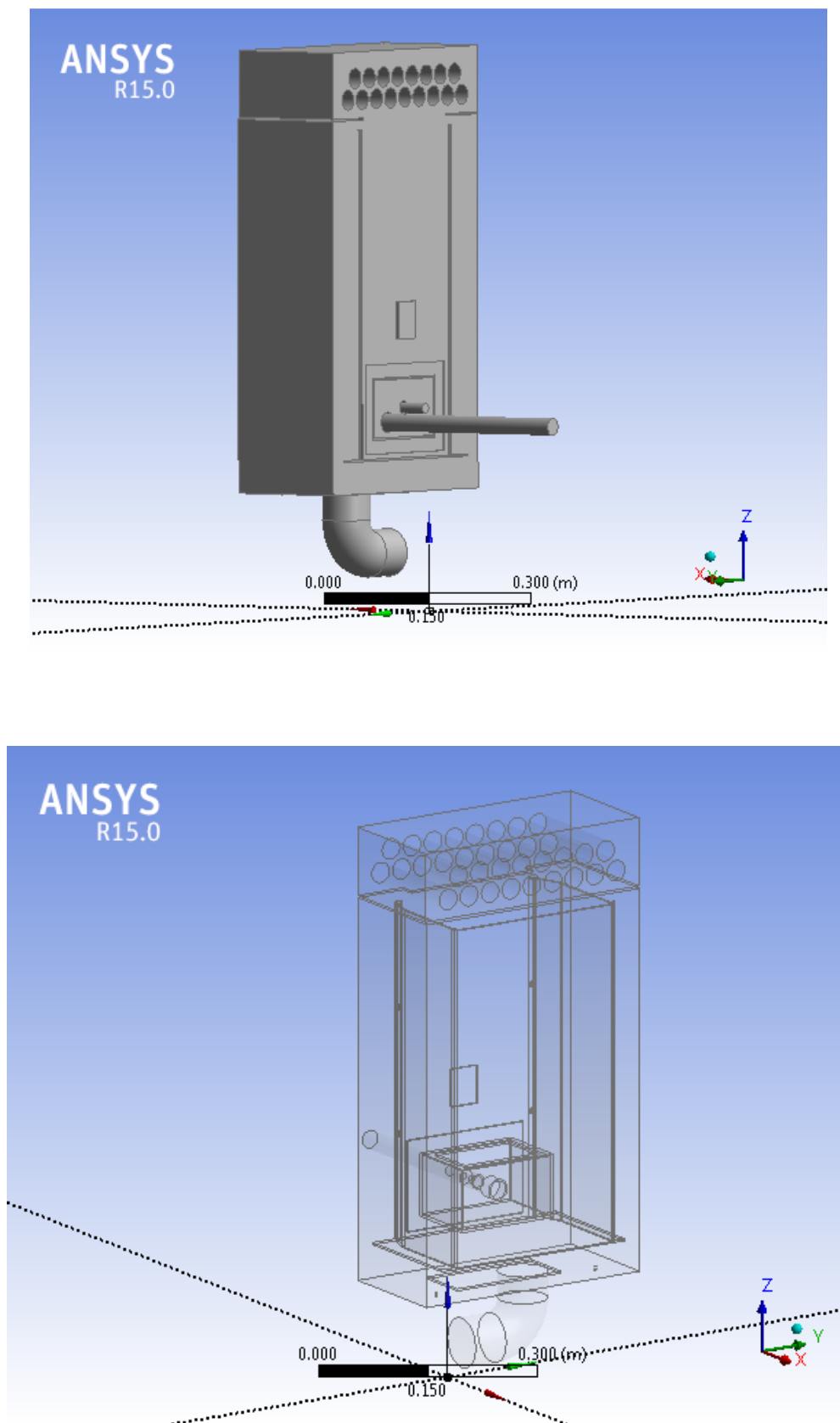
$$R_C = A_3 e^{\left(-\frac{E_{a,3}}{RT}\right)} [O_2] \quad (9.34)$$

Kao što je već ranije pomenuto, u jednačinama (9.32-9.34) vrednosti predeksponencijalnih faktora A_1 , A_2 i A_3 , kao i energije aktivacije $E_{a,1}$, $E_{a,2}$ i $E_{a,3}$ definisani su u skladu sa podacima iz literature [114, 116, 122].

9.3 Definisanje domena i graničnih uslova za sprovođenje numeričke simulacije

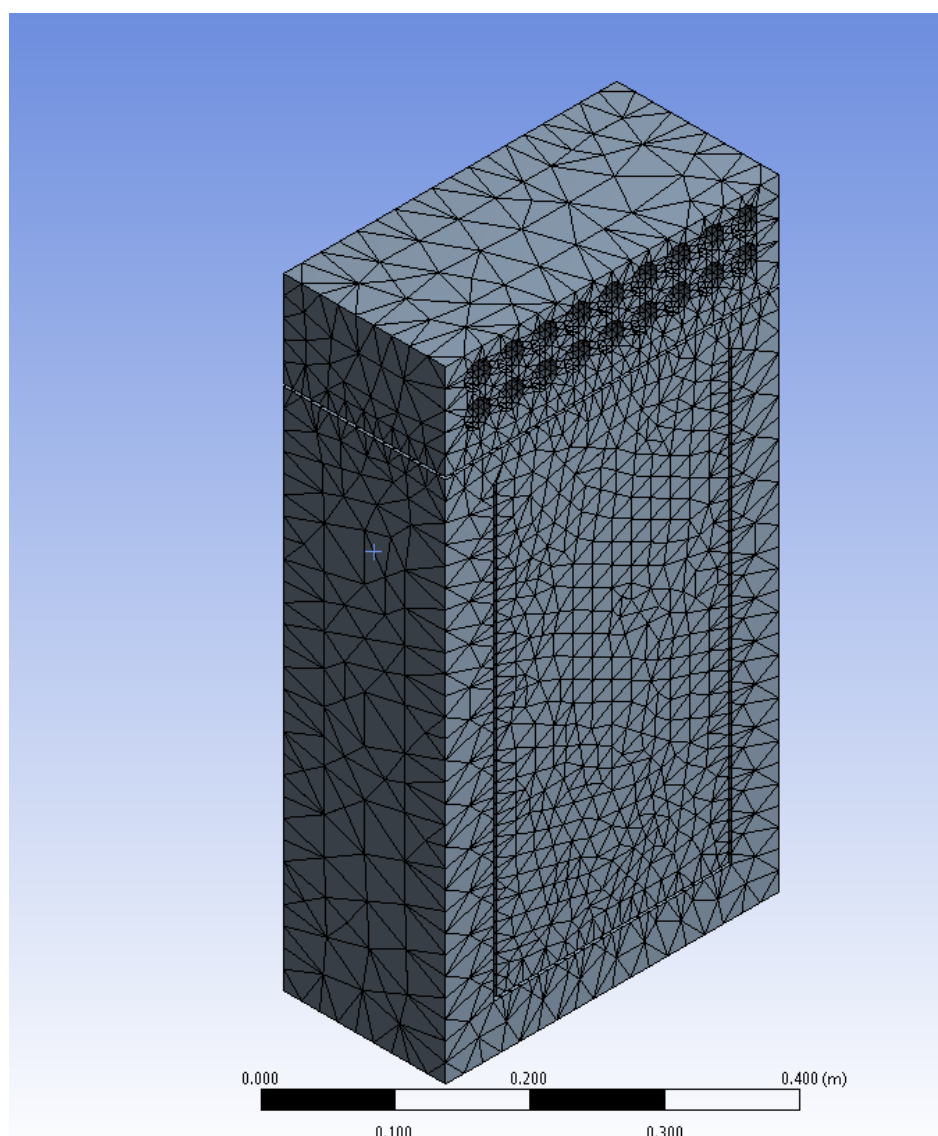
Usvojeni matematički model sagorevanja peleta i rešavanje diferencijalnih jednačina na kojima je model zasnovan, zahtevaju definisanje numeričkog domena na kom će matematička postavka modela biti numerički rešavana. Shodno tome, za domen modela usvojena je geometrija ispitivane peći za sagorevanje peleta tj. geometrija ložišta u kom se odvija proces sagorevanja goriva. Geometrija analizirane peći modelovana je u softverskom pod-programu Ansys Design Modeler 15.0, koji predstavlja integralni deo softverskog paketa FLUENT. Na Slici 9-2 prikazan je rezultat navedenog procesa tj. modelovana geometrija ispitivane peći za sagorevanje peleta.

Za modelovanu geometriju ložišta definisane su granične površine kojima je definisan prostor numeričke mreže unutar koje je rešavana matematička postavka modela. Granične površine kojima je definisan domen modela obuhvatile su zidove peći (prednji, zadnji i dva bočna zida), izmenjivač toplote (sa gornje strane ložišta), otvor za dovod vazduha, kao i otvor za odvod dimnog gasa. Na taj način, domen modela obuhvatio je ložište ispitivane peći u kom se proces sagorevanja odvija. Na Slici 9-3 prikazana je usvojena numerička mreža unutar domena modela.



Slika 9-2 Modelovana geometrija ispitivane peći na pelet

Za postavku i rešavanje modela korišćen je model konačnih zapremina, tako da je domen modela podeljen na konačan broj kontrolnih zapremina u čijem centru se nalaze čvorovi numeričke mreže. Čvor tako zauzima centralno mesto konačne zapremine za koju su definisane matematičke jednačine modela. Usvojeni domen numeričkog modela obuhvatio je 67.201 konačnih zapremina za koje su u FLUENT-u numerički rešavane jednačine modela po principu “od čvora do čvora”. Na taj način omogućeno je definisanje konkretne vrednosti svakog od razmatranih parametara (npr. temperature, brzine strujanja ili koncentracije određene gasne komponente) u svakom od čvorova mreže i dobijanje raspodele tj. polja konkretnog parametra u okviru geometrije usvojenog domena.



Slika 9-3 Usvojena numerička mreža unutar domena modela

Kako bi se omogućilo rešavanje parcijalnih diferencijalnih jednačina definisanog matematičkog modela bilo je neophodno definisati i granične uslove tj. vrednosti pojedinih parametara na graničnim površinama usvojenog domena i ulaznim i izlaznim presecima domena. Pomenuti postupak sproveden je na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja, gde su izmerene vrednosti temperatura zidova peći, prikazane na Slikama 8-15 i 8-16, poslužile za definisanje temperatura čvrstih zidova kojima je domen ograničen. Ovako definisani uslovi omogućili su određivanje temperaturnog polja unutar usvojenog domena. Pored toga, izmerene temperature toplog vazduha koji napušta izmenjivač toplote, omogućile su definisanje graničnog uslova za određivanje toplotnog fluksa i ostvarene toplotne snage peći.

Takođe, vrednosti protoka vazduha za sagorevanje, koje su određene na osnovu eksperimentalnih podataka i prikazane na Slici 8-14, omogućile su definisanje graničnih uslova za usvojenu graničnu površinu dovoda vazduha za sagorevanje. Za potrebe definisanja procesa sagorevanja i koncentracionog polja unutar usvojenog domena, vazduh je modelovan kao mešavina koja se sastoji od 79% mol N_2 i 21% mol O_2 . Vrednosti potrošnje goriva, određene eksperimentalno i prikazane u Tabeli 8-2, uz definisanu eksperimentalnu karakterizaciju goriva, iskorišćene su za definisanje ulaznih parametara i dobijanje koncentracionih polja pojedinih hemijskih komponenata unutar domena modela.

Sprezanje polja pritiska i brzine izvedeno je korišćenjem SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations) algoritma kojim se sprovodi diskretizacija jednačina održanja mase i momenta količine kretanja [129].

Rezultati numeričke simulacije procesa sagorevanja u FLUENT-u obuhvatili su vrednosti karakteristika procesa sagorevanja u graničnoj površini domena koja se odnosi na izlaz dimnog gasa iz usvojenog domena, kao i sagledavanje temperaturnih, strujnih i koncentracionih profila unutar ložišta peći. Numerički dobijene vrednosti temperatura u ložištu, koncentracija O_2 u dimnom gasu, kao i energetske i ekološke karakteristike rada analizirane peći (ostvarena toplotna snaga, stepen korisnosti i koncentracija ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu) upoređene su sa eksperimentalnim rezultatima u cilju sagledavanja adekvatnosti predloženog modela za simulaciju sagorevanja peleta u analiziranoj peći. Numerički postupak rešavanja definisanog modela podrazumevao je iterativni postupak do dobijanja zadovoljavajuće konvergencije rešenja, tako da je

numeričko rešavanje jednačina sprovedeno do ispunjavanja uslova da razlika između dva uzastopna rešenja ne bude veća od 10^{-4} tj. 10^{-5} za jednačinu održanja energije. Navedena tačnost za razmatrane režime značila je sprovođenje u proseku od 280-500 iteracija. Smanjivanje razlike između dva uzastopna rešenja povećala bi tačnost rešenja, ali bi zahtevala sprovođenje većeg broja iteracija i samim tim duže vreme potrebno za vršenje svake simulacije. S obzirom da je upoređivanjem numeričkih i eksperimentalnih rezultata postignuta prihvatljiva tačnost, smatrano je da usvojen postupak daje prihvatljiva rešenja analiziranog problema.

**10. REZULTATI MODELOVANJA I NUMERIČKE SIMULACIJE
PROCESA SAGOREVANJA PELETA**

10.1 Sagledavanje rezultata modelovanja i numeričke simulacije

Usvojeni matematički model i parametri numeričke simulacije sagorevanja peleta u ispitivanoj peći na pelet, koji su opisani u Poglavlju 9, omogućili su modelovanje i dobijanje najvažnijih karakteristika procesa sagorevanja u analiziranom ložnom uređaju za režime rada koji su bili predmet eksperimentalnih ispitivanja. U cilju upoređivanja rezultata modelovanja sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja analizirane su vrednosti koncentracija kiseonika u izlaznom dimnom gasu, temperature u ložištu peći, kao i energetska i ekološka pokazatelja rada peći: ostvarena toplotna snaga, stepen korisnosti rada peći i koncentracija ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu. Temperatura dimnog gasa određena putem eksperimentalnih ispitivanja i numeričkom simulacijom nije mogla biti direktno poređena usled specifičnosti konstrukcije analizirane peći. Naime, kod ispitivanog ložnog uređaja izmenjivač toplote nalazi se neposredno iznad ložišta, tako da dimni gasovi napuštajući ložište peći dospevaju u izmenjivač gde deo svoje toplote predaju vazduhu za zagrevanje prostorije. Dimni gasovi zatim, menjajući smer strujanja i nastavljajući da struje u smeru na dole, prolaze kroz poseban strujni kanal koji okružuje ložište peći, dospevajući konačno u dimni kanal u donjoj zoni peći kojim se odvode dalje u atmosferu. Kao posledica navedene konstrukcije, direktno poređenje temperature dimnog gasa dobijene tokom eksperimentalnog ispitivanja, u okviru koga je temperatura dimnog gasa merena na odgovarajućim mernim mestima u izlaznom kanalu dimnog gasa, i temperature dobijene modelovanjem, u okviru koga je temperatura izlaznog dimnog gasa određena na izlasku iz usvojenog domena matematičkog modela tj. ložišta peći, nije bilo moguće. Iz pomenutog razloga temperatura dimnog gasa nije uključena u grupu parametara za koje je sprovedena validacija razvijenog modela.

Pored dobijanja vrednosti ranije navedenih izlaznih parametara, rezultati numeričke simulacije omogućili su i sagledavanje temperaturskog, strujnog i koncentracionih polja O_2 , CO_2 i CO unutar ložišta razmatrane peći, na taj način ukazujući na karakteristične pojave koje se odvijaju tokom procesa sagorevanja, pa samim tim i na moguća konstruktivna unapređenja u cilju poboljšanja uslova sagorevanja goriva.

S obzirom na veliki broj eksperimentalnih ispitivanja, u nastavku disertacije prikazani su samo rezultati numeričke simulacije za radne režime koji odgovaraju konstrukciji peći predloženoj od strane proizvođača peći, tj. za konstrukciju koja se odlikuje gorionikom toplotnog kapaciteta 8 kWt. Na taj način, za pomenutu konstrukciju peći numeričkom simulacijom obrađeno je ukupno 12 radnih režima u kojima je varirana vrsta korišćenog goriva, toplotno opterećenje peći i potpritisak u kanalu dimnog gasa³.

U nastavku poglavlja je, kao ilustracija, prikazano temperatursko, strujno i koncentraciona polja dobijena numeričkom simulacijom radnih režima PA-N-B8-D12 i PB-N-B8-D12, za koje su u okviru Poglavlja 7 takođe dati i detaljni rezultati eksperimentalnih ispitivanja. Poređenje srednjih vrednosti izlaznih parametara, koji su poslužili za validaciju razvijenog matematičkog modela, dato je za sve numerički simulirane režime rada peći.

Hemijske reakcije procesa sagorevanja opisane usvojenim matematičkim modelom i definisane jednačinama (9.29), (9.30) i (9.31) obuhvataju utvrđivanje kinetičkih parametara kojima su određeni intenziteti tj. brzine navedenih reakcija. Pri tome, proces dogorevanja ugljen monoksida opisan jednačinom (9.30) predstavlja posebno važnu reakciju sa aspekta potpunosti sagorevanja u ložištu razmatranog uređaja za sagorevanje, kao i ekoloških karakteristika njegovog rada. Iz tog razloga, posebna pažnja posvećena je definisanju kinetičkih parametara, tačnije predeksponencijalnog faktora koji određuje intenzitet sudara molekula reagujuće materije, u jednačini dogorevanja ugljen monoksida u ugljen dioksid. Kinetika procesa definisana je ranije pomenutom Arenijusovim jednačinom (9.26), u kom poseban značaj ima predeksponencijalni faktor koji određuje intenzitet sudara molekula reagujuće materije. U literaturi se takođe navodi da predeksponencijalni faktor A predstavlja konstantu koja se može odrediti numerički ili eksperimentalno. Takođe, kao što je pomenuto u matematičkoj postavci modela datoj u Poglavlju 9, smatra se da se procesi sagorevanja odvijaju u uskom temperaturnom opsegu pri eksperimentalnim ispitivanjima, pa je zato usvajeno da predeksponencijalni faktor ne zavisi direktno od temperature. Kinetički

³ Režimi PA-N-B8-D8, PA-N-B8-D12, PA-N-B8-D16, PA-R-B8-D8, PA-R-B8-D12, PA-R-B8-D16, kao i PB-N-B8-D8, PB-N-B8-D12, PB-N-B8-D16, PB-R-B8-D8, PB-R-B8-D12, PB-R-B8-D16.

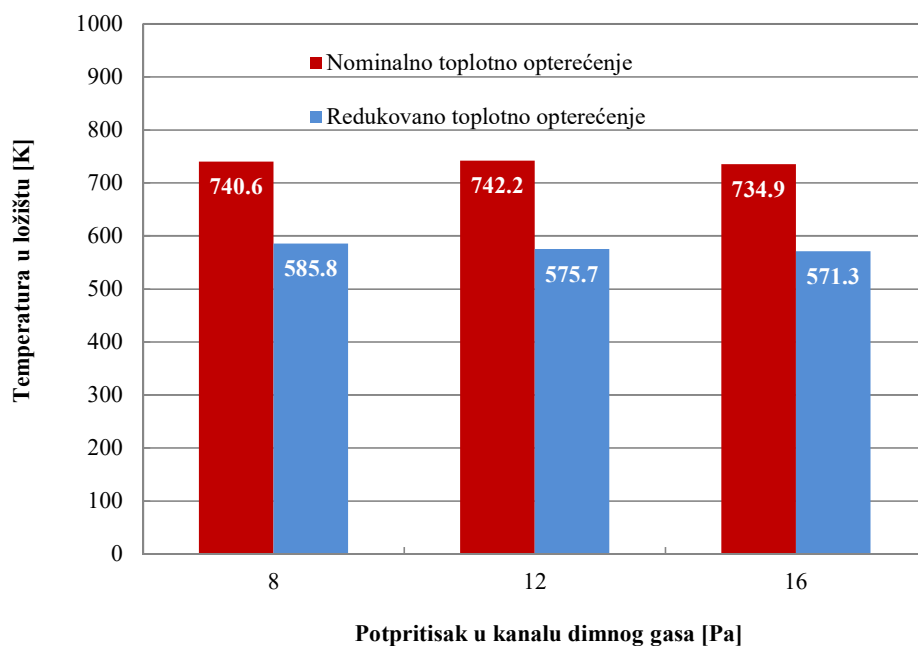
parametri modela usvojeni su na osnovu podataka iz literature i eksperimentalnih ispitivanja [109, 114, 122, 128, 130, 131, 132].

10.2 Prikaz rezultata modelovanja i numeričke simulacije

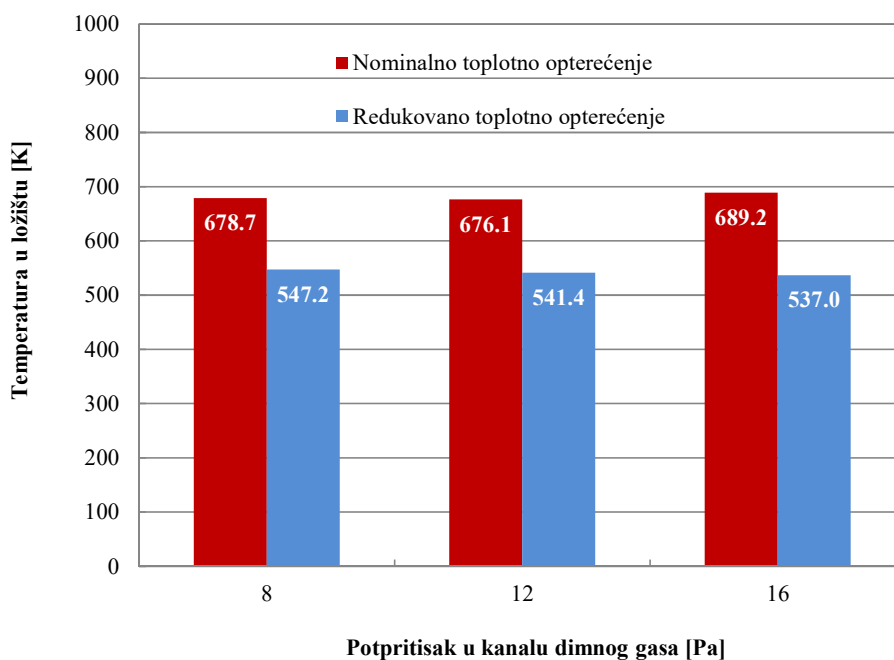
Pored sadržaja kiseonika u izlaznom dimnom gasu i energetskih i ekoloških indikatora rada peći na pelet, za validaciju razvijenog matematičkog modela korišćena je i vrednost srednje temperature u ložištu peći tj. vrednost temperature osrednjene po zapremini ložišta peći. Kao što je već navedeno u Poglavlju 7, usled velikog broja izvršenih merenja, tokom sprovođenja eksperimentalnih ispitivanja došlo je do otkazivanja termopara koji je merio temperaturu u ložištu peći ($T_{1,4}$), tako da pomenuti parametar nije eksperimentalno određen za sve ispitne režime. Iz pomenutog razloga, poređenje je izvršeno za one radne režime za koje su na raspolaganju bili eksperimentalni podaci, koji su upoređeni sa rezultatima dobijenim numeričkom simulacijom u cilju validacije razvijenog modela.

