

Numeričko-eksperimentalna analiza prikladnosti korištenja poljoprivredne biomase u toplovodnim kotlovima

Horvat, Ivan

Doctoral thesis / Disertacija

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:018726>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ivan Horvat

**NUMERIČKO-EKSPERIMENTALNA
ANALIZA PRIKLADNOSTI KORIŠTENJA
POLJOPRIVREDNE BIOMASE U
TOPLOVODNIM KOTLOVIMA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2020.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Ivan Horvat

**NUMERIČKO-EKSPERIMENTALNA
ANALIZA PRIKLADNOSTI KORIŠTENJA
POLJOPRIVREDNE BIOMASE U
TOPLOVODNIM KOTLOVIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Dović

Zagreb, 2020.



Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Ivan Horvat

**Numerical-experimental suitability
analysis of using agricultural biomass
in hot water boilers**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

Prof. Damir Dović, Phd.

Zagreb, 2020.

Podaci za bibliografsku karticu UDK:

Ključne riječi: Numerička simulacija izgaranja biomase

Smanjenje emisija CO

Smanjenje emisija NO_x

Smanjenje emisija prašine

Peleti iz poljoprivredne biomase

Drvni peleti

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsvo

Institucija: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i
brodogradnje

Mentor: prof. dr. sc. Damir Dović

Broj stranica: 219

Broj slika: 104

Broj tablica: 24

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 94

Datum obrane: 29.10.2020.

Članovi Povjerenstva za ocjenu i obranu prof. dr. sc. Dražen Lončar – predsjednik

doktorskog rada: prof. dr. sc. Ivanka Boras – član

prof. dr. sc. Neven Voća – vanjski član

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i
brodogradnje

ZAHVALA

Ovaj rad nastao je na Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

Iskreno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. DAMIRU DOVIĆU i prof. dr. sc. SREĆKU ŠVAIĆU, koji su me uveli u svijet toplovodnih kotlova i pružili sve potrebne uvjete da se ovaj rad uspješno privede kraju. Bez njihove pomoći i angažmana ovo istraživanje se nikad ne bi ostvarilo.

Zahvaljujem se članovima povjerenstva prof. dr. sc. DRAŽENU LONČARU, prof. dr. sc. IVANKI BORAS i prof. dr. sc. NEVENU VOĆI na savjetima, komentarima i ispravcima ovog rada.

Hvala kolegi PETRU FILIPOVIĆU na potpori i pomoći koju mi je pružio tijekom izrade ovog rada i laborantu ŽELJKU BADŽEKU na pomoći u laboratoriju.

Posebno hvala tvrtki „Centrometal d.o.o.“ iz Macinca na čelu S TIHOMIROM ZIDARIĆEM i DANIJELOM NOVAKOM na susretljivosti i donaciji opreme potrebne za provedbu ovog ispitivanja.

Na kraju se zahvaljujem mojoj Aniti, roditeljima, obitelji i prijateljima na stalnoj podršci, razumijevanju i strpljivosti tijekom svih ovih godina.

Zagreb, listopad 2020.

Ivan Horvat

SAŽETAK

Trenutno biomasa zauzima najveći udio u obnovljivim izvorima energije koji sudjeluju u ukupnoj potrošnji primarne energije u EU. Direktno izgaranje biomase u formi drva je ujedno i najstariji izvor energije poznat čovjeku. Izgaranje svih krutih goriva, pa tako i biomase, u ložištima kućanskih uređaja predstavlja značajan izvor onečišćenja okoliša. To se posebno odnosi na emisije hlapivih organskih spojeva (VOC), policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) i čestica (PM). Tako smo nerijetko, a naročito tijekom zimskih mjeseci, suočeni s povećanim udjelom sitnih lebdećih čestica u atmosferi. Brojna su istraživanja pokazala da postoji uska veza između izloženosti povećanim udjelima navedenih spojeva te srčanih, krvožilnih i plućnih bolesti, a kao glavni izvori smatraju se promet (naročito dizelski motori) i izgaranje krutog goriva. Osim navedenih, izgaranjem biomase javljaju se i značajne emisije ugljikovog monoksida (CO) i dušikovih oksida (NO_x), a možemo isto pretpostaviti i za dioksine i furane.

Danas, zbog ostvarenog napretka u tehnologiji i razumijevanju procesa izgaranja biomase, njeno iskorištavanje direktnim izgaranjem doživljava ponovni rast. Najniže emisije štetnih tvari postižu se izgaranjem peletirane biomase. Pelet čine komprimirana vlakna drveta s jako malom količinom vode. Sve stroži ekološki zahtjevi EU, naročito u pogledu emisija štetnih tvari, zahtijevaju kontinuirani razvoj novih konstrukcija toplovodnih kotlova koji kao gorivo koriste neki oblik krute biomase.

Prilikom stupanja na snagu, Direktiva o ekološkom razvoju proizvoda smanjila je za toplovodne kotlove koji kao gorivo koriste krutu biomasu maksimalno dozvoljene emisije ugljikovog monoksida šest puta te emisije organskih plinovitih spojeva (OGC) i prašine četiri puta. Osim navedenog, uvedena je i granična vrijednost emisija dušikovih oksida.

U cilju postizanja niskih emisija polutanta, za izgaranje potrebno je koristiti kvalitetne pelete. Kvaliteta peleta u EU izražava se ENplus Certifikatom koji razvrstava pelete u različite klase A1, A2, i B (za drvne pelete) te A i B (za nedrvne pelete). Prepreka širem korištenju drvnog peleta, a naročito kvalitetnog (klase A1) je njegova cijena koja je na tržištu RH veća od cijene plina. Ovdje valja napomenuti i činjenicu da je certifikacija peleta dobrovoljna, tako da velik

dio peleta dostupnog na tržištu, a i onog iz kućne radinosti ne zadovoljava niti zahtjevima za klasu A2.

Emisije štetnih tvari postaju još veći problem ako se umjesto klasične drvene biomase koriste razni ostaci iz poljoprivredne proizvodnje, koji postaju sve traženija vrsta goriva zbog svoje niske cijene (26% jeftiniji u odnosu na prirodni plin). Pojam „razni ostaci“ se prvenstveno odnosi na žetveni ostatak ratarskih kultura koji su u pravilu sporedni produkt u poljoprivrednoj proizvodnji. Mala energetska gustoća (ogrjevna vrijednost/volumen) slamnatog materijala u osnovnoj formi otežava njihovu primjenjivost za izgaranje u kućanskim ložištima. Zbog toga slamnati materijal u obliku peleta ima puno veći potencijal za takav način korištenja.

Za razliku od izgaranja klasične drvene biomase, izgaranje ostataka iz poljoprivredne proizvodnje povezano je s nekoliko izazova. Glavni izazovi su povezani uz značajno veće emisije polutanata (to se naročito odnosi na ugljikov monoksid, dušikove okside i prašinu, a može pretpostaviti isto za dioksine i furane), nižu toplinsku učinkovitost za istu snagu te problemi vezani uz taljenje pepela. Kao najznačajniji problem, uz puno veću količinu pepela prisutnog u gorivu, javlja se njegova niska temperatura taljenja. Isto može rezultirati ozbiljnim problemima u radu, što uključuje taloženje i aglomeraciju na rešetci (na taj način utječe na dobavu zraka za izgaranje) i stijenkama za izmjenu topline (smanjenje snage i korozija).

Ovo istraživanje odnosi se na rješavanje prethodno navedenih problema za toplovodne kotlove manjih snaga koji se koriste u rezidencijalnom sektoru. Sam rad se može podijeliti u tri dijela. U prvom dijelu eksperimentalno su istražena fizikalna i kemijska svojstva poljoprivredne biomase te njezine karakteristike prilikom izgaranja u toplovodnom kotlu. Dobiveni rezultati uspoređeni su s onima dobivenim za drvene pelete te su utvrđene značajne razlike u svojstvima i karakteristikama prilikom izgaranja. Slijedom toga odabrani su peleti iz slame uljane repice kao, iz tehničkog aspekta, najprikladnijeg goriva za izgaranje u kućanskom toplovodnim kotlovima.

U drugom dijelu, s ciljem boljeg razumijevanja i određivanja mjesta intenzivnijeg odvijanja kemijskih procesa izgaranja unutar kotla, provedeno je numeričko modeliranje procesa izgaranja u programskom paketu Ansys Fluent. Numerički model je validiran za slučaj izgaranja peletirane drvene biomase. Za razliku od ostalih modela dostupnih u literaturi, razvijeni model ne koristi korisnički definirane funkcije (UDF) te je kao takav, upravo zbog svoje

dostupnosti i jednostavnosti, prikladniji za korištenje u industriji. Temeljem tog modela određena su temperaturna polja i strujanje dimnih plinova kao i područja intenzivnijeg odvijanja kemijskih reakcija izgaranja. Također dobivene su spoznaje o mehanizmima nastajanja tih polja odnosno parametrima koji utječu na intenziviranje brzine reakcija (parametri turbulencija, temperatura, udio neizgorelih plinova). Pri tome se pretpostavilo da će zaključci dobiveni za drvenu biomasu vrijediti i za peletirane ostatke iz poljoprivredne proizvodnje.

U trećem dijelu je slijedom rezultata dobivenih iz prvog i drugog dijela dano ukupno devet smjernica za izradu prototipa komercijalnog kotla na biomasu iz poljoprivrednih ostataka, od kojih su dvije analizirane numerički i eksperimentalno. Numeričke simulacije predloženih konstrukcijskih smjernica validirane su eksperimentalno za slučaj drvene biomase te su poboljšanja eksperimentalno kvantificirana za slučaj biomase iz poljoprivrednih ostataka. Za oba slučaja utvrđena su smanjenja emisija ugljikovog monoksida, dušikovih oksida i prašine.

Ključne riječi:

Numerička simulacija izgaranja biomase

Smanjenje emisija CO

Smanjenje emisija NO_x

Smanjenje emisija prašine

Peleti iz poljoprivredne biomase

Drvni peleti

EXTENDED ABSTRACT

Currently, biomass accounts for the largest share of renewable energy sources that participate in total primary energy consumption in the EU. Direct combustion of biomass in the form of wood is the oldest energy source known to man. Solid fuel combustion, including biomass, in domestic combustion appliances represents a significant source of environmental pollution. This is especially valid for volatile organic compound (VOC), polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) and dust (PM) emissions. Thus, we are very often faced with increased content of fine particulate matter in the atmosphere (especially during the winter months). Numerous studies have shown that there is a close relationship between the exposure to increased proportions of these compounds and heart, circulatory and pulmonary diseases, with traffic (especially diesel engines) and solid fuel combustion being the main sources. In addition, biomass combustion systems are the cause of a significant amount of carbon monoxide (CO) and nitrogen oxide (NO_x) emissions, and we can assume the same for dioxins and furans.

Today, because of the progress made in technology and understanding of the biomass combustion process, its exploitation through direct combustion is experiencing a new take-off. The lowest emissions are achieved when pelleted biomass is used. Pellets consist of compressed wood fibers with very little water content. Increasingly stringent environmental requirements of the EU, particularly regarded to pollution emissions, require the continuous development of new hot water boiler designs.

EcoDesign Directive has in the case of hot water boilers that burn solid biomass reduced the maximum permissible carbon monoxide emissions six times and organic gaseous compounds (OGC) and dust emissions four times. In addition, the nitrogen oxide emission limit value is also introduced. The quality of pellets in the EU is expressed by the ENplus Certificate, which classifies pellets into different classes A1, A2, and B (for woody pellets) and A and B (for non-woody pellets). An obstacle to the wider use of quality pellets (class A1) is in its price, which is higher than the gas price on the Croatian market. It should also be noted that the certification of pellets is voluntary, so much of the pellets available on the market, as well as those home-made, do not even meet the requirements set for A2 class.

Emissions are becoming an even bigger problem if, instead of wooden biomass, various residues from agricultural production are used. This is very important as agro-fuels are becoming more and more demanded fuel type due to its low cost (26% cheaper compared to the natural gas). The term residues refers primarily to the residue of arable crops, which is generally considered as a by-product of the agricultural production. The low energy density (calorific value/volume) of straw material primary form aggravates their applicability in the household combustion appliances. Therefore, straw material in the form of pellets has a greater potential for becoming a fuel used in household appliances.

Unlike conventional wood biomass combustion, the combustion of agricultural residues has several related challenges. The main challenges are associated with significantly higher pollutant emissions (this applies especially to CO, NO_x, dust and same can be presumed for dioxins and furans), lower efficiency for the same power, and ash related problems. The most significant problem, along with the much greater fuel ash content, is its low melting point. This can result in serious operating problems, which include deposition and agglomeration of ash on the grid (thus affecting the supply of combustion air) and heat exchange surfaces (reducing heat output and corrosion).

This research is focused on solving the above mentioned problems in the case of hot water boilers that are used in the residential sector. Research can be divided into three parts. In the first part, the physical and chemical properties of agricultural biomass and the combustion characteristics have been investigated experimentally. The results were compared with those obtained for wood pellets and significant differences were found. Consequently, rapeseed straw pellets were selected as, from the technical point of view, the most suitable fuel for the combustion in domestic hot water boilers.

In the second part, in order to determine places with more intense chemical combustion reactions inside the boiler, numerical modeling of the combustion process in the hot water boiler was conducted in the Ansys Fluent software. Unlike other models available in the open literature, the developed model is not based on user-defined functions (UDFs) and, as such due to its availability and simplicity, is more applicable in the industry. The numerical model has been developed and validated for the combustion of pelleted wood biomass. Based on the developed model, temperature fields and flue gas flows were determined, as well as the areas with more intense rates of combustion reactions. Also, important knowledge about the

mechanisms to form these fields and parameters that influence the acceleration of combustion rate (turbulence, flue gas temperatures, fraction of unburned gases) was gained. It was assumed that the conclusions obtained for wood biomass can also be applied to the pelleted residues from agricultural production.

In the end, following the results obtained from the first two parts, a total of nine design guidelines were given for the production of a prototype of the commercial biomass boiler burning agricultural residues. Two of the proposed design solutions were analysed numerically and experimentally. Numerical simulations of the proposed design solutions have been validated experimentally for the case of wood biomass combustion, while improvements in the case of agricultural residues have been experimentally quantified. In both cases, the reductions in carbon monoxide, nitrogen oxide and dust emissions were found.

Objective and hypothesis of the research

This research is based on the hypothesis that by proper selection of low quality biomass or their mixture and new design solutions, it is possible to, in compliance with all environmental requirements of European standards, directly burn low quality biomass (e.g. residues from agricultural production) in hot water boilers at the conventional modes of operation.

The objectives of this research are:

- Analytically and experimentally investigate the characteristics of certain biomass types, available in the Republic of Croatia, during combustion in the hot water boilers in order to select the most appropriate fuel from the ecological and technical point of view (e.g. emissions of pollutants, ash slagging and deposition of unburned substances).
- Conduct numerical modeling of the combustion process in the hot water boiler, with model validation based on the obtained experimental data. The aim is to estimate temperature fields, fields where intense chemical reactions take place and flue gas composition in certain parts of the analysed hot water boiler.
- Numerically and experimentally investigate the effect of the proposed design solutions of the hot water boiler combustion chamber on the reduction of flue gas emissions.

Scientific contribution

The scientific contribution includes:

- determining the applicability of the particular residue from agricultural production (with chemical analysis) for the combustion in residential hot water boilers
- experimentally validated results of the solid biomass (pellets) combustion process numerical modeling in the hot water boiler and burner
- experimentally validated results of the flue gas combustion process numerical modeling in the insert unit for subsequent combustion (honeycomb and plate structure)
- extension of knowledge on the mechanisms of pollutant emission reduction depending on the working and design parameters
- guidelines for the development of a commercial boiler prototype fueled by agricultural residues that meet all the requirements of EN standards with regard to pollutant emissions, energy efficiency, construction and usage
- calculation model for determining the hot water boiler thermal efficiency by the indirect method

Conclusion

Numerical and experimental investigations conducted in this study indicate that by implementing the proposed design solutions it is possible to burn pellets from agricultural residues in hot water boilers with all requirements of the EN standards (pollutant emissions, energy efficiency, construction and usage) being met. The advantage of the proposed solution is that it can be easily installed as a “complete solution” in almost all residential combustion appliances.

Keywords:

Numerical modeling of biomass combustion process

CO emission reduction

NO_x emission reduction

Dust emission reduction

Pellets from agricultural residues

Wood pellets

SADRŽAJ

SAŽETAK	II
EXTENDED ABSTRACT	V
SADRŽAJ	IX
POPIS SLIKA	XII
POPIS TABLICA	XV
POPIS OZNAKA	XVI
1. UVOD	1
1.1 Opis problema.....	1
1.2 Cilj i hipoteza istraživanja	5
1.3 Znanstveni doprinos.....	6
2. PREGLED LITERATURE	7
2.1 Biomasa	7
2.1.1 Karakteristike biomase	8
2.1.2 Izgaranje biomase.....	10
2.1.3 Emisije polutanata koje su posljedica izgaranja biomase.....	13
2.1.4 Biomasa u formi peleta.....	22
2.1.5 Poljoprivredna biomasa	24
2.2 Numeričko modeliranje izgaranja biomase	29
2.2.1 Diskretizacija metodom konačnih volumena pri stacionarnim uvjetima.....	29
2.2.2 Pristup matematičkom modeliranju izgaranja biomase.....	31
2.2.3 Pregled modela izgaranja krutog goriva (biomase).....	46
3. MATERIJALI I METODE	48
3.1 Korišteni peleti.....	48
3.2 Eksperimentalni postav	49
3.2.1 Postupak određivanja toplinskog učina.....	50
3.2.2 Analiza dimnih plinova i određivanje toplinske učinkovitosti	51
3.2.3 Ostala mjerenja.....	54
3.2.4 Provedba mjerenja.....	55
3.2.5 Mjerenja emisija provedena od strane akreditiranog laboratorija.....	57

3.3	Model proračuna toplinske učinkovitosti	60
3.3.1	<i>Van der Waalsova jednadžba stanja</i>	60
3.3.2	<i>Proračun idealnog izgaranja</i>	61
3.3.3	<i>Proračun realnog izgaranja</i>	63
3.4	Numeričke simulacije izgaranja.....	67
3.4.1	<i>Numeričko-eksperimentalna simulacija procesa izgaranja u toplovodnom kotlu</i>	68
3.4.2	<i>Numerička simulacija naknadnog izgaranja na sačastom umetku za naknadno izgaranje</i>	73
3.4.3	<i>Numerička simulacija naknadnog izgaranja na lamelnom umetku za naknadno izgaranje</i>	75
4.	REZULTATI I ANALIZA	77
4.1	Fizikalno-kemijska analiza korištenih peleta.....	77
4.2	Temperature taljenja pepela korištenih peleta	80
4.3	Fizikalno-kemijska analiza ostatka nakon izgaranja.....	81
4.4	Usporedna analiza toplinske učinkovitosti i emisija (CO i NO _x) dobivenih izgaranjem peleta	83
4.5	Detaljna analiza toplinskih/kemijskih gubitaka i emisija polutanata (CO i NO _x)	89
4.5.1	<i>Drveni peleti (PD2)</i>	89
4.5.2	<i>Peleti iz slame uljane repice (PUR)</i>	95
4.6	Numeričke simulacije izgaranja.....	101
4.6.1	<i>Numeričko-eksperimentalna simulacija procesa izgaranja u toplovodnom kotlu</i>	101
4.6.2	<i>Numerička simulacija naknadnog izgaranja u sačastom umetku</i>	118
4.6.3	<i>Numerička simulacija naknadnog izgaranja u lamelnom umetku</i>	123
4.7	Detaljna analiza emisija polutanata (CO i NO _x) uz konstrukcijske izmjene	128
4.7.1	<i>Drveni peleti (PD2)</i>	128
4.7.2	<i>Peleti iz slame uljane repice (PUR)</i>	134
4.8	Mjerenja emisija provedena od strane akreditiranog laboratorija.....	137
5.	PRIJEDLOG KONSTRUKCIJSKIH IZMJENA	145
5.1	Ugradnja plamenika koji omogućuje izgaranje peleta s većim sadržajem pepela.....	144
5.2	Ugradnja sačastog umetka za naknadno izgaranje.....	145
5.3	Ugradnja lamelnog umetka za naknadno izgaranje	146
5.4	Šamotiranje ložišta.....	147
5.5	Ugradnja mehaničke prepreke unutar plamenika tzv. „strugač“	148
5.6	Veći prostor za skupljanje pepela	149
5.7	Ugradnja nastavka za miješanje i vrtloženje na izlasku iz plamenika	149

5.8	Ugradnja dodatnog fotosenzora	150
5.9	Ugradnja sustava filtera na izlasku iz kotla	150
6.	ZAKLJUČAK	152
7.	PRILOZI.....	155
	Prilog A: Tablice	156
	Prilog B: Europski standardi	158
	Prilog C: Mjerna nesigurnost pri određivanju toplinske učinkovitosti toplovodnog kotla	167
	Prilog D: Vremenski prikaz emisija završnog mjerenja od strane Akreditiranog laboratorija	181
8.	LITERATURA.....	185
9.	ŽIVOTOPIS	196

POPIS SLIKA

Slika 1. Udio obnovljivih izvora energije i biogoriva u EU (podaci za 2016.) [1]	1
Slika 2. Kružni ciklus ugljika i energije u prirodi [35].....	7
Slika 3. Izgaranje čestice biomase tvari [11].....	11
Slika 4. CO emisije u funkciji pretička zraka [40]	14
Slika 5. Emisije ugljikovodika u funkciji CO emisija za razna ložišta [41].....	14
Slika 6. Kemijske reakcije prilikom stupnjevanog dovođenja zraka za izgaranje [42].....	15
Slika 7. Nastanak NO _x iz goriva [40]	16
Slika 8. Odnos između sadržaja dušika u gorivu i emisija NO _x ; udio N koji oksidira u NO _x [44]	17
Slika 9. Mehanizmi nastajanja čestica i aerosola [45].....	19
Slika 10. Svojstva glavnih vrsta aerosola generirani prilikom izgaranja biomase [46].....	20
Slika 11. Tehnologije smanjenja emisija čestica [46]	21
Slika 12. Kontrolni volumen [66].....	30
Slika 13. Turbulentni granični sloj kod nastrujavanja na ravnu ploču	35
Slika 14. Izgled mreže kontrolnih volumena kod primjene metode zidnih funkcija, odnosno metode uz stijenku [9].....	37
Slika 15. Fotografije korištenih peleta.....	48
Slika 16. Ispitna linija.....	50
Slika 17. Mjerna linija za analizu dimnih plinova [7]	52
Slika 18. Korišteni kotao [85]	55
Slika 19. Presjek plamenika Blaze Harmony XS 26 [86].....	56
Slika 20. CAD model prolaza dimnih plinova s označenim temperaturnim mjernim mjestima	56
Slika 21. Prikaz toplovodnog kotla s mrežom konačnih volumena	68
Slika 22. Prikaz plamenika s mrežom kontrolnih volumena	70
Slika 23. Modeliranje ulaznih parametara „virtualne“ površine – ulazne površine plinova nastalih izgaranjem biomase	71
Slika 24. Sačasti umetak za naknadno izgaranje	73
Slika 25. Prikaz sačastog umetka za naknadno izgaranje s mrežom kontrolnih volumena.....	73
Slika 26. Grafički prikaz korištenih rubnih uvjeta	74
Slika 27. Lamelni umetak za naknadno izgaranje	75
Slika 28. Prikaz lamelnog umetka za naknadno izgaranje s mrežom kontrolnih volumena	75
Slika 29. Usporedba sadržaja C, H, O (suha tvar, bez pepela) [89]	79
Slika 30. Usporedba sadržaja N, S, Cl (suha tvar) [89].....	79
Slika 31. Odnos Si/(Ca+Mg) i SST [89]	81
Slika 32. Odnos (Si+P+K)/(Ca+Mg) i SST [89]	81
Slika 33. Analiza ostatka nakon izgaranja [89]	82
Slika 34. Emisije plinova generiranih izgaranjem PPL [89]	84
Slika 35. Emisije plinova generiranih izgaranjem PUR [89]	84
Slika 36. Emisije plinova generiranih izgaranjem PD1 [89].....	85
Slika 37. Usporedba emisija polutanata [89].....	86
Slika 38. Usporedba NO _x emisije u ovisnosti o sadržaju dušika u gorivu [89].....	87
Slika 39. Relativni toplinski gubitak osjetne topline u ovisnosti o pretičku zraka	90
Slika 40. Relativni kemijski toplinski gubitak nepotpunog izgaranja u ovisnosti o pretičku zraka	91
Slika 41. Ostvarena toplinska učinkovitost u ovisnosti o pretičku zraka	91
Slika 42. Temperature dimnih plinova u ložištu u ovisnosti o pretičku zraka	92

Slika 43. Temperature dimnih plinova u konvektivnom dijelu u ovisnosti o pretičku zraka	92
Slika 44. Temperature dimnih plinova na izlazu iz kotla u ovisnosti o pretičku zraka	93
Slika 45. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	93
Slika 46. NO _x emisije u ovisnosti o pretičku zraka	94
Slika 47. Relativni toplinski gubitak osjetne topline u ovisnosti o pretičku zraka	96
Slika 48. Relativni kemijski toplinski gubitak nepotpunog izgaranja u ovisnosti o pretičku zraka	96
Slika 49. Ostvarena toplinska učinkovitost u ovisnosti o pretičku zraka	97
Slika 50. Temperature dimnih plinova u ložištu u ovisnosti o pretičku zraka	97
Slika 51. Temperature dimnih plinova u konvektivnom dijelu u ovisnosti o pretičku zraka	98
Slika 52. Temperature dimnih plinova na izlazu iz kotla u ovisnosti o pretičku zraka	98
Slika 53. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	99
Slika 54. NO _x emisije u ovisnosti o pretičku zraka	99
Slika 55. Izgaranje i prolaz dimnih plinova preko sloja ostatka.....	100
Slika 56. Usporedba numeričke simulacije i mjerenja	103
Slika 57. Raspodjele temperaturnih polja u okomitim uzdužnim presjecima	106
Slika 58. Raspodjele temperaturnih polja u horizontalnim uzdužnim presjecima	108
Slika 59. Brzine odvijanja reakcija izgaranja hlapivih plinova i CO u okomitim uzdužnim presjecima	109
Slika 60. Brzine odvijanja reakcija izgaranja CO u horizontalnim uzdužnim presjecima	110
Slika 61. Raspodjele molarnog udjela O ₂ u vlažnim dimnim plinovima u okomitom uzdužnom presjeku	111
Slika 62. Prikaz strujanja kroz plamenik	111
Slika 63. Prikaz strujanja unutar kotla.....	112
Slika 64. Prikaz raspodjele molnih udjela CO ₂ u okomitom poprečnom presjeku.....	113
Slika 65. Predloženo mjesto za ugradnju umetka za naknadno izgaranje	114
Slika 66. Prikaz raspodjele molnih udjela CO na ulasku u konvektivni dio kotla	115
Slika 67. Prikaz raspodjele molnih udjela CO ₂ na ulasku u konvektivni dio kotla	115
Slika 68. Prikaz temperaturnih polja na ulasku u konvektivni dio kotla	115
Slika 69. Koeficijent brzine odvijanja reakcije u ovisnosti o temperaturi.....	116
Slika 70. Prikaz temperaturnih polja unutar saćastog umetka.....	119
Slika 71. Prikaz polja disipacije turbulentne kinetičke energije (ϵ) unutar saćastog umetka	119
Slika 72. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja unutar saćastog umetka za naknadno izgaranje.....	120
Slika 73. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed miješanja/turbulencije (<i>Model disipacije vrtloga</i> , poglavlje 2.2.2)	121
Slika 74. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed temperature dimnih plinova (<i>Model konačnih brzina reakcije</i> , poglavlje 2.2.2).....	121
Slika 75. Procjena smanjenja emisija CO u ovisnosti o molnom udjelu CO na ulazu u saćasti umetak za naknadno izgaranje	122
Slika 76. Prikaz temperaturnih polja unutar saćastog umetka za naknadno izgaranje (za molni udio CO u vlažnim dimnim plinovima od 3.000 ppm)	123
Slika 77. Prikaz temperaturnih polja unutar lamelnog umetka za naknadno izgaranje.....	124
Slika 78. Prikaz polja disipacije turbulentne kinetičke energije (ϵ) unutar lamelnog umetka za naknadno izgaranje.....	125
Slika 79. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja unutar lamelnog umetka za naknadno izgaranje.....	126
Slika 80. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed miješanja/turbulencije (<i>Model disipacije vrtloga</i> , poglavlje 2.2.2)	127

Slika 81. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed temperature dimnih plinova (<i>Model konačnih brzina reakcije</i> , poglavlje 2.2.2).....	127
Slika 82. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	129
Slika 83. NO _x emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	129
Slika 84. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	131
Slika 85. NO _x emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	131
Slika 86. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	133
Slika 87. Vremenski prikaz CO emisija.....	133
Slika 88. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	135
Slika 89. NO _x emisije u ovisnosti o pretičku zraka.....	135
Slika 90. Usporedba emisija onečišćujućih tvari – kotao bez umetka.....	139
Slika 91. CO emisije s/bez umetaka.....	140
Slika 92. NO emisije s/bez umetaka.....	140
Slika 93. SO ₂ emisije s/bez umetaka.....	141
Slika 94. OGC emisije s/bez umetaka.....	141
Slika 95. Emisije prašine s/bez umetaka.....	142
Slika 96. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PD2 – CO emisije.....	143
Slika 97. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PD2 – NO _x emisije.....	143
Slika 98. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PUR – CO emisije.....	144
Slika 99. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PUR – NO _x emisije.....	144
Slika 100. Plamenik s pomičnom rešetkom [92].....	145
Slika 101. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka – pelet uljane repice (bez konstrukcijskih izmjena, šamotiranje ložišta, sačasti umetak za naknadno izgaranje, sačasti umetak + šamotiranje ložišta)....	148
Slika 102. Nakupljivanje i lijepljenje pepela na rešetci plamenika.....	149
Slika 103. Prikaz predloženog konstrukcijskog rješenja – ugradnje mehaničke prepreke (strugača) u plamenik.....	149
Slika 104. Nastavak za miješanje i vrtloženje.....	150

POPIS TABLICA

Tablica 1. Temperature taljenja pepela [63].....	28
Tablica 2. Utjecajni parametri u određivanju toplinske učinkovitosti.....	54
Tablica 3. Pregled korištenih parametara u modelima numeričkih simulacija.....	67
Tablica 4. Reakcije izgaranja biomase	70
Tablica 5. Ulazni parametri u domenu simulacije cijelog kotla	72
Tablica 6. Reakcije naknadnog izgaranja CO	74
Tablica 7. Molni sastav dimnih plinova na ulasku u lamelni umetak za naknadno izgaranje.....	76
Tablica 8. Fizikalna i kemijska svojstva korištenih peleta [89]	77
Tablica 9. Fizikalna i kemijska svojstva pepela korištenih peleta [89]	80
Tablica 10. Kemijska analiza pepela nakon izgaranja [89].....	83
Tablica 11. Prosječne vrijednosti emisija [89]	85
Tablica 12. Ostvarena toplinska učinkovitost [89].....	88
Tablica 13. Ostvarena toplinska učinkovitost (prema postupku iz 3.3.3)	89
Tablica 14. Rezultati detaljnih ispitivanja PD2.....	90
Tablica 15. Rezultati detaljnih ispitivanja peleta slame uljane repice.....	95
Tablica 16. Temperature i molni sastav dimnih plinova te toplinski učin dobiven numeričkom simulacijom (usporedba s mjerenjem).....	102
Tablica 17. Temperature i molni sastav glavnih dimnih plinova na ulasku u konvektivni dio kotla ..	114
Tablica 18. Temperature i molni sastav dimnih plinova na izlasku iz sačastog umetka za naknadno izgaranje	118
Tablica 19. Temperature i molni sastav dimnih plinova na izlasku iz lamelnog umetka za naknadno izgaranje	123
Tablica 20. Rezultati detaljnih ispitivanja drvnih peleta nakon ugradnje sačastog umetka za naknadno izgaranje	128
Tablica 21. Rezultati detaljnih ispitivanja drvnih peleta nakon ugradnje lamelnog umetka za naknadno izgaranje	130
Tablica 22. Sumarni prikaz ostvarenih smanjenja CO emisija u ovisnosti o CO emisijama bez ugrađenih umetaka za naknadno izgaranje.....	132
Tablica 23. Rezultati detaljnih ispitivanja peleta iz slame uljane repice nakon ugradnje sačastog umetka za naknadno izgaranje.....	134
Tablica 24. Rezultati završnog ispitivanja emisija	137

POPIS OZNAKA

LATINIČNE OZNAKE

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
b	%	maseni udio neizgorenog goriva u ostatku
c	kg _c /kg _G	maseni udio ugljika u gorivu (dostavno stanje)
C	%	maseni udio ugljika u gorivu (dostavno stanje)
CO	%	molni udio ugljikovog monoksida u suhim dimnim plinovima
CO_2	%	molni udio ugljikovog dioksida u suhim dimnim plinovima
$CO_{2,max}$	%	maksimalni molni udio ugljikovog dioksida u suhim dimnim plinovima (uz $\lambda=1$)
C_r	%	maseni udio ugljika u ostatku (svedeno na ukupnu masu goriva)
C_{pH_2O}	kJ/Nm ³ K	specifični toplinski kapacitet vodene pare (normalno stanje)
C_{pmd}	kJ/Nm ³ K	specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova (normalno stanje)
d_X	kg/Nm ³	gustoća pri normalnom stanju
F_X	m ²	površina
h	kg _h /kg _G	maseni udio vodika u gorivu (dostavno stanje)
H	%	maseni udio vodika u gorivu (dostavno stanje)
H_u	kJ/kg	donja ogrjevna vrijednost goriva
H_{u-b}	kJ/kg	reducirana ogrjevna moć (uzima u obzir gubitke neizgorenog goriva)
H_{u-b-CO}	kJ/kg	reducirana ogrjevna moć (uzima u obzir gubitke kemijske topline gubitke i gubitke neizgorenog goriva)
n	kmol	količina plina
n_{fuel}	kg _n /kg _G	maseni udio dušika u gorivu (dostavno stanje)
NO	%	molni udio dušikovog oksida u suhim dimnim plinovima

NO_2	%	molni udio dušikovog dioksida u suhim dimnim plinovima
NO_x	%	molni udio dušikovih oksida u suhim dimnim plinovima
o	kg_o/kg_G	maseni udio kisika u gorivu (dostavno stanje)
O_2	%	molni udio kisika u suhim dimnim plinovima
O_2 standardized	%	referentni molni udio kisika u suhim dimnim plinovima
Q_A	kJ/kg	specifični toplinski gubitak osjetne topline dimnim plinovima
Q_B	kJ/kg	specifični toplinski gubitak zbog neizgorenih sastojaka u ostatku
Q_U	kJ/kg	specifični kemijski toplinski gubitak zbog nepotpunog izgaranja
Q_N	kW	toplinski učin
Q_S	kW	specifični toplinski gubitak zbog kondukcije, konvekcije i zračenja kroz ovojnici kotla
p	Pa	apsolutni tlak
R_b	%	maseni udio ostatka (svedeno na ukupnu masu goriva)
R_m	J/kmol K	opća plinska konstanta
s	kg_s/kg_G	maseni udio sumpora u gorivu (dostavno stanje)
T	K	temperatura plina
t_a	$^\circ\text{C}$	temperatura dimnih plinova
t_m	$^\circ\text{C}$	prosječna temperatura površine
t_r	$^\circ\text{C}$	temperatura zraka prilikom ispitivanja (oznaka iz norme)
V_{vdp}	Nm^3/kg	volumen vlažnih dimnih plinova
V_m	m^3/kmol	molarni volumen
$V_{\text{L,stv}}$	Nm^3/kg	stvarni volumen zraka za izgaranje
$V_{\text{O,min}}$	Nm^3/kg	minimalni volumen kisika potrebnog za izgaranje

V_{sdp}	Nm^3/kg	volumen suhih dimnih plinova
w	kg_w/kg_G	maseni udio vlage u gorivu
W	%	maseni udio vlage u gorivu
x	-	udio dušika iz goriva (n_{fuel}) koje je podvrgnut reakciji spajanja s kisikom

GRČKE OZNAKE

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
α	$W/m^2 K$	koeficijent prijelaza topline
η_K	%	toplinska učinkovitost
ϑ_{dp}	$^{\circ}C$	temperatura dimnih plinova
ϑ_{teor}	$^{\circ}C$	adijabatska temperatura izgaranja
ϑ_{ok}	$^{\circ}C$	temperatura zraka prilikom ispitivanja
λ	-	pretičak zraka

DODATNE OZNAKE

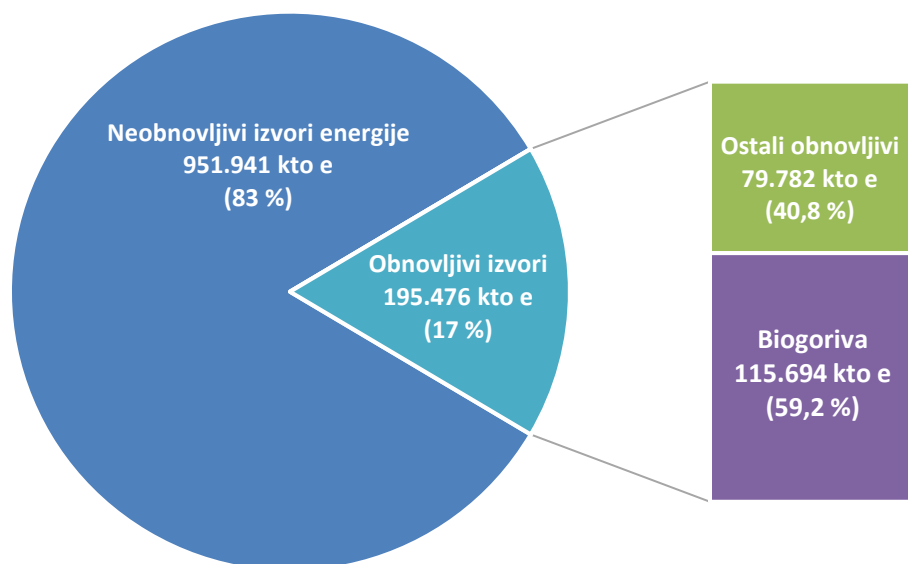
Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
Δh_c	kJ/kg	ogjevnost vrijednost ugljika
ΔH_{CO}	$kJ/kmol$	ogjevnost vrijednost ugljikovog monoksida

1. UVOD

1.1 Opis problema

Svake godine na zemlji nastaje oko 2 000 milijardi tona suhe biomase. Za hranu se od toga koristi oko 1,2%, za papir 1% i za gorivo 1%. Ostatak, oko 96% trune ili povećava zalihe obnovljivih izvora energije. Veliki potencijal za korištenje biomase leži u zgradarstvu. Kako zgrade troše oko 40% ukupne potrošnje energije, korištenjem biomase za proizvodnju toplinske energije (grijanje i priprema PTV-a) može se doprinijeti smanjenju potrošnje primarne energije i emisija stakleničkih plinova kao jednom od temeljnih ciljeva energetske politike EU.

Prema dostupnim podacima od Zajedničkog istraživačkog centra Europske komisije (JRC) [1], obnovljivi izvori energije sudjeluju sa 17% u ukupnoj potrošnji primarne energije u EU (podaci za 2016. godinu), gdje biogoriva (uključujući industrijski i komunalni otpad) sudjeluju s 59,2% (slika 1). Od toga 74,6% se odnosi na biomasu koja se koristi za proizvodnju toplinske energije u sektoru grijanja i hlađenja. U Hrvatskoj obnovljivi izvori energije sudjeluje s 23,6% u ukupnoj potrošnji primarne energije (podaci za 2016. godinu). Kao i u EU, navedeni udio obnovljivih izvora se ostvaruje pretežno biomasom (65%).



Slika 1. Udio obnovljivih izvora energije i biogoriva u EU (podaci za 2016.) [1]

U odnosu na ostale obnovljive izvore, biomasa ima nekoliko prednosti. Jedna od najznačajnijih prednosti je gustoća energetskega toka (ogrjevna vrijednost/volumen) pri pretvorbi energije. Tako je vrijednost gustoće energetskega toka većine obnovljivih izvora energije uglavnom ispod 1 kW po kvadratnom metru tlocrtno površine. Biomasaom se mogu ostvariti i do dva reda veličine veće vrijednosti. Druga važna značajka obnovljivih izvora energije je njihova promjenjivost u vremenu. Balat [2] navodi da se od biomase, u bližoj budućnosti, očekuje najveći doprinos od svih obnovljivih izvora energije, upravo zbog činjenice da se njenim korištenjem može osigurati kontinuirana opskrba, odnosno rad postrojenja neovisan o vremenskim uvjetima. Prema trenutnim projekcijama EU isto je djelomično demantirano, no i dalje je za očekivati da će biomasa zadržati svoj udio u obnovljivim izvorima energije koja sudjeluju u ukupnoj potrošnji primarne energije. Pa tako, po analizama *European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (RHC-Platform)* biomasa u kombinaciji sa solarnom (toplinskom) i geotermalnom energijom za grijanje i hlađenje ima najveći potencijal za postizanje ciljeva potpunog pokrivanja energetske potrebe za grijanjem i hlađenjem u EU do 2050., odnosno smanjenjem emisija stakleničkih plinova za 80-95%. To je također prepoznato u *Prijedlogu strategije energetskega razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu*, gdje stoji da se u zgradarstvu predviđa intenziviranje dobre prakse obnove svih zgrada (stambenih i nestambenih) s usmjeravanjem obnove prema nZEB standardu (zgrade gotovo nulte energije), koji podrazumijeva i snažnije iskorištavanje OIE pa sukladno tome i ugradnju kotlova na biomasu. Isti Prijedlog, između ostalog, prepoznaje priliku za hrvatsko gospodarstvo upravo u proizvodnji peleta iz poljoprivredne proizvodnje.

Demirbaş [3] navodi da su najvažniji izvori biomase drvena biomasa i ostaci prilikom prerade drva. Ostali izvori su ostaci i otpaci u poljoprivredi, životinjski otpad i ostaci, razni drugi oblici otpada te energetske usjevi (brzo rastuće drveće i trave poput miscanthusa, proso, indijska konoplja, kukuruz, topola, vrba i šećerna trska). Biomasa, u formi drva, je najstariji izvor energije poznat čovjeku. Tradicionalno toplinska energija se dobivala direktnim izgaranjem krute biomase. Demirbaş [4] navodi da je taj proces i dalje u širokoj uporabi, pogotovo u nerazvijenim zemljama.

Izgaranje biomase u kućanskim toplovodnim kotlovima smatra se značajnim izvorom onečišćenja okoliša. To se posebno odnosi na emisije hlapivih organskih spojeva (VOC), policikličkih aromatskih ugljikovodika (PAH) i čestica (PM) [5]. Upravo zbog toga, iako biomasu smatramo obnovljivim izvorom energije, nikako ne možemo smatrati ekološkim

gorivom (uzevši u obzir trenutne razine emisija polutanata). Zato je daljnji razvoj potrebno usmjeriti u pronalazak ekonomski prihvatljivih rješenja za smanjenje emisija štetnih tvari.

Najbolje toplinske učinkovitosti i najmanje emisije štetnih tvari dimnim plinovima postižu se izgaranjem peletirane biomase. Važna prednost peleta, u usporedbi s npr. cjepanicama, očituje se u mogućnosti automatiziranja rada kotla. Pelet čine komprimirana vlakna drveta s jako malom količinom vode (manje od 10% [6]).

U Hrvatskoj raste broj proizvođača toplovodnih kotlova na peletiranu biomasu. Povećanjem ekološke svijesti te politikom EU u području zaštite okoliša i energetske učinkovitosti, postavljaju se sve stroži minimalni zahtjevi koje takvi uređaju moraju zadovoljiti kako bi se isti mogli plasirati na tržište. Pa tako sve stroži zahtjevi EU u pogledu emisije štetnih tvari (CO, NO_x, OGC i prašine) i toplinske učinkovitosti [7] zahtijevaju razvoj novih konstrukcija toplovodnih kotlova. Propisi nekih država (Austrija, Švicarska, Njemačka) propisuju još strože minimalne zahtjeve te je stoga plasman proizvoda na tržište tih zemalja dodatno otežano.

Trenutno se razvoj toplovodnih kotlova na kruto gorivo temelji na analitičkim proračunima baziranim na mnogo iskustvenih faktora, odnosno onih dobivenih mjerenjem [8, 9]. Takvi proračuni nisu dovoljno pouzdani da bi mogli osigurati postizanje traženih ekoloških zahtjeva te se stoga razvoj kotlova na kruto gorivo temelji na iskustvu i eksperimentima što zahtjeva puno financijskog ulaganja i vremena. Analitičke i/ili numeričke metode koje omogućuju analizu konstrukcije i izmjene topline u kotlu te analizu izgaranja u samom ložištu, kako bi se osiguralo rješavanje problema emisije štetnih tvari dimnim plinovima, mogu potencijalno ubrzati i pojeftiniti razvoj istih od ideje do prototipa. Ipak, još uvijek takve metode, u najvećem broju slučajeva, ne daju dovoljno pouzdane rezultate da bi mogle u većoj mjeri skratiti razvoj, koji se u konačnici ipak temelji na iskustvu i u većini slučajeva dugotrajnom eksperimentu.

Emisije štetnih tvari postaju još veći problem ako se umjesto klasične drvene biomase koriste razni ostatci iz poljoprivredne proizvodnje [10], koji postaju sve traženija vrsta goriva zbog svoje niske cijene (u formi peleta cijena iznosi 0,80-1,00 kn/kg). To potkrjepljuje i činjenica da je za krajnjeg korisnika generiranje toplinske energije za grijanje prostora i PTV korištenjem drvene biomase u formi peleta postalo skuplje od plina.

U gore spomenutu grupu ostataka iz poljoprivredne proizvodnje spadaju slama, kukuruzovina, razne stabljike, ljuške i koštice raznih poljoprivrednih kultura. Na svojstva ovakve biomase podjednako utječe njezin sastav i udio vlage. Udio pepela se može kretati i do 20% [10] što značajno utječe na ogrjevnu vrijednost i emisije prašine. Sastav goriva je takav da sadrži značajnije udjele spojeva poput dušika, sumpora, silicija, kalija i klora, koji uzrokuju povećane emisije štetnih spojeva u okoliš te probleme s lijepljenjem šljake na rešetci i izmjenjivačkim površinama. Dodatno, kao posljedica većeg udjela klora u gorivu javljaju se veće emisije dioksina i furana (u usporedbi s drvnom biomasom).

Konstruktivna rješenja koja se primjenjuju kod kotlova većih snaga te kao posljedica toga temperaturni uvjeti u ložištu, u najvećoj mjeri, nisu ostvarivi u kućanskim toplovodnim kotlovima. Problemi taljenja pepela mogu se potencijalno umanjiti kad bi se izgaranje odvijalo na nižim temperaturama, odnosno suspaljivanjem s ugljenom [11], čiji kemijski sastav pepela poništava ove pojave. Iako bi suspaljivanjem riješili glavni problem koji se javljaju prilikom izgaranja biomase iz ostataka iz poljoprivredne proizvodnje (taljenje pepela), korištenjem ugljena odmičemo se od koncepta korištenja obnovljivih izvora energije.

U literaturi mogu se pronaći radovi koji se bave izgaranjem i emisijama štetnih tvari (CO, OGC, NO_x, SO₂, PM) iz toplovodnih kotlova na peletiranu biomasu iz raznih poljoprivrednih ostataka, odnosno energetskih usjeva. Tako se autori u [12-14] bave povećanjem emisija štetnih tvari korištenjem peletirane biomase iz raznih ostataka u poljoprivredi u odnosu na klasičnu šumsku biomasu. Wielgoński i ostali [15] uspoređuju emisije polutanata dobivenih izgaranjem biomase i ugljena. U [16-18] autori analiziraju primjenjivost *Miscanthusa* za izgaranje u ložištu, dok se Bilandžija i ostali [19] bave optimizacijom vremena žetve *Michantusa* s ciljem postizanja boljih svojstva prilikom izgaranja. Mineralni sastav pepela *Miscanthusa*, koji je vrlo bitan za određivanje parametara izgaranja, analiziran je u [12]. Chandrasekaran i ostali [20] opisuju utjecaj povišenog sadržaja prašine i klora na kvalitetu izgaranja peleta iz raznih trava. Zhao i ostali [21] analiziraju emisije sumporovog dioksida, dušikovih oksida prašine izgaranjem algi. Postoje i radovi [22, 23] koji se pak bave matematičkom predikcijom emisija štetnih tvari. Pokazalo se da ti modeli ipak nisu dovoljno točni za postizanje traženih emisija, naročito u slučaju nedrvne biomase. Postoji nekoliko radova koji se bave numeričkom simulacijom izgaranja biomase u kućanskim toplovodnim kotlovima [24-31]. Detaljniji pregled literature dan je kroz sljedeća poglavlja.

Radovi u literaturi se bave isključivo međusobnom usporedbom kemijskog sastava biomase iz raznih poljoprivrednih ostataka, energetskih usjeva, drvene biomase ili njihovih mješavina i emisijama ostvarenim prilikom izgaranja u ložištima kućanskih uređaja za izgaranje. Nisu pronađeni radovi koji detaljnije obrađuju teme kao što je smanjenje emisija štetnih tvari i primjenjivosti raznih filtara u toplovodnim kotlovima manjih snaga. Isto tako, nisu pronađeni radovi koji bi istražili potencijal neke preinake na konstrukciji kotla (ložišta) na smanjenje emisija štetnih tvari. Radovi koji se bave numeričkom simulacijom izgaranja krutog goriva uglavnom koriste vlastite matematičke modele kojima se opisuju kemijski procesi unutar krute faze te su kao takvi manje dostupni za primjenu u industriji, već se pretežno koriste samo u znanstvenim istraživanjima.