Na Slikama 10-1 i 10-2 prikazane su srednje temperature po zapremini ložišta peći određene modelovanjem i numeričkom simulacijom procesa sagorevanja peleta A i peleta B. Na dijagramima je data zavisnost tako dobijene temperature u ložištu peći od potpritiska u kanalu dimnog gasa, imajući u vidu da su za svaki pelet analizirani režimi sa tri vrednosti potpritiska u dimnom kanalu (8 ± 2 , 12 ± 2 i 16 ± 2 Pa), kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju peći. Generalno gledano, uticaj potpritiska na promenu temperature u ložištu je mali. Za nominalno toplotno opterećenje temperature u ložištu kretale su se u opsegu od 735 do 742 K za pelet A, tj. od 676 K do 689 K za pelet B. U slučaju sagorevanja peleta B, temperature u ložištu bile su u proseku oko 8% niže pri nominalnom i 6% niže pri redukovanom toplotnom opterećenju u odnosu na temperature ostvarene pri sagorevanju peleta B, što predstavlja direktnu posledicu toplotne moći ovog peleta koja je za oko 5% niža u odnosu na toplotnu moć peleta A.

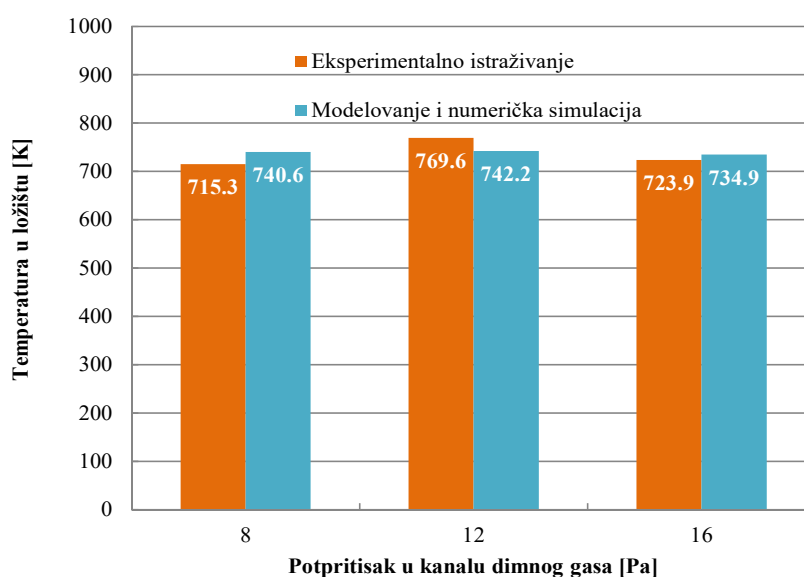
U cilju validacije razvijenog modela, temperature u ložištu dobijene numeričkom simulacijom upoređene su sa temperaturama izmerenim tokom eksperimentalnih ispitivanja. Na Slikama 10-3 i 10-4 prikazano je navedeno poređenje za pelet A i pelet B i to za nominalne režime rada, za koje su bili raspoloživi eksperimentalni rezultati.



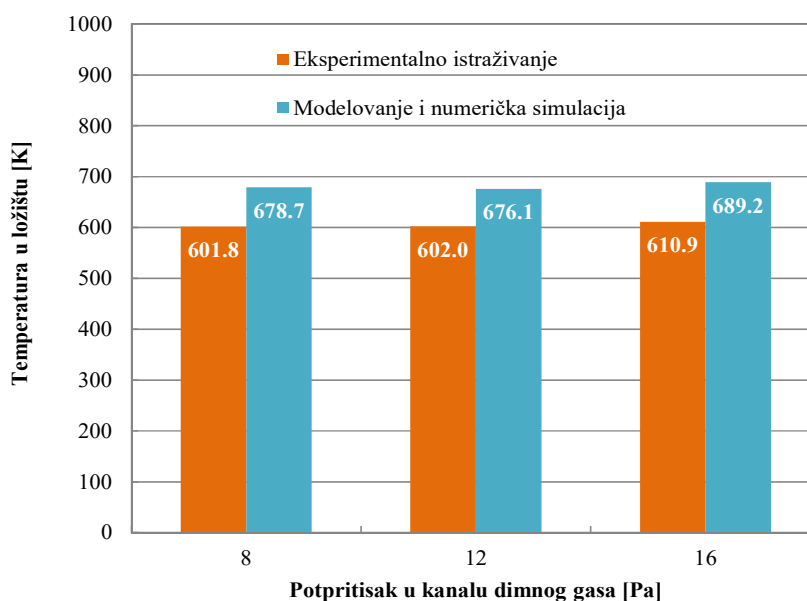
Slika 10-1 Temperatura u ložištu dobijena numeričkom simulacijom sagorevanja peleta A u peći sa gorionikom kapaciteta 8 kWt



Slika 10-2 Temperatura u ložištu dobijena numeričkom simulacijom sagorevanja peleta B u peći sa gorionikom kapaciteta 8 kWt



Slika 10-3 Poređenje vrednosti temperature u ložištu dobijene eksperimentalnim ispitivanjem i numeričkom simulacijom za pelet A



Slika 10-4 Poređenje vrednosti temperature u ložištu dobijene eksperimentalnim ispitivanjem i numeričkom simulacijom za pelet B

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je ostvareno zadovoljavajuće slaganje razmatranih podataka, naročito u slučaju sagorevanja peleta A, gde razlika između eksperimentalnih rezultata i rezultata dobijenih numeričkom simulacijom iznosi do 5%. U slučaju peleta B, registrovana odstupanja rezultata eksperimentalnog i

numeričkog određivanja temperatura u ložištu kreću se oko 11%. Navedeno još jednom ukazuje na zaključak da se sagorevanje peleta B u peći odigrava na drugačiji način u odnosu na pelet A i to kao posledica razlika u kvalitetu goriva, koje se pored različitog hemijskog sastava i toplotne moći, ogleda i u ustanovljenim razlikama fizičkih osobina peleta, u prvom redu manjoj nasipnoj i (komadnoj) gustini peleta B. Pored validacije modela, ostvareno slaganje dobijenih rezultata omogućava da se na osnovu vrednosti temperatura u ložištu dobijenih numeričkom simulacijom, prikazanih na Slikama 10-1 i 10-2, usvoje temperature u ložištu za režime rada pri redukovanom toplotnom opterećenju peći, za koje eksperimentalni podaci nisu bili raspoloživi.

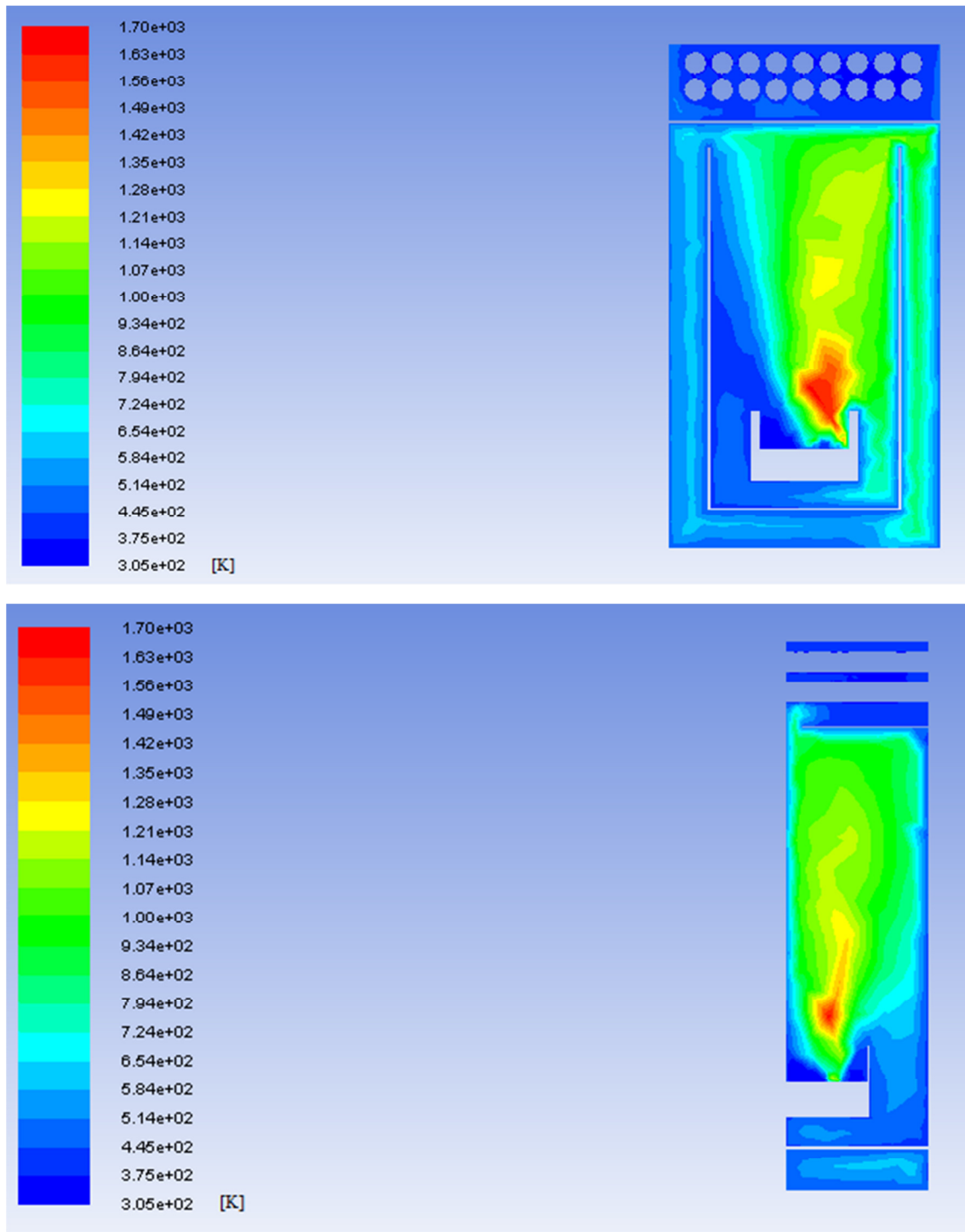
Kao što je ranije pomenuto, u nastavku će biti prikazani detaljni rezultati temperaturskog, brzinskog i koncentracionog polja kiseonika (O_2), ugljen dioksida (CO_2) i ugljen monoksida (CO) za izabrane radne režime PA-N-B8-D12 i PB-N-B8-D12, koji su dati za dva karakteristična podužna preseka analizirane peći: frontalni, kao i srednji bočni (duž centralne ose simetrije peći).

Rezultati određivanja temperaturskih polja prikazani na Slikama 10-5 i 10-10 potvrđuju raniji zaključak da su pri sagorevanju peleta A ostvarene više temperature u ložištu u odnosu na režime u kojima je sagorevan pelet B. Takođe, analiza temperaturskih polja ukazuje na činjenicu da se paljenje goriva i prostiranje plamena ne odvija duž centralne ose simetrije ložišta, već pomerenom ka desnoj površini ložišta, gde se iz tog razloga razvijaju i više temperature u odnosu na levu polovinu ložišta. Usled navedenog, temperatura dimnog gasa koji iz ložišta dospeva u izmenjivač toplote viša je na desnoj strani peći u odnosu na njenu levu stranu, što dovodi do neravnomernog zagrevanja toplog vazduha u izmenjivaču toplote iznad ložišta. Vidljiva posledica navedenog ogleda se u višim temperaturama vazduha za zagrevanje prostorije koje su registrovane na desnoj strani peći u odnosu na odgovarajuće temperature na levoj strani peći. Sve prethodno navedeno je u skladu sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja koji su prikazani u Tabelama 8-3 do 8-6, kao i na Slikama 8-17 i 8-18, na kojima su uočljive razlike u temperaturama vazduha za zagrevanje prostorije na levoj i desnoj strani peći. Profili temperature dobijeni za režime sa redukovanim toplotnim opterećenjem potvrđuju pomenutu asimetričnost raspodele temperature unutar ložišta, ukazujući takođe i na manju visinu prostiranja plamena i manju zonu visokih temperatura po uzdužnom preseku ložišta u odnosu na režime sa nominalnim toplotnim

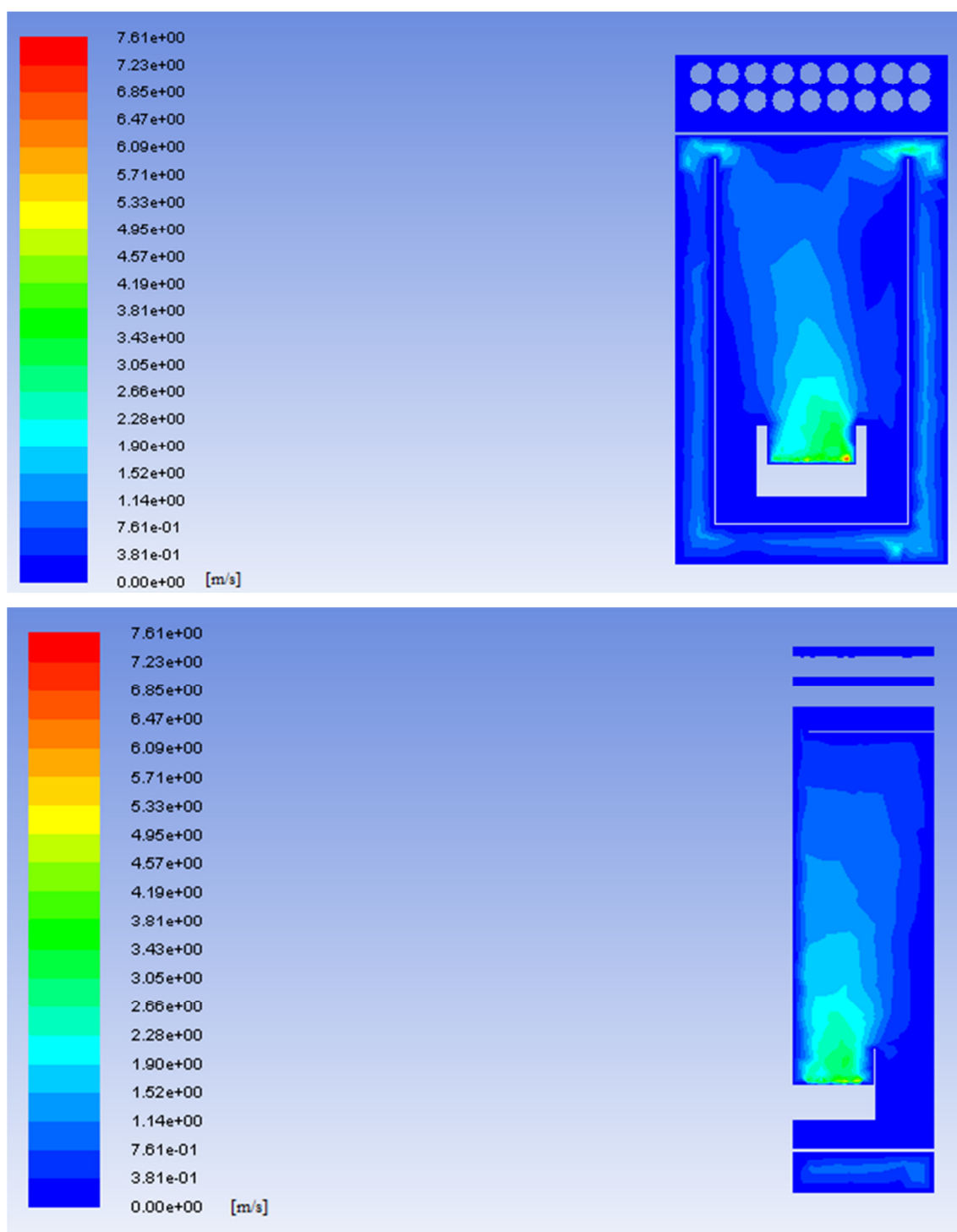
opterećenjima. Asimetrično prostiranje plamena i neravnomerno zagrevanje toplog vazduha ne pogoduje optimalnom radu peći i komforu korisnika, tako da bi konstruktivna unapređenja ložnog uređaja, u prvom redu mesta dovoda goriva i vazduha u ložište, trebala ići u smeru uniformnije raspodele temperatura unutar ložišta.

Na osnovu analize rezultata brzinskih polja dobijenih numeričkom simulacijom, koja su prikazana na Slikama 10-6 i 10-11, zaključeno je da profil raspodele brzina odgovara geometriji ložišta, tako da se najveće brzine razvijaju u centralnoj zoni ložišta, dok u zonama pri vrhu ložišta dolazi do porasta brzine strujanja i vrtloženja gasne struje. Navedena strujna slika je i očekivana imajući u vidu konstrukciju peći i tok dimnog gasa koji nakon predaje toplote u izmenjivaču toplote naglo menja pravac i smer strujanja i kroz uski strujni prostor koji okružuje ložište dospeva u kanal dimnog gasa u donjem delu peći, odakle odlazi u atmosferu. Na taj način, veće brzine registrovane su u zonama u kojima dolazi do promene (redukcije) poprečnog preseka strujnog prostora. Iako je profil raspodele brzina skoro identičan, maksimalne brzine strujanja su nešto veće u slučaju sagorevanja peleta B. S ozbirom da je količina vazduha za sagorevanje u režimu u kom je korišćen pelet A (PA-N-B8-D12) bila u proseku za oko 14% viša u odnosu na protok vazduha u režimu u kom je korišćen pelet B (PB-N-B8-D12), navedeno je uticalo na razvoj nešto većih brzina pri sagorevanju alternativne vrste peleta.

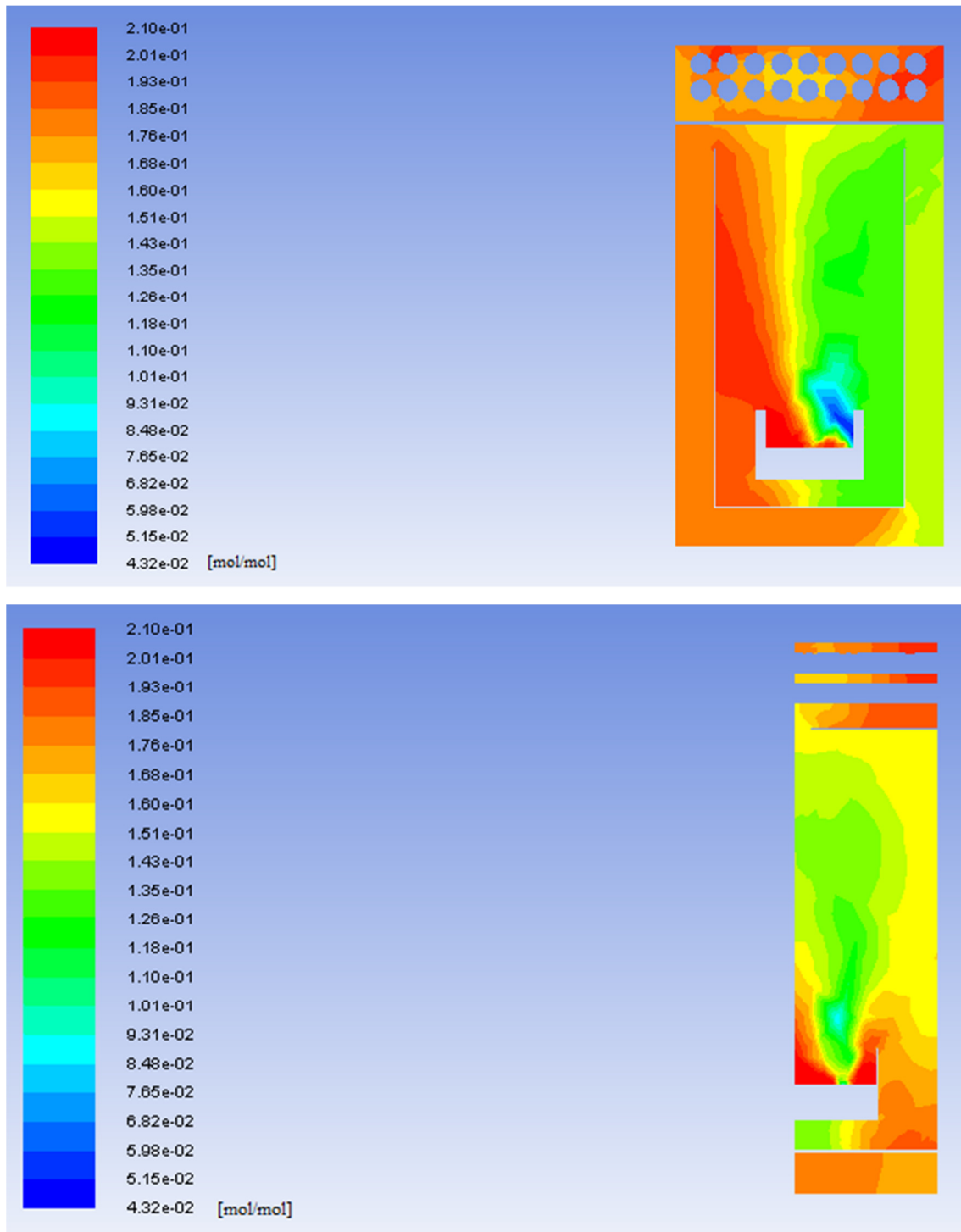
Rezultati određivanja polja koncentracije kiseonika, prikazani na Slikama 10-7 i 10-12, pokazuju nešto veću koncentraciju ovog reaktanta (O_2) na levoj strani u odnosu na desnu stranu ložišta. Navedeno upućuje na zaključak da se u desnoj polovini ložišta, u kojoj su registrovane više temperature, odvijaju intenzivnije reakcije sagorevanja goriva i intenzivnija reakcija dogorevanja CO u CO_2 u kojoj se konzumira i veća količina kiseonika. Ovakav zaključak je u skladu i sa dobijenom raspodelom koncentracije CO_2 u ložištu peći, prikazanom na Slikama 10-8 i 10-13, gde su veće koncentracije ugljen dioksida registrovane upravo na desnoj strani ložišta. Rezultati polja koncentracije ugljen monoksida su u skladu sa prethodnom diskusijom, sa najvećim koncentracijama registrovanim u zoni neposrednog sagorevanja goriva, dok su u ostatku usvojenog domena koncentracije ugljen monoksida niske, jer je glavni deo ovog reaktanta izreagovao i prešao u ugljen dioksid, kao što se uočava na Slikama 10-9 i 10-14.