Za razliku od ostalih radova, u sklopu ovog istraživanja provedena je sveobuhvatnu analiza primjenjivosti peleta iz poljoprivrednih ostataka dostupnih u Republici Hrvatskoj za izgaranje u plameniku kućanskih toplovodnih kotlova. Nadalje, numerički i eksperimentalno su istraženi učinci predloženih konstrukcijskih izmjena ložišta toplovodnih kotlova na smanjenje emisija štetnih tvari. Predložena konstrukcijska rješenja zahtijevaju vrlo malo prostora za ugradnju te se kao takva „gotova rješenja“ mogu lako ugraditi u gotove sve postojeće kućanske uređaje za izgaranje krutog goriva. Provedeni postupak numeričkog modeliranja izgaranja biomase, za razliku od ostalih modela dostupnih u literaturi, ne zahtijeva dodatne matematičke modele konverzije krute faze te je kao takav dostupniji za primjenu u industriji.

1.2 Cilj i hipoteza istraživanja

Rad se temelji na hipotezi da je pravilnim odabirom vrste poljoprivredne biomase ili njihove mješavine te novim konstrukcijskim rješenjima moguće ekološki prihvatljivo, uz zadovoljenje svih zahtjeva propisanih europskim normama, direktno izgarati ostatke iz poljoprivredne proizvodnje u ložištima kućanskih toplovodnih kotlova pri uobičajenim režimima rada.

Ciljevi ovog istraživanja su:

- Analitički i eksperimentalno istražiti karakteristike pojedinih vrsta biomase, dostupne u RH, prilikom izgaranja u ložištima toplovodnih kotlova radi odabira prikladnog goriva sa stanovišta emisija štetnih plinova i taloženje neizgorenih tvari na površinama izmjene topline.
- Provesti numeričko modeliranje procesa izgaranja u plameniku i ložištu toplovdnog kotla, uz potvrdu modela temeljem prethodno dobivenih eksperimentalnih podataka, s

ciljem procjene temperaturnih polja, polja odvijanja kemijskih reakcija izgaranja i sastava dimnih plinova u određenim segmentima ložišta. Temeljem tih rezultata predložiti konstrukcijsko rješenje ložišta.

- Numerički i eksperimentalno istražiti utjecaj predloženog konstrukcijskog rješenja ložišta toplovodnog kotla na smanjenje emisija štetnih tvari dimnim plinovima.

1.3 Znanstveni doprinos

Znanstveni doprinos uključuje:

- primjenjivost pojedinog tipa ostatka iz poljoprivredne proizvodnje za izgaranje u kućanskim toplovodnim kotlovima
- eksperimentalno potvrđeni rezultati numeričkog modeliranja procesa izgaranja u plameniku i ložištu toplovodnog kotla na krutu biomasu (pelete)
- eksperimentalno potvrđeni rezultati numeričkog modeliranja procesa izgaranja dimnih plinova u umetcima za naknadno izgaranje (saćasti i lamelni)
- mehanizme smanjenja emisija polutanata u ovisnosti o radnim i konstrukcijskim parametrima
- smjernice za izradu prototipa komercijalnog kotla na biomasu iz poljoprivrednih ostataka koji zadovoljava sve zahtjeve EN normi u pogledu emisija onečišćujućih tvari u okoliš, energetske učinkovitosti, konstrukcije i načina korištenja
- proračunski model određivanja toplinske učinkovitosti toplovodnog kotla indirektnom metodom

2. PREGLED LITERATURE

2.1 Biomasa

Definicija biomase dana je u Direktivi 2009/28/EZ [34]: „Biomasa je biorazgradiv dio proizvoda, otpada i ostataka biološkog podrijetla iz poljoprivrede (uključujući tvari biljnog i životinjskog podrijetla), šumarstva i s njima povezanih proizvodnih djelatnosti uključujući ribarstvo i akvakulturu te biorazgradiv udio industrijskog i komunalnog otpada.“ Prema toj definiciji, biomasa je sav organski materijal nastao tijekom procesa fotosinteze, odnosno spajanja CO_2 i vode pod djelovanjem fotona iz sunčevog zračenja. Iz biomase se, u reakciji u suprotnom smjer, odnosno spajanja s kisikom, tijekom izgaranja i prirodnih metaboličkih procesa, oslobađa toplinska energija u iznosu od 16,5-19 MJ/kg (suhe tvari) te CO_2 i voda. U takvom, zatvorenom procesu, neto prirast CO_2 je jednak nuli.

U prirodi načelno postoji ravnoteža između količine CO_2 iz atmosfere apsorbirane kroz rast biljaka i količine CO_2 oslobođene kroz procese njihovog raspadanja (kao i kroz respiratorne procese živih bića koji se hrane tim biljkama i dr.). Spaljivanjem biomase oslobađa se jednaka količina CO_2 (i energije) koja bi ionako bila oslobođena kroz prirodne procese ukoliko je takva potrošnja biomase vremenski usklađena s prirodnim tijekom njenog obnavljanja (slika 2). Ista Direktiva [34] energiju dobivenu od biomase svrstava u energiju dobivenu iz obnovljivih izvora energije.



Slika 2. Kružni ciklus ugljika i energije u prirodi [35]

2.1.1 Karakteristike biomase

Svako gorivo, tehnički gledano, je supstanca koja kemijski reagira s kisikom (u većini slučajeva iz zraka) i pri tome oslobađa toplinsku energiju. Zbog svog kemijskog sastava, pojedina goriva se razlikuju od ostalih po svojim karakteristikama izgaranja. Kod biomase, kako je sadržaj ugljika približno isti, najvažniji elementi su sadržaj vode, udio hlapivih tvari, količina i sastav pepela [11].

Udio ugljika u suhoj tvari drvene biomase kreće se od 47-50%, dok je kod većine nedrvne biomase od 43-48%. Udio kisika kreće se od 40-45%, a sadržaj vodika između 5-7%. Značajnija odstupanja mogu se pronaći kod biomase s većim sadržajem ulja (zrna uljane repice). Udio dušika kreće se od 0,1-0,2% u drvetu, u slami oko 0,5%, a veći sadržaj dušika može se pronaći kod biljaka bogatim bjelančevinama. Općenito, sadržaj sumpora u krutoj biomasi je relativno nizak u usporedbi s ugljenom. Slama uljane repice ima oko 0,3% dok većina drvnih goriva ima 0,02-0,05%, a slama žitarica ispod 0,1%. Sadržaj klora u drvanoj biomasi kreće se oko 0,005 – 0,02%, a u žitaričnoj slami je udio 0,2-0,5% (mnogostruko veći). Vrlo visoke koncentracije uglavnom se javljaju u slami uljane repice i suncokreta (0,5-0,8%). Važno je također naglasiti da sadržaj klora jako varira (uslijed padalina lako može doći do njegovog ispiranja).

Sadržaj vode predstavlja najznačajniju veličinu koja utječe na ogrjevnu vrijednost biomase. Utjecaj sadržaja vlage na ogrjevnu moć krute biomase može se odrediti prema jednadžbi (2.1) [36]. Što je veći sadržaj vlage manja je ogrjevna vrijednost. To posljedica manjeg sadržaja suhe biomase, ali i činjenica da se jedan dio oslobođene energije troši na proces isparavanja te vlage. Ogrjevna vrijednost apsolutno suhe krute biomase ($H_{u(wf)}$) kreće se u rasponu 16,5-19 MJ/kg.

$$H_{u(w)} = \frac{H_{u(wf)} \cdot (100 - W) - 2,443 \cdot W}{100} \quad (2.1)$$

gdje su:

$H_{u(w)}$ – ogrjevna vrijednost biomase uz određeni sadržaj vlage, [MJ/kg]

$H_{u(wf)}$ – ogrjevna vrijednost apsolutno suhe biomase, [MJ/kg]

W – maseni udio vlage u biomasi, [%]

U elemente u tragovima spadaju svi preostali elementi, većinom teški metali. Oni prije svega određuju karakteristike pepela (npr. taljenje pepela, korozivno djelovanje pepela i prašine te emisije onečišćujućih tvari). Od svih krutih biogoriva, drvo s 0,5% ima najmanji sadržaj pepela. Kod kore smreke sadržaj pepela je između 2,5-5%. Veći sadržaj pepela može se pronaći kod

većine slamnatih biogoriva. Količina i sadržaj pepela jako utječu na konstrukciju samog ložišta. Prosječni sastav te tehnički parametri izgaranja različite biomase prikazane su u tablici A.1 i A.2 u prilogu ovog rada.

Travnata biomasa te biomasa iz ostataka u poljoprivredi može imati bitno drugačiji sastav u pogledu sastava metala i dušika u odnosu na šumsku biomasu (tablica A.1). Takav sastav u konačnici ima značajan utjecaj na emisije onečišćujućih tvari u okoliš, na ponašanje prilikom izgaranja i na taljenje pepela.

Biomasa sadrži nutrijente poput dušika, fosfora, kalija te ostale elemente poput kalcija, magnezija, natrija, silicija, mangana, željeza, molibdena, bakra, cinka i klora. Pojedinačno najvažniji elementi koji utječu na snižavanje temperature taljenja pepela su kalij i silicij. Slama tipično sadrži velike količine kalija i klora (0,7-1,3% K i 0,2-0,97% Cl), dok klasična drvena biomasa sadrži manje količine tih elementa (0,2-0,5% K i <0,1% Cl) [11]. Silicij je glavni sastojak pepela travnate biomase i biomase iz raznih ostataka (slama i ljuske riže), dok je veći sadržaj kalcija primjetan u šumskoj biomasu i u nekim energetske usjevima [11].

Suha tvar biomase sastoji se od tri glavna spoja: celuloze, hemiceluloze i lignina [37]. Ostale komponente koje čine organsku komponentu biomase su lignani, lako hlapiva ulja, tanini, resini, proteini itd. Anorganska komponenta uključuje elemente poput kalija i klora, čestice materijala uključenih u samu biljku kao silikati i ostalo.

Celuloza čini najveći udio u drvnjoj biomasu. Maseni udio se kreće od 30% kod nekih vrsta drva i ljuski orašastih plodova do preko 90% kod pamuka i sličnih materijala. Sastoji se od 10.000 anhidroglukoznih jedinica u kojoj je maseni udio kisika 49%. Kemijska formula celuloze je $(C_6H_{10}O_5)_n$, a atomi unutar polimera povezani su kovalentnim, vodikovim vezama i Wan der Waalsovima silama. Po sastavu je polisaharid na bazi glukoze.

Hemiceluloza čini oko 25% mase biomase kod većine biljaka. Po svom sastavu slična je celulozi s izuzetkom što nije polimer tj. ne sastoji se od lanaca ponavljajućih jedinica (monomera). Lanac hemiceluloze je dosta kraći te uključuje svega nekoliko monomera (heteropolisaharida) pretežno heterogeno vezanih sa 6-ugljičnim i 5-ugljičnim anhidrošećerima, pri čemu je maseni udio kisika u 5-ugljičnom šećeru oko 54%.

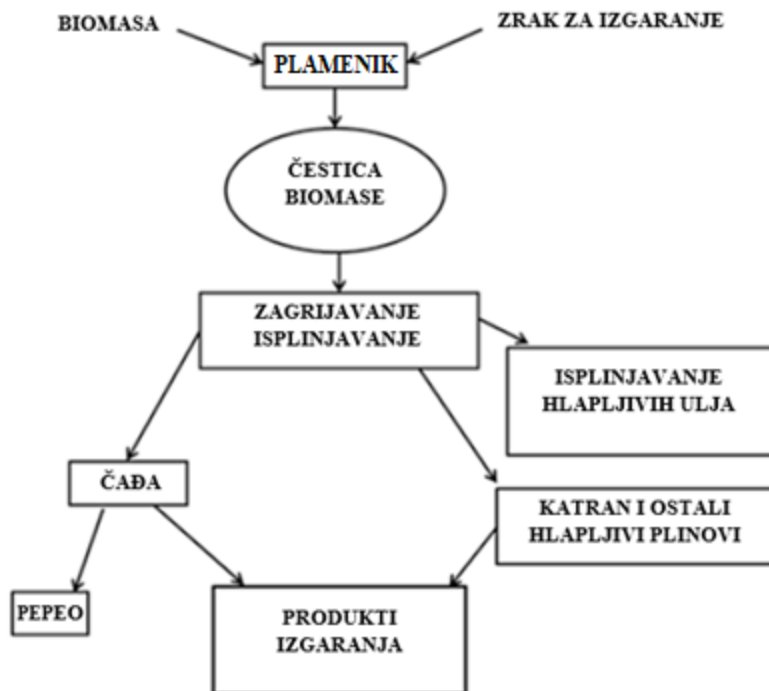
Pod ligninom podrazumijeva se grupa visokomolekulskih, umreženih amorfnih spojeva koji čine oko 25-30% mase biomase. Taj udio je nešto veći kod drvne u odnosu na biljnu biomasu. Molekula je izrazito razgranata, dugog lanca sličnog polimerima osim što se sastoji od različitog monomera, uglavnom fenil-propan jedinica spojenih vezom ugljik-ugljik. Strukture lignina su različite, ovisno o izvoru iz kojeg je dobiven. Najčešće zastupljen monomer je koniferil alkohol. Ostali monomeri su p-kumaril alkohola ($C_9H_6O_3$) i sinapil alkohola ($C_{11}H_{14}O_4$). Zbog većeg broja metoksi grupa, C/H i C/O omjeri gore navedenih fenola su međusobno značajno različiti (C/H omjeri su 0,9, 0,83 i 0,78 dok C/O omjeri su 4,5, 3,3 i 2,75). Udjeli navedenih fenola u ligninu ovisni su o vrsti biljke i njenom staništu. Lignini mekog drveta se najčešće nazivaju „guaiacil lignini“ jer im građevni elementi potječu od transkoniferil alkohola (preko 90%), dok ostatak čine uglavnom trans-p-kumanil alkohol. Lignini tvrdog drveta ili „guaiacil-siringil lignini“ sastavljeni su od trans-koniferil alkohola i trans-sinapil alkohola u podjednakim omjerima. Lignini trava sastavljeni su pretežno od konifenil alkohola. Različiti C/H i C/O omjeri osim u različitim ogrjevnim vrijednostima očituju se i u sklonosti stvaranju različitih polutanata. Na taj način točan udio ovih jedinica određuje proces izgaranja pa tako i utjecaj na okoliš pojedine vrste biomase.

2.1.2 Izgaranje biomase

Postoje tri osnovne tehnologije za termokemijsku konverziju biomase: piroliza, isplinjavanje i izgaranje. Među njima izgaranje je najprovjerena i najčešće korištena tehnologija za proizvodnju toplinske i električne energije. Danas su sustavi za izgaranje biomase dostupni u rasponu od nekoliko kW do preko 100 kW sa sljedećom tipičnom primjenom:

- Ručno ložene peći i štednjaci na drva sa snagama od 5 do 35 kW.
- Ručno loženi toplovodni kotlovi na drva sa snagama od 20 do 70 kW.
- Peći i toplovodni kotlovi na drvni pelet sa snagama od 15 do 70 kW. Toplovodni kotlovi na pelet mogu se naći i sa snagama do 1 MW.
- Automatsko loženi kotlovi na drva sa snagama od 200 kW do 10 MW. Kotlovi na sječku mogu biti u rasponu od 20 kW do 100 MW.

Trenutna toplinska učinkovitost ovakvih kotlova za generaciju topline je prilično visoka, što omogućuje rad po ekonomski prihvatljivim cijenama (npr. sječka koja se koristi kod kotlova većih snaga). Isto nije slučaj za drvne pelete koji se koriste u individualnim ložištima (vidjeti poglavlje 2.5).



Slika 3. Izgaranje čestice biomase tvari [11]

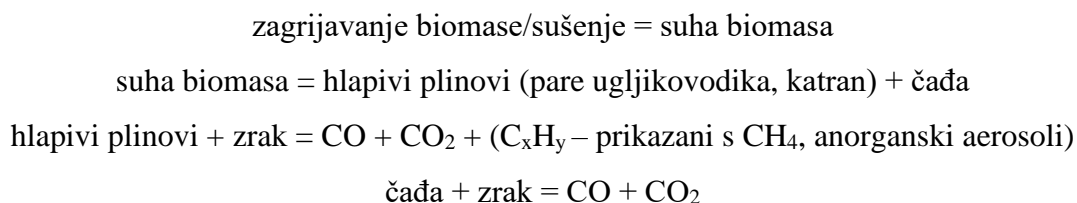
Ulaskom organske čestice poput biomase u vruću atmosferu bogatu kisikom, dolazi do njenog zapaljenja i izgaranja na način prikazan na slici 3. Izgaranje se sastoji od sljedećih koraka: zagrijavanje do temperature na kojoj dolazi do isparavanja vlage (sušenje); raspadanje karbonatne strukture (tzv. rasplinjavanje) prilikom čega nastaju pare ugljikovodika, katran te čađa. Hlapivi plinovi izgaraju u plamenu oko čestice te kako se smanjuje količina hlapivih sastojaka, kisik dolazi u kontakt s površinom čađe i nastupa njeno heterogeno izgaranje. Točan proces izgaranja ovisi o vrsti biomase (udjelu celuloze, hemiceluloze i sastavu lignina), veličini čestice, temperaturi i uvjetima izgaranja.

Općenito, kod biomase proces isplinjavanja započinje na temperaturama od 160-250 °C. Kod drvene biomase proces rasplinjavanja započinje raspadanjem molekula hemiceluloze u temperaturnom rasponu 225 – 325 °C. Nakon toga slijedi celuloza na temperaturama od 325 – 375 °C i na kraju molekule lignina na 300 – 500 °C. Kao produkti rasplinjavanja u najvećoj mjeri nastaju pare ugljikovodika, katran i vodena para, koji se ubrzo nakon nastajanja u uvjetima visokih temperatura pretvaraju u jednostavnije ugljikovodike, ugljikov monoksid, ugljikov dioksid, vodik i vodenu paru. Istraživanja pokazuju da se više od 67% ogrjevne vrijednosti šumske biomase [38] oslobađa izgaranjem nastalih para ugljikovodika.

Nakon isplinjavanja započinje zadnji stupanj, odnosno izgaranje krutog ostatka. Kruti ostatak koji ostaje nakon procesa rasplinjavanja vrlo je porozan. Kako više nema plinova koji izlaze kroz pore, kisiku je difuzijom omogućen dolazak do vanjskih rubnih slojeva te tako započinje proces izgaranja krutog ostatka goriva. Heterogena reakcija na površini uglavnom rezultira nastankom ugljikovog monoksida (djelomično i nastankom dušikovih oksida) koji nakon što napusti rubni sloj reagira s kisikom te nastaje ugljikov dioksid.

Budući da automatski sustavi izgaranja rade kontinuirano, uzastopne reakcije odvijaju se istovremeno na različitim mjestima u ložištu (na različitim odjeljcima rešetke). Zbog toga se te različite zone mogu optimirati konstrukcijom samog ložišta, odnosno rešetke. Upravo ta distinkcija između različitih koraka izgaranja može biti vrlo korisna u pogledu stvaranja i smanjenja štetnih tvari.

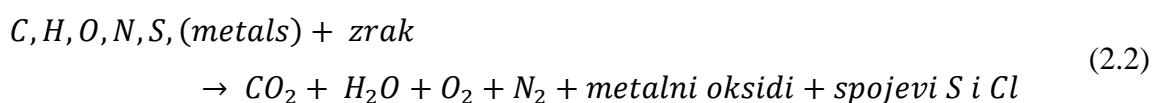
Osnovni koraci izgaranja mogu se prikazati i ovako [39]:



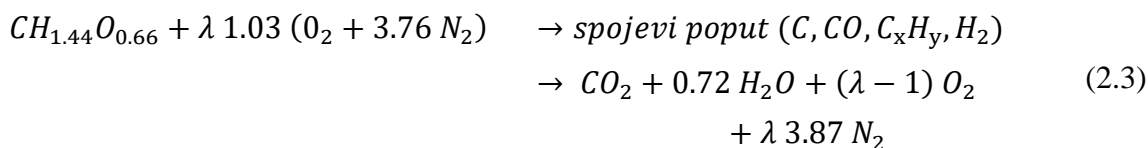
Prilikom rasplinjavanja i izgaranja krutog ostatka dolazi do djelomičnog oslobađanja raznih nutrijenata iz biomase (N, S, K i dr.) koji su uzrok emisijama raznih polutanata (na bazi N, S, K).

Kako bi izgaranje teklo mora se dovoditi dovoljna količina zraka za izgaranje te s obzirom na to kako se izgaranje ne odvija u idealnim uvjetima (zrak se ne dovodi direktno do goriva, ne dolazi do idealnog miješanja goriva i zraka) potrebno je dovoditi više zraka od onog minimalno potrebnog, što je ujedno i jedan od glavnih parametara izgaranja. Parametar koji opisuje koliko se zraka dovodi više od onog stehiometrijski potrebnog se naziva pretičak zraka (λ).

Općenito kemijska jednadžba izgaranja je:



Za tipičnu biomasu jednadžba (2.2) se može napisati kao:



gdje $CH_{1.44}O_{0.66}$ predstavlja sastav tipične biomase. Kao posljedica izgaranja nastaju različiti polutanti:

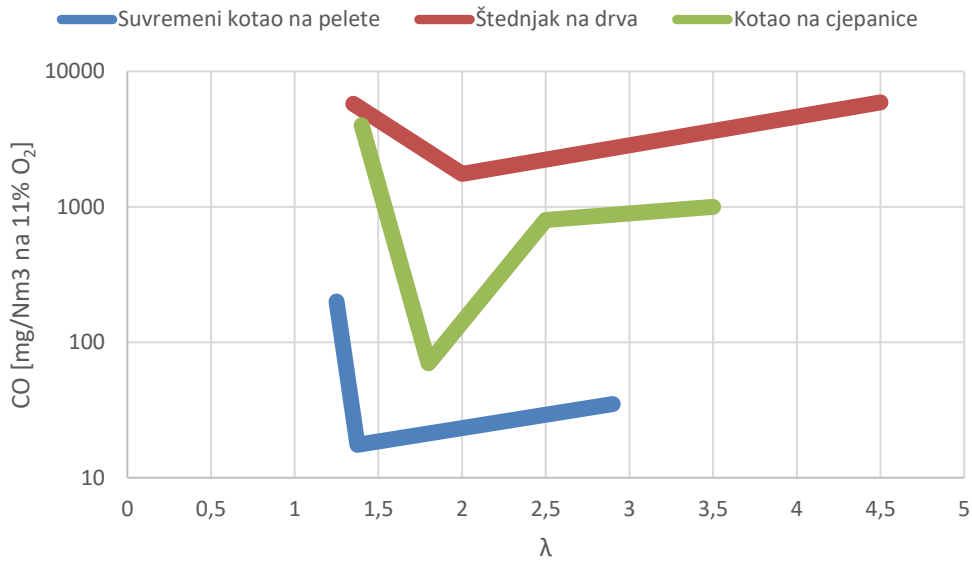
- Polutanti koji su posljedica nepotpunog izgaranja kao što su CO, OGC (VOC, PAH), COC, čađa, neizgoreni ugljik, H_2 , HCN, NH_3 te N_2O
- Polutanti koji su posljedica potpunog izgaranja kao što su NO_x (NO i NO_2), CO_2 i H_2O
- Čestice pepela i kontaminati koji su posljedica sastava biomase kao što su KCl, SO_2 , HCl, PCDD/F, Cu, Pd, Zn, Cd i ostali

2.1.3 Emisije polutanata koje su posljedica izgaranja biomase

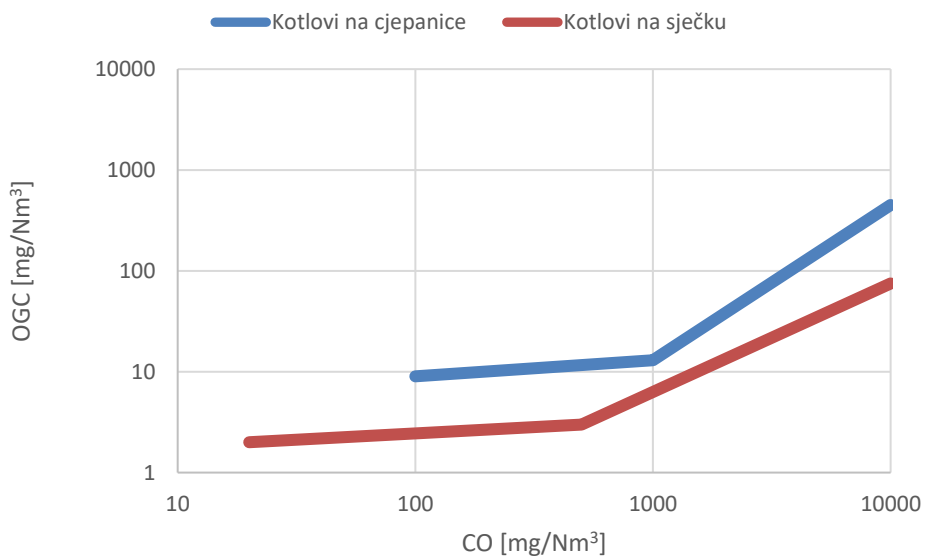
Emisije polutanata koje su posljedica nepotpunog izgaranja

Emisije koje su posljedica nepotpunog izgaranja nastaju kao rezultat lošeg izgaranja, a što je rezultat niske temperature izgaranja, nedovoljnog miješanja čestica goriva (pare ugljikovodika, katran, čađa) sa zrakom te/ili prekratkog zadržavanja dimnih plinova na visokim temperaturama (VOC). Policiklički aromatski ugljikovodici nastaju na temperaturama iznad $850\text{ }^\circ\text{C}$, u uvjetima nedostatka kisika za izgaranje. Miješanje čestica goriva (CO, VOC, PAH, čađa i dr.) sa zrakom je često ograničavajući parametar za postizanje skoro-potpunog izgaranja. Zahtjevi za visoku temperaturu izgaranja ($>850\text{ }^\circ\text{C}$) i vrijeme zadržavanja ($>0,5\text{ s}$) se obično mogu postići u ložištima većih snaga, dok isto često nije moguće ostvariti u ložištima manjih snaga koja se primjenjuju u rezidencijalnom sektoru.

Kao što je i prije navedeno, faktor pretička zraka (uz odgovarajuće konstrukcijsko rješenje) je jedan od ključnih parametara za optimiranje i postizanje skoro-potpunog izgaranja. Na slici 4 prikazane su emisije ugljikovog monoksida kao funkcija pretička zraka za različite tipove ložišta za izgaranje biomase. Jasno je vidljivo da za pojedine vrste ložišta postoji optimalan pretičak zraka za postizanje skoro-potpunog izgaranja. Na slici 5 je pokazano da su kod drvene biomase emisije ugljikovodika vrlo usko povezane s emisijama ugljikovog monoksida.

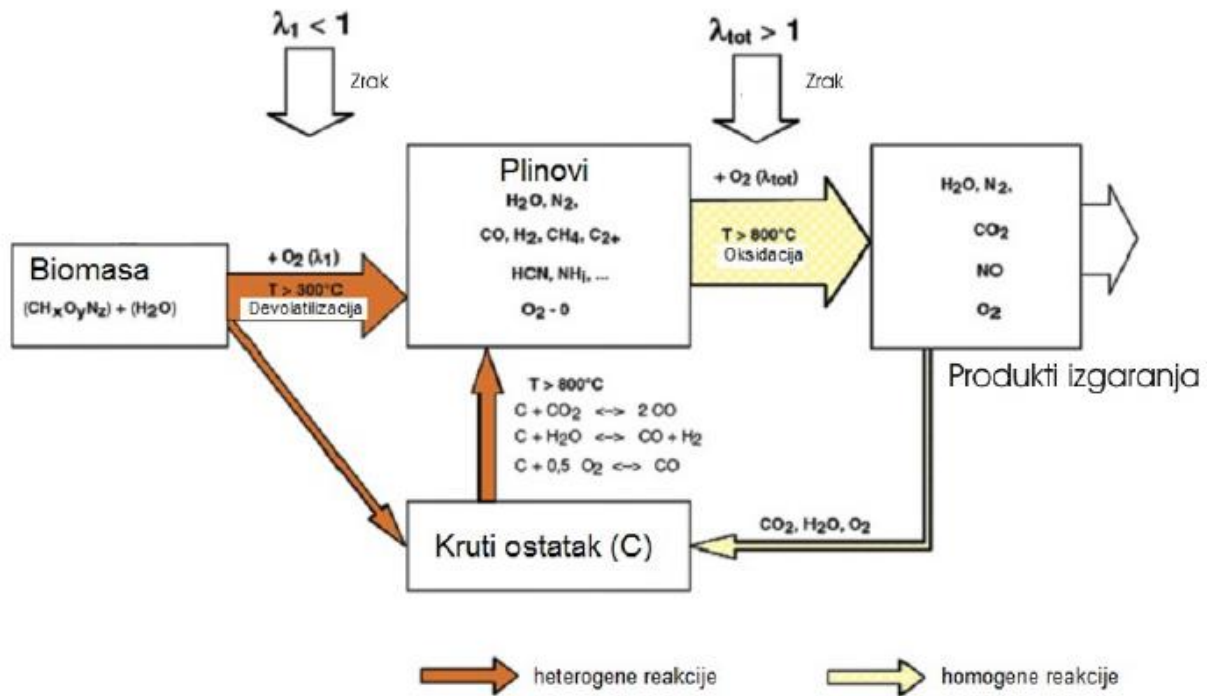


Slika 4. CO emisije u funkciji pretička zraka [40]



Slika 5. Emisije ugljikovodika u funkciji CO emisija za razna ložišta [41]

Stupnjevano dovođenje zraka za izgaranje pokazalo se kao učinkoviti način ostvarivanja kvalitetnog izgaranja, odnosno postizanja skoro-potpunog izgaranja [10]. Zbog manjeg volumnog protoka zraka za izgaranje u primarnoj zoni izgaranja, dimni plinovi se duže zadržavaju u zoni visoke temperature. Sekundarni zrak se obično dovodi iznad primarnog zraka, gdje dolazi do intenzivnog miješanja zraka s hlapivim plinovima i konačnog izgaranja gorivih sastojaka. Ovakvim načinom izgaranja biomase s faktorom pretička zraka od otprilike 1,5 postiže se skoro-potpuno izgaranje. Kemijske reakcije prilikom stupnjevanog dovođenja zraka za izgaranje prikazane su na slici 6.

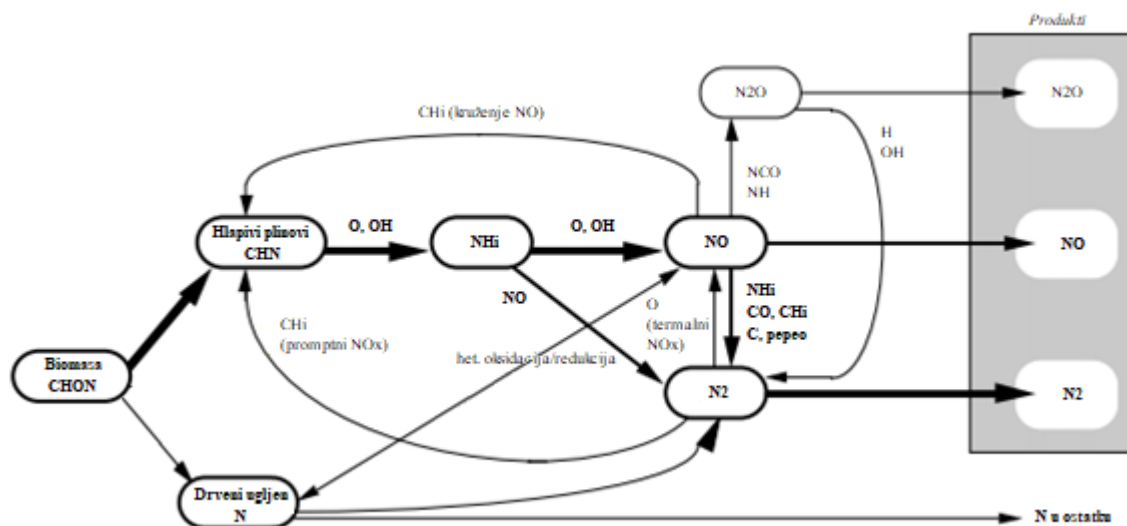


Slika 6. Kemijske reakcije prilikom stupnjevanog dovođenja zraka za izgaranje [42]

Emisije dušikovih oksida

U ložištima, emisije dušikovih oksida (NO i NO₂, zajednički naziv NO_x) mogu nastati u tri različite reakcije. Termalni i promptni NO_x nastaju iz dušika iz zraka na visokim temperaturama (brzina nastanka termalnog NO_x-a postaje značajna tek iznad 1.400 °C) i u slučaju promptnog NO_x u prisustvu ugljikovodika. NO_x iz goriva nastaje prilikom izgaranja goriva koja sadrže dušik. Kod ložišta na biomasu, dušik iz goriva je glavni izvor emisija dušikovih oksida, dok termalni i promptni NO_x nisu toliko značajni zbog relativno niskih temperatura izgaranja (< 1.000 °C u slučaju kućanskih kotlova). Dušik iz goriva (emitiran u obliku NH₃) oksidira u intermedijarni NO (NH₃+O₂=NO+H₂O+0,5·H₂), što je slučaj u konvencionalnim ložištima. Ako kisik nije prisutan, intermedijarni spojevi mogu reagirati u redukcijskoj zoni pritom stvarajući N₂ u reakciji poput NO+NH₂=N₂+H₂O (slika 7). Tijekom zadnjih nekoliko godina razvijane su tehnologije stupnjevanog izgaranja (stupnjevano dovođenje zraka za izgaranje, stupnjevano dovođenje zraka i goriva) s ciljem ostvarivanja gore napisane redukcijske jednadžbe. Tehnologije omogućavaju smanjenje emisija NO_x za 50% u slučaju drvene biomase i do 80% u slučaju biomase s većim sadržajem dušika. Navedeni učinci se mogu postići samo u idealnim uvjetima koji u većoj mjeri nisu mogući kod manjih uređaja. Tako npr. u slučaju stupnjevanog dovođenja zraka za izgaranje, količina primarnog zraka koji bi se trebao dovoditi odgovara pretičku zraka od 0,7. U redukcijskoj zoni potrebno je održavati temperaturu od 1.150

°C uz vrijeme zadržavanja dimnih plinova od 0,5 s. Ostvarivanje ovako visokih temperatura nije moguće u kućanskim uređajima te ovako visoke temperature mogu uzrokovati probleme taljenja pepela, naročito kod nedrvne biomase. Osim primarnih mjera postoje sekundarne mjere (selektivna katalitička redukcija i selektivna nekatalitička redukcija) koje mogu ostvariti smanjenje emisija NO_x za 90-95% no one se za sad ne primjenjuju u kućanskim uređajima. Valja naglasiti da prilikom korištenja sekundarnih mjera smanjenja emisija NO_x može doći do povećanja emisija drugih polutanata (H_2CO , N_2O , NH_3 , HCN i ostali).

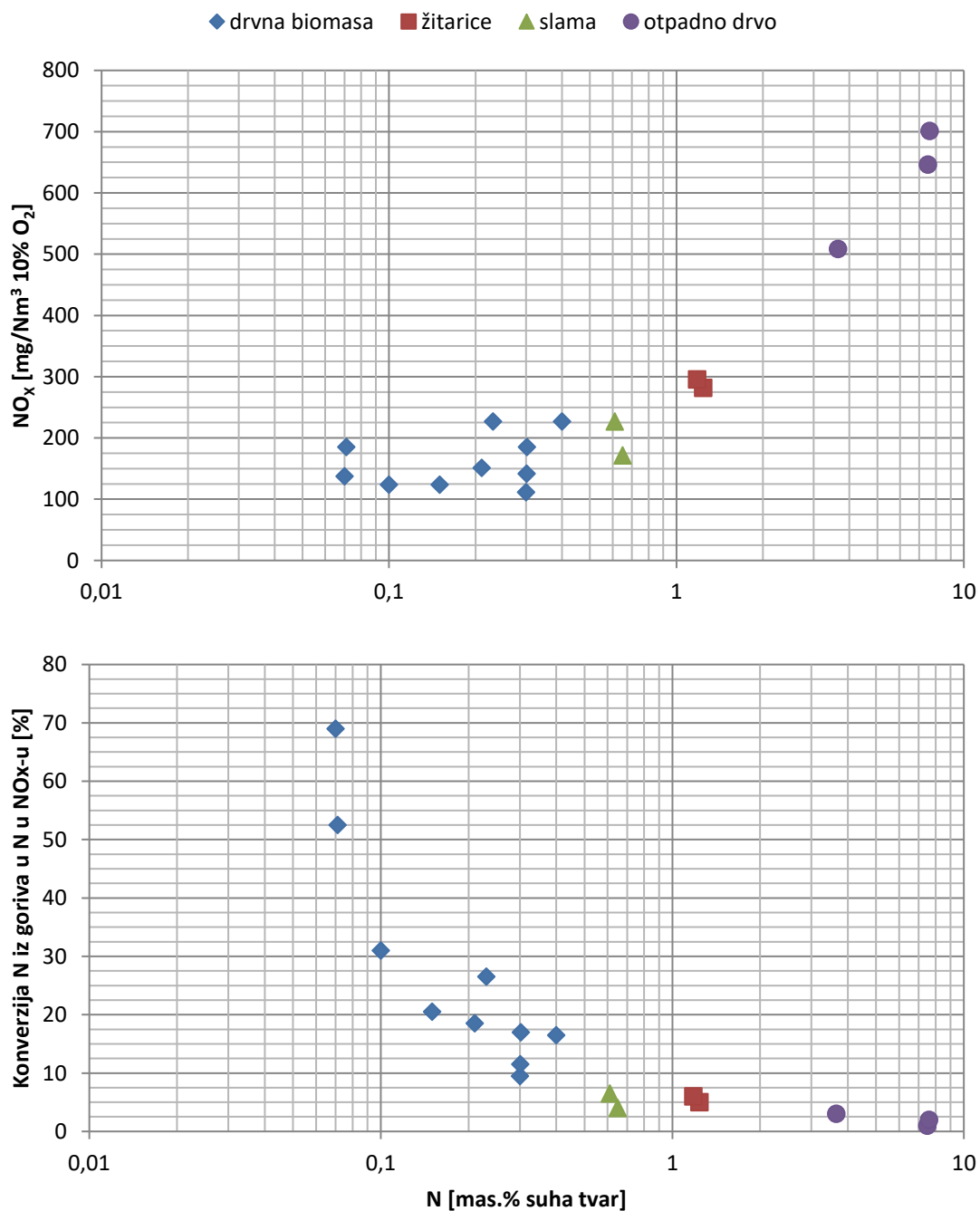


Slika 7. Nastanak NO_x iz goriva [40]

Autori u [14, 18] ustanovili su logaritamsku korelaciju između emisija dušikovih oksida i sadržaj dušika u gorivu. S obzirom na granične vrijednosti dušikovih oksida definiranih u [43] i male mogućnosti konstrukcijskog utjecaja na njihovo smanjenje, za pre-evaluaciju goriva iz novih izvora biomase poželjno je unaprijed znati očekivane vrijednosti emisije.

U nastavku su prikazane dušikovih emisije dobivene izgaranjem različitih goriva u suvremenom postrojenju koje koristi izgaranje na rešetci s tehnologijom stupnjevanog dovođenja zraka za izgaranje (slika 8). Na temelju tih rezultata može se povući korelacija između sadržaja dušika u gorivu i ukupnih emisija dušikovih oksida. S obzirom da se dobiveni rezultati odnose na veće postrojenje, gdje je moguće ostvariti „pravilno“ stupnjevano dovođenje zraka za izgaranje, za izgaranje peleta u plameniku toplovodnih kotlova manje snage očekuju se nešto nepovoljniji rezultati. Razlog tome je što tehnologijom izgaranja u plameniku kućanskih uređaja ipak nije moguće toliko optimirati stupnjevano dovođenje zraka za izgaranje. Zbog toga dobivene rezultate možemo na neki način shvatiti kao tehnički maksimum, odnosno

minimalne emisije koje se mogu ostvariti korištenjem ove tehnologije. Na slici 8 vidljivo je da veći sadržaj dušika u gorivo generira veće emisije dušikovih oksida. Također može se primijetiti da je kod goriva s manjim sadržajem dušika veći relativni udio dušika podvrgnuti konverziji u dušikove okside.



Slika 8. Odnos između sadržaja dušika u gorivu i emisija NO_x; udio N koji oksidira u NO_x [44]

Analizirajući ove dijagrame i kemijske sastave pojedine biomase (tablica A.1) možemo ustvrditi klasifikaciju biomase s obzirom na udio dušika u gorivu na:

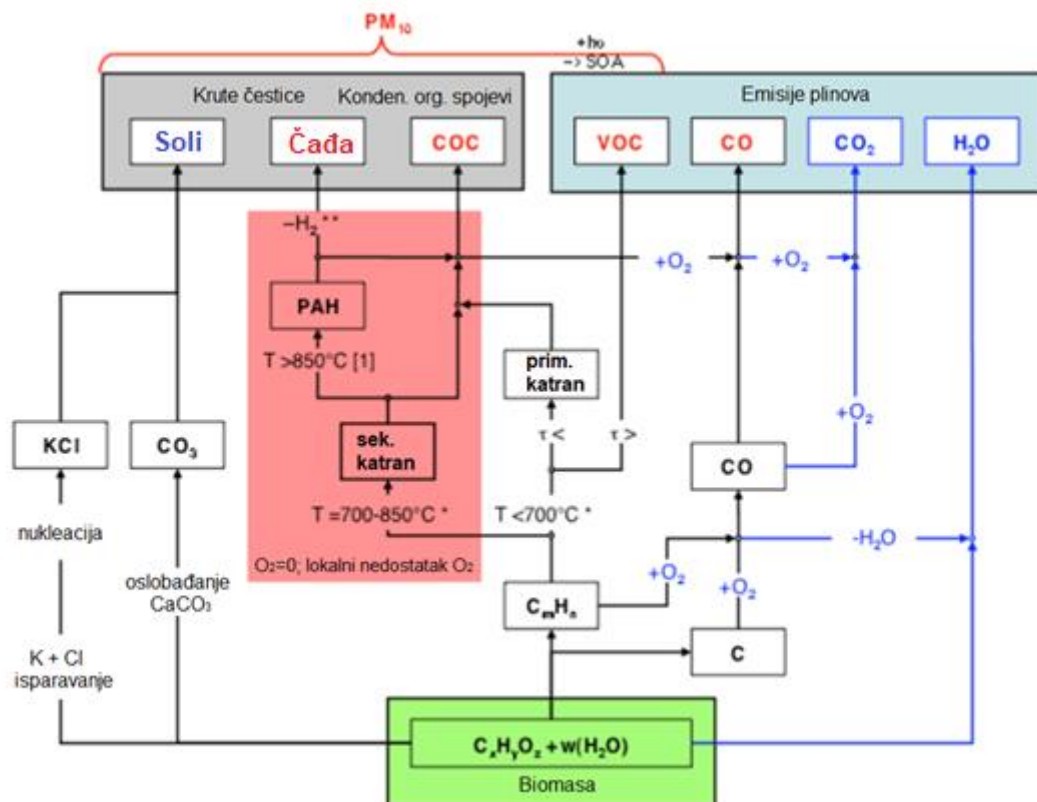
- Biomasi s niskim udjelom dušika ($N < 0,4\%$) – pretežno drvena biomasa
- Biomasi s umjerenim udjelom dušika ($0,4\% < N < 1\%$) – slama, šikare
- Biomasi s visokim udjelom dušika ($N > 1\%$) – otpadno drvo, žitarice

Temeljem istraživanja kemijskog sastava može se zaključiti da sve nove vrste biomase (ostaci iz poljoprivrede, energetske usjevi i sl.) spadaju u grupu biomase s umjerenim ili visokim udjelom emisija te se shodno tome veće emisije dušikovih oksida (iznad 200 mg/Nm^3 -na 13% O_2) očekuju u odnosu na klasičnu drvenu biomasu.

Emisije čestica i aerosola



Za izgaranje biomase karakteristična su tri tipa čestica i aerosola koje se mogu svrstati u „soli“, „čada“ i „kondenzirajući organski spojevi“ (slika 9):

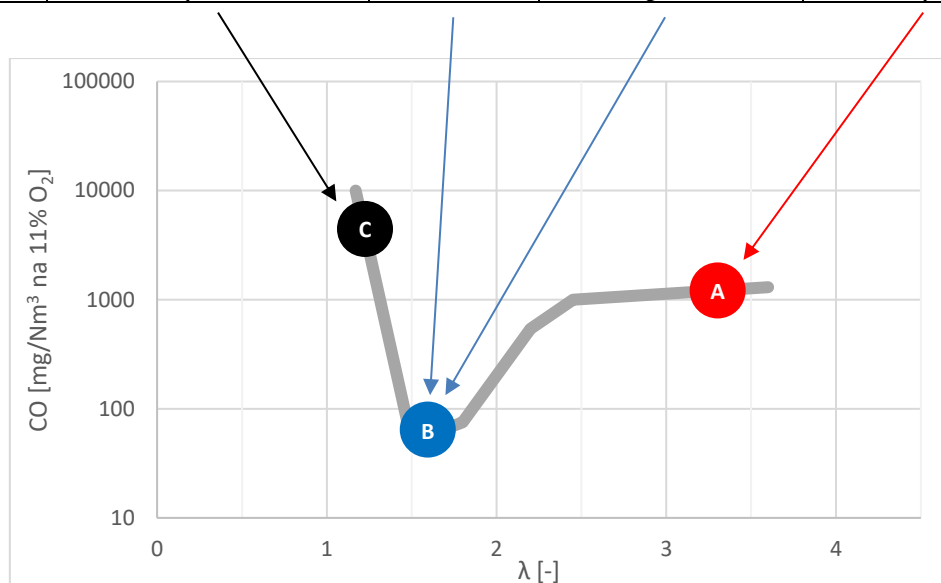
- Anorganske čestice, tzv. „soli“, nastaju iz minerala iz goriva (pepeo). Te čestice su dominantne pri skoro-potpunom izgaranju, odnosno imaju najveći udio u sastavu emitiranih čestica i aerosola
- „Kondenzirajući organski spojevi“ nastaju u različitim procesima:
 - Na niskim temperaturama ($< 700 \text{ }^\circ\text{C}$) hlapivi plinovi ili kondenzirajući organski spojevi koji nastaju prilikom raspadanja biomase jako su ovisni o vremenu zadržavanja, temperaturi i ostalim parametrima izgaranja
 - Na umjerenim temperaturama ($700\text{-}850 \text{ }^\circ\text{C}$) i nedostatku kisika organski spojevi se mogu pretvoriti u sekundarni katran
- Čada nastaje iz organskih prekursora (katrana) u zonama s visokim temperaturama i nedostatkom kisika, gdje hlapivi plinovi i primarni katran reagiraju sa sekundarnim katranom stvarajući poliaromatske ugljikovodike, koji u konačnici mogu stvoriti čestice čađe daljnjom aglomeracijom i otpuštanjem vodika. Primarni katran može nastati iz C_xH_y spojeva na temperaturama ispod $700 \text{ }^\circ\text{C}$.



Slika 9. Mehanizmi nastajanja čestica i aerosola [45]

Slika 9 prikazuje glavne mehanizme nastanka čestica u dimnim plinovima. U automatskim sustavima loženja drvene biomase, skoro-potpuno izgaranje se vrlo lako može postići te su „soli“ dominantne emisije čestica. Međutim, tijekom paljenja i u uvjetima neprikladnog rada, kondenzirajući organski spojevi i čađa mogu također biti emitirani u značajnijoj mjeri. Nepotpuno izgaranje je često za ručno ložena ložišta, gdje su kondenzirajući organski spojevi i čađa značajan (čak i dominantan) dio ukupnih emisija čestica u atmosferu.

Aerosoli	Uvjeti izgaranja			Piroliza
	Visoka temperatura i nedostatak kisika u plamenu	Prijelazno ↔	Visoka temperatura uz dovoljno kisika u plamenu	Niska temperatura (visoka vrijednost pretička zraka)
Prikaz				
Dominantna vrsta čestica	Čađa	Čađa i anorganske čestice	Anorganske čestice	Kondenzirajući organski spojevi
Boja	Crno	Sivo	Bijelo	Smeđe
Utjecaj na zdravlje	umjerena toksičnost umjerena kancerogenost upalno	↔	niska toksičnost niska kancerogenost upalno	visko toksičnost visoka kancerogenost upalno

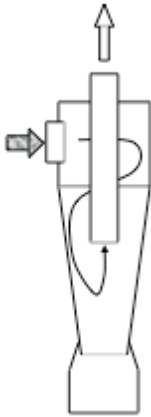
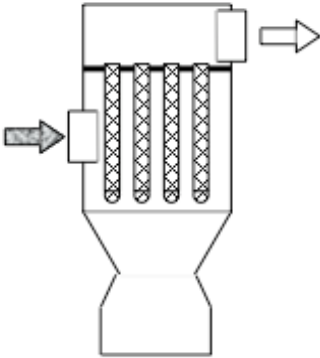
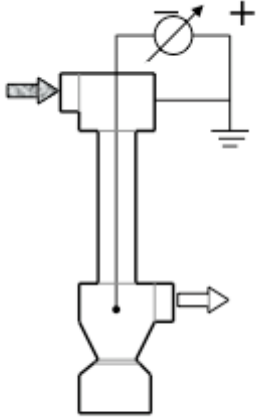


Slika 10. Svojstva glavnih vrsta aerosola generirani prilikom izgaranja biomase [46]

Slika 10 sumira glavne značajke soli, čađe i kondenzirajućih organskih spojeva koji se mogu naći u dimnim plinovima zajedno s režimima nastanka istih prilikom izgaranja biomase. Točka C opisuje izgaranje s premalim pretičkom zraka ($\lambda = 1,2$). Kod takvog izgaranja temperatura plamena je visoka i manjak je kisika za izgaranje te se generiraju pretežno čestice čađe. Točka A opisuje izgaranje s prevelikim pretičkom zraka ($\lambda = 3,5$). Zbog niske temperature izgaranja, a koja je posljedica pretička zraka, od čestica i aerosola se pretežno javljaju kondenzirajući organski spojevi. Slično se javlja i pri procesu pirolize gdje je $\lambda \ll 1$. Zbog niske temperature izgaranja izbjegnuto je generiranje čađe. Točka B opisuje skoro-potpuno izgaranje ($\lambda = 1,55$). Zahvaljujući visokoj temperaturi plamena i dovoljnoj količini kisika generirane čestice pretežno su soli.