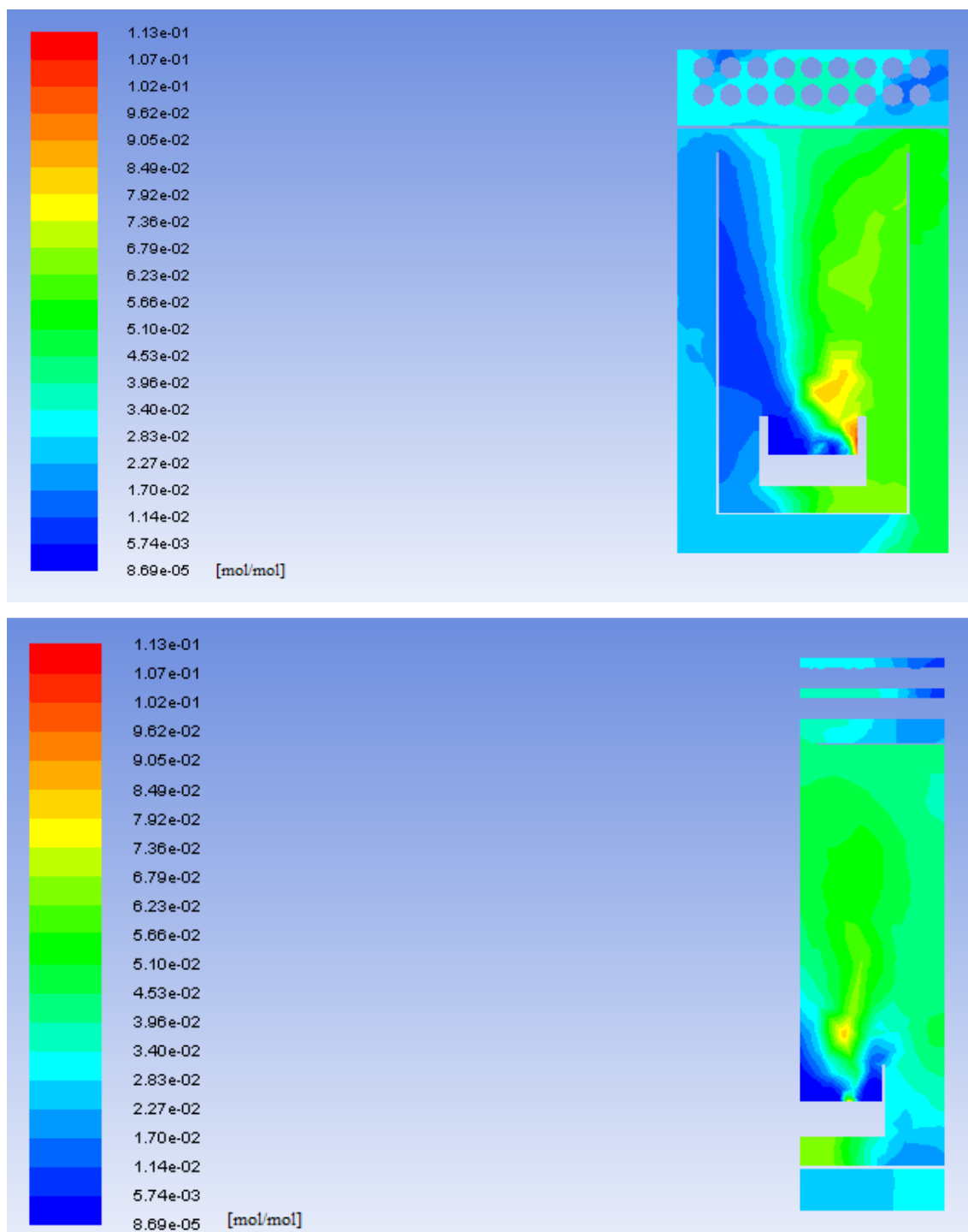
Slika 10-5 Temperaturno polje dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12



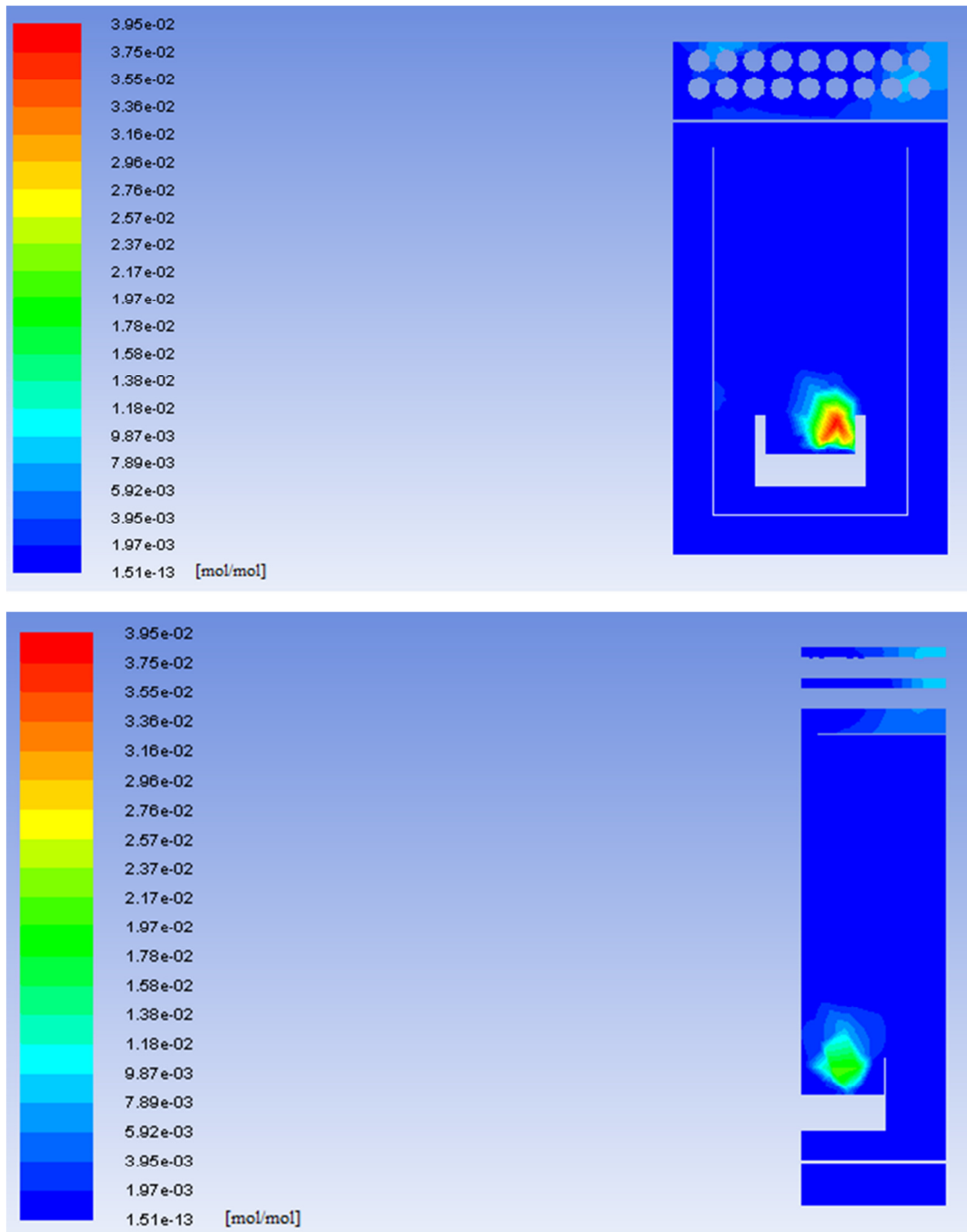
Slika 10-6 Brzinsko polje dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12



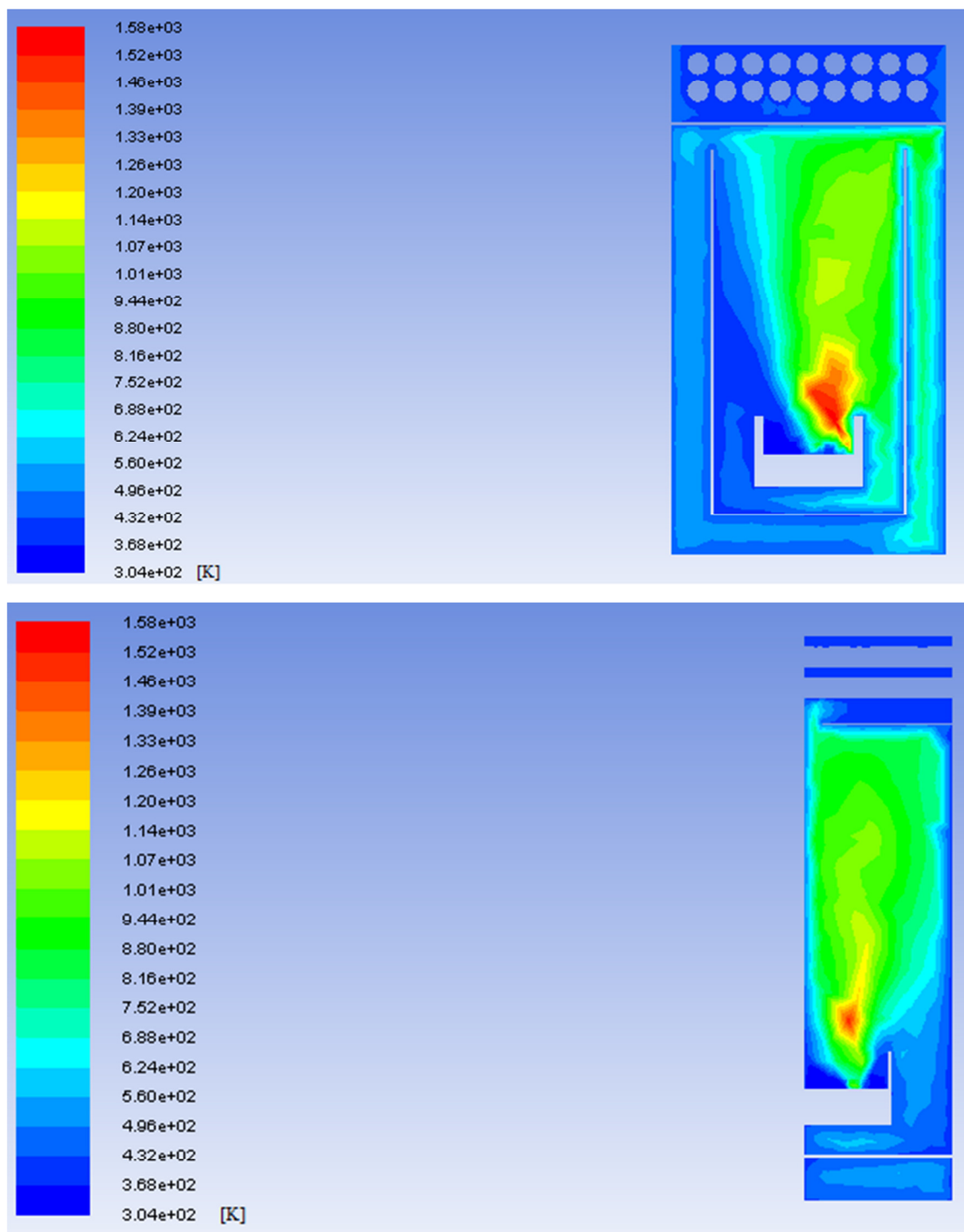
Slika 10-7 Polje koncentracije O₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12



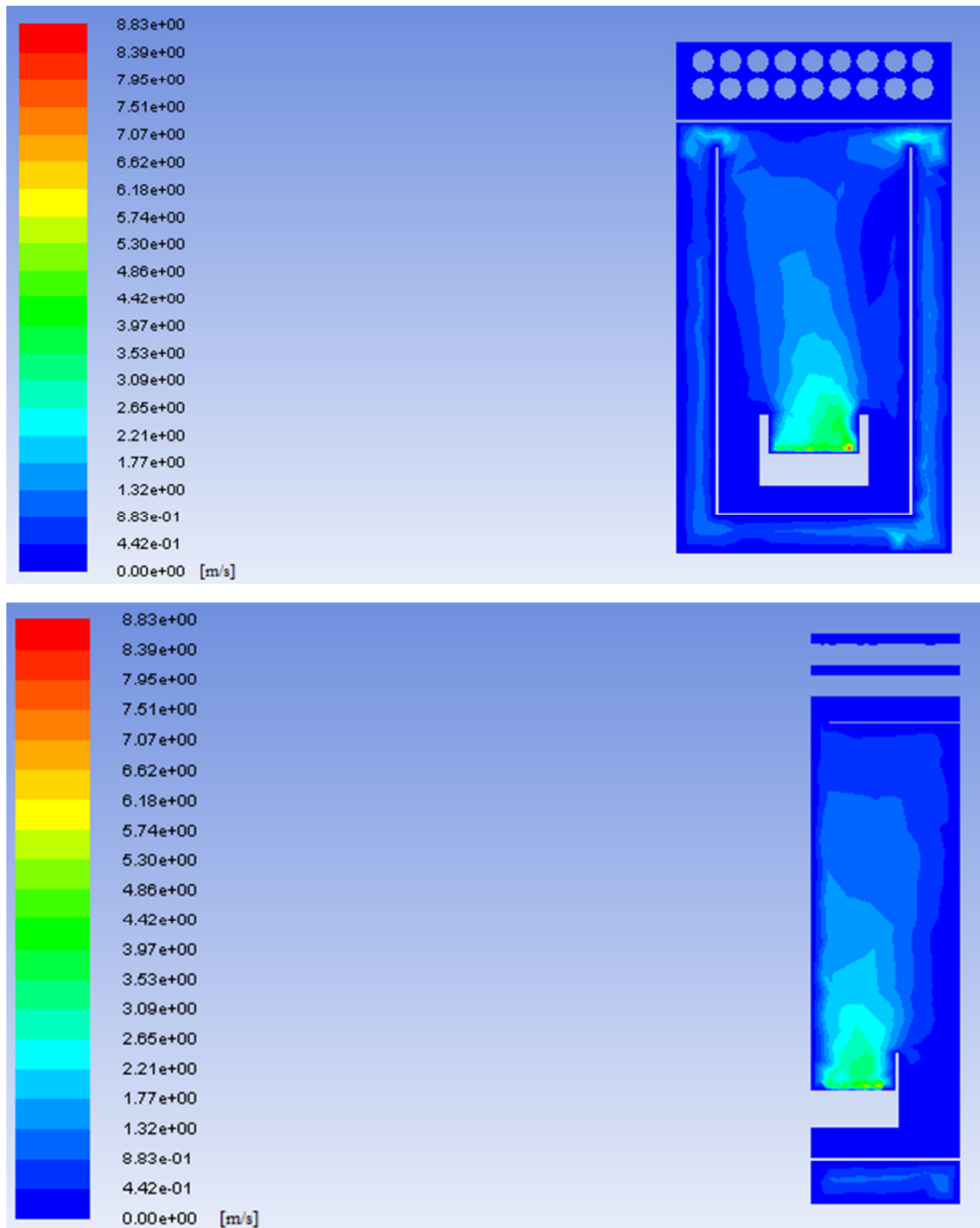
Slika 10-8 Polje koncentracije CO₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12



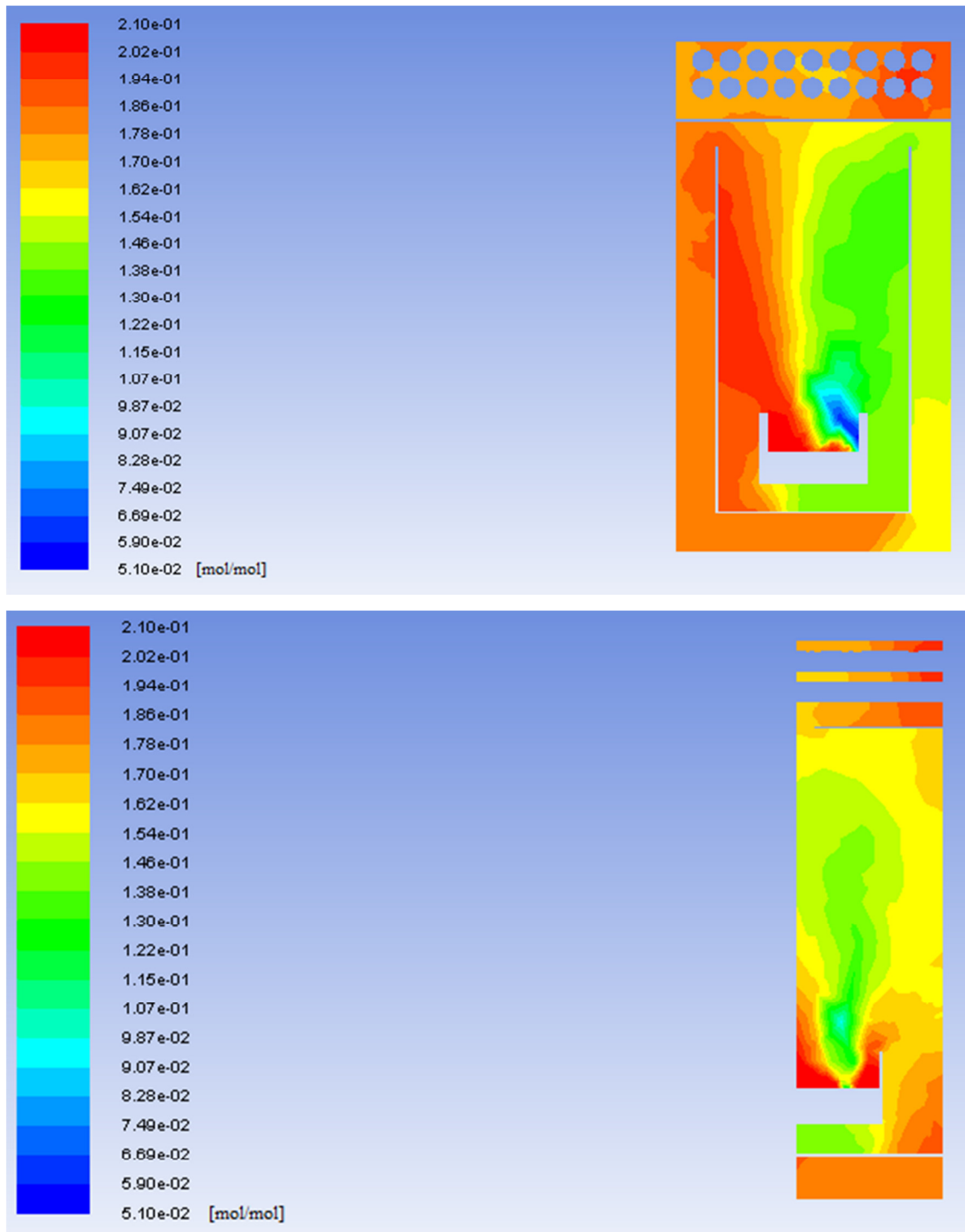
Slika 10-9 Polje koncentracije CO dobijeno numeričkom simulacijom za režim PA-N-B8-D12



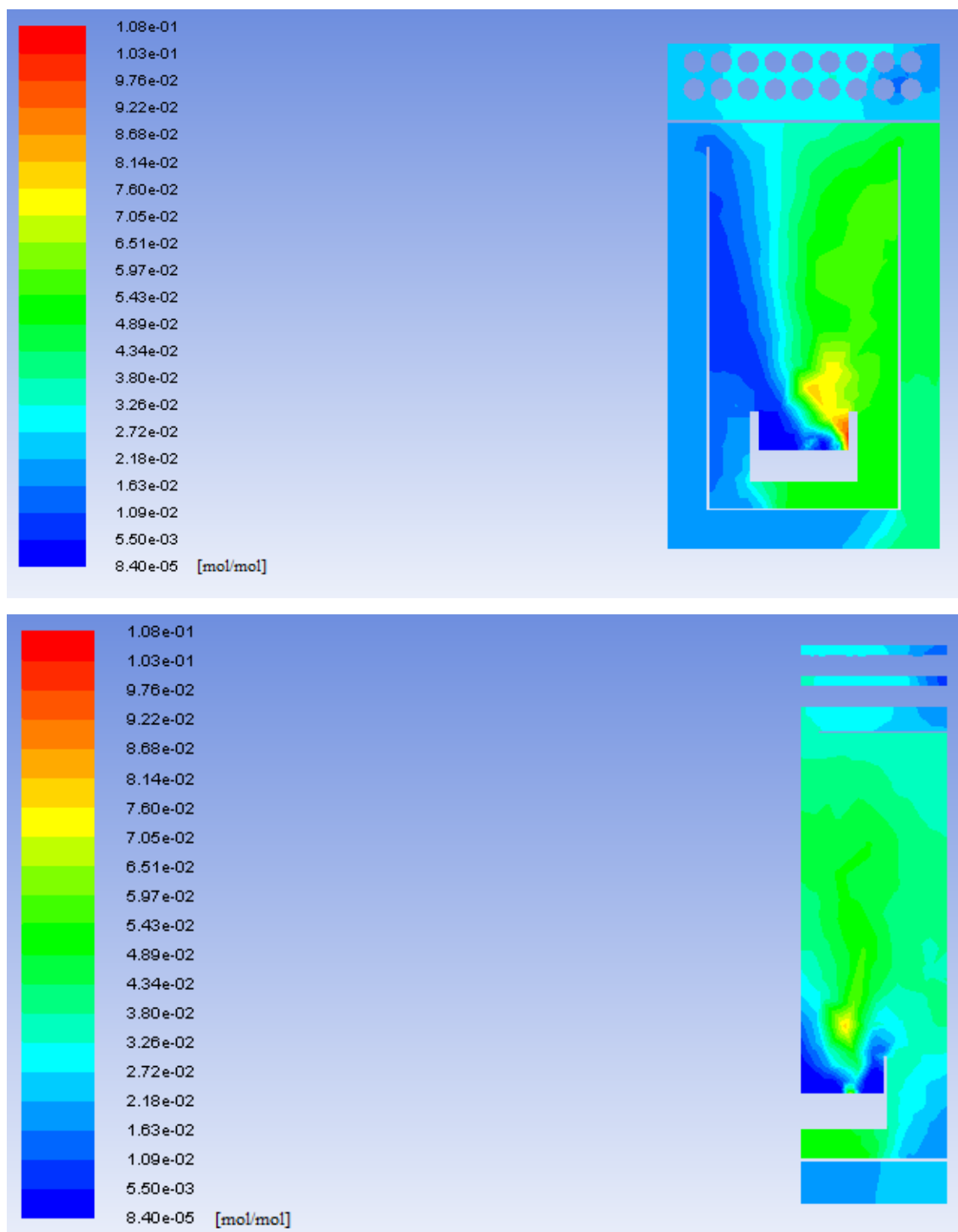
Slika 10-10 Temperaturno polje dobijeno numeričkom simulacijom
za režim PB-N-B8-D12