U slučaju skoro-potpunog izgaranja biomase, značajne količine anorganskih čestica („soli“) mogu biti emitirane u okoliš (K, Cl, S, Ca, Na, Si, P, Fe, Al). Emisije tih čestica mogu u nekoj mjeri biti smanjene preko koncepta izgaranja, tzv. „low-particle-concept“. Koncept se zasniva na principu rada gdje primarna zona izgaranja služi kao rasplinjač (vrlo niski pretičak zraka). Koncept se zasniva na sljedećim mehanizmima:

- Niža temperatura smanjuje isparavanje minerala iz goriva i nastanak soli poput KCl.
- Smanjena brzina strujanja kroz žar, smanjuje zahvaćanje i odnošenje minerala i goriva.
- Nedostatak kisika smanjuje oksidaciju minerala iz goriva.
- Sama posteljica goriva se ponaša kao neka vrsta filtera.

Ciklon	Filtar	Elektrostatski filtari
> 5 μm	> 0,01 μm	> 0,01 μm
		

Slika 11. Tehnologije smanjenja emisija čestica [46]

Međutim za značajnija smanjenja emisija koriste se sekundarne mjere poput ciklona, klasičnih vrećastih i elektrostatskih filtera (slika 11). Cikloni se upotrebljavaju u sustavima gdje nije potrebna niska razina čestica u dimnim plinovima (do 150 mg/Nm³ na 11% O₂). Cikloni nisu u mogućnosti značajnije smanjiti emisije čestica ispod 5 mikrona (PM₅). Za takve primjene se uglavnom koriste elektrostatski filteri. U današnje vrijeme isti se instaliraju na izlazu iz kotla (prije dimnjače) ili u samom dimnjaku. U slučaju „suhih“ dimnih plinova i vrlo strogih emisija čestica često se koriste vrećasti filteri.

Ostale emisije

Udio sumpora u biomasi kreće se od 0,1-0,5% suhe tvari što je malo u usporedbi s većinom ugljena, tako da se prilikom izgaranja biomase očekuju male emisije sumporovog dioksida. Udio klora u drvnjoj biomasi je vrlo nizak, dok se veće vrijednosti mogu pronaći u nekim vrstama slame (do 2% suhe tvari) i mogu predstavljati značajan utjecaj na okoliš. I klor i sumpor u biomasi mogu biti u organskim spojevima, ali su uglavnom prisutni kao anorganske soli (pretežno kalijeve soli). Klor može reagirati s metalima poput kalija i natrija, stvarajući hlapive spojeve i aerosole, koji se tijekom hlađenja mogu taložiti na stijenkama kotla. Klor u obliku klorovodika (HCl), može također reagirati s organskim spojevima stvarajući dioksine [47]. Dioksini i dioksinu slični spojevi su vrlo toksični i vrlo postojani organski zagađivači.

Općenito, mehanizam nastanka dioksina je vrlo složeni proces. U pravilu, iz bilo kojeg ugljikovodika iz dimnih plinova koji se nađe u vrućim zonama ložišta može nastati benzen, a zatim fenol i radikal fenola (u oksidacijskoj atmosferi) koji tada mogu međusobno reagirati, pritom stvarajući prekursore dioksina. Međutim, sve dok je izgaranje skoro-potpuno, smanjenjem količine organskih plinovitih spojeva, ugljikovog monoksida i kisika (optimalni pretičak zrak – Točka B na Slici 10) i čestica u dimnim plinovima, utjecaj na okoliš je minimalan. Nadalje, kako dioksini nisu kemijske spojevi visoke toplinske stabilnosti, Hunsinger i ostali [48] dokazali su da temperature veće od 900 °C i nedostatak kisika mogu dovesti do potpunog raspada dioksina i drugih spojeva sličnih dioksinima. S druge strane, većina emitiranih dioksina i dioksinima slični spojevi nastaju iza zone izgaranja (iza ložišta) u tzv. „de-novo“ sintezi, na temperaturama ispod 500 °C, a kao rezultat niza katalitičkih reakcija koje se odvijaju na površini čestica koje sadrže minerale poput Cu, Fe, Ni, Al, Zn [47].

2.1.4 Biomasa u formi peleta

U razvijenom svijetu, biomasa se pretežno koristi za proizvodnju topline, ili u postrojenjima daljinskog grijanja ili u kućanskim toplovodnim kotlovima i pećima na cjepanice i drvne pelete. Izgaranje biomase u kućanskim toplovodnim kotlovima smatra se značajnim izvorom onečišćenja okoliša. To se posebno odnosi na emisije hlapivih organskih spojeva, policikličkih organskih ugljikovodika, i čestica [5, 49]. Postoje brojni radovi koji analiziraju te emisije, kao npr. [15, 18, 50]. Najniže emisije postižu se izgaranjem biomase u formi peleta. Suho drvo u formi peleta, s niskim sadržajem pepela, omogućava direktnu usporedbu biomase s fosilnim gorivima u pogledu gustoće energije.

U cilju postizanja niskih emisija, odnosno skoro-potpunog izgaranja potrebno je imati kvalitetne pelete. Kvaliteta peleta u EU izražava se ENplus Certifikatom koji razvrstava pelete u različite klase A1, A2, i B (za drvne pelete) te A i B (za nedrvne pelete). Za određivanje klase mjerodavni su sljedeći standardi: ISO 17225-1:2014 [51], ISO 17225-2:2014 [52] i ISO 17225-6:2014 [53]. Standard [51] utvrđuje klase kvalitete goriva i svojstva krutih biogoriva od sirovih i prerađenih materijala koji potječu od: šumarstva i voćarstva, poljoprivrede i vrtlarstva i akvakultura. Standard [52] utvrđuje klase kvalitete goriva i svojstva drvnih peleta za neindustrijsku i industrijsku primjenu. Standard [53] utvrđuje klase kvalitete goriva i svojstva nedrvnih peleta.

Zahtjevi za toplovodne kotlove na biomasu, kako bi se isti mogli plasirati na tržište EU dani su kroz standard [43]. Isti standard uključuje i granične vrijednosti toplinske učinkovitosti i emisija štetnih tvari dimnim plinovima propisane u EkoDesign Direktivi (tablice B.4 i B.5 [54]). Nadalje, EkoDesign Direktiva prepoznaje dioksine i furane kao potencijalno značajne, no zbog premalo dostupnih mjerenih podataka nisu dane granične vrijednosti za njihove emisije, niti je propisano njihovo mjerenje. Zahtjevi svih navedenih standarda i direktiva sažeto su prikazani su u prilogu B ovog rada.

Zadnjih nekoliko godina, potražnja za drvnim peletima pada. To je povezano s činjenicom što je cijena korištenja peleta postala prilično visoka. Za usporedbu, trenutna cijena prirodnog plina je otprilike 0,26 kn/kWh (bez PDV-a), dok cijena A1 drvnog peleta se kreće oko 28,00 kn za 15 kg peleta (bez PDV-a) te cijena A2 drvnog peleta oko 22,5 kn za 15 kg peleta (bez PDV-a). Uz pretpostavku godišnje toplinske učinkovitosti kondenzacijskog kotla od 95% i kotla na pelete od 90% dobivaju se sljedeće cijene toplinske energije za kućanstvo (u zgradama su navedene cijene s PDV-om):

- 0,27 (0,34) kn/kWh isporučene energije za prirodni plin
- 0,44 (0,55) kn/kWh isporučene energije za A1 drvni pelet
- 0,36 (0,45) kn/kWh isporučene energije za A2 drvni pelet

Prikazana situacija na tržištu energenata omogućila je rast tržišta nedrvenih peleta te tako peleti iz poljoprivrednih ostataka postaju sve poželjnije gorivo, upravo zbog svoje niže cijene u usporedbi s drvnim peletima. Cijena takvih peleta na tržištu RH kreće se oko 0,64 kn/kg (bez PDV-a), gdje uz najnižu vrijednost ogrjevnosti prema [53] i pretpostavke vrlo niske godišnje toplinske učinkovitosti kotla od 80% dobivamo:

- 0,20 (0,25) kn/kWh isporučene energije za pelete iz poljoprivredne biomase (manje od prirodnog plina)

2.1.5 Poljoprivredna biomasa

Poljoprivreda je značajan potrošač energije, no korištenjem ostataka iz njene proizvodnje može postati i njezin proizvođač (obzirom da svake godine na polju ostanu velike količine neiskorištene biomase). Upravo zbog toga je gospodarenje poljoprivredom, a time i poljoprivrednom biomasom od strateške važnosti. Prema Statističkim podacima [55] ukupno korištene poljoprivredne površine u RH zauzimale su 1.485.645 ha (podaci za 2018.). Ratarske kulture, pšenica, ječam, kukuruz, soja, suncokret i uljana repica zauzimale su 459.703 ha (što iznosi 21,8% ukupnih poljoprivrednih površina). Upravo zbog ovih količina postoji interes za iskorištavanje ostataka tih ratarskih kultura, naročito slame.

Pod slamom uglavnom se podrazumijeva biomasa koja potiče od jednogodišnjih i višegodišnjih biljaka. Pri tome se pod pojmom slamnati materijal smatra ili sporedni produkt proizvodnje (ostatak ili otpad) ili se radi o specijalnim energetske biljkama (*Mischanthus* i ostale). Proizvodnja goriva od ostataka poljoprivredne proizvodnje je od posebne važnosti, jer se na taj način ne povećava konkurencija između proizvodnje goriva i hrane. U ovom radu slamom se načelno naziva žetveni ostatak koji nastaje kod zrnatih kultura (žitarice, uljana repica, kukuruz i sl.). Tradicionalni načini iskorištavanja slame podrazumijevaju proizvodnju humusa (zaoravanjem), stajnjaka ili hrane za životinje. Uklanjanje slame s polja svakako treba uzeti u obzir prilikom planiranja gnojenja. Jedno od čestih metoda zbrinjavanja slame jest paljenje na otvorenom. Izgaranje u takvim, nekontroliranim uvjetima rezultira u značajnim emisijama polutanata (CO₂, CO, SO_x, VOC, HC, PAH, HCl, dioksini i furani i sl.), a bez dobivanja korisne toplinske energije.

Žitarična slama je raspoloživa u ljetnim i ranim jesenskim mjesecima. Količina koja se može žeti varira od lokacije, vrste kulture, ali se može grubo procijeniti na osnovi relativno konstantnog odnosa između mase zrna i slame pojedine žitarice uz otprilike 15% žetvenih

gubitaka [36]. Načelno se može računati s planski ostvarivim godišnjim prinosom od otprilike 6 t/ha (mase sušene na zraku). Kao gruba procjena može se uzeti da to energetske odgovara 2400 litara lož-ulja po hektaru. No za procjenu energetske potencijala slame u pojedinoj regiji ne može se uzeti ukupni potencijal, obzirom da se jedan dio slamnatih ostataka koristi za održavanje uravnoteženog balansa humusa ili kao prostirka u stočarstvu. Prema Ćosiću i ostalima [56] Hrvatska ima tehnički potencijal od 400.000 tona u kukuruzu i 750.000 tona u pšenici. Također postoji potencijal u slami soje i uljane repice [57]. Cijena peleta iz poljoprivredne biomase, u kojoj su uključeni troškovi prikupljanja i pretvorbe u gorivo (poglavlje 2.1.4), pokazala se konkurentnom ostalim energentima, a dok je sama prikladnost korištenja pojedinih vrsta istražena u ovom radu.

Gustoća sjeckane slame iznosi 50-120 kg/m³ [58], dok gustoća drvene biomase iznosi 170-600 kg/m³ [59], što rezultira u povećanim troškovima transporta. Zbog toga se slamnata goriva u pravilu isporučuju u komadnom (bale, briketi ili peleti) ili rasutom stanju (sječka). Slamnata goriva u obliku briketa se vrlo rijetko proizvode. Od svih, slamnati materijal u obliku peleta ima najveći potencijal za korištenje u ložištima kućanskih uređaja. U RH mogu se pronaći sljedeći peleti od poljoprivrednih ostataka: slama pšenice, slama soje, slama uljane repice. Mala energetska gustoća i fizička svojstva slamnatog materijala otežavaju proizvodnju kvalitetnog peleta te ih zbog toga većina na tržištu ne zadovoljava zahtjeve norme ISO 17225-6 [53] što prouzrokuje dodatne probleme prilikom njihovog korištenja u toplovodnim kotlovima (niže temperature izgaranja, potreban veći volumen za izgaranje, mrvljene peleta). Razlog tome je što je ispitivanje na dobrovoljnoj bazi i ono se u pravilu ne radi, osim kod renomiranih proizvođača (postoje samo za drveni pelet). Također je važno naglasiti da se trenutno peleti iz poljoprivredne biomase proizvode u širokom spektru strojeva za proizvodnju peleta od kojih su većina bila ili još uvijek jesu namijenjena za proizvodnju drvnih peleta ili stelje za životinje. Potrebne preinake često su uvedene na jednostavan način (ili uopće nisu) što u konačnici rezultira u peletima vrlo raznolike kvalitete. Postoje radovi koji se bave pronalaskom optimalnih i minimalnih zahtjeva za pelete iz raznih trava [60], no kao mjerodavne možemo smatrati granične vrijednosti propisane EN/ISO normama [51-53].

Neovisno o kvaliteti samog peleta iz poljoprivredne biomase, njihovo izgaranje u postojećim kućanskim toplovodnim kotlovima praktički je nemoguće na ekološki prihvatljiv način [10]. To prvenstveno proizlazi iz visokih emisija čestica prašine, ugljikovog monoksida i organskih

plinskih spojeva, male toplinske učinkovitosti (koja može biti posljedica visokog pretička zraka) i problema niske temperature taljenja pepela [13].

Werther i ostali u svom preglednom radu [10] daju nekoliko glavnih izazova vezanih uz izgaranje ostataka iz poljoprivredne proizvodnje u ložištima kućanskih uređaja. Glavni problemi koje su istakli su:

- Emisije polutanata
- Niža toplinska učinkovitost uređaja
- Problemi vezani uz taljenje pepela

U preglednom radu [57] zaključeno je da u postojećim ložištima i plamenicima koji su namijenjeni za izgaranje drvene biomase nije moguće izgarati pelete iz poljoprivrednih ostataka i ostala nedrvna goriva na ekološki prihvatljiv način. Uz to javljaju se i drugi problemi prilikom izgaranja.

U literaturi postoji dosta radova na temu emisija polutanata dobivenih izgaranjem peleta iz poljoprivredne biomase i ostale nekonvencionalne biomase. Tako su indikatori emisije ugljikovog monoksida, dušikovih oksida i organskih plinskih spojeva (emisije svedene na kilogram goriva) 7 različitih vrsta biomase istraženi u [15]. Istraživanje je provedeno u laboratorijskom ložištu na 5 različitih temperatura (700-1.100 °C) i 3 različite dobave zraka za izgaranje. U većini slučajeva indikatori emisija za biomasu, posebno za organske plinske spojeve, su se pokazali većim od onih za ugljen. U prosjeku najveći indikatori emisija organskih plinskih spojeva pokazali su se za brikete biomase iz poljoprivrednih ostataka (slama uljane repice). Usporedba emisija oksida ugljika, sumpora i dušika dobivenih izgaranjem nekoliko vrsta biomase pri visokim režimima grijanja u električne peći dana je u [13]. U istraživanju se torificirana biomasa pokazala ekološki prihvatljivijom (manje emisije polutanata). Torefakcija je termokemijski tretman biomase na temperaturama od 200 °C do 320 °C, a provodi se na atmosferskom tlaku i bez prisustva kisika, tj. bez zraka. Tijekom procesa torefakcije, otpušta se voda sadržana u biomasi, kao i dio hlapivih tvari (celuloza, hemiceluloza i lignin djelomično se raspadaju). Krajnji proizvod je suhi, pocrnjeni materijal koji se naziva bio-ugljen.

Garcia-Maraver i ostali [50] istražuju emisije kućanskog toplovodnog kotla koji kao gorivo koristi pet različitih vrsta peleta (bor, pluto, drvo maslina i ostaci obrezivanja maslina). Iako sličnog sadržaja dušika, peleti od pluta i drva masline emitirali su veće količine dušikovih

oksida. Autori to objašnjavaju činjenicom da se prilikom izgaranja mogu javljati mjesta (na rešetci) gdje je veći sadržaja dušika u gorivu (kod većeg sadržaja dušika u gorivu faktor konverzije N u NO_x je manji, slika 8) te katalitičkim pojavama na površini ostatka nakon rasplinjavanja biomase. Navedene pojave mogu se razlikovati od goriva do goriva. Najveće emisije dušikovih oksida ostvarene su izgaranjem peleta od ostataka obrezivanja maslina, što je povezano i s najvećim sadržajem dušika u gorivu.

U [14] su prikazane emisije 4 vrsta peleta (iz travnate i drvene biomase) dobivene izgaranjem u ložištu konstruiranom za izgaranje peleta s visokim udjelom pepela. Istraživanje je pokazalo da se i nedrvna biomasa može uspješno izgarati u za to prikladnim ložištima s emisijama sličnim onima dobivenih izgaranjem drvnih peleta. Veće emisije dušikovih oksida posljedica su većeg sadržaja dušika u gorivu kod peleta iz travnate biomase. U [61] autori su otkrili da osim sadržaja dušika u gorivu, na emisije dušikovih oksida utjecaj ima i dobava zraka za izgaranje. U pravilu, veći pretičak zraka uzrokovao je povećanu konverziju dušika iz goriva.

U [62] ispitivane su emisije osam različitih peleta u kotlu namijenjenom za izgaranje više vrsta goriva, nazivnog toplinskog učina 40 kW. Utvrđeno je da najmanji ekološki utjecaj ima izgaranje drvnih peleta (najveća toplinska učinkovitost i najniže emisije). Zbog visokog sadržaja pepela i niske temperature taljenja, peleti slame nisu se pokazali prikladnim za izgaranje u korištenom kotlu.

Zeng i ostali [18], svjesni glavnih problema korištenja nedrvne biomase (šljake i emisije polutanata), eksperimentalnim ispitivanjem u komercijalnom toplovodnom kotlu analiziraju izgaranje sedam raznih mješavina biomase (od Mischanutsa, slame pšenice, bora) u obliku peleta. Istraživanje je pokazalo da se značajnija poboljšanja u smanjenju stvaranju šljake i emisija ostvaruju u mješavinama s minimalnim masenim udjelom bora od 50%. Ovdje je važno također napomenuti da na tržištu ne postoje drveni peleti klase A1 koji u svom sastavu nemaju crnogoricu.

Analiza emisija raznih polutanata istražena je u [44]. Utvrđeno je da otprilike 80% sumpora sadržanog u gorivu emitirano u dimne plinove. Prilikom izgaranja emitirani sumpor uglavnom formira spojeve poput sumporovog dioksida (SO_2) i sumporovog trioksida (SO_3) te alkalijske i alkalne sulfate. S obzirom na činjenicu da poljoprivredna biomasa imaju veći udio sumpora u svom sastavu (Tablica A.1) za očekivati je značajnije emisije navedenih spojeve prilikom

njihovog izgaranja. Slični zaključci dobiveni su i za klor u gorivu. Tako se prilikom izgaranja poljoprivredne biomase očekuju veće emisije spojeva na bazi klora (HCl, Cl₂, KCl, NaCl) u odnosu na klasičnu drvenu biomasu.

Najznačajniji problem vezan uz veću količinu pepela (u usporedbi s drvnom biomasom) je njegova niska temperatura taljenja, koja može rezultirati ozbiljnim problemima u radu, što uključuje taloženje i aglomeraciju na rešetci (dobava zraka za izgaranje) i na stijenkama za izmjene topline (smanjenje snage i korozija). Nedrvna biomasa obično ima visoki sadržaj alkalijskih oksida i soli koji posljedično doprinose niskoj temperaturi taljenja pepela. Stoga bi pažljiva analiza svojstava taljenja pepela trebala biti prvi korak u odabiru odgovarajućeg sustava izgaranja i uvjeta izgaranja za odabranu biomasu. Obično poljoprivredni ostaci i energetske kulture imaju veći udio kalijevog oksida (K₂O) u usporedbi s drvnom biomasom ili ugljenom [10]. To se uglavnom pripisuje korištenju gnojiva u poljoprivrednoj industriji. Utjecaj sadržaja kalijevog oksida na točku taljenja pepela prikazan je u tablici 1. Budući da se pepeo sastoji od mješavine različitih anorganskih spojeva, nema dobro definirano talište pa se proces taljenja odvija u širokom rasponu temperatura počevši od početne temperature deformacije (temperatura početka skupljanja pepela – SST). Vidljivo je da slama raži, zobi i ječmu s visokim sadržajem kalijevog oksida imaju znatno niže karakteristične temperature taljenja u usporedbi s pšeničnom slamom koja ima niži sadržaj.

Tablica 1. Temperature taljenja pepela [63]

	Pšenica	Raž	Zob	Ječam
K ₂ O (mas. %)	6,6	19,2	40,3	40,3
Temperatura deformacije (°C)	900-1050	800-850	750-850	730-800
Temperatura hemisfere (°C)	1.300-1400	1.050-1.150	1.000-1.100	8.50-1.050
Temperatura tečenja (°C)	1.400-1500	1.300-1.400	1.150-1.250	1.050-1.200

Autori u [16, 64] analizirali su taljenje pepela u ovisnosti o njegovom sadržaju. Boström i ostali [65] otkrili su da goriva s povećanim sadržajem kalcija i magnezija imaju više temperature taljenja pepela. Sommersacher i ostali [44] utvrdili su linearnu korelaciju između sadržaja pepela i njegovog taljenja. Lajili i ostali [12] ispitivanjem emisija polutanata prema [7] su dobili ohrabrujuće podatke za razmatranje peleta iz poljoprivredne biomase kao alternative klasičnim drvnim peletima.

2.2 Numeričko modeliranje izgaranja biomase

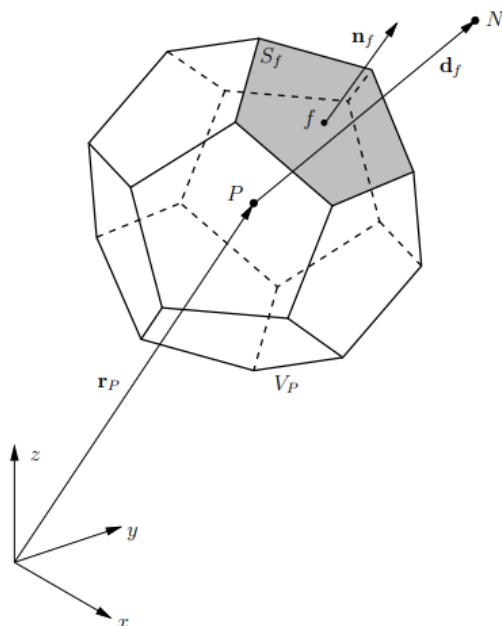
Numeričko modeliranje izgaranje krutog goriva provodi se na nekoliko načina, a izbor načina najviše ovisi o vrsti i veličini krutog goriva koje izgara. Za različite slučajeve izgaranja, različitih vrsta krutih goriva, razvijeni su različiti pristupi matematičkom modeliranju izgaranja. Pri modeliranju ložišta s izgaranjem na rešetki potrebno je definirati model sloja biomase, gdje se odvija interakcija između krute i plinovite faze što uključuje više složenih procesa. Gorivo, koje se nalazi na rešetki, zagrijava se zračenjem dimnih, ali i iz procesa izgaranja u samom sloju.