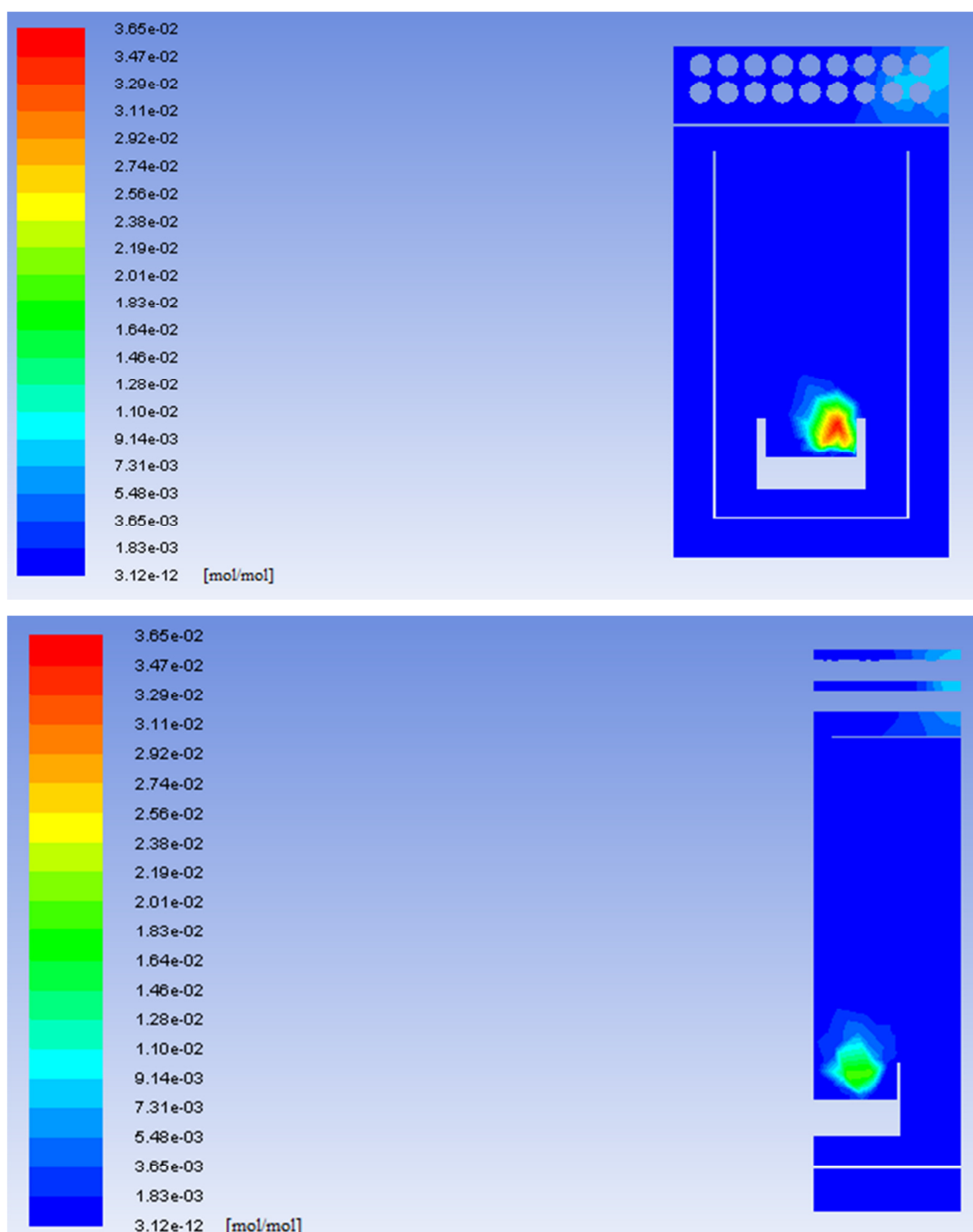
Slika 10-11 Brzinsko polje dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12



Slika 10-12 Polje koncentracije O₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12



Slika 10-13 Polje koncentracije CO₂ dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12



Slika 10-14 Polje koncentracije CO dobijeno numeričkom simulacijom za režim PB-N-B8-D12

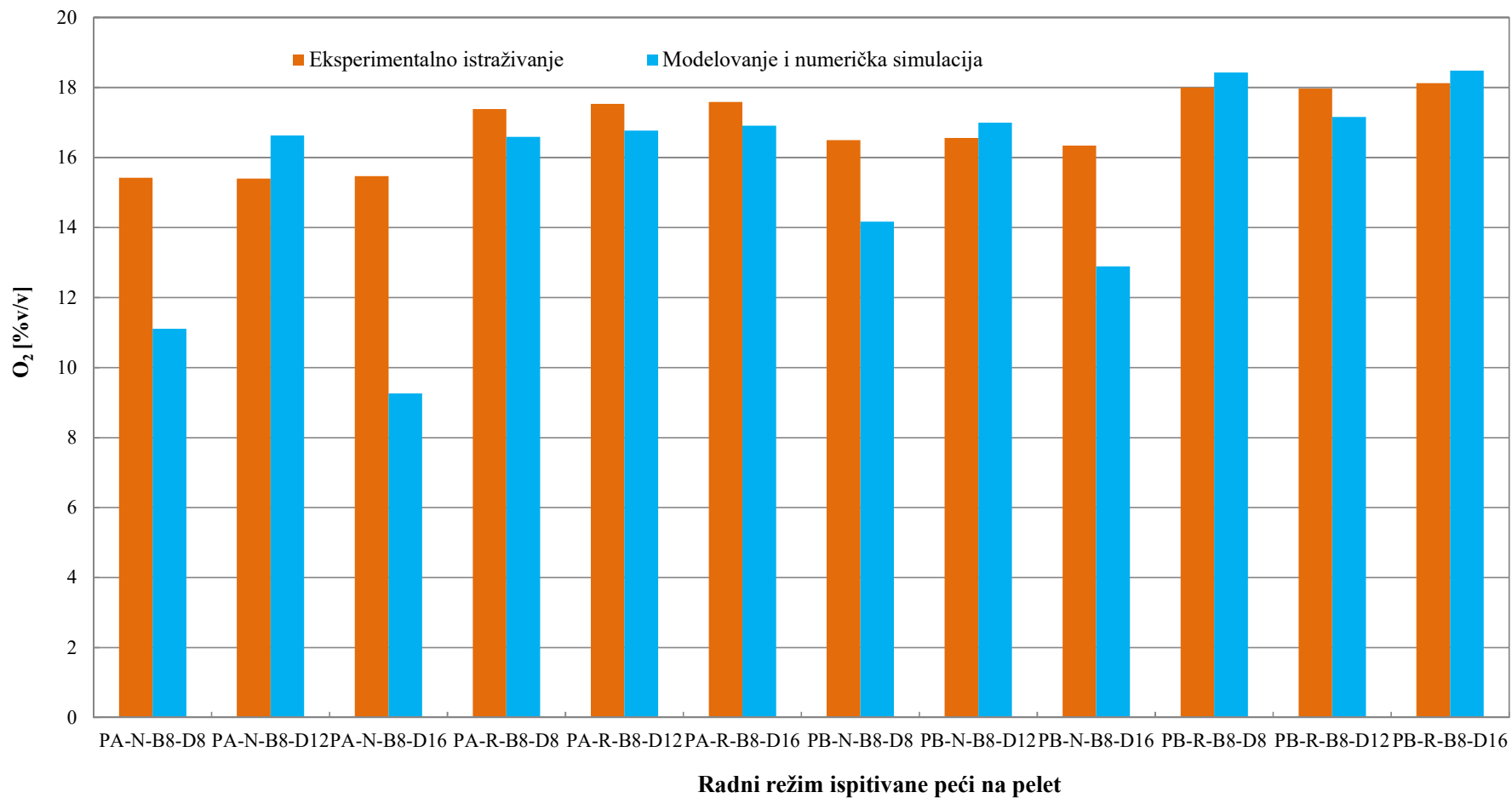
10.3 Poređenje rezultata modelovanja i numeričke simulacije sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja

U nastavku je prikazano poređenje rezultata modelovanja i numeričke simulacije sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, sprovedeno u cilju validacije razvijenog matematičkog modela. Poređenje je izvršeno tako što su upoređivane vrednosti sledećih parametara:

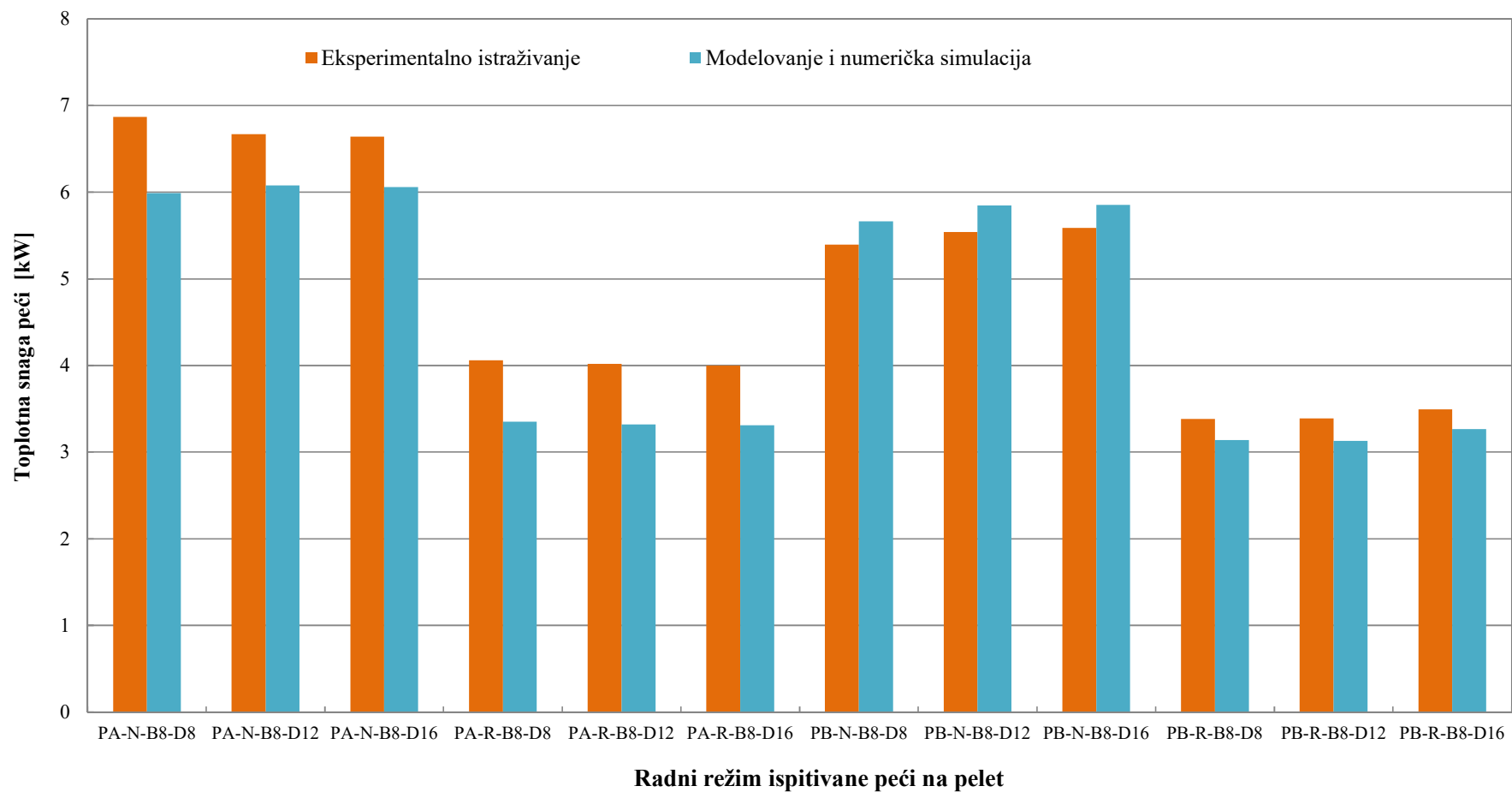
- srednje temperature u ložištu peći (temperatura osrednjena po zapremini ložišta),
- sadržaj kiseonika u izlaznom dimnom gasu,
- energetske karakteristike peći - ostvarena toplotna snaga i stepen korisnosti peći,
- ekološke karakteristike peći - sadržaj ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu, sveden na referentni sadržaj kiseonika od 13% O₂ (v/v).

Razvijenim modelom nije obuhvaćena emisija azotnih oksida iz nekoliko razloga. Relevantnim standardom i regulativom definisanom za peći na pelet male snage, azotni oksidi nisu prepoznati kao parametar za koji se definiše maksimalni dozvoljeni nivo emisija iz razmatrane vrste ložnih uređaja. Pored toga, sadržaj azota u ispitivanim gorivima bio je izuzetno nizak (0,12% za pelet A i 0,10% za pelet B), što je rezultovalo niskim emisijama azotnih oksida pri njihovom sagorevanju.

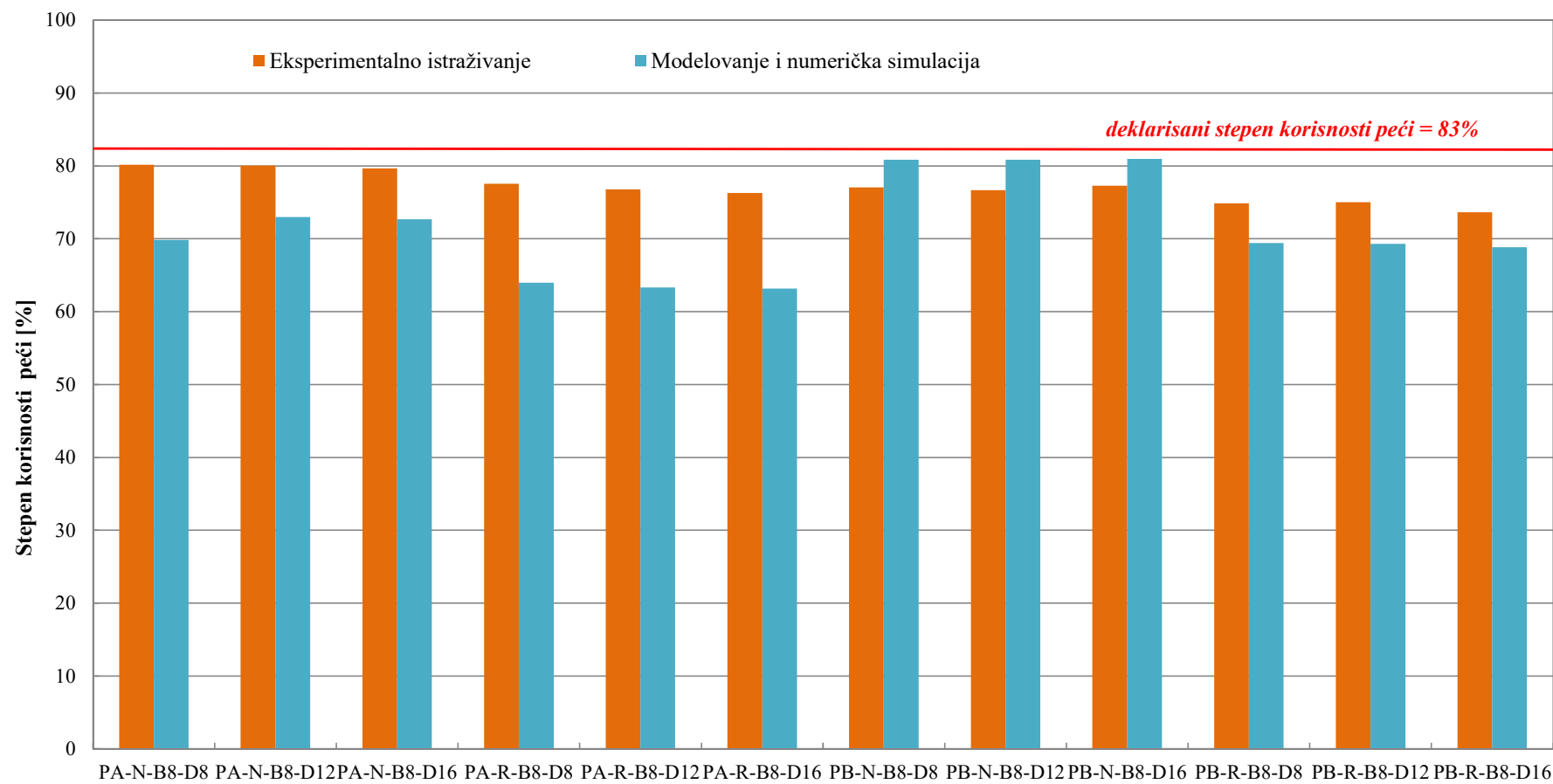
Poređenje rezultata određivanja srednje temperature u ložištu peći, prikazano na Slikama 10-3 i 10-4, analizirano je u Poglavlju 10.2 ove disertacije. Poređenje vrednosti dobijenih modelovanjem za preostale odabrane parametre rada i rezultate eksperimentalnih ispitivanja prikazano je na Slikama od 10-15 do 10-18. Vrednosti sadržaja O₂ u dimnom gasu i ostvarena toplotna snaga peći, dobijene modelovanjem i prikazane na Slikama 10-15 i 10-16, predstavljaju direktan rezultat razvijenog modela i numeričke simulacije. Vrednosti stepena korisnosti, dobijene kao rezultat primenjenog modela i prikazane na Slici 10-17, proračunate su na osnovu vrednosti toplotne snage peći dobijene modelovanjem, a u skladu sa metodologijom navedenom u EN 14785:2006, koja je korišćena i za izračunavanje stepena korisnosti na osnovu rezultata eksperimentalnih ispitivanja. Sadržaj CO u izlaznom dimnom gasu, prikazan na Slici 10-18, predstavlja koncentracije koje su dobijene kao rezultat modelovanja (za realan sadržaj kiseonika u dimnom gasu) i potom preračunate na 13% O₂ v/v u dimnom gasu kako bi se mogle porediti sa koncentracijama ugljen monoksida koje su dobijene eksperimentalnim ispitivanjem (koje su takođe svedene na 13% O₂ v/v u dimnom gasu).



Slika 10-15 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja sadržaja kiseonika u izlaznom dimnom gasu

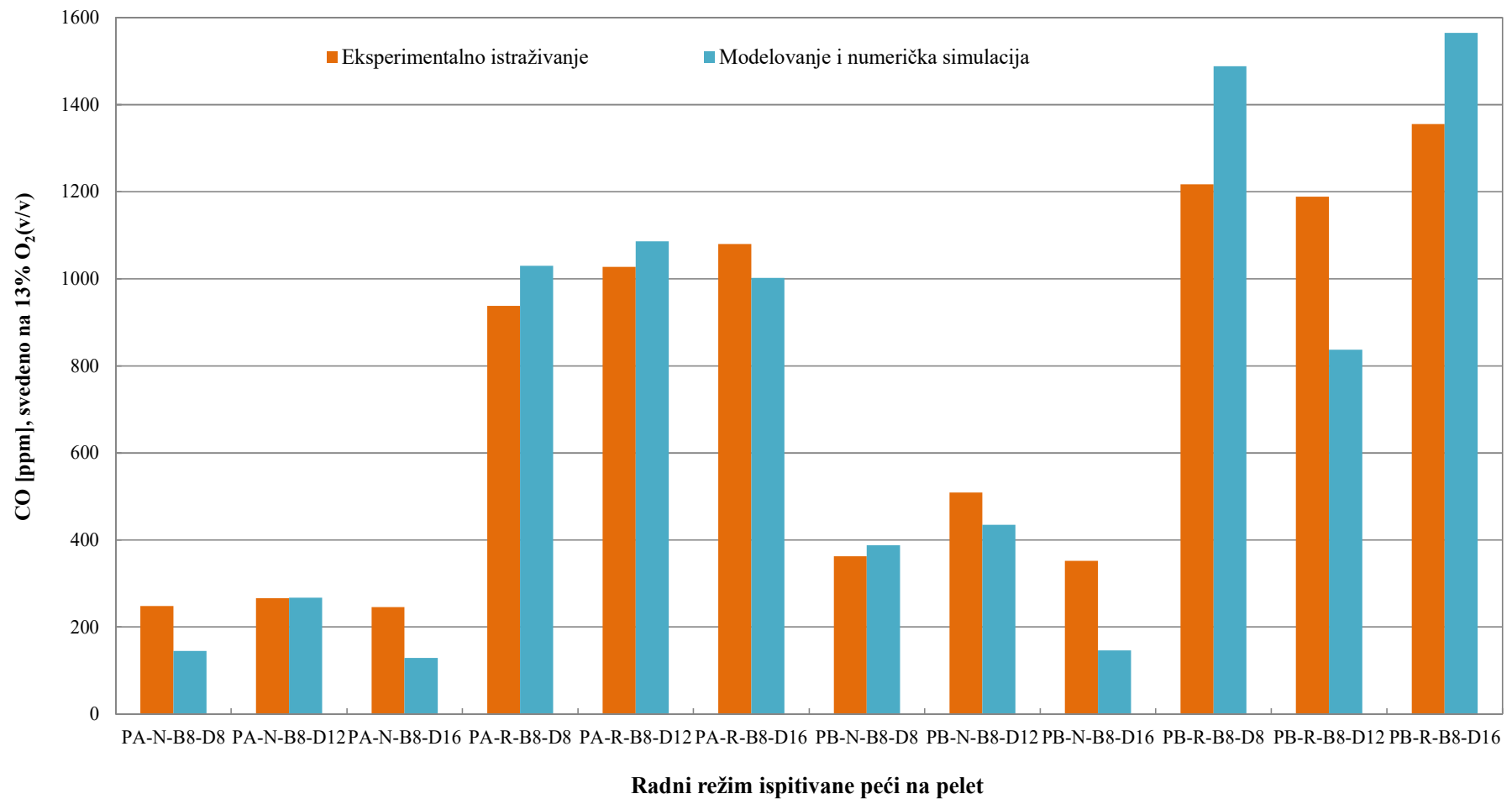


Slika 10-16 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja toplotne snage peći



Radni režim ispitivane peći na pelet

Slika 10-17 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja stepena korisnosti peći



Slika 10-18 Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata određivanja koncentracije ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu

10.4 Analiza rezultata modelovanja i numeričke simulacije

Analizom prikazanih rezultata poređenja modelovanja i eksperimentalnih ispitivanja može se zaključiti da je s obzirom na veliki broj obrađenih režima u kojima je variran veći broj uticajnih parametara ostvareno zadovoljavajuće slaganje poređenih veličina. Većina predloženih modela koji se mogu naći u literaturi odnose se samo na jedan ili na eventualno nekoliko radnih režima. Prosečna odstupanja modelovanih vrednosti analiziranih parametara od vrednosti dobijenih eksperimentalnim istraživanjima za 12 radnih režima su sledeća:

- za temperaturu u ložištu peći: 6,9%
- za sadržaj kiseonika u dimnom gasu: 11,3%
- za ostvarenu toplotnu snagu peći: 9,9%
- za stepen korisnosti peći: 9,9%
- za sadržaj ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu, sveden na referentni sadržaj kiseonika od 13% v/v: 21,8%.