U heterogenom modelu sloja biomase na rešetki, svi su navedeni procesi mogući istovremeno na jednom segmentu sloja (sušenje, isplinjavanje i izgaranje krutog ostatka), pogotovo što su susjedne čestice biomase različite veličine i različito dugo su u procesu izgaranja (nalaze se u različitoj fazi termo-kemijske konverzije). Dodatna poteškoća je u tome da u samom sloju mogu biti prisutni značajni gradijenti temperature i koncentracija pojedine tvari. Zbog visokog stupnja složenosti navedenih pojava ne postoji detaljni model sloja biomase, odnosno ne postoji teorijski/numerički primjenjiv model koji bi egzaktno opisivao sve pojave koje se odvijaju u sloju biomase u ložištu.

Iz tog razloga se za pojedine slučajeve mogu razviti pojednostavljeni modeli koji mogu približno prikazati procese u sloju biomase i nastale produkte ranije navedenih procesa koji služe kao ulazni podaci za numeričke simulacije pojava u području iznad sloja biomase.

2.2.1 Diskretizacija metodom konačnih volumena pri stacionarnim uvjetima

Diskretizacija je postupak transformacije diferencijalnih jednadžbi u odgovarajući sustav algebarskih jednadžbi. Rješavanjem takvog sustava jednadžbi dobiva se skup vrijednosti koje odgovaraju približnom rješenju izvorne jednadžbe u prethodno definiranim točkama prostora. Diskretizacijom se prostorna domena se dijeli na konačan broj kontrolnih volumena, koji potpuno ispunjavaju domenu i pri tome se ne preklapaju. Primjer jednog kontrolnog volumena prikazan je na slici 12, gdje su s P i N označena težišta dva susjedna kontrolna volumena koji dijele osjenčanu stranicu f na kojoj je istom oznakom istaknuto težište.



Slika 12. Kontrolni volumen [66]

Metoda konačnih volumena primijenjena u numeričkoj simulaciji turbulentnog strujanja temelji se na integraciji transportne jednačbe održanja skalarne veličine φ oko svakog kontrolnog (ili konačnih) volumena.

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \varphi)}{\partial x_j} = \Gamma \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_j^2} + S \quad (2.4)$$

Integracijom oko proizvoljnog kontrolnog volumena, u stacionarnim uvjetima izraz (2.4) pisan u, za daljnji prikaz povoljnijem, vektorskom obliku nakon primjene Green-Gauss-ovog teorema o divergenciji postaje:

$$\oint \rho \cdot u \cdot \varphi \cdot \vec{A} = \oint \Gamma \cdot \nabla \varphi \cdot d\vec{A}_p + \int_V S \cdot dV \quad (2.5)$$

Izraz (2.5) primijenjen na kontrolni volumen daje diskretiziranu transportnu jednačbu oblika:

$$\sum_f^{n_ploha} \rho \cdot u_p \cdot \varphi_p \cdot \vec{A}_p = \sum_f^{n_ploha} \Gamma \cdot (\nabla \varphi)_n \cdot \vec{A}_p + S \cdot \Delta V \quad (2.6)$$

gdje je φ_p vrijednost varijable φ na plohi f kontrolnog volumena, dok je $(\nabla \varphi)_n$ iznos gradijenta $\nabla \varphi$ u smjeru normale na plohu f . Vrijednosti varijable φ računaju se za središta pojedinog kontrolnog volumena.

2.2.2 Pristup matematičkom modeliranju izgaranja biomase

Numerička simulacija izgaranja, koja u biti predstavlja strujanje plinova uz odvijanje kemijskih reakcija, obuhvaća niz pojava kao što su pojave vezane uz strujanje fluida, prijelaz topline, izmjenu tvari, proces nastajanja i raspadanja/oksidacije pojedinih kemijskih spojeva itd. Takav sustav može se u potpunosti opisati navođenjem tlaka, gustoće, temperature, brzine strujanja i koncentracije svakog pojedinog sastojaka u određenoj točki prostora.

Jednadžba očuvanja mase

Promjena mase u promatranom kontrolnom volumenu može se sažeto napisati sljedećom jednadžbom:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.7)$$

gdje je ρ gustoća fluida, t vrijeme, a u_i vektor brzine strujanja fluida koji se sastoji od komponenti u_x , u_y , i u_z , u smjeru osi x , y i z pravokutnoga koordinatnog sustava. Prvi član s lijeva u jednadžbi (2.7) opisuje promjenu gustoće u vremenu, dok drugi član prikazuje maseni protok kroz površine kontrolnog volumena i naziva se konvekcijski član.

Jednadžba očuvanja količine gibanja

Prema drugom Newtonovom zakonu, promjena količine gibanja čestice jednaka je zbroju sila koje djeluju na česticu. Isto možemo opisati sljedećom jednadžbom:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \Sigma_{ji} + \rho g_i \quad (2.8)$$

što zapravo predstavlja Navier-Stokesovu jednadžbu za nestacionarno strujanje stlačivog fluida.

$$\Sigma_{ji} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left(\mu_v - \frac{2}{3} \mu \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \cdot I_{ij} \quad \text{- tenzor viskoznih naprezanja}$$

g_i - gravitacijska konstanta

p - tlak fluida

Jednadžba očuvanja energije

Jednadžba očuvanja energije može se napisati kao:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i E) = -p \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \Sigma_{ji} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q_H \quad (2.9)$$

gdje je q_H volumenska gustoća toplinskog izvora.

Modeli turbulencije

Da bi se uspješno prikazao matematički model izgaranja potrebno je ranije navedene jednadžbe očuvanja prikazati u obliku koji uključuje pojave koje se susreću kod turbulentnog strujanja. Strujanje u ložištima obično je izrazito turbulentno. Za modeliranje turbulencije razvijeno je nekoliko modela, a za modeliranje procesa izgaranja se najčešće (zbog robusnosti i manje zahtjevnosti za vremenom računanja) koristi $k-\varepsilon$ model te ostali modeli izvedeni iz tog modela. Tako je u ovom radu korišten ostvarljiv $k-\varepsilon$ model u kombinaciji s metodom proširene stijenke. Prednosti ostvarljivog $k-\varepsilon$ modela nad standardnim $k-\varepsilon$ modelom su u boljem modeliranju širenja mlaza, strujanja koje uključuju jaku zakrivljenost strujnica, vrtloženje, granične slojeve s velikim gradijentima tlaka te recirkulaciju. Prednost metode proširene stijene je da za razliku od metode zidnih funkcija je u tome što ova metoda ne "preskače" granični sloj već se pojedine varijable računaju i u području viskoznog podsloja. U nastavku je dan opis tih modela.

Ostvarljiv $k-\varepsilon$ model

Transportna jednadžba za turbulentnu kinetičku energiju ne razlikuje se u odnosu na standardni $k-\varepsilon$ model (2.10), dok jednadžba za disipaciju poprima drugačiji oblik (2.11).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k + \bar{\rho}\varepsilon \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \bar{\rho}C_1 S \varepsilon + \bar{\rho}C_2 \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2.11)$$

U jednadžbi (2.11):

$$C_1 = \max \left[0,43 ; \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (2.12)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.14)$$

Konstante ostvarljivog modela imaju sljedeće vrijednosti:

$$C_2 = 1,9$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92$$

$$\sigma_k = 1$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,2$$

Turbulentna viskoznost računa se prema:

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

gdje se C_μ računa kao:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.16)$$

i

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (2.17)$$

te

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (2.18)$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (2.19)$$

$\bar{\Omega}_{ij}$ je srednja vrijednost rotacije s obzirom na kutnu brzinu ω_k .

Konstante ostvarljivog k - ε model iznose:

$$A_0 = 4,04 \quad (2.20)$$

$$A_S = \sqrt{6} \cos \phi \quad (2.21)$$

gdje su redom:

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W) \quad (2.22)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (2.23)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (2.24)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.25)$$

C_μ je funkcija usrednjene deformacije i brzine rotacije, kutne brzine rotacije sustava, te turbulentnih veličina k i ε .

Jednadžba očuvanja energije poprima oblik:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\bar{\rho}E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (2.26)$$

gdje je:

k_{eff} – efektivni konduktivitet ($k_{eff} = k + k_t$)

k_t – turbulentni toplinski konduktivitet određen turbulentnim modelom koji koristi:

$J_{j'}$ - difuzijski fluks kemijskog spoja j'

$(\tau_{ij})_{eff}$ – devijatorni tenzor naprezanja

Prva tri izraza s desne strane jednadžbe predstavljaju konduktivitet, difuziju kemijskih spojeva i viskozna disipacija (oslobađanje toplinske energije uslijed viskoznog trenja).

S_h - sadržava utjecaj zračenja i druge volumenske izvore topline

U jednadžbi (2.26) $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$ gdje je h entalpija.

Turbulentni granični sloj

Ukoliko se u slučaju turbulentnog strujanja, kod kojeg dolazi do nepravilnog kaotičnog gibanja čestica fluida s jakim fluktuacijama brzine, promatraju makroskopska izmjena i procesi na molekularnom nivou, ukupno tangencijalno naprezanje jednako je sumi smičnih naprezanja definiranih Newtonovim zakonom viskoznosti i Reynoldsovih naprezanja:

$$\bar{\tau}_{uk} = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} - \bar{\rho} \widetilde{u_i'' u_j''} \quad (2.27)$$

Opisani modeli turbulencije vrijede samo u području dovoljno daleko od stijenke, gdje turbulencija ima glavni utjecaj na izmjenu količine gibanja i topline te gdje se viskozni efekti mogu zanemariti, odnosno gdje vrijedi:

$$\bar{\tau}_{uk} = \bar{\rho} \widetilde{u_i'' u_j''} \quad (2.28)$$

U blizini stijenke, gdje dolazi do smanjivanja tangencijalnih i normalnih fluktuacija brzina uslijed djelovanja viskoznih sila u fluidu i gubitka kinetičke energije zbog prisutnosti stijenke,

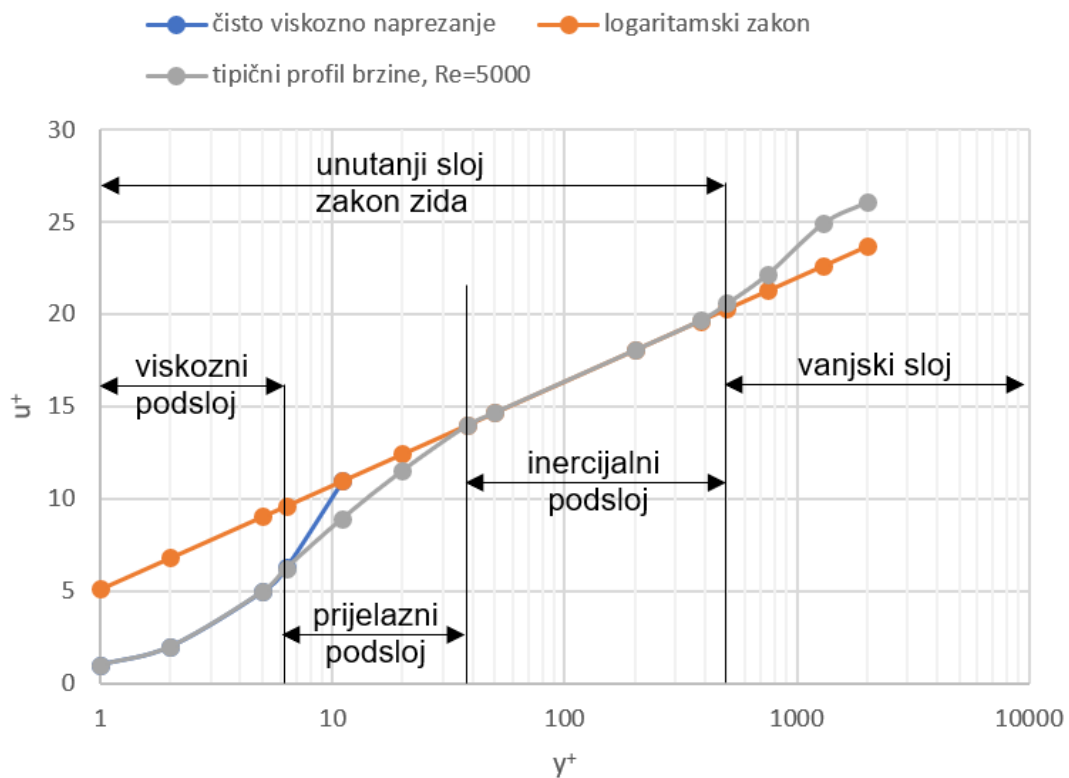
nisu ispunjeni uvjeti za primjenu modela turbulencije, a ukupno naprezanje prema Newtonovom zakonu viskoznosti jednako je:

$$\bar{\tau}_{uk} = \mu \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (2.29)$$

Upravo u području uz stijenku fizikalne veličine imaju najveće gradijente. Točnost prikaza polja strujanja uz stijenku presudno je za uspješno predviđanje turbulentnih strujanja. Modeli poput $k-\varepsilon$ prvenstveno se mogu primijeniti samo u jezgri turbulentnog strujanja, dok se u blizini stijenke ne mogu primijeniti.

Brojni eksperimenti potvrdili su da se turbulentni granični sloj sastoji od sljedećih slojeva (slika 13):

- viskozni laminarni podsloj ($y^+ < 5 \rightarrow$ čisto viskozno naprezanje)
- prijelazni sloj ($5 \leq y^+ \leq 30 \rightarrow$ egzistencija viskoznih i tangencijalnih naprezanja)
- logaritamski ili inercijalni sloj ($y^+ > 30$)
- vanjski sloj ($y^+ > 0,1\delta$)



Slika 13. Turbulentni granični sloj kod nastrojavanja na ravnu ploču

y^+ je bezdimenzijska udaljenost od stijenke definirana izrazom:

$$y^+ = \frac{y_p \rho u_\tau}{\mu} = \frac{y_p \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}}{\nu} \quad (2.30)$$

pri čemu je brzina trenja u_τ definirana izrazom:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.31)$$

τ_w predstavlja smično naprezanje na stijenci, y_p udaljenost točke P od stijenke, ρ gustoća fluida i μ dinamička viskoznost fluida u točki P, odnosno ν kinematička viskoznost.

Također su, za analizu u području turbulencije, definirani bezdimenzijski parametar y^* i bezdimenzijska brzina u^* kako slijedi:

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (2.32)$$

$$u^* = \frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{u_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.33)$$

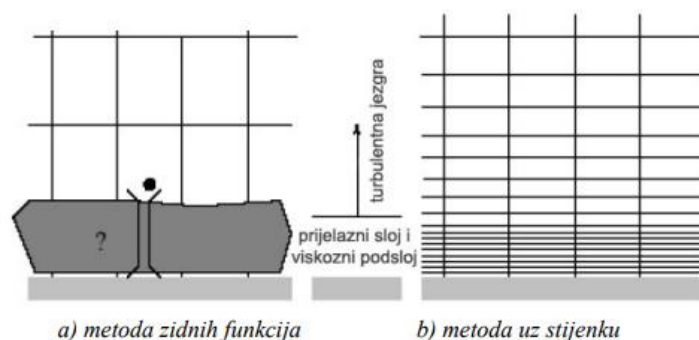
gdje su k_P turbulentna kinetička energija u točki P, \bar{u} vremenski usrednjene komponenta brzine u slobodnoj struji, u_P srednja brzina fluida u točki P.

U viskoznom podsloju strujanje je laminarno, nema fluktuacija brzina, a viskoznost ima dominantnu ulogu u izmjeni mase, topline ili količine gibanja. Srednja brzina mijenja se linearno s udaljenošću od stijenke. U prijelaznom sloju strujanje poprima karakteristike turbulencije. U logaritamskom sloju dominantnu ulogu ima turbulencija. Točnost numeričke simulacije turbulentnog strujanja uvelike ovisi upravo o proračunu strujanja u području uz stijenk, odnosno u turbulentnom graničnom sloju.

Programski paket Fluent nudi dva pristupa modeliranju turbulentnog graničnog sloja:

- metoda zidnih funkcija
 - standardne zidne funkcije
 - neravnotežne zidne funkcije
- metoda uz stijenk
 - metoda proširene stijenke

U metodi zidnih funkcija, viskozni podsloj i prijelazni sloj se ne rješavaju, već se za proračun polja brzina i temperatura u turbulentnom graničnom sloju koriste poluempirijske formule tzv. zidne funkcije, kojima se premošćuje područje između potpuno razvijenog turbulentnog strujanja i područje uz stijenku. Kod ove metode zahtijeva se da čvor blizu čvrste stijenke bude smješten u potpuno razvijenom turbulentnom sloju odnosno samo jedan čvor je dovoljan za modeliranje prijelaznog područja od stijenke do potpunog razvijenog turbulentnog polja strujanja. U metodi uz stijenku rješavanju se pristupa primjenom fine mreže kontrolnih volumena i pomoću modela turbulencije koji uzimaju u obzir utjecaje viskoznosti u području sve do stijenke. Prikaz ovih metoda dan je na slici 14.



Slika 14. Izgled mreže kontrolnih volumena kod primjene metode zidnih funkcija, odnosno metode uz stijenku [9]

Ukoliko se koriste zidne funkcije (standardne ili neravnotežne) vrijednost bezdimenzijske udaljenosti od stijenke y^+ mora se nalaziti u području logaritamskog sloja $30 < y^+ < 300$ ($y^+ \approx 30$ najpoželjnije). Pretjerano finu mrežu uz stijenku treba izbjegavati, jer zidne funkcije prestaju vrijediti u viskoznom podsloju. Također je poželjno izbjeći prijelazni sloj $5 \leq y^+ \leq 30$. Ukoliko se koristi metoda uz stijenku vrijednost y^+ mora se nalaziti unutar viskoznog podsloja $y^+ < 4$ do 5 odnosno poželjno je da se kreće oko $y^+ = 1$.

Metoda proširene stijenke općenito je pouzdanija od metode zidnih funkcija u sljedećim slučajevima:

- kod strujanja s malim Reynoldsovim brojem i kod strujanja gdje su efekti stijenke značajni (npr. strujanje kroz mali otvor)
- kod strujanja s jakim gradijentima tlaka koji uzrokuju odvajanja graničnog sloja
- kod strujanja s jakim silama (npr. strujanje u blizini rotirajućeg diska, strujanja uslijed uzgona)

Metoda proširene stijenke

Metoda proširene stijenke kombinira dvoslojni model s proširenim zidnim funkcijama. Prema dvoslojnom modelu cijela domena dijeli se na područje u kojem dominira viskoznost i na razvijeno turbulentno područje. Granica između ta dva područja određena je turbulentnim Reynoldsovim brojem definiranim kako slijedi:

$$Re_t = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} \quad (2.34)$$

U viskoznom području uz stijenku ($Re_t < 200$) koristi se model Wolfsteina s jednom jednadžbom prema kojem se turbulentna viskoznost računa prema:

$$\mu_{t,2sloj} = \rho C_\mu l_\mu \sqrt{k} \quad (2.35)$$

pri čemu je karakteristična duljina l_μ definirana:

$$l_\mu = y C_l (1 - e^{-Re_t/A_\mu}) \quad (2.36)$$

Konstante iznose:

$$A_\mu = 70 \quad (2.37)$$

$$C_l = \kappa C_\mu^{-3/4} \quad (2.38)$$

Turbulentna viskoznost u turbulentnom području ($Re_t > 200$) računa se prema Jongenu pomoću izraza:

$$\mu_{t,proširena} = \lambda_\varepsilon \mu_t + (1 - \lambda_\varepsilon) \mu_{t,2sloj} \quad (2.39)$$

Turbulentna viskoznost μ_t određena je na način opisan u poglavljima o $k-\varepsilon$ modelu turbulencije.

Funkcija miješanja λ_ε definirana je izrazom:

$$\lambda_\varepsilon = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{Re_t - Re_t^*}{A} \right) \right] \quad (2.40)$$

Njezina vrijednost poprima iznos 0 u neposrednoj blizini stijenke odnosno 1 daleko od stijenke.

U vanjskom turbulentnom sloju disipacija turbulentne kinetičke energije ε se dobiva rješavanjem transportne jednadžbe, dok se unutar viskozno sloja računa prema sljedećem algebarskom izrazu:

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_\varepsilon} \quad (2.41)$$

pri čemu je karakteristična duljina l_ε definirana prema Chenu i Patelu izrazom:

$$l_\varepsilon = yC_l(1 - e^{-Re_t/A_\varepsilon}) \quad (2.42)$$

Konstante iznose:

$$A_\varepsilon = 2C_l \quad (2.43)$$

$$C_l = \kappa C_\mu^{-3/4} \quad (2.44)$$

Ukoliko je mreža uz stijenku dovoljno fina ($y^+ \approx 1$) da se zasebno obuhvati i riješi viskozni linearni podsloj, metoda proširene stijenke je identična dvoslojnom modelu (nema primjene zidnih funkcija u tom području). Međutim za grublje mreže u područjima izvan viskozno podsloja, metoda proširene stijenke omogućuje primjenu proširenih zidnih funkcija. Kombiniranjem dvoslojnog modela i proširenih zidnih funkcija omogućuje se korištenje mreža koje su previše "grube" za primjenu dvoslojnog modela odnosno previše "fine" za primjenu standardnih zidnih funkcija koje se uglavnom koriste kod velikih Re brojeva. Kod definiranja proširenih zidnih funkcija osnovna je ideja da se cijelo područje turbulentnog graničnog sloja obuhvati jednom funkcijom, koja bi se mogla upotrijebiti u bilo kojem dijelu graničnog sloja, ovisno o strukturi mreže. Tako je bezdimenzijski profil brzine određen superpozicijom izraza koji vrijede u viskoznom podsloju i u logaritamskom sloju:

$$u^+ = e^\Gamma u_{lam}^+ + e^{\frac{1}{\Gamma}} u_{turb}^+ \quad (2.45)$$

gdje je Γ funkcija spajanja, ovisna o udaljenosti od stijenke, definirana izrazom:

$$\Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1 + by^+} \quad (2.46)$$

gdje su $a=0,01$ i $b=5$.

Proširene zidne funkcije za temperaturu temelje se na istom principu te se bezdimenzijski profil temperature računa prema:

$$\Gamma = -\frac{a(Pr \cdot y^+)^4}{1 + b \cdot Pr^3 \cdot y^+} \quad (2.47)$$

Modeli zračenja

Toplinsko zračenje, kao najvažniji mehanizam prijenosa topline u ložištu toplovodnog kotla i plamenika, sastoji se od spektra elektromagnetskih valova u infracrvenom području valnih duljina od 0,76 do 360 μm . Kod prijelaza topline kondukcijom (provođenjem) promatrani kontrolni element izmjenjuje toplinu kondukcijom samo sa svojim susjednim elementima. Međutim, kod izmjene topline zračenjem situacija je znatno kompleksnija, jer promatrani element izmjenjuje toplinu zračenjem sa svim elementima i na strani plina i na strani stijenke. Zbog toga je za matematički opis zračenja razvijena integralno-diferencijalna jednadžba (2.48), čije rješenje nije moguće dobiti analitičkim putem osim u nekim vrlo pojednostavljenim slučajevima, a numerički je izuzetno zahtjevno. Svaki element koji pripada stijenci odnosno nastalim dimnim plinovima može, ovisno o svojim optičkim svojstvima emitirati, apsorbirati i raspršivati energiju zračenja.

Nadalje, sam opis svojstava zračenja nastale smjese dimnih plinova (H_2O , CO , CO_2 , OGC i dr.) u kojima se pojavljuju i krute čestice (koks, pepeo, čađa), predstavlja jedan kompleksni problem, koji zahtjeva poznavanje lokalne raspodjele kemijskih vrsta. Time se stvara jaka veza modela zračenja s modelom izgaranja.

Općenito, energijski tok usmjeren prema nekom tijelu djelomično se reflektira (r), djelomično apsorbira (a) i djelomično propušta kroz samo tijelo (d). Prema definiciji, suma r , a i d mora biti jednaka 1. Tijela koja apsorbiraju cjelokupnu dozračenu energiju zovu se crna tijela ($r = 0$, $d = 0$, $a = 1$), tijela koja propuštaju svu dozračenu energiju zovu se dijatermna tijela ($r = 0$, $d = 1$, $a = 0$), a tijela koja reflektiraju svu dozračenu energiju nazivaju se idealnim ogledalima ($r = 1$, $d = 0$, $a = 0$).

Smjesa nastalih dimnih plinova može se aproksimirati smjesom sivih plinova, koji apsorbiraju, emitiraju i raspršuju zračenje ovisno o valnoj duljini, temperaturi i fizikalnim karakteristikama. Jednoatomni i dvoatomni plinovi (O_2 , N_2) mogu se u potpunosti smatrati propusnim za toplinske zrake, dok troatomni i višeatomni plinovi (CO_2 , H_2O , OGC) emitiraju i apsorbiraju zračenje samo u nekim za plin karakterističnim pojasevima frekvencije. Za ostale pojaseve spektra ovi plinovi su potpuno prozračni, odnosno njihov koeficijent apsorpcije jednak je nuli. U literaturi se za zračenje plinova u određenom području valnih duljina koristi izraz selektivno zračenje.

Pojasevi frekvencije na kojima je značajno zračenje plinova određeni su za svaku vrstu frekvencijom osciliranja pojedinačnih atoma, koji mogu oscilirati na nekoliko frekvencija. Broj frekvencija, širina pojasa i jakost emisije ovisi o sastavu plina, tlaku, temperaturi i optičkoj debljini plina. U slučaju skoro-potpunog izgaranja biomase u struji zraka tipični sastavni elementi nastalih dimnih plinova su ugljikov dioksid, kisik, vodena para i dušik, dok su npr. ugljikov monoksid, dušikovi oksidi, vodik i dr. prisutni samo u vrlo malim koncentracijama, te nemaju neki značajan učinak na sam prijenos topline zračenjem.

Od modela zračenja dostupnih u Fluentu samo P-1 model i model diskretnih ordinata (*DO model*) uzimaju u obzir izmjenu topline zračenjem između nastalih dimnih plinova i čestica goriva. S obzirom na to da se P-1 model koristi za optički 'debele' probleme ($aL > 1$) u ovom je radu kao najprikladniji model zračenja odabran DO model, pogodan za optički 'tanke' probleme.

Model diskretnih ordinata rješava jednadžbu prijenosa topline zračenjem u konačnom broju diskretiziranih kontrolnih kutova. Jednadžbe prijenosa topline zračenjem postavljaju se za konačan broj prostornih kutova definiranih vektorima smjera \vec{s} . Broj kutova, odnosno smjerova odabire se ovisno o željenoj točnosti i raspoloživom vremenu za proračun. Svaki oktant sfere 4π , koja okružuje izvorišnu točku (x_1, x_2, x_3), diskretiziran je s $N_\theta \times N_\phi$ prostornih kutova ω_i . Kut θ je polarni, a kut ϕ azimutalni. Prostorni kut ω_i definiran je odsječcima kutova $d\theta$ i $d\phi$. Broj kutova kod trodimenzijskih problema iznosi $8 \cdot N_\theta \cdot N_\phi$. Time je ujedno definiran i broj jednadžbi transporta topline zračenjem koje se moraju riješiti za svaki od ω_i kutova:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = a \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (2.48)$$

gdje su I totalni intenzitet zračenja (ovisi o poziciji \vec{r} i smjeru \vec{s}), \vec{r} vektor pozicije, \vec{s} vektor smjera, s duljina puta, \vec{s}' vektor smjera raspršenja, a koeficijent apsorpcije, σ_s koeficijent raspršenja, $(a + \sigma_s)$ optička debljina, σ Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$), T lokalna temperatura, Φ fazna funkcija, Ω' prostorni kut.

Fizikalno značenje pojedinih članova jednadžbe prijenosa topline zračenjem je kako slijedi:

- član I daje promjenu intenziteta zračenja na duljini puta s
- član II predstavlja smanjenje intenziteta zračenja uslijed apsorpcije i raspršenja
- član III predstavlja zračenje molekula medija temperature T na promatranom mjestu
- član IV opisuje raspršeno zračenje

Stijenke ložišta promatraju se kao sive difuzne površine emisijskog faktora ε_{st} . U slučaju sivog difuznog zračenja, upadno zračenje na stijenku ložišta definirano je:

$$q_{ul} = \int_{\vec{s} \cdot \vec{n} > 0} I_{ul} \cdot \vec{s} \cdot \vec{n} d\Omega \quad (2.49)$$

gdje su I_{ul} intenzitet upadnog zračenja, \vec{s} vektor smjera zračenja, \vec{n} normala na površinu stijenke, Ω prostorni kut polusfere 2π .

Svjetloća površine definirana je:

$$q_{iz} = (1 - \varepsilon_{st})q_{ul} + n^2 \varepsilon_{st} \sigma T_{st}^4 \quad (2.50)$$

gdje su n indeks loma medija blizu stijenke, T_{st} temperatura stijenke ložišta. Prvi član na desnoj strani jednadžbe predstavlja dio zračenja koji se reflektira, a drugi član na desnoj strani emisiju zračenja površine stijenke.

Neto toplinski tok zračenja na ulazima i izlazima iz domene računa se na jednak način kao sa stjenkama ložišta s time da se za emisivnost otvora (ulaza i izlaza) uzima vrijednost 1,0 (crno tijelo).

Modeliranje koeficijenta apsorpcije

Jedan od važnijih problema kod zračenja plinova predstavlja upravo određivanje koeficijenta apsorpcije. Kao što je već rečeno, troatomni i višeatomni plinovi (CO_2 , H_2O , OGC) emitiraju, apsorbiraju i raspršuju zračenje samo u nekim za pojedini plin karakterističnim područjima valnih duljina i temperatura. Zbog toga se za koeficijent apsorpcije nastalih dimnih plinova ne može uzeti neka konstantna vrijednost na čitavom području valnih duljina.

Smjesa dimnih plinova nastala izgaranjem u ložištu može se aproksimirati kompozicijom određenog broja sivih plinova. Koeficijent apsorpcije sivih plinova može se s dovoljnom točnošću modelirati modelom težinske sume sivih plinova (engl. WSGGM – Weighted Sum of Gray Gases Model). Osnovna pretpostavka je da se ukupna emisivnost smjese dimnih plinova na duljini puta s može izraziti kao:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^I a_{\varepsilon,i}(T) [1 - e^{-\kappa_i p s}] \quad (2.51)$$

gdje su $a_{\varepsilon,i}$ težinski faktor emisivnosti za i -ti sivi plin (ovisan o sastavu i temperaturi dimnih plinova), κ_i koeficijent apsorpcije i -tog sivog plina, p je suma parcijalnih tlakova svih apsorbirajućih plinova (CO_2 , H_2O), a s je duljina puta kroz medij. Izraz u uglatim zagradama u

jednadžbi (2.51) predstavlja emisivnost i -tog sivog plina. Ovisnost težinskog faktora emisivnosti sivih plinova o temperaturi najčešće se aproksimira sljedećim izrazom:

$$a_{\varepsilon,i}(T) = \sum_{j=1}^J b_{\varepsilon,i,j} T^{j-1} \quad (2.52)$$

gdje su $b_{\varepsilon,i,j}$ temperaturni koeficijenti polinoma. Koeficijenti $b_{\varepsilon,i,j}$ i κ_i uzimaju se iz tablica usklađivanjem jednadžbe (2.51) s eksperimentalno dobivenim podacima ukupne emisivnosti. Traženi faktor apsorpcije za slučaj kad je $s > 10^{-4}$ m određuje se prema sljedećoj jednadžbi:

$$a = -\frac{\ln(1 - \varepsilon)}{s} \quad (2.53)$$

gdje se za duljinu puta s uzima karakteristična duljina kontrolnog volumena.

Interakcija turbulencije i izgaranja

Kako bi došlo do izgaranja gorivi sastojci se moraju pomiješati sa zrakom. To se ostvaruje turbulencijom tako da turbulencija ima značajan utjecaj na miješanje reaktanata, na transport mase i izmjenu topline. Zbog toga je vrlo bitno uzeti u obzir efekte turbulencije na samu kinetiku izgaranja. Tako je razvijeno nekoliko modela izgaranja koji se koriste u CFD-u. Najčešće korištena je klasična metoda prijenosa tvari koja može uključivati model konačnih brzina kemijskih reakcija i model disipacije vrtloga.

Jednadžba prijenosa tvari

Jednadžba očuvanja tvari u kontrolnom volumenu kod turbulentnog strujanja je:

$$\frac{d(\rho m_i)}{dt} + \text{div}(\rho u m_i) = \text{div} \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{C_t}} \right) \cdot \text{div}(m_i) \right] + R_i + S_i \quad (2.54)$$

gdje su:

$D_{i,m}$ – koeficijent difuzije za tvar i

$S_{C_t} = \frac{S_{C_t}}{\rho D_t}$ – turbulentni Schmidt-ov broj

D_t – koeficijent difuzije uslijed turbulencije

R_i – brzina nastajanja tvari i kemijskim reakcijama

S_i – brzina nastajanja tvari i definirana na drugi način

Treći član u jednadžbi (2.54) predstavlja masenu difuziju kod turbulentnog strujanja prikazanu pomoću koeficijenta difuzije. Kako je difuzija uslijed turbulencije znatno veća nego kod laminarne difuzije, nije potrebno detaljno razraditi Maxwell-Stefanove jednadžbe za difuziju, već je dovoljno odrediti difuziju kako je prikazano u izrazu (2.55).

U energetska jednadžbu potrebno je uključiti transport entalpije uslijed difuzije tvari u obliku:

$$\operatorname{div} \left(\sum_{i=1}^n \left[-h_i \cdot \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{C_t}} \right) \right] \right) \quad (2.55)$$

koji može imati značajan učinak na polje vrijednosti entalpija.

Model konačnih brzina reakcije

Model konačnih brzina reakcija zanemaruje fluktuirajuću komponentu i određuje brzinu reakcija pomoću Arrheniusovog izraza (2.58). Kod laminarnog plamena model točno opisuje plamen, ali je neadekvatan za turbulentni plamen zbog izuzetne nelinearnosti Arrheniusova modela kemijske kinetike. Četvrti član u jednadžbi za transport tvari (2.54) prema ovom modelu jednak je:

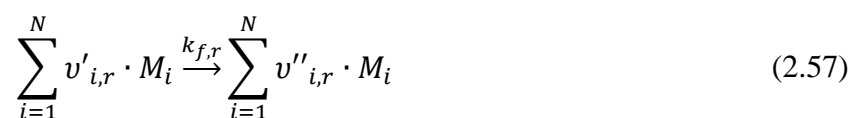
$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r} \quad (2.56)$$

gdje su:

$M_{w,i}$ – molekularna masa tvari i

$R_{i,r}$ – Arrheniusova molarna brzina nastajanja/uništavanja tvari i u reakciji r

Općenito se reakcija r može pisati kao:



gdje su:

N – broj tvari uključenih u proces izgaranja

$v'_{i,r}$ – stehiometrijski koeficijent reaktanata i u reakciji r

$v''_{i,r}$ – stehiometrijski koeficijent produkta i u reakciji r

M_i – simbol koji označava tvar i

$k_{f,r}$ – konstanta brzine reakcije

Reakcije (2.57) mogu biti u oba smjera, tj. reverzibilne, ali zbog jednostavnosti uzeto je da su reakcije ireverzibilne.

Arrheniusova molarna brzina nastajanja/uništavanja tvari i u reakciji r je:

$$R_{i,r} = \Gamma(v''_{i,r} - v'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} \right) \quad (2.58)$$

gdje su:

N_r – broj tvari u reakciji r

$C_{j,r}$ – molarna koncentracija pojedinog reaktanta j u reakciji r

$\eta'_{j,r}$ – eksponent brzine reakcije za svaki reaktant i produkt tvari j u reakciji r

Konstanta (koeficijent) brzine reakcije r , $k_{f,r}$ je prema Arrheniusovom izrazu:

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_k} e^{-\frac{E_r}{RT}} \quad (2.59)$$

gdje su:

A_r – predeksponencijalni faktor

β_k – temperaturni eksponent

E_r – aktivacijska energija u reakciji r

R – univerzalna plinska konstanta

Model disipacije vrtloga

Kod većine goriva koja brzo izgaraju može se reći da je vodeća veličina koja limitira izgaranje upravo miješanje gorivih tvari i zraka uslijed turbulentnog strujanja. Kod izgaranja krute biomase, gorivo i zrak sporo se miješaju u području neposredno iznad 'virtualne površine' (slika 23). U tom području također dolazi do trenutnog, značajnijeg prodora zraka ili para ugljikovodika nastalih isplinjavanjem goriva (vremenska oscilacija pretička zraka λ) što simulacijom u stacionarnim uvjetima nije moguće uzeti u obzir.

Prema model disipacije vrtloga brzina nastajanja kemijske tvari uslijed reakcije r , $R_{i,r}$, jednaka je manjoj vrijednosti izraza:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} \cdot M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \cdot \min \left(\frac{m_r}{v'_{R,r} \cdot M_{w,R}} \right) \quad (2.60)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} \cdot M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{\sum_P m_P}{\sum_j^N v'_{j,r} \cdot M_{w,j}} \quad (2.61)$$

gdje su:

m_P – maseni udio kemijske tvari i produkta

m_r - maseni udio kemijske tvari i pojedinog reaktanta

A – empirijska konstanta jednaka 4,0

B – empirijska konstanta jednaka 0,5

Izgaranje se prema ovom modelu javlja uvijek kada je prisutna turbulencija. Takav pristup je ispravan za odvojeno dovođenje goriva i zraka u prostor izgaranja, ali je za unaprijed izmiješane smjese goriva i zraka nepovoljan jer će se izgaranje dogoditi odmah po ulasku smjese u komoru izgaranja. Iz tog razloga, kombinacijom modela konačnih brzina kemijskih reakcija i modela disipacije vrtloga dobivamo najvjerođostojnije rezultate, jer se u obzir uzima i Arrheniusovu brzinu reakcija i brzinu reakcija koja je limitirana turbulencijom odnosno miješanjem gorivih tvari i zraka. Kao stvarna brzina reakcije uzima se manja vrijednost od dviju. Korištenjem empirijskih vrijednosti konstanta A i B , za slučaj izgaranja biomase, dobivaju se previsoke vrijednosti temperatura plamena u glavnoj zoni izgaranja, a kao posljedica toga i niže vrijednosti emisija polutanata (u odnosu na one mjerene). To ukazuje na potrebu za limitiranjem brzine reakcija uslijed turbulencije/miješanja (preko smanjenja vrijednosti empirijske konstante A).

2.2.3 Pregled modela izgaranja krutog goriva (biomase)

Izgaranje krutog goriva na rešetci uključuje simulaciju rasplinjavanja krute faze i izgaranja nastale plinovite faze. Zbog toga je potreban detaljan matematički opis procesa/konverzije koja se događaju u plinovitoj i krutoj fazi, što je prilično kompleksno (izmjena mase i energije između faza). Komercijalni CFD paketi, poput Ansys FLUENT-a, u svoj kod imaju implementirane detaljne opise za simulaciju izgaranja plinovite faze [67]. Isti paketi pružaju vrlo ograničavajuće mogućnosti vezane uz konverziju krute faze. S ciljem implementacije konverzije krute faze u simulaciju procesa izgaranja razvijeni su različiti pristupi. Također,

važno je naglasiti da u literaturi postoji malo radova koji se bave izgaranjem biomase u ložištima manjih snaga.

Detaljan opis različitih pristupa dan je u [68]. Ti pristupi se mogu svrstati u dvije zasebne vrste pristupa. Prvi pristup uključuje opis samostalnog modela koji predviđa termodinamičku konverziju krutog goriva i kao rezultat daje ulazne parametre za simulaciju procesa izgaranja plinovite faze. U tom pristupu konverzije koje se dešavaju u krutoj i plinovitoj fazi se simuliraju zasebno [31, 69-71]. Drugi pristup uključuje u potpunosti integriran model konverzije krutog goriva u simulaciju procesa izgaranja.

Postoji nekoliko samostalnih modela konverzije krute faze razvijenih za različite svrhe. Jednostavan pristup usvojen od strane nekoliko autora [30, 31] modelira interakciju između krute i plinovite faze preko 'virtualne površine' gdje dolazi do izmjene mase i energije. Modeliranje je moguće raditi na način da je jednosmjerno (nastali volatili su nezavisni o kasnijem procesu izgaranja) ili dvosmjerno (gdje proces izgaranja plinovite faze ima utjecaj na konverziju krute faze). Tipično, izgaranje na rešetci se može modelirati na dva različita režima: ili sloj koji izgara promatramo kao savršeni miješajući reaktor ili kao stratificirani reaktor. Kod slojeva male debljine (kao što je slučaj izgaranja peleta u kotlovima manje snage) sloj možemo promatrati kao savršeni miješajući reaktor [31]. Detaljniji modeli uključuju potpunu integraciju konverzije krutog goriva [27-29, 72, 73].

U oba pristupa se za opisivanje konverzija krute faze koriste vlastiti matematički modeli implementirani u CFD preko korisnički definiranih funkcija (UDF) te kao takvi uglavnom nisu toliko dostupni za primjenu u industriji, već se većinom koriste u znanstvenim istraživanjima. U ovom radu usvojen je jednosmjernog pristup modeliranja interakcije između krute i plinovite faze preko 'virtualne površine'. Provedeni postupak numeričkog modeliranja zasniva se na poznavanju sastava i masenog protoka goriva, masenog protoka zraka za izgaranje te literaturnih podataka o karakterističnim temperaturama isparavanja vlage, rasplinjavanja i izgaranja drvnog ugljena (ostatka nakon isplinjavanja drva) te ne zahtijeva implementaciju vlastitih numeričkih modela.

3. MATERIJALI I METODE

3.1 Korišteni peleti

U sklopu ovog istraživanja korišteno je pet vrsta peleta (slika 15):

- Peleti od slame pšenice (PP)
- Peleti od slame pšenice i ljuske lješnjaka (PPL)
- Peleti od slame uljane repice (PUR)
- Drvni peleti od crnogorice (PD1)
- Drvni peleti od bukve i jele (PD2) – nije rađena kemijska analiza goriva



Slama pšenice (PP)



Slama pšenice i ljuska
lješnjaka (PPL)



Slama uljane repice (PUR)



Drvni pelet (PD1) Drvni pelet (PD2)

Slika 15. Fotografije korištenih peleta

3.2 Eksperimentalni postav

Ispitna linija za ispitivanje toplinskog učina i učinkovitosti te analizu dimnih plinova toplovodnih kotlova pripravljena je prema odredbama normi [7, 32, 33] u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Zagreb. U sklopu ovog rada toplinska učinkovitost je određivana indirektnom metodom, mjerenjem sastava i temperature dimnih plinova, a toplinski učin direktnom metodom.

Korišteni peleti pripremljeni su i analizirani u skladu s [74] u HEP-ovom CKTL Laboratoriju iz Zagreba akreditiranom prema standardu ISO/IEC 17025:2007. Analizu goriva moguće je raditi na dva načina:

- Približna analiza određuje masene postotke hlapivih tvari, pepela i fiksnog ugljika.
- Konačna kemijska analiza određuje masene udjele ugljika (C), vodika (H), dušika (N), sumpora (S), pepela i vode te kisika (O) kao razlika do 100%. Također, može se određivati udio metala, klora i drugih elemenata.

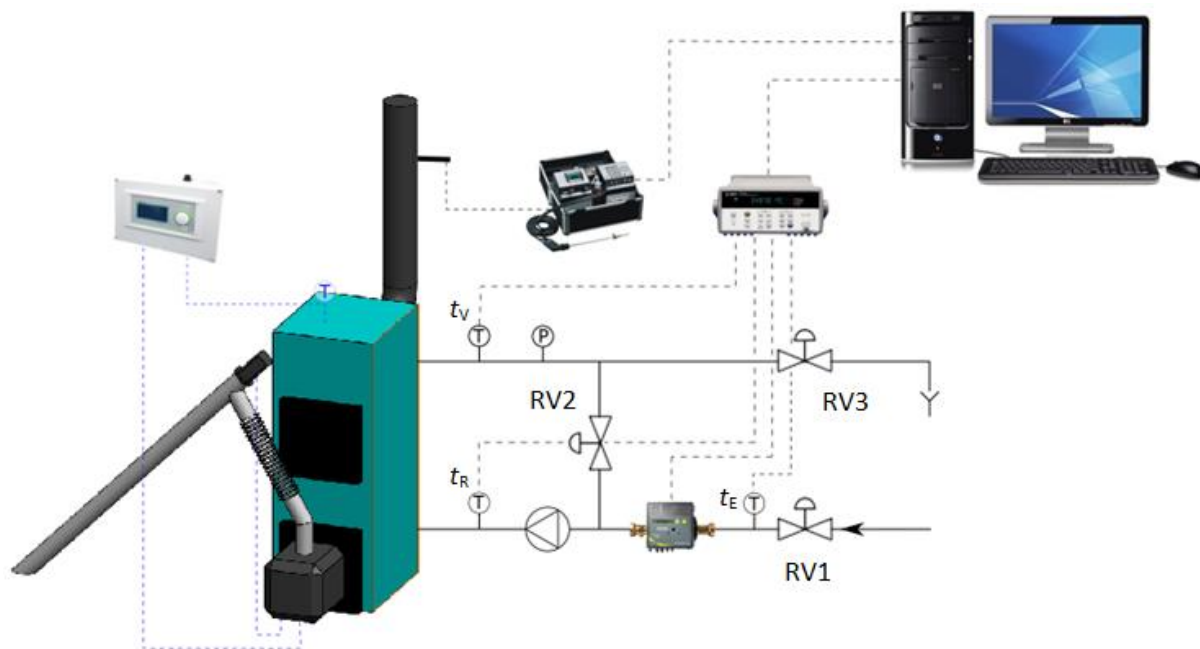
Za potrebe ovog rada analizirana je vlažnost prema standardu [75], nasipna gustoća prema [76], mehanička izdržljivost prema [77], sadržaj pepela prema [78], ogrjevna vrijednost prema [79]. Sadržaj C, H, N određen je prema [80]. Ukupni S i Cl određeni su sukladno [81]. Elementi poput Si, P, K, Ca i Mg određeni su prema [82]. Taljenje pepela određeno je metodom karakterističnih temperatura prema [83]. Temeljem dobivenih vrijednosti određeni su indeksi goriva. Dobivena svojstva uspoređena su s onima dostupnim u literaturi.

Osim goriva u CKTL Laboratoriju analiziran je i ostatak od izgaranja. Cilj tog ispitivanja je određivanje njegovog sastav, a posebno sadržaj C (predstavlja količinu neizgorenog goriva).

Završna mjerenja emisija polutanta provela je tvrtka Međimurje ZAING iz Čakovca, također akreditirana prema ISO/IEC 17025:2007. Opisi korištenih metoda dani su u poglavlju 3.2.5.

3.2.1 Postupak određivanja toplinskog učina

U postupku određivanja toplinskog učina kotla mjeri se korisno predani toplinski tok nosiocu topline (u našem slučaju vodi) preko mjerne linije prikazane na slici 16 (tzv. mjerna linija s kratko spojenim krugom vode). Korištene su oznake relevantnih standarda [7, 32, 33, 84].



Slika 16. Ispitna linija

Toplinski tok predan vodi dobiva se mjerenjem protoka hladne vode temperature (W_1) i povećanja njezine temperature na temperaturu polaznog voda ($t_V - t_E$). Ispitivanje se provodi na srednjoj temperaturi polaza (t_V) i povrata (t_R) većoj od 70 i manjoj od 90 °C. Pri tome srednja razlika između povrata i polaza mora biti u rasponu od 10 do 25 K. Temperature, tlakovi i sastav dimnih plinova mjere se kontinuirano ili najmanje jednom u minuti. Isto tako, propisano je koliko se najviše smiju razlikovati temperature polaza i povrata prilikom ispitivanja. Zbog toga svako ispitivanje započinje zapaljenjem te predispitnim periodom koji služi da se navedeni uvjeti postignu. Predispitni period obično traje oko sat vremena. Za ispitivanja sukladno [7] potrebno je napraviti ispitivanje u trajanju od 6 sati. Za potrebe ovog rada isti period je skraćen na period od 40 minuta do sat vremena. U većini radova iz literature period ispitivanja je i kraći. Period od 40 min pokazao se i više nego dostatan da obuhvati dovoljan broj ciklusa punjenja goriva (svakih 10-tak sekundi) i okretanja rešetke (svakih 130 s u slučaju drvnih peleta). Osim toga, probnim mjerenje utvrđeno je da se i nakon 4 sata mjerenja dobiveni rezultati ponavljaju ukoliko je mjerenje počelo iz stacionarnog stanja. Na taj način je omogućeno provođenje većeg broja ispitivanja s jednom vrećom goriva čime je umanjeno utjecaj vanjskih čimbenika

(promjene vreće goriva) na jedan set mjerenja. Važno je napomenuti da se prilikom ispitivanja sve postavke plamenika moraju držati konstantnim (ne mogu se mijenjati).

Polazni i povratni vod kratko su spojeni preko izoliranog spojnog voda na kojem se nalazi regulacijski ventil RV2. Unutar tog kratkog kruga instalirana je cirkulacijska pumpa. Kroz regulacijski ventil RV1 dovodi se hladna voda iz vodovodne mreže u povratni vod kotla. Hladna voda iz vodovodne mreže se miješa s dijelom vode koja izlazi iz kotla. Nastala mješavina ponovo ulazi u kotao. Ostali dio tople vode koja izlazi iz kotla baca se u kanalizaciju. Pomoću regulacijskih ventila RV1 i RV2 namješta se protok svježe vode iz vodovoda te protok tople vode na izlazu iz kotla tako da se ostvari željeni temperaturni režim te razlika polaznog i povratnog voda. Pomoću regulacijskog ventila RV3 namješta se tlak u sustavu.