Najveća odstupanja zabeležena su u slučaju poređenja vrednosti koncentracija ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu. Ipak, kako poređene koncentracije ugljen monoksida predstavljaju vrednosti svedene na referentni sadržaj kiseonika od 13% v/v, navedeno odstupanje vrednosti emisija CO predstavlja i direktnu posledicu odstupanja koje je zabeleženo pri poređenju modelovanih i eksperimentalnih vrednosti sadržaja O₂ u dimnom gasu. Pomenuto odstupanje, u proseku od 11,3%, praktično je integrisano u veće odstupanje koje je izračunato poređenjem modelovanih i eksperimentalnih vrednosti koncentracija ugljen monoksida u dimnom gasu. Navedeno se može videti ako se uporede dijagrami na Slikama 10-15 i 10-18, gde se uočava da je najveće odstupanje koncentracija ugljen monoksida registrovano za nominalne režime sa potpritiskom u kanalu dimnog gasa od 16 ± 2 Pa, za koje je zabeleženo i najveće odstupanje između modelovanih i izmerenih koncentracija O₂ u dimnom gasu. Najbolje slaganje podataka zabeleženo je za slučaj korišćenja preporučenog goriva tj. peleta A i preporučenu vrednost potpritiska u kanalu dimnog gasa od 12 ± 2 Pa.

Što se tiče ostvarene toplotne snage i stepena korisnosti peći, primećeno je da model u slučaju sagorevanja peleta A predviđa nešto niže vrednosti ovih parametara nego što su vrednosti dobijene eksperimentalnim istraživanjem, sa skoro konstantnim

odstupanjem za sve analizirane režime (varirano toplotno opterećenje i vrednost potpiritiska u kanalu dimnog gasa). U slučaju korišćenja peleta B, model za nominalna toplotna opterećenja predviđa nešto više vrednosti u odnosu na eksperimentalne podatke, dok za redukovana opterećenja, kao i u slučaju peleta A, daje nešto niže projekcije. Ipak, odstupanja su relativno mala i kreću se u opsegu $\pm 6\%$ za pelet B i oko $\pm 13,7\%$ za pelet A.

Kako su faktori koji utiču na proces sagorevanja peleta mnogobrojni, identifikacija tačnih razloga zbog kojih dolazi do odstupanja numeričkih od eksperimentalnih podataka nije jednostavna. Pretpostavke usvojene prilikom postavke matematičkog modela, a u cilju pojednostavljenja kompleksnog procesa sagorevanja biomase, svakako imaju uticaj na krajnji ishod numeričkih simulacija. Jedna od mogućih pretpostavki koja ima uticaj na modelovanje analiziranog fenomena sagorevanja peleta odnosi se na pretpostavku sferičnog oblika komada goriva, sa zanemarljivim otporima prenošenju toplote i uniformnim termičkim karakteristikama po celoj njegovoj zapremini. Kako realni cilindrični komadi peleta dostižu dužinu do 30 mm, unutrašnji otpori mogu ipak imati određenu ulogu u razmatranom procesu. Takođe, usvojena diskretizacija geometrije modela, predstavljanje izdvojenih volatila jednom fiktivnom formulom, kao i korišćenje jedne vrednosti predeskonencijalnog faktora za sve režime sa istom vrstom peleta predstavljaju neke od razloga koji su mogli uticati na odstupanje poređenih vrednosti analiziranih parametara.

10.5 Zaključak procesa validacije razvijenog modela i numeričke simulacije

Analizom rezultata modelovanja i numeričke simulacije zaključeno je da je predloženi matematički model adekvatno postavljen kako bi se simulirao proces sagorevanja peleta u analiziranoj peći na pelet. Usvojene pretpostavke i osnovne transportne jednačine, kao i kinetika procesa sagorevanja definisana modelom, omogućile su adekvatno predstavljanje razmatranih fenomena i procesa koji se odvijaju pri sagorevanju peleta.

Dobijena temperaturska polja ukazala su na neravnomerno prostiranje plamena unutar ložišta, što je dalo objašnjenje za razlike u izmerenim temperaturama vazduha za zagrevanje prostora sa leve i desne strane peći, koje su registrovane tokom

eksperimentalnog ispitivanja. Upoređivanjem vrednosti temperatura u ložištu dobijenih numeričkom simulacijom i eksperimentalnim istraživanjem zaključeno je da razvijeni matematički model daje veoma tačne prognoze razmatranog parametra. Brzinski profili pokazali su očekivanu distribuciju u modelovanoj geometriji ložišta peći, sa vrtloženjem i porastom brzina pri vrhu ložišta, u zonama u kojima se menja poprečni presek strujnog prostora dimnog gasa. Koncentraciona polja kiseonika i ugljen dioksida ukazala su da se u desnoj polovini ložišta odvijaju intenzivnije reakcije sagorevanja goriva tj. intenzivnija reakcija dogorevanja CO u CO₂.

Generalno gledano, model je pokazao zadovoljavajuću sposobnost da reaguje na promenu uticajnih parametara i uspešno je predvideo promenu analiziranih kontrolnih veličina za većinu razmatranih radnih režima.

S obzirom na relativno dobro slaganje rezultata modelovanja i eksperimentalnih istraživanja, razvijeni model može se koristiti za poboljšanje rada analizirane vrste ložnih uređaja kako bi se postigla optimizacija procesa sagorevanja i ispunjavanje propisanih normativa u pogledu minimalnog stepena korisnosti i maksimalno dozvoljene emisije ugljen monoksida koji su definisani za uređaje za sagorevanje male snage.

11. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U okviru ove disertacije analizirana je problematika sagorevanja drvnih peleta u uređajima za sagorevanje male snage. Kako bi se stekao adekvatan uvid u značaj sprovedenih ispitivanja, u disertaciji je navedena argumentacija kojom je objašnjena očekivana uloga obnovljivih izvora energije u uspostavljanju koncepta održive energetike, sa posebnim osvrtom na očekivano značajnu ulogu biomase u oblasti proizvodnje toplotne energije, kako u Evropskoj Uniji, tako i u Republici Srbiji. Definisane su osnovne specifičnosti korišćenja biomase kao obnovljivog goriva, naročito sa aspekta kompleksnosti procesa sagorevanja i identifikacije ključnih faktora koji utiču na razmatrani proces. Peleti, kao oblik posebno pripremljene biomase koji pruža velike prednosti u odnosu na korišćenje nepripremljene biomase, definisani su sa aspekta tehnologije proizvodnje i karakteristika njihovog sagorevanja u uređajima male snage (peći i kotlovi toplotne snage do 100 kWt). Kako bi se sagledalo aktuelno stanje u oblasti naučnih istraživanja u razmatranoj oblasti, dat je pregled merodavnih eksperimentalnih ispitivanja, kao i naučnih aktivnosti koje su sprovedene u oblasti modelovanja i numeričke simulacije procesa sagorevanja peleta u pećima i kotlovima male snage. Na osnovu sveobuhvatnog pregleda i jasno identifikovanih oblasti koje zahtevaju dodatna istraživanja, definisan je plan i program eksperimentalnih ispitivanja koja su sprovedena u cilju analize uticaja parametara procesa sagorevanja na radne karakteristike peći na pelet deklarisan snage 8 kWt. Pored analize uticaja kvaliteta goriva, sagledan je uticaj promene konstruktivnih karakteristika, kao i promene radnih parametara (toplotnog opterećenja, vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa) peći na pelet na energetske i ekološke karakteristike rada razmatranog ložnog uređaja. Takođe, u okviru disertacije definisan je i matematički model sagorevanja peleta u analiziranoj peći, koji je korišćen u numeričkoj simulaciji razmatranih procesa primenom softverskog paketa Ansys Fluent 15.0.

Na osnovu svih aktivnosti sprovedenih u okviru izrade ove Doktorske disertacije moguće je doneti sledeće zaključke:

- Obnovljivi izvori energije danas predstavljaju jedno od ključnih rešenja kada je u pitanju budućnost globalne energetike i rešavanje problema koji se odnose na ekološke posledice tradicionalnog sagorevanja fosilnih goriva, ali i na sigurnost snabdevanja energijom. Biomasa, kao jedan od najznačajnijih oblika OIE, čija se prednost ogleda u činjenici da se može skladištiti i koristiti po potrebi, svoju

najveću primenu nalazi u sektoru proizvodnje toplotne energije, u okviru koga se sektor domaćinstava izdvaja kao najveći korisnik generisane toplote. U strateškim dokumentima Republike Srbije definisano je ciljno učešće OIE od 30% u sektoru proizvodnje toplotne i rashladne energije do 2020. godine, u okviru čega se kao ključna mera izdvaja uvođenje biomase kao zamene fosilnim gorivima koja se koriste za grejanje u sektoru domaćinstava.

- Usled značajnije izraženih problema koji se javljaju pri sagorevanju poljoprivredne biomase (koji se ogledaju u problematičnijem hemijskom sastavu goriva, a koji dalje dovode do operativnih problema prilikom procesa sagorevanja i značajnijih emisija zagađujućih materija), za uređaje male snage koji se koriste u domaćinstvima preporučuje se korišćenje drvene biomase. Korišćenje peleta, kao biogoriva koje se odlikuje većom energetsom gustinom, homogenijim sastavom i formom, manjim sadržajem vlage i mogućnošću lakšeg i ekonomičnijeg transporta i manipulacije, prepoznato je kao najadekvantiji vid sagorevanja biomase, naročito ako se ima u vidu da se uređaji za sagorevanje peleta odlikuju automatizovanim radom koji omogućava značajno niže emisije zagađujućih materija u odnosu na uređaje sa ručnim loženjem.
- Kako uređaji za sagorevanje peleta male snage nisu opremljeni specijalnim sistemima za smanjenje emisija zagađujućih materija, posebna pažnja mora se posvetiti optimizaciji procesa sagorevanja, kako bi se postiglo što efikasnije sagorevanje goriva uz što manje lokalno zagađenje životne sredine.
- Kvalitet peleta identifikovan je kao jedan od ključnih aspekata koji utiče na karakteristike procesa sagorevanja, pa samim tim i na rad uređaja za sagorevanje, posebno zbog činjenice da se za proizvodnju pomenute vrste goriva mogu koristiti različite sirovine. Iz tog razloga, međunarodnim ISO standardima definisane su zahtevane osobine tj. utvrđene su klase kvaliteta peleta, maksimalni sadržaj pojedinih materija, zahtevi u pogledu održivosti korišćenja i slično. Karakteristike peleta imaju ključnu ulogu i pri sagledavanju mogućnosti korišćenja razmatrane vrste goriva u uređajima različitih tipova i snaga i od posebnog su značaja kod uređaja male snage.
- Posebnim evropskim standardom definisana je procedura ispitivanja uređaja za sagorevanje peleta koji se koriste za zagrevanje domaćinstava u cilju utvrđivanja

ispunjenosti zahteva po pitanju energetske i ekološke karakteristike njihovog rada. Savremeni pristup razvoju ložnih uređaja malih snaga predviđa njihovu klasifikaciju po odgovarajućim kriterijumima koji obuhvataju indikatore potrošnje energije, potrošnje resursa i emisije štetnih materija, slično već uvedenim energetskim klasama za električne uređaje. Na taj način, razvoj konstrukcija ložnih uređaja i istraživanje procesa sagorevanja koji se u njima odvijaju, kao i ispitivanje uticaja kvaliteta goriva, dobijaju sve veći značaj. Posebno je interesantna ideja proizvođača ložnih uređaja (peći na pelet), da se zamenom samo gorionika u nepromenjenoj konstrukciji peći postigne promena snage uređaja uz zadovoljenje svih energetske i ekološke zahteva.

- Na tržištu Srbije postoji veliki broj uređaja bez verodostojnog sertifikata o ključnim performansama rada, što ukazuje na potrebu uvođenja obavezne sertifikacije uređaja za sagorevanje peleta, kako bi se korisnicima pružila sigurnost u pogledu garantovanih performansi rada. Analogno klasama kvaliteta goriva, sertifikacijom bi se uvele klase kvaliteta uređaja za sagorevanje peleta, a na osnovu jasno definisanih zahteva po pitanju energetske i ekološke karakteristike pri različitim uslovima rada (nominalno ili redukovano toplotno opterećenje).
- Detaljnom analizom literature u oblasti do sada sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja rada uređaja na pelet male snage zaključeno je da analiza i optimizacija radnih parametara uređaja za sagorevanje, kao i pažljiv odabir konstruktivnih karakteristika, u prvom redu mesta uvođenja vazduha u zone sagorevanja, ali i mesta i načina dovoda goriva u ložište, predstavljaju adekvatan način za optimizaciju procesa sagorevanja. Ispitivanje uticaja variranja toplotnog kapaciteta gorionika na radne performanse peći na pelet, a u cilju sagledavanja mogućnosti da se malom izmenom u konfiguraciji peći (izmenom gorionika) omogući serijska proizvodnja uređaja različitih deklariranih snaga i time značajno smanje troškove proizvodnje, kao i krajnja cena gotovog proizvoda, predstavlja problematiku koja do sada nije razmatrana. Takođe, kako je merodavnim evropskim standardom ostavljena mogućnost da potpritisak u kanalu dimnog gasa uređaja za sagorevanje odstupa od vrednosti od 12 ± 2 Pa koju definiše standard, ukoliko se to pozitivno odražava na karakteristike rada uređaja za sagorevanje, smatrano je da ispitivanje uticaja variranja potpritisaka u kanalu dimnog gasa na radne performanse peći

omogućava da se sagleda uticaj potpritiska na poboljšanje performansi rada analiziranih ložnih uređaja. Pored toga, kako su podaci iz literature ukazali da kvalitet goriva ima veoma veliki značaj za rad uređaja za sagorevanje, smatrano je da pomenuti uticaj takođe treba ispitati tj. kvantifikovati u odabranoj konfiguraciji ložnog uređaja.

- Shodno navedenom, definisan je plan i program eksperimentalnih ispitivanja koji je obuhvatio projektovanje i izradu eksperimentalne instalacije u cilju analize uticaja promene parametara procesa sagorevanja na radne karakteristike peći na pelet. Eksperimentalna instalacija, koja je obuhvatila peć za sagorevanje drvnih peleta deklarisanе snage 8 kWt, sistem za odvođenje dimnog gasa, vagu za merenje trenutne mase peći i sistem za akviziciju tj. prikupljanje merenih parametara, omogućila je kontinualno praćenje ili izračunavanje svih parametara koji su potrebni za analizu procesa sagorevanje (karakterizacija i potrošnja goriva, protok i temperatura vazduha za sagorevanje, sastav i temperatura dimnog gasa, sadržaj nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja, koeficijent viška vazduha u ložištu, temperatura u ložištu, temperature karakterističnih površina peći, kao i temperatura toplog vazduha) i to kao rezultat promene vrste goriva, konstruktivnih karakteristika peći (gorionika) i vrednosti potpritiska u kanalu dimnog gasa, kako pri nominalnom, tako i pri redukovanom toplotnom opterećenju peći. Analizirano je ukupno 36 radnih režima sa različitim kombinacijama variranih parametara, za koje je sagledavan uticaj variranih veličina na energetske (realno ostvarena toplotna snaga i stepen korisnosti) i ekološke (emisija ugljen monoksida) parametre rada razmatranog uređaja za sagorevanje.
 - Na osnovu prikupljenih rezultata zaključeno je da deklarisanе karakteristike peći u pogledu toplotne snage i stepena korisnosti nisu dostignute, čak ni za gorivo i radni režim koji je preporučen od strane proizvođača peći. Stepен korisnosti peći kretao se u rasponu od 56,06 do 80,18%, tako da deklarisanа vrednost od 83% nije ostvarena. Najveći stepen korisnosti od 80,18% ostvaren je za sagorevanje peleta preporučenog kvaliteta, dok je za alternativno gorivo ostvarena maksimalna efikasnost od 77,86%. Ukoliko se uporede rezultati ostvareni za režime koje preporučuje proizvođač peći tj. koji odgovaraju korišćenju gorionika toplotnog kapaciteta 8 kWt i pri potpritisku u kanalu

dimnog gasa od 12 ± 2 Pa, a za dve analizirane vrste peleta, može se konstatovati da je korišćenje alternativnog peleta dovelo do smanjenja ostvarene toplotne snage peći za 1,34 kWt tj. do snižavanja efikasnosti rada za 3,36%. U slučaju redukovane snage, smanjenje ostvarene toplotne snage peći prouzrokovano sagorevanjem alternativnog goriva iznosilo je 0,63 kW, pri čemu je efikasnost rada smanjena za 1,72%. Navedeno upućuje na zaključak da kvalitet peleta ima veoma veliki uticaj na energetske i ekološke performanse rada uređaja za sagorevanje. Takođe, utvrđeno je da kvalitet peleta ima posebno veliki uticaj na emisiju CO, koja se u sprovedenim ispitivanjima kretala od 135 mg/m^3 do čak 2.127 mg/m^3 . Generalno gledano, režimi kod kojih je za preporučeno gorivo registrovano odstupanje od propisanih energetskih i ekoloških karakteristika bili su uvek problematični i pri korišćenju alternativnog goriva, s tim što su pri korišćenju alternativnog goriva identifikovani i dodatni režimi sa nezadovoljavajućim performansama, naročito sa aspekta prekoračenja dozvoljenih emisija CO. Od ukupno 36 ispitivanih radnih režima, ispunjenost standarda po oba kriterijuma, energetskom i ekološkom, zabeležena je u 11 slučajeva, od čega se 8 režima odnosi na korišćenje preporučenog goriva, dok se 3 režima odnose na sagorevanje alternativnog goriva.

- Sve navedeno upućuje na zaključak da se kod uređaja male snage kvalitet sirovine i proces proizvodnje peleta u velikoj meri odražavaju na radne performanse uređaja za sagorevanje i da zato navedeni uređaji zahtevaju korišćenje goriva najvišeg kvaliteta. Pored hemijskih osobina i toplotne moći goriva, utvrđeno je da veliku ulogu imaju i fizičke karakteristike peleta i to posebno nasipna i komadna gustina, koje direktno utiču na potrošnju goriva, ali i na difuziju kiseonika pri sagorevanju, vrednost koeficijenta viška vazduha u ložištu i dalje na temperature dimnog gasa i tok odvijanja procesa sagorevanja u ispitivanoj peći. Navedeni parametri odrazili su se i na sadržaj nesagorelog u čvrstim produktima sagorevanja, kao dodatnog indikatora kvaliteta procesa sagorevanja koji je razmatran u okviru sprovedenih analiza. Veća komadna gustina kvalitetnijeg goriva dovela je do većeg sadržaja nesagorelog u pepelu u

odnosu na pelet lošijeg kvaliteta, iako je korišćenje goriva boljeg kvaliteta generalno rezultovalo povoljnijim performansama rada peći.

- Takođe, nemogućnost dostizanja deklarisanе snage čak ni za pelet preporučenog kvaliteta ukazuje na potrebu za daljim istraživanjima u cilju analize mogućnosti da se eventualno većom potrošnjom goriva ostvare deklarisani parametri rada peći. Navedeno bi se moglo postići promenom predefinisanih brzina kretanja pužnog dozatora i učestalosti doziranja goriva u ložište tj. intervenisanjem u sistemu automatskog upravljanja peći kako bi se uticalo na optimizaciju vremena kratanja i vremena mirovanja u okviru radnog ciklusa pužnog dozatora kojim se gorivo dovodi u ložište. Dalja istraživanja u razmatranoj oblasti trebala bi da razmotre da li bi se optimizacijom trajanja pomenutih faza radnog ciklusa pužnog dozatora omogućilo dostizanje deklarisanе snage analiziranog ložnog uređaja. Pomenuta istraživanja bi takođe zahtevala sprovođenje dodatnih analiza u pogledu pratećih uticaja koje bi pomenuta intervencija imala na energetske i ekološke karakteristike rada razmatranog uređaja.
- Sa aspekta uticaja toplotnog kapaciteta gorionika na energetske i ekološke karakteristike rada peći, zaključeno je da pomenuti parametar ima veći uticaj na ekološke nego na energetske karakteristike rada analiziranog uređaja za sagorevanje. Izmena gorionika nije dovoljna da se poveća/smanji deklarisanа snaga peći pri nepromenjenim podešavanjima sistema automatskog upravljanja uređajem, već je neophodno izvršiti i odgovarajuće podešavanje pomenutog upravljačkog sistema za svaku konstruktivnu izmenu koja utiče na proces sagorevanja goriva u ložištu. U okviru navedenih izmena, potrebno je izvršiti podešavanja kojima bi se, između ostalog, uticalo na brzinu ventilatora vazduha, kao i brzinu kretanja pužnog dozatora kojim se gorivo dovodi u gorionik. S tim u vezi, neophodno je izvršiti optimizaciju rada uređaja i sagledati zajednički uticaj promene konstruktivnih karakteristika i izmenjenih parametara automatske regulacije rada uređaja za sagorevanje peleta.
- Potpritisak u kanalu dimnog gasa, koji je variran u širem opsegu, može u određenoj meri uticati na proces sagorevanja goriva u peći na pelet kako bi se poboljšale njene energetske i ekološke karakteristike rada. Zaključeno je da

niža/viša vrednost potpritiska u pojedinim režimima omogućava ispunjavanje zahteva standarda sa aspekta minimalno propisanih energetskih i ekoloških performansi, koji pri standardnoj vrednosti potpritiska od 12 ± 2 Pa nisu bili ispunjeni. Takođe je zaključeno da uticaj potpritiska u kanalu dimnog gasa ima veći značaj na emisije ugljen monoksida nego na stepen korisnosti analiziranog uređaja za sagorevanje. Pored toga, utvrđeno je da je uticaj potpritiska direktno povezan i sa kvalitetom korišćenog goriva, tako da očekivani efekti promene potpritiska u slučaju jedne vrste goriva ne moraju i najčešće nemaju identične efekte u slučaju sagorevanja alternativnog goriva.

- Sa aspekta rada analiziranog uređaja za sagorevanje pri različitim toplotnim režimima (nominalno/redukovano toplotno opterećenje), zaključeno je da su emisije ugljen monoksida značajno niže pri nominalnim nego pri redukovanim režimima za obe vrste korišćenih peleta. Na ovaj način potvrđeno je da emisije ugljen monoksida zavise od toplotnog opterećenja peći i to tako što su emisije zagađujućih materija najniže pri nominalnom toplotnom opterećenju.
- Pored eksperimentalnih ispitivanja, aktivnosti sprovedene u okviru ove disertacije obuhvatile su modelovanje i numeričku simulaciju procesa sagorevanja peleta u razmatranoj peći na pelet. Proces modelovanja obuhvatio je definisanje metodoloških osnova procesa sagorevanja peleta, uz usvajanje polaznih pretpostavki po pitanju fizičkih i hemijskih karakteristika procesa koji se odvijaju tokom sagorevanja peleta u peći poznatih geometrijskih karakteristika, zatim definisanje matematičke postavke modela i numeričku simulaciju razmatranog fenomena korišćenjem softverskog paketa Ansys Fluent 15.0. Pri definisanju modela korišćen je Ojler-Lagranžov pristup, u okviru koga je gasovita faza tretirana kao kontinualna i definisana osnovnim transportnim jednačinama održanja mase, energije, momenta količine kretanja i hemijskih komponenata, dok je gorivo modelovano kao disperzna faza koja se u vidu sferičnog komada čvrstog ugljeničnog goriva dovodi u domen matematičkog modela. Pored osnovnih transportnih jednačina, matematički su definisani i svi neophodni podmodeli disperzne faze, kao i kinetika procesa sagorevanja (brzine odvijanja hemijskih reakcija i nastajanja/nestajanja hemijskih komponenata). Domen modela, u kom su numerički rešavane parcijalne diferencijalne jednačine matematičke postavke

modela, definisan je na osnovu poznate geometrije peći koja je modelovana u softverskom pod-programu Ansys Design Modeler 15.0. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja omogućili su definisanje polaznih i graničnih uslova koji su neophodni za numeričko rešavanje jednačina usvojenog matematičkog modela. Za postavku i rešavanje modela korišćen je model konačnih zapremina, tako da je domen modela podeljen na 67.201 kontrolnih zapremina. Razvijeni model omogućio je definisanje temperaturskog, strujnog i koncentracionih polja gasnih komponenta unutar usvojenog domena.

- S obzirom na veliki broj eksperimentalnih ispitivanja, u disertaciji su prikazani samo rezultati numeričke simulacije za radne režime koji odgovaraju konstrukciji peći predloženoj od strane proizvođača peći, tj. za konstrukciju koja se odlikuje gorionikom toplotnog kapaciteta 8 kWt. Na taj način, za pomenutu konstrukciju peći numeričkom simulacijom obrađeno je ukupno 12 radnih režima u kojima je varirana vrsta korišćenog goriva, toplotno opterećenje peći i potpritisak u kanalu dimnog gasa. Za pomenute režime dobijeni su rezultati modelovanja koji su obuhvatili: temperaturu u ložištu peći (osrednjenu po zapremini peći), temperatursko, strujno i koncentraciona polja O₂, CO₂ i CO unutar ložišta peći, energetske karakteristike rada peći - ostvarenu toplotnu snagu i stepen korisnosti peći, kao i ekološke karakteristike rada peći - sadržaj ugljen monoksida u izlaznom dimnom gasu, sveden na referentni sadržaj kiseonika u dimnom gasu od 13% v/v.
- Dobijeni rezultati temperaturskih polja unutar ložišta ukazuju na činjenicu da se paljenje goriva i prostiranje plamena ne odvija duž centralne ose simetrije ložišta, već je pomereno ka desnoj površini ložišta, gde se iz tog razloga razvijaju i više temperature u odnosu na levu polovinu ložišta. Usled navedenog, temperatura dimnog gasa koji iz ložišta dospeva u izmenjivač toplote viša je na desnoj strani peći u odnosu na njenu levu stranu, što dovodi do neravnomernog zagrevanja toplog vazduha u izmenjivaču toplote iznad ložišta. Vidljiva posledica navedenog ogleda se u višim temperaturama vazduha za zagrevanje prostorije koje su registrovane na desnoj strani peći u odnosu na temperature vazduha koji napušta peć kroz otvore koji se nalaze na njenoj levoj strani. Dobijeni profili raspodele brzina su u skladu sa geometrijom ložišta, tako da se najveće brzine razvijaju u centralnoj zoni ložišta, dok u zonama pri vrhu ložišta dolazi do vrtloženja gasne

struje usled promene pravca i smera strujanja dimnog gasa i redukcije poprečnog preseka strujnog kanala. Rezultati određivanja polja koncentracije kiseonika pokazuju nešto veću koncentraciju ovog reaktanta (O_2) na levoj strani u odnosu desnu stranu ložišta. Navedeno upućuje na zaključak da se u desnoj polovini ložišta, u kojoj su registrovane više temperature, odvijaju intenzivnije reakcije sagorevanja goriva i intenzivnija reakcija dogorevanja CO u CO_2 . Ovakav zaključak je u skladu i sa dobijenom raspodelom koncentracije CO_2 , gde su veće koncentracije ugljen dioksida registrovane upravo na desnoj strani ložišta peći. Rezultati polja koncentracije ugljen monoksida dodatno potvrđuju navedeni zaključak, pokazujući da su najveće koncentracije registrovane u zoni neposrednog sagorevanja goriva, dok su u ostatku usvojenog domena koncentracije ugljen monoksida niske, jer je glavni deo ovog reaktanta izreagovao i prešao u ugljen dioksid.

- Poređenjem srednjih vrednosti temperatura u ložištu, koncentracije kiseonika u izlaznom dimnom gasu, kao i energetske i ekološke karakteristike rada peći dobijenih modelovanjem i eksperimentalnim istraživanjem utvrđeno je da je postignuto zadovoljavajuće slaganje dve grupe rezultata. Zaključeno je da je predloženi matematički model adekvatno postavljen kako bi se simulirao proces sagorevanja peleta u analiziranoj peći na pelet. Usvojene pretpostavke i osnovne transportne jednačine, kao i kinetika procesa sagorevanja definisana modelom, omogućile su adekvatno predstavljanje razmatranih fenomena i procesa koji se odvijaju pri sagorevanju peleta. Model je pokazao zadovoljavajuću sposobnost da reaguje na promenu uticajnih parametara i uspešno predvidi promenu analiziranih kontrolnih veličina za većinu razmatranih režima.
- S obzirom na relativno dobro slaganje rezultata modelovanja i eksperimentalnih istraživanja, zaključeno je da se razvijeni model može koristiti za poboljšanje rada analizirane vrste ložnih uređaja kako bi se postigla optimizacija procesa sagorevanja i ispunjavanje propisanih normativa u pogledu minimalno zahtevanog stepena korisnosti i maksimalno dozvoljene emisije ugljen monoksida.

Na osnovu istraživanja sprovedenih u toku izrade ove doktorske disertacije moguće je predložiti dalji tok istraživanja koji bi trebao da razmotri uticaj intervenisanja u sistemu

automatskog upravljanja radom peći na mogućnost dostizanja deklariranih parametara rada, kao i rezultujuće efekte na karakteristike rada uređaja za sagorevanje. Naime, kako deklarirana snaga peći nije dostignuta ni za sagorevanje peleta preporučenog kvaliteta, potrebno je razmotriti mogućnost da se eventualno većom potrošnjom goriva ostvare deklarirani parametri rada peći. Navedeno bi se moglo postići promenom predefinisanih brzina kretanja pužnog dozatora i učestalosti doziranja goriva u ložište. Pored toga, kako je ustanovljeno da promena gorionika ima određeni, ali nedovoljan uticaj na povećanje/smanjenje deklarirane snage peći, preporučuje se sprovođenje daljih istraživanja u okviru kojih bi se sagledao zajednički uticaj promene konstruktivnih karakteristika i izmenjenih parametara automatske regulacije rada uređaja za sagorevanje u cilju optimizacije i boljih energetske i ekoloških performansi rada razmatranih uređaja za sagorevanje. Razvijeni matematički model može se dalje koristiti za analizu efekata izmena u odvijanju procesa sagorevanja i postizanja uniformnije temperaturne i strujne slike po preseku ložišta peći. Istovremeno, razvijeni model može da bude osnov za razvoj kompleksnijeg modela koji bi obuhvatio i model razmene toplote, uzeo u obzir formiranje azotnih oksida i preciznije određene kinetičke parametre svake od pojedinačnih faza procesa sagorevanja peleta.

12. LITERATURA

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects: The 2015 Revision*, Data Booklet. ST/ESA/SER.A/377; <http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications>
- [2] International Energy Agency, *Key World Energy Statistics 2015*, http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf
- [3] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2013*, <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2013.pdf>
- [4] United Nations, *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 1992, http://unfccc.int/essential_background/convention/items/6036.php
- [5] United Nations, *United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto Protocol*, 1997, http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/items/6034.php
- [6] United Nations, Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014 Synthesis Report, Fifth Assessment Report*, <http://ar5-syr.ipcc.ch/index.php>
- [7] United Nations, Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change*, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_technical-summary.pdf
- [8] International Energy Agency, *Energy and Climate Change – World Energy Outlook Special Report*, 2015, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf>
- [9] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2015 Factsheet*, Global energy trends to 2040, http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2015/WEO2015_Factsheets.pdf
- [10] European Union, Directive 2009/258/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable energy sources and amending and subsequently repelling Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Official Journal of the European Union, 2009

- [11] Eurostat, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_from_renewable_sources, podaci preuzeti u februaru 2016
- [12] European Renewable Energy Council (EREC), *Renewable Energy in Europe – Markets, Trends and Technologies*, Publication Office of the European Union, Luxemburg, 2010
- [13] Umweltbundesamt (German Federal Environment Agency), *Energy target 2050:100% renewable electricity supply*, 2011
- [14] Eurostat, <http://ec.europa.eu/eurostat>, podaci preuzeti u februaru 2016. godine
- [15] European Commission, Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, *Renewable energy progress report*, Brussels, 2015, <http://eur-lex.europa.eu>
- [16] European Renewable Energy Council (EREC), *Mapping Renewable Energy Pathways towards 2020*, Renewable Energy Policy Action Paving the Way toward 2020 (REPAP 2020), 2011
- [17] European Commission, *Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling*, Brussels, 2010, <http://eur-lex.europa.eu>
- [18] European Commission, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, *A new EU Forest Strategy: for forests and the forest-based sector*, Brussels, 2013, <http://eur-lex.europa.eu>
- [19] European Commission, *State of play on the sustainability of solid and gaseous biomass used for electricity, heating and cooling in the EU*, Brussels, 2014, <http://eur-lex.europa.eu>
- [20] European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling, *Common Implementation Roadmap for Renewable Heating and Cooling Technologies*, Brussels, 2014, www.rhc-platform.org
- [21] European Commission, *Biomass Action Plan*, Brussels, 2005, <http://eur-lex.europa.eu>

- [22] Declaration: Large-scale bioenergy must be excluded from the renewable energy definition, <http://www.biofuelwatch.org.uk/wp-content/uploads/BioenergyOut-Declaration-2.pdf>, 2016.
- [23] Eurostat, <http://ec.europa.eu/eurostat>, podaci preuzeti u februaru 2016. godine
- [24] Energetski bilans Republike Srbije za 2016. godinu, Službeni glasnik Republike Srbije br. 113/2015
- [25] The World Bank, *Serbian Partnership Program Snapshot*, 2015, <http://www.worldbank.org>
- [26] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, Službeni glasnik Republike Srbije br. 101/2015
- [27] Nacionalni akcioni plan Republike Srbije za korišćenje OIE, Službeni glasnik Republike Srbije br. 53/2013
- [28] Mogućnosti i procena primene biomase za grejanje u Srbiji – studija o mogućnostima korišćenja biomase u sistemu daljinskog grejanja – poboljšanje energetske efikasnosti i zamena konvencionalnih goriva (lignita i ulja za loženje) biomasom, USAID, 2010
- [29] Poslovno udruženje “Toplane Srbije”, <http://www.tops.rs>
- [30] Mašinski fakultet Beograd, Institut za nuklearne nauke VINČA, *Analiza raspoloživih tehnologija i opreme za korišćenje briketa i peleta, i mogućnosti njihovog korišćenja kao zamene za korišćenje električne energije za grejanje*, Nacionalni program energetske efikasnosti, NP EE610-12A, 2003.
- [31] European Committee for Standardization, www.cen.eu
- [32] European Committee for Standardization, EN ISO 17225-1:2014 *Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements*, 2014
- [33] European Committee for Standardization, EN ISO 16559:2014 *Solid biofuels – Terminology, Definitions and Descriptions*, 2014
- [34] European Committee for Standardization, EN 15234-1:2011 *Solid biofuels - Fuel quality assurance - Part 1: General requirements*, 2011
- [35] Nussbaumer T., Hustad J. E., *Overview of Biomass Combustion*, 1 In: Bridgewater AV, Boocock DGB, *Developments in thermochemical biomass conversion*, Chapman and Hall, London; 1997

- [36] Leaver R., *Wood Pellet Fuel and The Residential Market*, Andritz, Inc., Northeast Regional Biomass Program, U.S. Department of Energy (DOE), 2001
- [37] Demirbas A., *Combustion characteristics of different biomass fuels*, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 30: 219–230, 2004
- [38] Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S, *A review on biomass as a fuel for boilers*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15: 2262-2289, 2011
- [39] Yin C., Rosendahl L. A., Kær S. K., *Grate-firing of biomass for heat and power production*, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 34: 725-754, No. 6, 2008
- [40] Van Loo S., Koppejan J., *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*, Earthscan, UK, 2008
- [41] Biomass Energy Centre, Reference Library, Facts and Figures, www.biomassenergycentre.org.uk
- [42] Williams A., Jones J.M., Ma L., Pourkashanian M., *Pollutants from the combustion of solid biomass fuels*, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 38: 113-137, 2012
- [43] Schmidl C. Et al., *Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems*, Atmospheric Environment, Volume 45: 7443-7454, 2011
- [44] Bafver, L. S. At al., *Particle emissions from pellet stoves and modern and old-type wood stoves*, Biomass and Bioenergy, Volume 35: 323-329, 2011
- [45] Limously L. At al., *Gasous products and particulate emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets*, Fuel, Volume 107: 323-329, 2013
- [46] Kistler M. Et al., *Odor, gaseous and PM₁₀ emissions from small scale combustion of wood types indigenous to Central Europe*, Atmospheric Environment, Volume 51: 86-93, 2012
- [47] Miguez J. L. At al., *Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16: 3867-3875, 2012.
- [48] <http://www.biofuelmachines.com/wood-pellet-global-market-report-2014.html>

- [49] European Biomass Association (AEBIOM), European Pellet Council, *European Pellet Report – PellCert Project*, 2012, www.aebiom.org
- [50] Austrian Standards Institute, *ÖNORM M7135: Compressed Pieces Produced of Biomass Forestry; Part 1: Wood Briquettes, Wood Pellets; Marking of Conformity; Part 2: Bark Pellets, Bark Briquettes, Bark Sticks; Marking of Conformity*, Vienna, Austria, 2000
- [51] German Institute for Standardisation, *DIN 51731: Testing of solid fuels - compressed untreated wood, requirements and testing*, Berlin, Germany, 1996
- [52] Italian Organization for Standardization, *UNI TS 11263: Solid biofuels, Characterization of pellet for energy purposes*, Roma, 2007
- [53] Swedish Standards Institute, *SS 187120: Biofuels and peat – Fuel pellets – Classification*, Stockholm, 1998
- [54] Hansen M., Rosentoft A., Hayes S., Bateman P., *English Handbook of Wood Pellet Combustion*, 2009
- [55] Obernberger I., Thek G., *The Pellet Handbook, The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*, Earthscan Ltd, UK, 2010
- [56] European Committee for Standardization, *EN ISO 17225-2:2014, Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Graded wood pellets*, 2014
- [57] Alakangas E., *New European Pellet Standards*, European Pellet Conference, Wels, Austria, 2010
- [58] Arranz J.I., Miranda M.T., Montero I., Sepúlveda F.J., Rojas C.V., *Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe*, *Fuel*, Volume 142: 199-207, 2015
- [59] Pirraglia A., Gonzalez R., Saloni D., *Techno-economical Analysis of Wood Pellets Production for U.S. Manufacturers*, *BioResources*, Volume 5, No. 4: 2374-2390, 2010
- [60] A. Garcia-Maraver et al., *Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in domestic pellet-fired boiler*, *Fuel*, Volume 119: 141-152, 2014
- [61] European Pellet Council, *Handbook for the Certification of Wood Pellets for Heating Purposes*, 2011
- [62] <http://www.enplus-pellets.eu/>

- [63] CrossBorder Bioenergy Consortium, Working Group on Small Scale Heating Systems, Sector Handbook: *Small Scale Heating*, <http://www.CrossBorderBioenergy.eu>
- [64] ATMOS, <http://www.atmos.cz>, Jaroslav Cankař a syn – ATMOS, 2013
- [65] GUNTAMATIC, <http://www.guntamatic.com>, GUNTAMATIC Heiztechnik GmbH, 2013
- [66] Van Loo S., Koppejan J., *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*, Earthscan, UK, 2008
- [67] European Union, Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, Official Journal of the European Union, 2009
- [68] European Committee for Standardization, <https://standards.cen.eu/>
- [69] European Committee for Standardization, EN 14785:2006 Residential space heating appliances fired by wood pellets - Requirements and test methods, 2006
- [70] Verma, V. K., Bram, S., De Ruyck, J. *Small scale biomass heating systems: standards, quality labelling and market driving factors—an EU outlook*, Biomass and bioenergy, Volume 33(10): 1393-1402, 2009
- [71] Standort Wieselburg (2011), *Proposal of a Product-Label for small scale Biomass Furnaces*, Project BIOHeatLabel, BIOENERGY 2020+ GmbH, Gratz, Austria
- [72] Verma V. K. , Bram S., Delattin F., Laha P., Vandendael I., Hubin A., et al. *Agro-pellets for domestic heating boilers: standard laboratory and real life performance*, Applied Energy, Volume 90: 17–323, 2012
- [73] Rabaçal M., Fernandes U., Costa M., *Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones*, Renewable Energy, Volume 51: 220-226, 2013
- [74] Sippula O., Hytonen K., Tissari J., Raunemaa T., Jokiniemi J., *Effect of Wood Fuel on the Emissions from a Top-Feed Pellet Stove*, Energy & Fuels, Volume 21: 1151-1160, 2007

- [75] Roy M. M. , Dutta A., Corscadden K., *An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace*, Applied Energy, Volume 108: 298-307, 2013
- [76] European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Official Journal of the European Union, 2010
- [77] Persson T., Nordlander S., Ronnelid M., *Electrical savings by use of wood pellet stoves and solar heating systems in electrically heated single-family houses*, Energy and Buildings, Volume 37: 920–929, 2005
- [78] Fiedler F., Persson T., *Carbon monoxide emissions of combined pellet and solar heating systems*, Applied Energy, Volume 86: 135–143, 2009
- [79] Stahl M., Wikstrom F., *Swedish perspective on wood fuel pellets for household heating: A modified standard for pellets could reduce end-user problems*, Biomass and Bioenergy, Volume 33: 803–809, 2009
- [80] Ohman M., Nordin A., Hedman H., Jirjis R., *Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention*, Biomass and Bioenergy , Volume 27: 597–605, 2004
- [81] González J. F., González-García C. M., Ramiro A., Gañán J., Ayuso A., et al. *Use of energy crops for domestic heating with a mural boiler*, Fuel Process Technology, Volume 87: 717–26, 2006
- [82] Verma, V.K., Bram, S., Gauthier, G., De Ruyck, J., *Evaluation of the performance of a multi-fuel domestic boiler with respect to the existing European standard and quality labels: Part-1*, Biomass and Bioenergy, Volume 35: 80–89, 2011
- [83] Tissari J., Sippula O., Kouki J., Vuori K., Jokiniemi, *Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner*, Energy & Fuels, Volume 22: 2033–2042, 2008
- [84] Mediavilla I, Fernández MJ, Esteban LS. *Optimization of pelletization and combustion in a boiler of 17.5 kWth for vine shoots and industrial cork residue*, Fuel Process Technology, Volume 90: 621–628, 2009
- [85] González J. F., González-García C.M., Ramiro A., Gañán J., González J., Sabio E., et al., *Use of almond residues for domestic heating: Study of the combustion*

- parameters in a mural boiler*. Fuel Process Technology, Volume 86: 1351–1368, 2005
- [86] Carvalho L., Wopienka E., Pointner C., Lundgren J., Verman V. K., Haslinger W., et al. *Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels*, Applied Energy, Volume 104: 286–296, 2013
- [87] Rabaçal M., Fernandes U., Costa M., *Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones*, Renewable Energy, Volume 51: 220–226, 2013
- [88] Eskilsson D., Ronnback M., Samuelsson J., Tullin C., *Optimization of efficiency and emissions in pellet burners*, Biomass and Bioenergy, Volume 27: 541–546, 2004
- [89] Klason T., Bai X.S., *Computational study of the combustion process and NO formation in a small-scale wood pellet furnace*, Fuel, Volume 86: 1465–1474, 2007
- [90] Menghini D., Marra F.S., Allouis C., Beretta F., *Effect of excess air on the optimization of heating appliances for biomass combustion*, Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 32: 1371–1380, 2008
- [91] Qiu G., *Testing of flue gas emissions of a biomass pellet boiler and abatement of particle emissions*, Renewable Energy, Volume 50: 94-102, 2013
- [92] Verma, V. K., Bram, S., Vandendael, I., Laha, P., Hubin, A., De Ruyck, J., *Residential pellet boilers in Belgium: Standard laboratory and real life performance with respect to European standard and quality labels*, Applied Energy, Volume 88: 2628–2634, 2011
- [93] Fernandes, U., Costa, M., *Particle emissions from a domestic pellets-fired boiler*, Fuel Processing Technology, Volume 103: 51–56, 2011
- [94] Yin C., Rosendahl L. A., Kær S. K., *Grate-firing of biomass for heat and power production*, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 34: 725– 754, 2008
- [95] Khan A. A., de Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H., *Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies*, Fuel Processing Technology, Volume 90: 21-50, 2009

- [96] Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalao J.P.S., *Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models*, Applied Energy, Volume 127: 135-140, 2014
- [97] Ruusunen M., *Modeling and control od small-scale biomass combustion for emission reduction*, Energy research at the University of Oulu, Proceedings of the EnePro conference, pp. 75-78, June 3rd, 2009, University of Oulu, Finland
- [98] Korpela T., Ruusunen, M., Zethraeus B., *Control Potential of Different Operating Methods in Small-Scale Wood Pellet Combustion*, ERANET Bioenergy SSC Conference, September 10, 2008, Potsdam, Germany
- [99] Ruusunen, M., Korpela T., Björkqvist, T., *The effect of control parameters to the quality of small-scale wood pellet combustion*, Bioenergy 2009 Conference, August 31 – September 2, 2009, Jyväskylä, Finland
- [100] Korpela T., Ruusunen M., Björkqvist T., Lautala P., *Control structures of a multivariable process applied to small scale biomass combustion*, Automation 09 Seminar, March 17-18, 2009, Helsinki, Finland
- [101] Ruusunen M., *Signal Correlations in Biomass Combustion: an Information Theoretic Analysis*, Ph.D. Thesis, University of Oulu, Finland, 2013
- [102] Verma V. K. , Bram S., Gauthier G., de Ruyck J., *Performance of a domestic boiler as a function of operational loads: part-2*, Biomass and Bioenergy, Volume 35: 272-279, 2011
- [103] Petrocelli D., Lezzi A. M., *CO and NO emissions from pellet stoves: an experimental study*, Journal of Physics: Conference Series 501: 1659-1712, 2014
- [104] Moran J.C., Granada E., Porteiro J., Míguez J.L., *Pellet combustion in stove: performance and emissions statistical approach*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ '03), 2003, Vigo, Spain.
- [105] Yin C., Rosendahl L. A., Ker S.K., *Grate-firing of biomass for heat and power production*, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 34: 725–754, 2008
- [106] Shin D., Choi S., *The combustion of simulated waste particles in a fixed bed*, Combustion Flame, Volume 121:167–180, 2000

- [107] Yin C., Rosendahl L., Ker S.K., Clausen S., Hvid S.L., Hiller T., *Mathematical modeling and experimental study of biomass combustion in a thermal 108MW grate fired boiler*, Energy and Fuels, Volume 22: 1380–1390, 2008
- [108] Collazo J., Porteiro J., Miguez J. L., Granada E., Gómez M. A., *Numerical simulation of a small-scale biomass boiler*, Energy Conversion and Management, Volume 64: 87–96, 2012
- [109] Porteiro J., Collazo J., Patino D., Granada E., Gonzalez J., Miguez J., *Numerical modeling of a biomass pellet domestic boiler*, Energy and Fuels, Vol. 23: 1067-1075, 2009
- [110] Gomez M. A., Comesana R., Feijoo M. A. A., Eguia P., *Simulation of the effect of water temperature on domestic biomass boiler performance*, Energies, Volume 5: 1044-1061, 2012
- [111] Klarson T., Bai X. S., *Computational study on the combustion process and NO formation in a small-scale wood pellet furnace*, Fuel, Volume 86:1465-1474, 2007
- [112] FLUENT: Fluent 6.3.26, User's Guide, Fluent Inc., 2003
- [113] Chaney J., Liu H., Li H., *An overview of CFD modeling of small-scale fixed-bed biomass pellet boilers with preliminary results from a simplified approach*, Energy Conservation and Management, Volume 63:149-156, 2012
- [114] Gomez M.A., Porteiro J., Patino D., Míguez J.L., *CFD modelling of thermal conversion and packed bed compaction in biomass combustion*, Fuel 117: 716–732, 2014
- [115] Collazo J., Porteiro J., Patino D., Miguez J.L., Granada E., Moran J. C., *Simulation and experimental validation of a methanol burner*, Fuel, Volume 88:326-334, 2009
- [116] FLUENT: Ansys Fluent 15.0, Theory Guide, Fluent Inc., 2013
- [117] Bojko M., Branc M., *A definition of the mathematical model of combustion process in stove*, Journal of Applied Science in the Thermodynamic and Fluid Mechanics, Volume 3, No. 1, 2009
- [118] Ahn J., Kim J. J., *Combustion and heat transfer characteristics inside the combustion chamber of a wood pellet boiler*, Journal of Mechanical Science and Technology, Volume 28 (2): 789-795, 2014

- [119] Blasi C. D., Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 34: 47-90, 2008.
- [120] European Committee for Standardization, EN 14785:2006 Residential space heating appliances fired by wood pellets - Requirements and test methods, 2006
- [121] FERUX, <http://www.ferlux.es/espanol/PDF/manual-estufas-pellet.pdf>
- [122] Manić G. N., *Optimizacija i modeliranje sagorevanja peleta od biomase u pećima za domaćinstvo*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2011
- [123] Petrović Bećirović S., Manić N., Stojiljković D., *Impact of Fuel Quality and Burner Capacity on the Performance of Wood Pellet Stove*, *Thermal Science*, Volume 19, Issue 5: 1855-1866, 2015
- [124] Haghgoo M. R., *A comparison of CFD Software packages to find the suitable one for numerical modeling of gasification process*, <http://www.cs.usask.ca/faculty/spiteri/students/>, 2013
- [125] Yang Y. B., Yamauchi H., Nasserzadeh J., Swithenbank J., *Effect of fuel devolatilization on the combustion of wood chips and incineration of simulated municipal solid wastes in a packed bed*, *Fuel*, Volume 82: 2205-2221, 2003
- [126] Jurena T., Hajek J., *Energy consideration in CFD modeling of biomass combustion in an experimental fixed-bed reactor*, *Chemical Engineering Transactions*, Volume 25:803-808, 2011
- [127] Klason T., Bai X. S., *Computational study of the combustion and NO formation in a small-scale wood pellet furnace*, *Fuel* 86: 1465-1474, 2007
- [128] Zahirovic S., Scharler R., Obernberger I., *Advanced CFD modeling of pulverized biomass combustion*, Institute for Resource Efficient and Sustainable Systems, University of Technology, Graz, Austria, <http://www.bios-bioenergy.at>
- [129] Baranski J., *Physical and Numerical Modelling of Flow Pattern and Combustion Process in Pulverized Fuel Fired Boiler*, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2002
- [130] Laidle, K. J., *The development of Arrhenius equation*, *Journal of Chemical Education* 61 (6):494-498, 1984

- [131] Yin C., Kaer S. K., Rosendahl L., Hvid S. L., *Modeling of pulverized coal and biomass cofiring in a 150 kW swirling-stabilized burner and experimental validation*, Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Kobe, Japan, 2009
- [132] Biswas A., *Effect of Chemical and Physical Properties on Combustion of Biomass Particle*, PhD Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2015.

13. PRILOZI

- PRILOG I Pregled standarda i tehničkih uputstava za čvrsta biogoriva**
- PRILOG II Podela čvrste biomase prema poreklu u skladu sa 17225-1:2014**
- PRILOG III Pregled evropskih standarda za uređaje male snage namenjene za sagorevanje čvrstih goriva**
- PRILOG IV Zahtevi koji se odnose na uređaje na drvene pelete za grejanje domaćinstava, u skladu sa EN 14785:2006**
- PRILOG V Poređenje nacionalnih zahteva za sagorevanje biomase u pojedinim zemljama EU [66]**
- PRILOG VI Uticaj promene toplotnog kapaciteta gorionika i potpritiska u kanalu dimnog gasa na energetske i ekološke performanse rada peći na pelet**

PRILOG I

Tabela I-1 Pregled standarda i tehničkih uputstava za čvrsta biogoriva

Oznaka standarda	Naziv standarda
Terminologija	
EN ISO 16559:2014	Solid biofuels - Terminology, definitions and descriptions
Specifikacija i klase goriva	
EN ISO 17225-1:2014	Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 1: General requirements
EN ISO 17225-2:2014	Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Graded wood pellets
EN ISO 17225-3:2014	Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 3: Graded wood briquettes
EN ISO 17225-4:2014	Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 4: Graded wood chips
EN ISO 17225-5:2014	Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 5: Graded firewood
EN ISO 17225-6:2014	Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 6: Graded non-woody pellets
Kvalitet goriva	
EN 15234-1:2011	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 1: General requirements
EN 15234-2:2012	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 2: Wood pellets for non-industrial use
EN 15234-3:2012	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 3: Wood briquettes for non-industrial use
EN 15234-4:2012	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 4: Wood chips for non-industrial use
EN 15234-5:2012	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 5: Firewood for non-industrial use
EN 15234-6:2012	Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use
Uzorkovanje	
EN 14778:2011	Solid biofuels – Sampling
EN 14780:2011	Solid biofuels – Sample preparation
Fizičke i mehaničke karakteristike	
EN ISO 17829:2015	Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets
EN ISO 17831-1:2015	Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets
EN ISO 17831-2:2015	Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 2: Briquettes
EN ISO 18122:2015	Solid biofuels - Determination of ash content
EN ISO 18123:2015	Solid biofuels - Determination of the content of volatile matter
EN ISO 18134-1:2015	Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method
EN ISO 18134-2:2015	Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method
CEN/TR 15149-3:2014	Solid biofuels - Determination of particle size distribution - Part 3: Rotary screen method
CEN/TS 15370-1:2006	Solid biofuels - Method for the determination of ash melting

	behaviour - Part 1: Characteristic temperatures method
EN 14918:2009	Solid biofuels - Determination of calorific value
EN 15149-1:2010	Solid biofuels – Determination of particle size distribution – Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 1 mm and above
EN 15149-2:2010	Solid biofuels – Determination of particle size distribution – Part 2: Vibrating screen method using sieve apertures of 3,15 mm and below
EN 15150:2011	Solid biofuels - Determination of particle density
EN 16126:2012	Solid biofuels - Determination of particle size distribution of disintegrated pellets
Hemijske karakteristike	
EN ISO 16948:2015	Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen
EN ISO 16967:2015	Solid biofuels - Determination of major elements - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti
EN ISO 16968:2015	Solid biofuels - Determination of minor elements
EN ISO 16994:2015	Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine
EN ISO 16995:2015	Solid biofuels - Determination of the water soluble chloride, sodium and potassium content
Obezbeđenje kvaliteta čvrstog biogoriva	
EN 16214-1:2012	Sustainability criteria for the production of biofuels and bioliquids for energy applications - Principles, criteria, indicators and verifiers - Part 1: Terminology
EN 16214-3:2012	Sustainability criteria for the production of biofuels and bioliquids for energy applications - Principles, criteria, indicators and verifiers - Part 3: Biodiversity and environmental aspects related to nature protection purposes
EN 16214-4:2012	Sustainability criteria for the production of biofuels and bioliquids for energy applications - Principles, criteria, indicators and verifiers - Part 4: Calculation methods of the greenhouse gas emission balance using a life cycle analysis approach
Održiva proizvodnja biogoriva	
EN 15234-1:2011	Solid biofuels - Fuel quality assurance - Part 1: General requirements
EN 15234-2:2012	Solid biofuels - Fuel quality assurance - Part 2: Wood pellets for non-industrial use
EN 15234-3:2012	Solid biofuels - Fuel quality assurance - Part 3: Wood briquettes for non-industrial use
EN 15234-4:2012	Solid biofuels - Fuel quality assurance - Part 4: Wood chips for non-industrial use
EN 15234-5:2012	Solid biofuels - Fuel quality assurance - Part 5: Firewood for non-industrial use
EN 15234-6:2012	Solid biofuels - Fuel quality assurance - Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use
Analički postupci i analize	
EN ISO 16993:2015	Solid biofuels - Conversion of analytical results from one basis to another

PRILOG II

Tabela II-1 Podela čvrste biomase prema poreklu u skladu sa ISO 17225-1:2014

1. KLASIFIKACIJA DRVNE BIOMASE		
<i>1.1 Šumsko drvo i drvo iz zasada</i>	1.1.1 Celo drvo bez korena	1.1.1.1 Listopadno
		1.1.1.2 Četinarsko
		1.1.1.3 Brzorastuće šiblje
		1.1.1.4 Žbunje
		1.1.1.5 Smeše i mešavine
	1.1.2 Celo drvo sa korenom	1.1.2.1 Listopadno
		1.1.2.2 Četinarsko
		1.1.2.3 Brzorastuće šiblje
		1.1.1.4 Žbunje
		1.1.1.5 Smeše i mešavine
	1.1.3 Deblo drveta	1.1.3.1 Listopadno
		1.1.3.2 Četinarsko
		1.1.3.3 Smeše i mešavine
	1.1.4 Drvni ostaci od seče	1.1.4.1 Sveže/zeleno, listopadno (uključujući lišće)
		1.1.4.2 Sveže/zeleno, četinarsko (uključujući četine)
		1.1.4.3 Uskladišteno, listopadno
		1.1.4.4 Uskladišteno, četinarsko
		1.1.4.5 Smeše i mešavine
	1.1.5 Panjevi/koren drveta	1.1.5.1 Listopadno
		1.1.5.2 Četinarsko
		1.1.5.3 Brzorastuće šiblje
		1.1.5.4 Žbunje
		1.1.5.5 Smeše i mešavine
	1.1.6 Kora drveta (iz aktivnosti iz oblasti šumarstva)	
1.1.7 Drvo prikupljeno iz parkova, bašta, tokom održavanja deonica pored puteva, vinograda i voćnjaka		
1.1.8 Smeše i mešavine		

<i>1.2 Nus proizvodi i otpad iz industrije prerade drveta</i>	1.2.1 Hemijski netretirano otpadno drvo	1.2.1.1 Drvo bez kore, listopadno
		1.2.1.2 Drvo bez kore, četinarsko
		1.2.1.3 Drvo sa korom, listopadno
		1.2.1.4 Drvo sa korom, četinarsko
		1.2.1.5 Kora drveta (iz industrijske delatnosti)
	1.2.2 Hemijski tretirano otpadno drvo	1.2.2.1 Drvo bez kore
		1.2.2.2 Drvo sa korom
		1.2.2.3 Kora drveta (iz industrijske delatnosti)
		1.2.2.4 Drvno vlakno i sastavni elementi drveta
	1.2.3 Smeše i mešavine	
<i>1.3 Korišćeno drvo</i>	1.3.1 Hemijski netretirano drvo	1.3.1.1 Drvo bez kore
		1.3.1.2 Drvo sa korom
		1.3.1.3 Kora drveta
	1.3.2 Hemijski tretirano drvo	1.3.2.1 Drvo bez kore
		1.3.2.2 Drvo sa korom
		1.3.2.3 Kora drveta
	1.3.3 Smeše i mešavine	
<i>1.4 Mešavine</i>		
2. KLASIFIKACIJA POLJOPRIVREDNE I TRAVNATE BIOMASE		
<i>2.1 Zeljasto bilje porekom iz poljoprivrede i hortikulture</i>	2.1.1 Žitarice	2.1.1.1 Cele biljke
		2.1.1.2 Slamasti delovi
		2.1.1.3 Zrnevlje i semenke
		2.1.1.4 Mahune ili čaure
		2.1.1.5 Smeše i mešavine
	2.1.2 Travnate biljke	2.1.2.1 Cele biljke
		2.1.2.2 Slamasti delovi
		2.1.2.3 Semenke
		2.1.2.4 Čaure
		2.1.2.5 Smeše i mešavine
	2.1.3 Uljarice	2.1.3.1 Cele biljke
		2.1.3.2 Stabljike i listovi

		2.1.3.3 Semenke
		2.1.3.4 Mahune ili čaure
		2.1.3.5 Smeše i mešavine
	2.1.4 Krtolaste biljke	2.1.4.1 Cele biljke
		2.1.4.2 Stabljike i listovi
		2.1.4.3 Koren
		2.1.4.4 Smeše i mešavine
	2.1.5 Mahunaste biljke	2.1.5.1 Cele biljke
		2.1.5.2 Stabljike i listovi
		2.1.5.3 Voće
		2.1.5.4 Čaure
		2.1.5.5 Smeše i mešavine
	2.1.6 Cveće	2.1.6.1 Cele biljke
		2.1.6.2 Stabljike i listovi
		2.1.6.3 Semenke
2.1.6.4 Smeše i mešavine		
2.1.7 Zeljasto bilje prikupljeno iz parkova, bašta, tokom održavanja deonica pored puteva, vinograda i voćnjaka		
2.1.8 Smeše i mešavine		
2.2 Nus proizvodi i otpad iz industrije prerade zeljastgo bilja	2.2.1 Hemijski netretirano otpadno zeljasto bilje	2.2.1.1 Žitarice i travnate biljke
		2.2.1.2 Uljarice
		2.2.1.3 Krtolaste biljke
		2.2.1.4 Mahunaste biljke
		2.2.1.5 Cveće
		2.2.1.6 Smeše i mešavine
	2.2.2 Hemijski tretirano otpadno zeljasto bilje	2.2.2.1 Žitarice i travnate biljke
		2.2.2.2 Uljarice
		2.2.2.3 Krtolaste biljke
		2.2.2.4 Mahunaste biljke
		2.2.2.5 Cveće
		2.2.2.6 Smeše i mešavine
	2.2.3 Smeše i mešavine	
	2.3 Mešavine	

3. KLASIFIKACIJA BIOMASE POREKOM IZ VOĆARSTVA			
<i>3.1 Voćnjaci i voće</i>	3.1.1 Bobičasto voće	3.1.1.1 Cele bobice	
		3.1.1.2 Plod	
		3.1.1.3 Semenke	
		3.1.1.4 Smeše i mešavine	
	3.1.2 Koštunjavo/jezgričavo voće	3.1.2.1 Cele voćke	
		3.1.2.2 Plod	
		3.1.2.3 Koštica/jezgro	
		3.1.2.4 Smeše i mešavine	
	3.1.3 Orašasto voće	3.1.3.1 Cela voćka	
		3.1.3.2 Ljuska/čaura	
		3.1.3.3 Jezgro	
		3.1.3.4 Smeše i mešavine	
	3.1.4 Smeše i mešavine		
	<i>3.2 Nus proizvodi i otpad iz industrije prerade voća</i>	3.2.1 Hemijski netretirani voćni ostaci	3.2.1.1 Bobičasto voće
3.2.1.2 Koštunjavo/jezgričavo voće			
3.2.1.3 Orašasto voće			
3.2.1.4 Komina masline, nastala nakon ekstrakcije ulja masline			
3.2.1.5 Smeše i mešavine			
3.2.2 Hemijski tretirani voćni ostaci		3.2.2.1 Bobičasto voće	
		3.2.2.2 Koštunjavo/jezgričavo voće	
		3.2.2.3 Orašasto voće	
		3.2.2.4 Komina masline, nastala nakon ekstrakcije ulja masline	
		3.2.2.5 Smeše i mešavine	
3.2.2 Smeše i mešavine			
<i>3.3 Smeše i mešavine</i>			
4. KLASIFIKACIJA SMEŠA I MEŠAVINA			
<i>4.1 Smeše</i>			
<i>4.2 Mešavine</i>			

PRILOG III

Tabela III-1 Pregled evropskih standarda za uređaje male snage namenjene za sagorevanje čvrstih goriva

<i>Oznaka standarda</i>	<i>Naziv standarda</i>
EN 12809:2001	Residential independent boilers fired by solid fuel - Nominal heat output up to 50 kW - Requirements and test methods
EN 12815:2001	Residential cookers fired by solid fuel - Requirements and test methods
EN 13229:2001	Inset appliances including open fires fired by solid fuels - Requirements and test methods
EN 13240:2001	Roomheaters fired by solid fuel - Requirements and test methods
EN 14785:2010	Residential space heating appliances fired by wood pellets - Requirements and test methods
EN 15250:2007	Slow heat release appliances fired by solid fuel - Requirements and test methods
EN 15821:2010	Multi-firing sauna stoves fired by natural wood logs - Requirements and test methods
prEN 16510-1*	Residential solid fuel burning appliances - Part 1: General requirements and test methods
prEN 16510-2-1*	Residential solid fuel burning appliances - Part 2-1: Roomheaters
prEN 16510-2-2*	Residential solid fuel burning appliances - Part 2-2: Inset appliances including open fires
prEN 16510-2-3*	Residential solid fuel burning appliances - Part 2-3: Cookers
prEN 16510-2-4*	Residential solid fuel burning appliances - Part 2-4: Independent boilers - Nominal heat output up to 50 kW
EN 15036-1:2006	Heating boilers - Test regulations for airborne noise emissions from heat generators - Part 1: Airborne noise emissions from heat generators operating temperature of 110 °C
EN 15270:2007	Pellet burners for small heating boilers - Definitions, requirements, testing, marking
EN 15332:2007	Heating boilers - Energy assessment of hot water storage systems
EN 15456:2008	Heating boilers - Electrical power consumption for heat generators - System boundaries - Measurements
EN 303-5:2012	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

* u fazi odobravanja

PRILOG IV

Tabela IV-1 Zahtevane karakteristike uređaja male snage na drvni pelet, u skladu sa EN 14785:2006

Toplotno opterećenje (kW)	Efikasnost peći/kotla* (%)	Granična vrednost emisije		
		CO**	Nesagoreli ugljovodonici	Praškaste materije
Nominalno	≥ 75	500 mg/m ³	-	-
Redukovano	≥ 70	750 mg/m ³	-	-

* računato za Hd goriva

** računato za suvi gas i 13% O₂**PRILOG V**

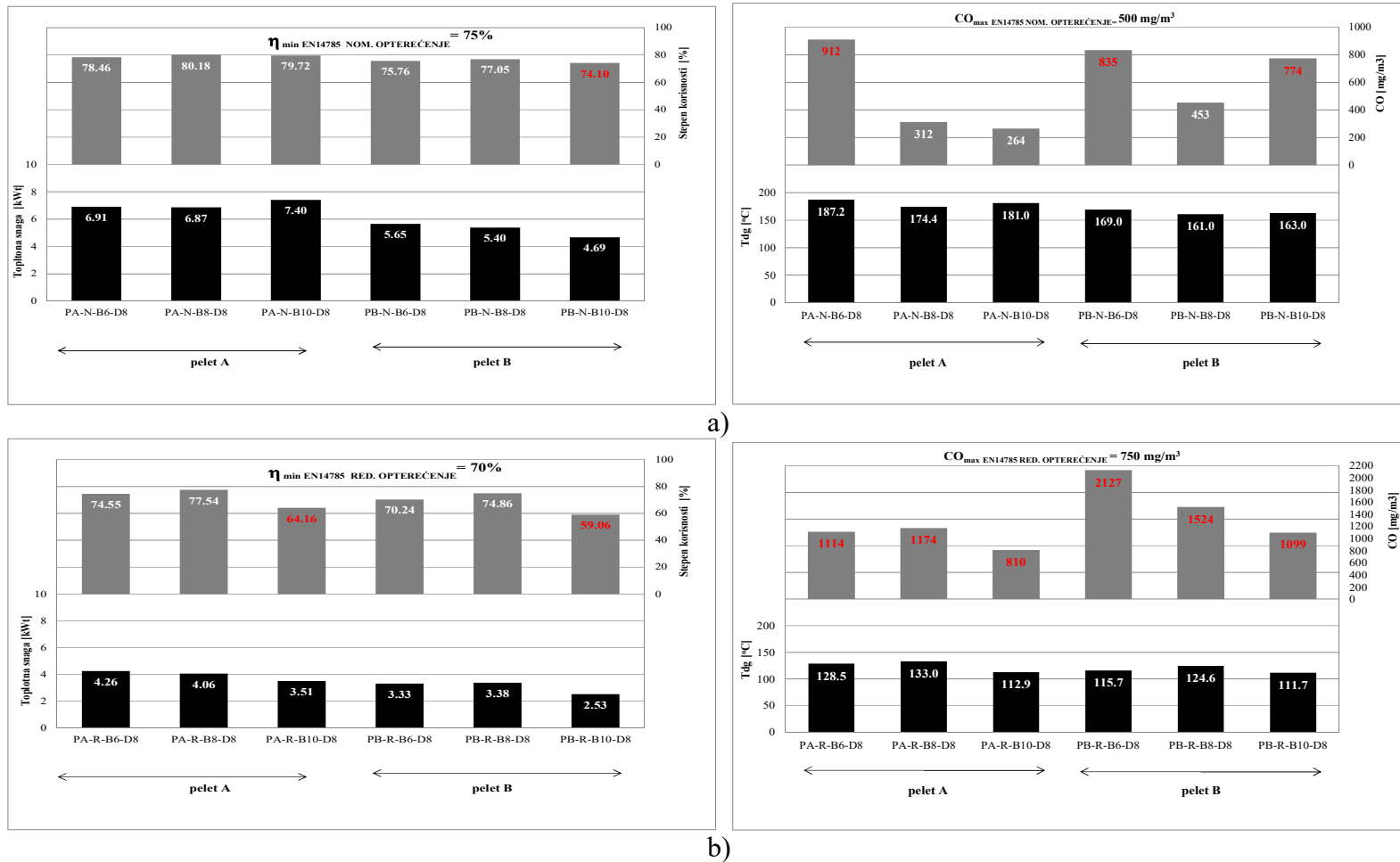
Tabela V-1 Poređenje zahteva standarda za sagorevanje biomase u pojedinim zemljama EU [66]

Nacionalni standard	Efikasnost rada [%]	Toplotna snaga [kW]	Režim rada	Gr. vrednost emisija, za 10% O ₂ , suvi dimni gas, O ^o C, 1013 mbar [mg/m ³]			
				CO	OGC	NO _x	PM
P- oznaka, Švedska	> 80	≤ 25 ^a /100 ^b	automatski	2000	75	-	-
Swan – oznaka, Norveška	≥ 79	≤ 100	nominalni	2000	70	340	70
			redukovani	2000	70	-	-
Blue angel ^c , Nemačka	≥ 90	≤ 15	nominalni	100	5	150	20
	≥ 88		redukovani	300	5	150	ND
	≥ 90	15-50	nominalni	100	5	150	30
	≥ 88		redukovani	250	5	150	ND
UZ-37, Austrija	≥ 90	≤ 400	nominalni	60	3	100	15
			redukovani	135	3	-	-
Flamme Verte ^d , Francuska	≥ 70	≤ 50	manuelni	6500	225	-	165
			automatski	4000	150	-	165
	≥ 70	50-70	manuelni	3750	150	-	165
			automatski	3500	115	-	165
SEI, Irska	≥ 80	≤ 10	automatski	2500	80	-	150
Optimaz, Belgija	≥ 89	≤ 70	nominalni	110	-	120	-
	≥ 89		redukovani				
Optimaz-Elite, Belgija	≥ 91	≤ 70	nominalni	110	-	120	-
	≥ 97		redukovani				

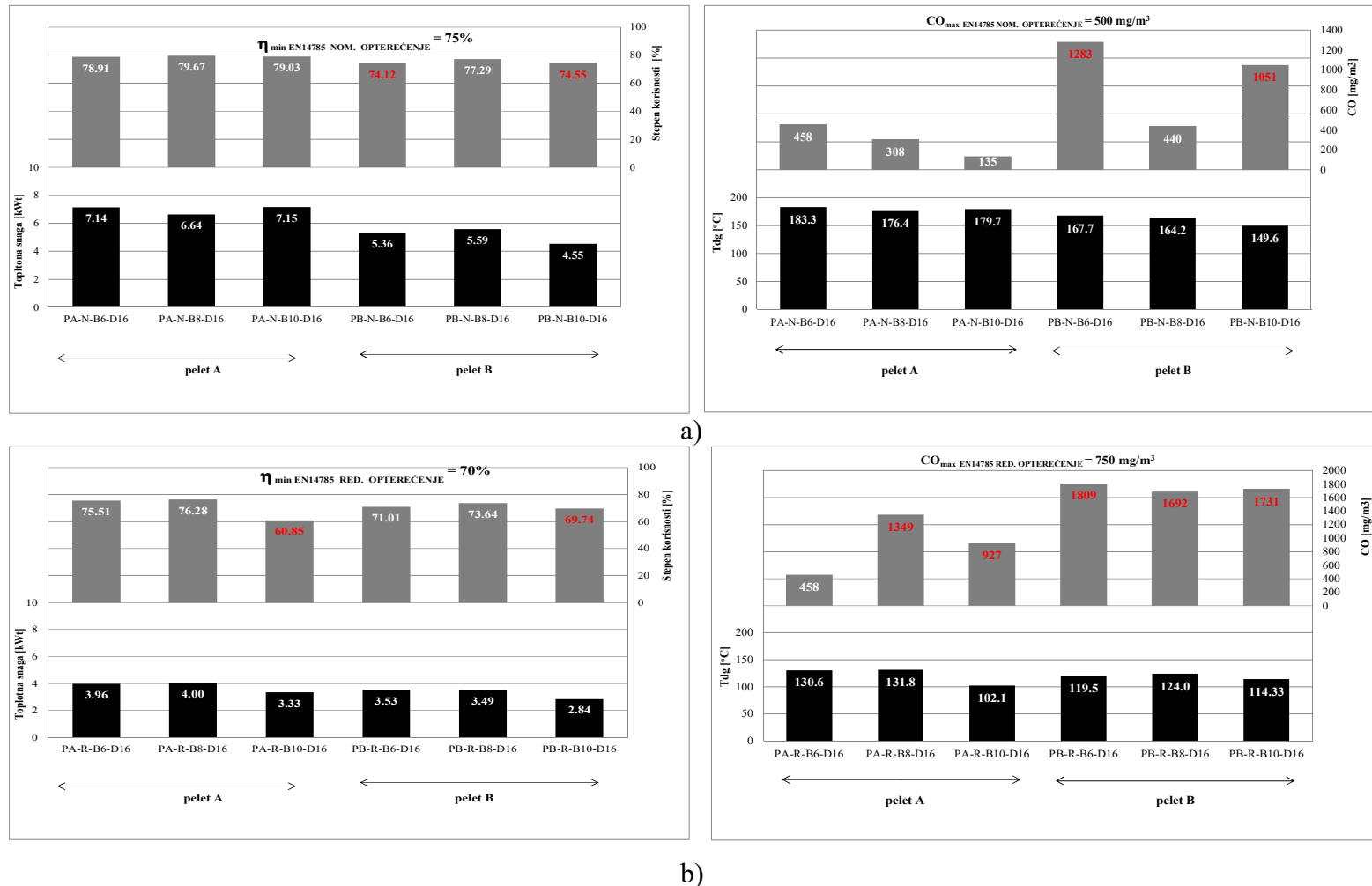
ND – nije definisano

a – samo za gorionike, b – kotlovi sa ili bez rezervoara tople vode, c – vrednosti definisane za suvi dimni gas (O^oC, 1013 mbar) i 13% O₂, d – vrednosti su date u mg/MJ.

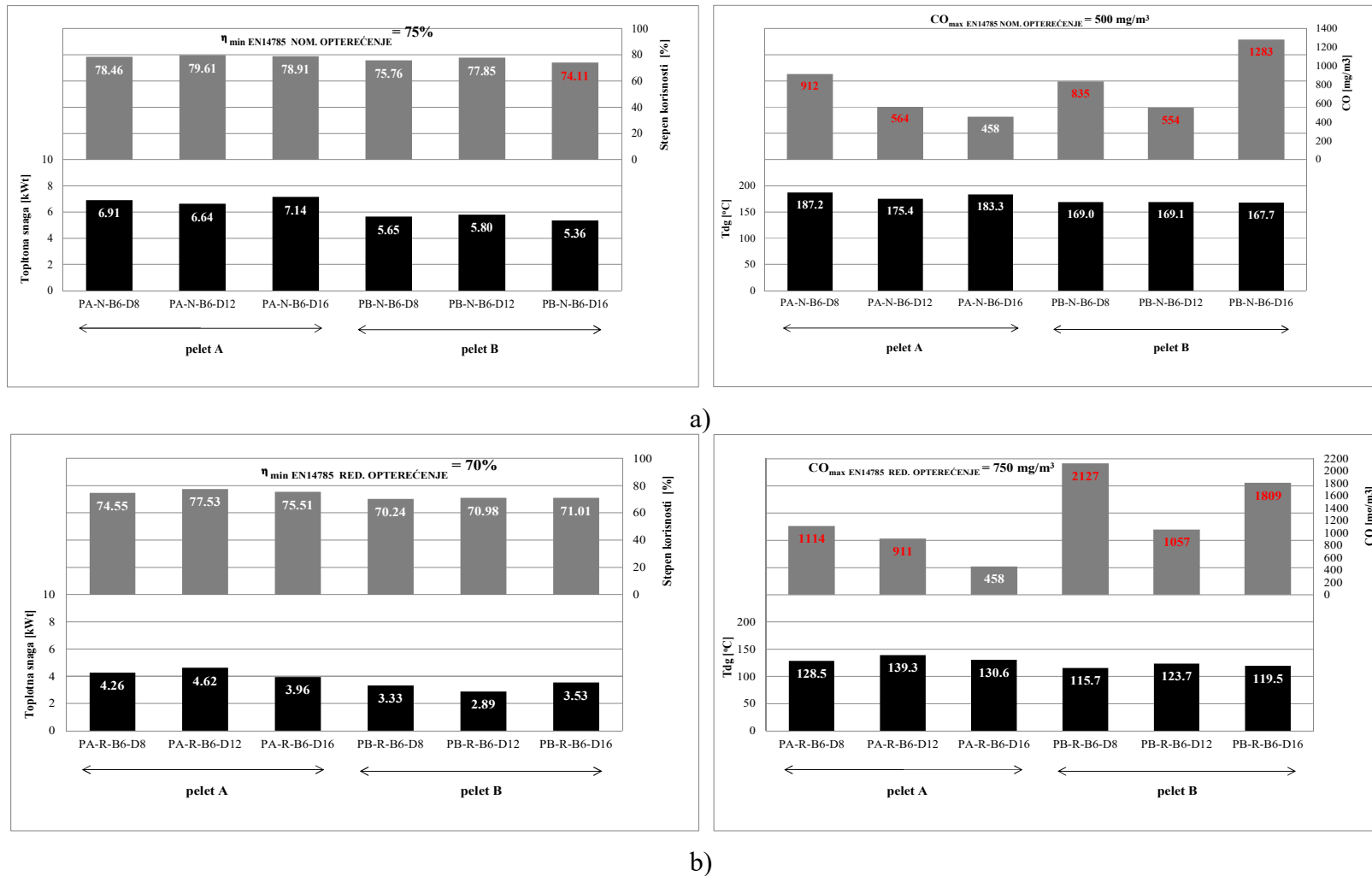
PRILOG VI



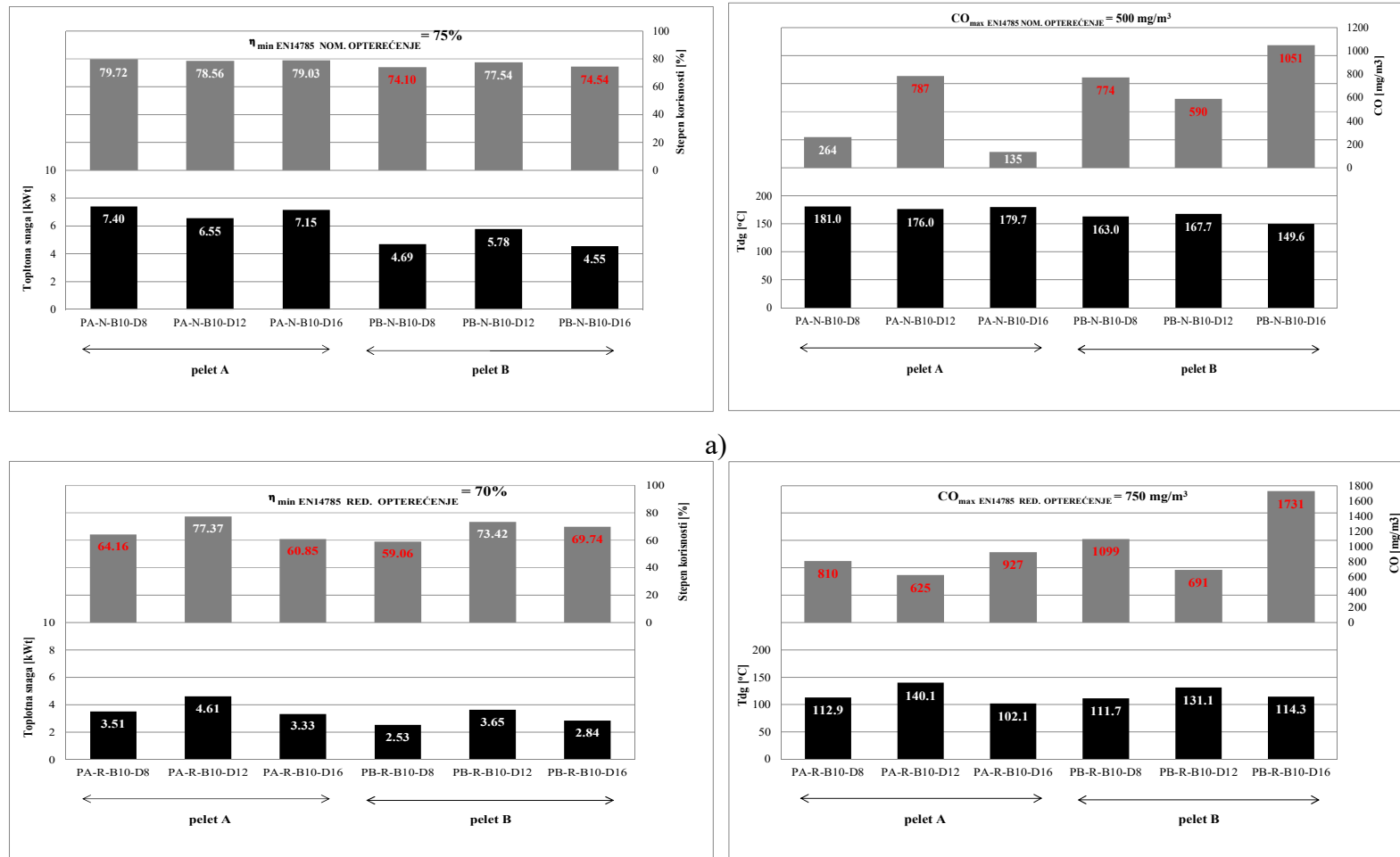
Slika VI-1 Uticaj promene toplotnog kapaciteta gorionika na energetske i ekološke performanse rada peći pri:
 a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i potpritisu u kanalu dimnog gasa od 8 ± 2 Pa



Slika VI-2 Uticaj promene toplotnog kapaciteta gorionika na energetske i ekološke performanse rada peći pri:
 a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i potpritisu u kanalu dimnog gasa od 16 ± 2 Pa



Slika VI-3 Uticaj promene potpritiska u kanalu dimnog gasa na energetske i ekološke performanse rada peći pri:
 a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i za korišćenje gorionika kapaciteta 6 kWt



Slika VI-4 Uticaj promene potpritiska u kanalu dimnog gasa na energetske i ekološke performanse rada peći pri:
 a) nominalnom i b) redukovanom toplotnom opterećenju i za korišćenje gorionika kapaciteta 10 kWt

BIOGRAFIJA AUTORA

Sanja Petrović Bećirović rođena je 1975. godine u Čačku, gde je završila osnovnu školu i Gimnaziju prirodno-matematičkog smera. Fakultetsko obrazovanje stekla je na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, gde je 2000. godine diplomirala na odseku za Termotehniku, sa odbranjenim diplomskim radom na temu “Karakterizacija uglja, ugljenog praha i pepela bloka A2 na Termoelektrani Nikola Tesla A”. Svoje studijsko obrazovanje nastavila je na katedri za Prenos toplote Mašinskog fakulteta Univerziteta *McMaster* u Kanadi, gde se, kao dobitnik stipendije kanadske vlade, bavila istraživačkim radom koji se zasnivao na ispitivanju Marangoni konvekcije, identifikovane kao fenomena prenosa toplote koji bi svoju punu primenu mogao naći u mikrogravitacijskoj sredini. Magistarske studije završila je 2003. godine odbranivši magistarsku tezu pod nazivom “*Marangoni Heat Transfer in Subcooled Nucleate Pool Boiling*”, čime je stekla zvanje *Master of Applied Sciences*. Stečenu magistarsku diplomu nostrifikovala je 2004. godine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Od 2004. godine zaposlena je u kompaniji ENERGOPROJEKT ENTEL a.d. Beograd, gde trenutno radi na poziciji Rukovodioca biroa za ekonomiju, ekologiju i elektro-energetske analize. Tokom višegodišnjeg rada učestvovala je u mnogobrojnim projektima u kojima je razmatran rad i mogućnosti unapređenja postojećih energetske objekata, kao i potencijalna izgradnja novih energetske kapaciteta, kako u regionu, tako i na Bliskom istoku. Bila je deo ekspertske timova zaduženih za implementaciju nacionalnih projekata gazdovanja energijom, izradu studija razvoja energetike gradova Srbije, kao i projekata unapređenja energetske efikasnosti u više od 90 javnih objekata širom Srbije. Član je Društva termičara Srbije, Društva energetičara i licencirani inženjer Inženjerske komore Srbije za oblast energetske efikasnosti zgrada.

Autor je većeg broja naučno-stručnih radova koji su objavljeni u renomiranim međunarodnim i domaćim stručnim časopisima.

Izjava o autorstvu

Potpisana mr Sanja Petrović Bećirović, dipl. inž. maš.

Broj indeksa: 363/94

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

„UTICAJ PROMENE PARAMETARA PROCESA SAGOREVANJA NA ENERGETSKE I EKOLOŠKE KARAKTERISTIKE PEĆI NA PELET“

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 1.09.2016.

Potpis doktoranta

.....

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: mr Sanja Petrović Bećirović, dipl. inž. maš.

Broj indeksa: 363/94

Studijski program: Doktorske studije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu

Naslov rada: **„UTICAJ PROMENE PARAMETARA PROCESA SAGOREVANJA
NA ENERGETSKE I EKOLOŠKE KARAKTERISTIKE PEĆI NA
PELET“**

Mentor: Prof. dr Dragoslava Stojiljković

Potpisana mr Sanja Petrović Bećirović, dipl. inž. maš.

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu.**

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada. Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 1.09.2016.

Potpis doktoranta

.....

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

„UTICAJ PROMENE PARAMETARA PROCESA SAGOREVANJA NA ENERGETSKE I EKOLOŠKE KARAKTERISTIKE PEĆI NA PELET“

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

U Beogradu, 1.09.2016.

Potpis doktoranta

.....

1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo – nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. Autorstvo - nekomercijalno – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. Autorstvo - nekomercijalno – deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. Autorstvo – bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.