Toplinski učin kotla tijekom ispitnog perioda određuje se prema:

$$Q_N = W_1 \cdot c_{w1} \cdot (t_V - t_E) \quad (3.1)$$

gdje se maseni protok hladne vode (W_1) određuje iz izraza:

$$W_1 = \rho_{w1} \cdot \frac{V_1}{t_{per}} \quad (3.2)$$

gdje je:

V_1 – ukupni volumen vode, m³

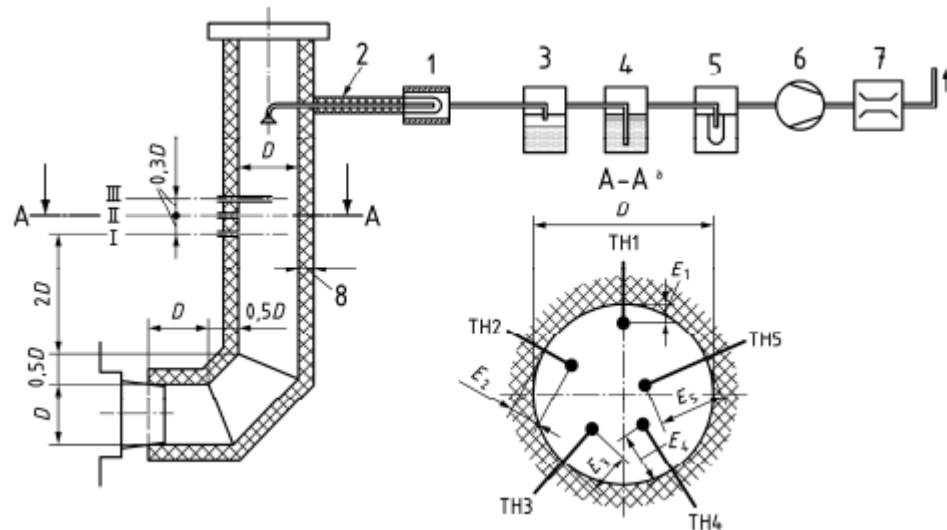
c_{w1} – specifični toplinski kapacitet vode na temperaturi $(t_V + t_E)/2$, J/(kg K)

ρ_{w1} – gustoća vode na temperaturi t_E , kg/m³

t_{per} – trajanje ispitivanja, s

3.2.2 Analiza dimnih plinova i određivanje toplinske učinkovitosti

Mjerna linija za analizu dimnih plinova je toplinski izolirana dionica dimovoda promjera D, koja je ugrađena neposredno iza dimovodnog nastavka. Na njoj se na točno određenim pozicijama nalaze tri priključka. Kroz priključak I mjeri se tlak, kroz priključak II sastav i temperatura dimnih plinova, a kroz priključak III dimni broj. Kroz priključak 2 priključuje se uređaj za mjerenje čestica. Mjerna linija može se postaviti u vertikalnoj i horizontalnoj izvedbi. Na slici 17 je prikazana mjerna linija u vertikalnoj izvedbi. Na kraju mjerne linije ugrađuje se zaklopka koja služi kao regulator potlaka u dimnjaku.



Slika 17. Mjerna linija za analizu dimnih plinova [7]

Prema indirektnoj metodi, toplinska učinkovitost toplovodnog kotla određuje se mjerenjem sastava i temperature dimnih plinova, temperature i površine oplata, te kemijske analize ostatka nakon izgaranja, jednadžba (3.3).

$$\eta_K = (1 - q_A - q_U - q_S - q_B) \cdot 100 \quad (3.3)$$

gdje je:

q_A – relativni toplinski gubitak osjetne topline dimnim plinova, [-]

q_U – relativni kemijski toplinski gubitak zbog nepotpunog izgaranja, [-]

q_S – relativni toplinski gubitak zračenjem, konvekcijom i provođenjem kroz ovojnici, [-]

q_B – relativni toplinski gubitak zbog neizgorenih sastojaka u ostatku, [-]

Relativni toplinski gubitak osjetne topline dimnim plinova računa se prema [84]:

$$q_A = \frac{Q_A}{H_u} \quad (3.4)$$

gdje se Q_A računa prema izrazu:

$$Q_A = (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{pmd} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \frac{C_{pH_2O} \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \quad (3.5)$$

Relativni kemijski toplinski gubitak zbog nepotpunog izgaranja računa se prema [84]:

$$q_U = \frac{Q_U}{H_u} \quad (3.6)$$

gdje se Q_U računa prema izrazu:

$$Q_U = \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2) \cdot 100} \quad (3.7)$$

Relativni toplinski gubitak zbog neizgorenih sastojaka u ostatku računa se prema [84]:

$$q_B = \frac{Q_B}{H_u} \quad (3.8)$$

gdje se Q_B računa prema izrazu:

$$Q_B = \frac{335 \cdot b \cdot R_b}{100} \quad (3.9)$$

Relativni toplinski gubitak zbog kondukcije, konvekcije i zračenja kroz ovojnici kotla računa se prema [84]:

$$q_S = \frac{\sum Q_S}{H_u} \quad (3.10)$$

gdje se Q_S računa prema izrazu:

$$Q_S = \frac{F_X \cdot \alpha \cdot (t_m - t_r)}{1000} \quad (3.11)$$

Specifični toplinski kapacitet suhih dimnih plinova za normalno stanje računa se prema [84]:

$$\begin{aligned} C_{pmd} = 3,6 \cdot & \left\{ 0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right. \\ & + \left[0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right) \\ & \left. + \left[0,3 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Specifični toplinski kapacitet vode u suhim dimnim plinova za normalno stanje računa se prema [84]:

$$C_{pH_2O} = 3,6 \cdot \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right] \quad (3.13)$$

Maseni udio ugljika u ostatku, korišteni u izrazima (3.5 i 3.7), računa se prema [84]:

$$C_r = \frac{b \cdot R_b}{100} \quad (3.14)$$

U prilogu C ovog rada prikazan je detaljan opis određivanja mjerne nesigurnosti toplinske učinkovitosti direktnom i indirektnom metodom. Utvrđeno je da je mjerna nesigurnost u određivanju izlazne snage glavni izvor mjerne nesigurnosti prilikom korištenja direktne metode, dok je kod indirektno metode glavni izvor mjerna nesigurnost u određivanju toplinskog gubitka zračenjem, konvekcijom i provođenjem kroz ovojnici kotla (tablica 2).

Tablica 2. Utjecajni parametri u određivanju toplinske učinkovitosti

Direktna metoda		
Veličina	Najutjecajni parametar	Ostali utjecajni parametri
$u(\eta_K)$	$\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_N} \cdot u(Q_N)$	-
Indirektna metoda		
$u(\eta_K)$	$u(q_S)$	-

S obzirom na to da u sklopu ovog istraživanja toplinski gubici zračenja, konvekcije i provođenja kroz ovojnici kotla nisu od posebnog interesa, odnosno isti se zbog više-manje istog temperaturnog režima prilikom svakog ispitivanja mogu smatrati konstantnim. Zbog toga se indirektna metoda za potrebe ovog istraživanja smatra boljim rješenjem.

3.2.3 Ostala mjerenja

Od ostalih mjerenja, a koja nisu propisana u [7], mjerene su temperature dimnih plinova u ložištu – mjerno mjesto 1 i u konvektivnom dijelu toplovodnog kotla – mjerno mjesto 2 (slika 20).

3.2.4 Provedba mjerenja

Mjerenja su provedena na kombiniranom toplovodnom kotlu Centrometal EKO – CK P 20 (slika 18), nazivnog toplinskog učina 20 kW, opremljenim s rotacijskim plamenikom Blaze Harmony XS 26 (slika 19) sa samočišćećom rešetkom i rasponom snage 6-26 kW.



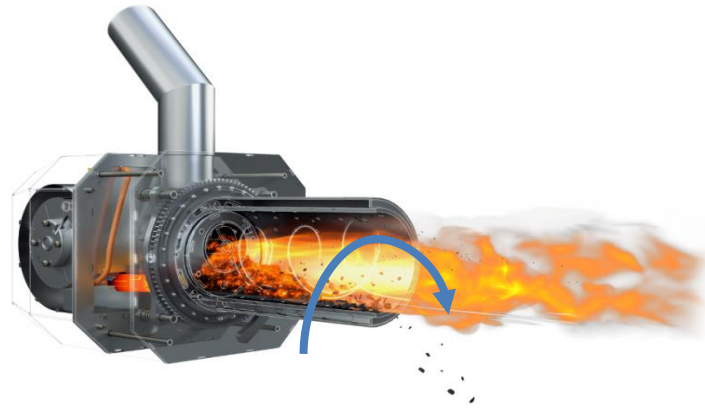
Slika 18. Korišteni kotao [85]

Izmjena topline u kotlu ostvaruje se preko vodom hlađenog ložišta i rešetki te u tri prolaza dimnih plinova. Zadnji prolaz dimnih plinova izveden je od tri pravokutna kanala s umetnutim turbulatorima. Plamenik je ugrađen u donja kotlovska vrata.

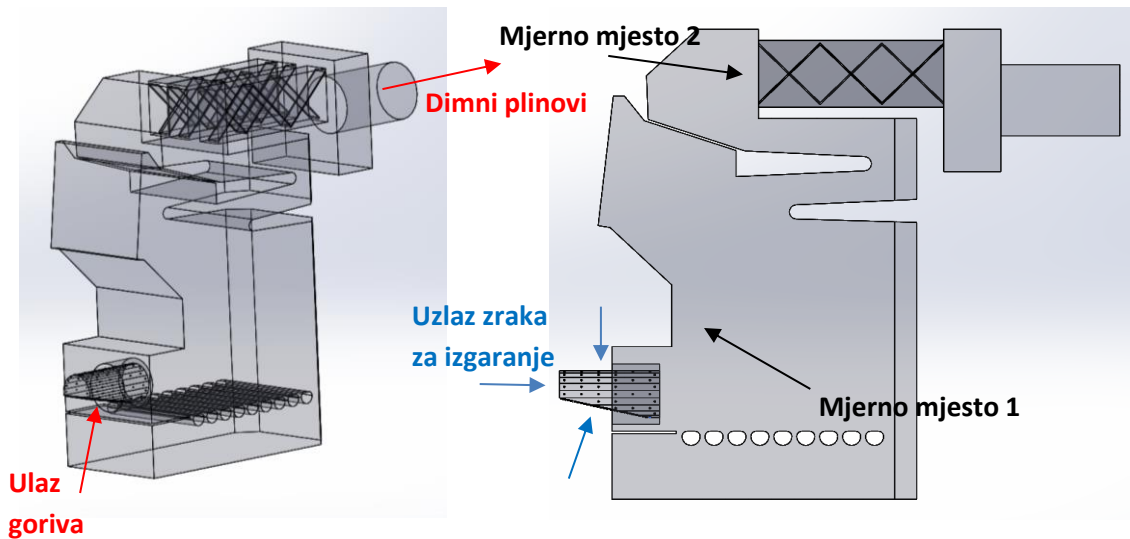
Ovaj plamenik odabran je zbog mogućnosti rotacije svog ložišta koja u kombinaciji s nagibom kompletne rešetke (slika 19) omogućuje izgaranje peleta lošije kvalitete i većeg sadržaja pepela. Na taj način spriječeno je lijepljenje potencijalno rastaljenog pepela na rešetku. Interval čišćenja rešetke, a time i zapunjivanje plamenika velikom količinom pepela kontrolira se kroz regulaciju parametara rotacije.

Za svako gorivo potrebno je odrediti optimalne radne parametre (toplinska učinkovitost, emisije polutanata, količina ostatka). Parametri koji se postavljaju su:

- Protok goriva
- Protok zraka
- Omjer primarnog/sekundarnog zraka
- Rotacija ložišta/rešetke



Slika 19. Presjek plamenika Blaze Harmony XS 26 [86]



Slika 20. CAD model prolaza dimnih plinova s označenim temperaturnim mjernim mjestima

Mjernim sustavom praćene su sljedeće veličine:

- Temperatura zraka prilikom ispitivanja (t_f)
- Temperatura hladne vode (t_E)
- Temperatura povratne vode (t_R)
- Temperatura polazne vode (t_V)
- Temperatura dimnih plinova u sekciji za analizu dimnih plinova (t_a)
- Temperatura dimnih plinova u ložištu
- Temperatura dimnih plinova u konvektivnom dijelu toplovodnog kotla
- Sastav dimnih plinova (O_2 , CO i NO_x)
- Volumen hladne vode (V_1)

Temperatura zraka u prostoru, kao i temperature vode mjerene su T-tip termoparovima. Temperature dimnih plinova mjerene su K-tip termoparovima. Generirani termonapon pretvaran je u A/D pretvaraču Agilent 34970A u digitalni signal koji se očitavao na računalu. Korišteni termoparovi prethodno su umjereni gdje su utvrđena međusobna odstupanja manja od $0,1^{\circ}\text{C}$.

Nakon postizanja stacionarnog stanja, mjereni je udio O_2 , CO , NO i NO_2 u suhim dimnim plinovima pomoću elektrokemijskog analizatora dimnih plinova MRU NOVA 2000. Udio CO_2 određuje se prema izrazu (3.15), a udio NO_x prema izrazu (3.16). Pretičak zraka (λ) računa se prema izrazu (3.17).

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_{2,\text{max}} \cdot \frac{20,9 - \text{O}_2}{20,9} \quad (3.15)$$

$$\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2 \quad (3.16)$$

$$\lambda = \frac{\text{CO}_{2,\text{max}}}{\text{CO}_2} = \frac{\text{O}_{2,\text{max}}}{\text{O}_{2,\text{max}} - \text{O}_2} \quad (3.17)$$

Udio pojedinog konstituenta (X) dimnih plinova svedenog na referentnu razinu kisika u dimnim plinovima računa se prema:

$$X = X_{\text{avg}} \cdot \frac{21 - \text{O}_{2\text{ standardized}}}{21 - \text{O}_{2\text{ avg}}} \quad (3.18)$$

Određivanje masene koncentracije konstituenta (X) radi se prema jednadžbi:

$$X [\text{mg}/\text{m}_n^3] = X_{\text{avg}}[\text{ppm}] \cdot d_X \quad (3.19)$$

pri čemu je:

$d_{\text{CO}} = 1,25 \text{ kg}/\text{m}_n^3$ – gustoća ugljičnog monoksida pri normalnom stanju

$d_{\text{NO}_x} = 2,05 \text{ kg}/\text{m}_n^3$ – gustoća dušikovih oksida pri normalnom stanju

$d_{\text{OGC}} = 1,64 \text{ kg}/\text{m}_n^3$ – gustoća propana pri normalnom stanju

3.2.5 Mjerenja emisija provedena od strane akreditiranog laboratorija

Mjerenja koncentracije onečišćujućih tvari u dimnim plinovima od strane akreditiranog laboratorija provedeno je u više seta mjerenja. Ciljevi ovih mjerenja su sljedeći:

- Potvrda provedenih vlastitih mjerenja
- Mjerenje emisija polutanata za koje Fakultet ne posjeduje opremu

Za potrebe završih mjerenja provedena je rekonstrukcija mjerne linije za analizu dimnih plinova gdje se dodatno ugradio nastavak (u horizontalnoj izvedbi) kojim je omogućeno priključenje mjernih uređaja angažiranog akreditiranog laboratorija na postojeću mjernu liniju. Zbog toga došlo je promjene mjesta postojećih mjernih priključaka te stoga izmjerene vrijednosti temperature dimnih plinova nisu u potpunosti usporedive s prethodnim ispitivanjima. Ukupno su provedena četiri seta mjerenja:

- a) Kotao bez ugrađenog umetka i loženjem na drvene pelete
- b) Kotao bez ugrađenog umetka i loženjem na pelete uljane repice
- c) Kotao s ugrađenim sačastim umetkom za naknadno izgaranje i loženjem na drvene pelete
- d) Kotao s ugrađenim sačastim umetkom za naknadno izgaranje i loženjem na pelete uljane repice

Vremensko trajanje svakog seta iznosilo je otprilike 1 sat (kontinuirano mjerenje koncentracije O₂, CO₂, CO, NO, SO₂, OGC) uz dva uzorkovanja čestica u trajanju od po pola sata. Kao rezultat dana je aritmetička sredina svih mjerenih vrijednosti tijekom jednog seta mjerenja svedena na mg/Nm³ na 10% O₂ u dimnim plinovima. Zbog potrebe za daljnjim razvojem lamelnog, mjerenja su također provedena samo za sačasti umetak.

Mjerenja su povedena sukladno sljedećim normama:

- a) HRS CEN/TS 15675:2008 – Kakvoća zraka – Mjerenje emisija iz stacionarnih izvora – Primjena norme EN ISO/IEC 17025:2005 na povremena mjerenja (CEN/TS 15675:2007)
- b) HRN EN 15259:2008 – Kvaliteta zraka – Mjerenje emisija iz stacionarnih izvora – Zahtjevi za mjerne presjeke mjesta te za mjerni cilj, plan i izvještaj (EN 15259:2007)
- c) HRN ISO 12039:2012 (ISO 12039:2001) – Emisije iz stacionarnih izvora – Određivanje koncentracije ugljikovog monoksida, ugljikovog dioksida i kisika (zahtjevi i kalibracija automatskih mjernih sustava)
- d) HRN ISO 10849:2008 (ISO 10849:1996) – Emisije iz stacionarnih izvora – Određivanje masene koncentracije dušikovih oksida – značajke rada automatskih mjernih mjesta
- e) HRN ISO 7935:1997 (ISO 7935:1992) – Emisije iz stacionarnih izvora - Određivanje masene koncentracije sumporovog dioksida - značajke rada automatskih mjernih mjesta
- f) HRN ISO 9096:2017 (ISO 9096:2017) – Emisije iz stacionarnih izvora – Ručna metoda određivanja masene koncentracije čestica

- g) HRN EN 13284-1:2017 (EN 13284-1:2017) – Emisije iz stacionarnih izvora – Određivanje niskih razina masenih koncentracija prašine – 1. dio: Ručna gravimetrijska metoda
- h) HRN EN 12619:2013 (EN 12619:2013) – Emisije iz stacionarnih izvora – Određivanje masene koncentracije ukupnog plinovitog organskog ugljika – Kontinuirana plameno ionizacijska metoda
- i) HRN EN 14790:2017 (EN 14790:2017) – Određivanje vodene pare u odvodnom kanalu

Za provedbu mjerenja korišteni su sljedeći mjerni instrumenti:

- a) Prijenosni analizator za kontinuirano mjerenje ukupnih ugljikovodika s plameno ionizacijskim plamenom, proizvođača „Ratfisch“ Poing, tip RS 53-T (P5 104) sa sondom za uzorkovanje proizvođača „M&C Products Analysentechnik“, tip PSP 4000-H i linijom za uzorkovanje „Winkler“.
- b) Uređaj za automatsko izokinetičko uzorkovanje proizvođača „TCR Tecora“, tip Isostack Basic HV s odgovarajućom grijanom sondom i grijanom kutijom za filter za uzorkovanje i Pitot cijevi tip S
- c) Analitička vaga za mjerenje mase uzorka krutih čestica u otpadnim plinovima proizvođača „Mettler Toledo“ tip AG204 Delta Range
- d) Analizator dimnih plinova koji radi na principu nedisperzivne infracrvene spektrometrije (NDIR) proizvođača „Madur Electronics“, tip Photon II s uređajem za pripremu dimnih plinova (hladnjak) proizvođača „Madur Electronics“, tip PGD – 100 i opremom za mjerenje temperature otpadnih plinova

3.3 Model proračuna toplinske učinkovitosti

Razvijeni model proračun toplinske učinkovitosti indirektnom metodom koji je opisan u poglavlju 3.3.3, može se primijeniti u preliminarnom određivanju očekivanih emisija dušikovih oksida te kod proračuna toplinske učinkovitosti toplovodnih kotlova. U ovom radu proračun se koristi za provjeru CEN pristupa određivanju toplinske učinkovitosti [84] (opisani u poglavlju 3.2.2).

CEN pristup određivanja toplinske učinkovitosti [84, 87] temelji se na poznavanju udjela pojedinih elementa goriva (C , H , W), ogrjevne moći goriva (H_d), masenog udjela ugljika u ostatku (C_r) i koncentraciji ugljičnog monoksida u suhim dimnim plinovima (CO). Nadalje, sukladno CEN pristupu postoji razlika u određivanju toplinskih gubitaka osjetne topline dimnim plinovima ako se za gorivo koriste peleti (drvni) [84] ili cjepanice i briketi [87], iako su to goriva istog ili sličnog kemijskog sastava. No, u europskom pristupu ne postoji razlika u određivanju toplinske učinkovitosti za biomasu različitog podrijetla (šumska, energetska usjevi, ostaci iz poljoprivredne proizvodnje), čiji se kemijski sastav može međusobno i značajnije razlikovati. Isto tako, u usporedbi s emisijama kod drvene biomase, korištenjem nedrvne biomase se mogu javiti i značajnije emisije drugih polutanata (npr. SO_x , NO_x) koje se u CEN pristupu ne uzimaju u obzir. Opisanim proračunom u obzir su uzeti navedeni nedostaci CEN pristupa.

3.3.1 Van der Waalsova jednadžba stanja

Za svaki gorivi element mogu se postaviti odgovarajući stehiometrijski odnosi izgaranja. U nastavku su dane osnovne jednadžbe idealnog i realnog izgaranja tipične za izgaranje krute biomase. Volumen plina određen je Van der Waalsovom jednadžbom stanja plina. Navedena jednadžba stanja uzima u obzir volumen molekula plina i privlačenje odnosno odbijanje između molekula. Jednadžba je opisana sljedećim izrazima:

$$p = \frac{R_m T}{V_m} \quad (3.20)$$

$$p = p_{\text{odbijanje}} - p_{\text{privlačenje}} \quad (3.21)$$

$$p_{\text{odbijanje}} = \frac{R_m T}{V_m - b} \quad (3.22)$$

$$p_{\text{privlačenje}} = \frac{a}{V_m^2} \quad (3.23)$$

$$p = \frac{R_m T}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2} \quad (3.24)$$

Uvođenjem broja molova dobiva se oblik:

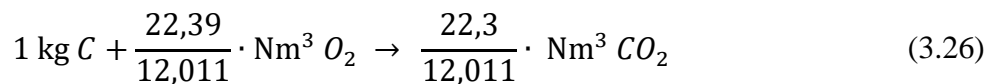
$$\left(p + \frac{n^2 \cdot a}{V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R_m \cdot T \quad (3.25)$$

Parametar b označava volumen molekula plina, koji se oduzima od volumena plina. Parametar a predstavlja korektivni faktor za sile privlačenja molekula plina i naziva se konstanta proporcionalnosti, te ima veliki utjecaj kod velikih tlakova i malih volumena plina. Kod niskih tlakova ($p \rightarrow 0$) a i b parametri su zanemarivi ($a, b \rightarrow 0$), pa izraz (3.25) poprima oblik jednadžbe stanja idealnog plina. Parametri a i b mogu se pronaći u kemijskim priručnicima poput [88].

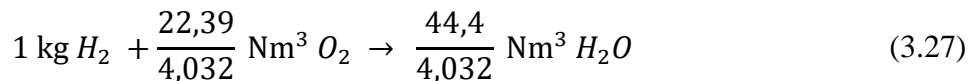
3.3.2 Proračun idealnog izgaranja

Stehiometrijske jednadžbe izgaranja

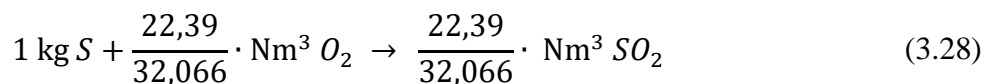
Reakcijom spajanja ugljika (C) i kisika (O₂) nastaje ugljikov dioksid (CO₂) uz oslobađanje topline:



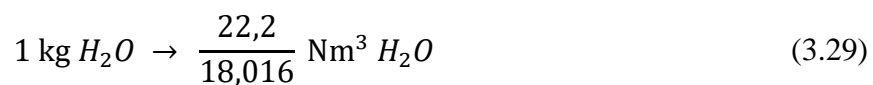
Reakcijom spajanja vodika (H₂) i kisika (O₂) nastaje vodena para (H₂O) uz oslobađanje topline:



Reakcijom spajanja sumpora (S) i kisika (O₂) nastaje sumporov dioksid (SO₂) uz oslobađanje topline:



Vlaga prisutna u biomasi/gorivu podvrgnuta je isparavanju pri čemu se koristi dio topline oslobođene izgaranjem goriva:



Potrebna količina zraka za izgaranje

U sljedećim izrazima c , s , h , o , w predstavljaju masene udjele pojedinog elementa u biomasi (gorivu). Minimalna količina kisika potrebnog za izgaranje izražena u Nm^3 određuje se prema:

$$V_{O,\min} = \frac{22,39}{12,011} \cdot c + \frac{22,39}{4,032} \cdot \left(h - \frac{o}{8}\right) + \frac{22,39}{32,066} \cdot s \quad (3.30)$$

Stvarna količina zraka za izgaranje izražena u Nm^3 određuje se prema:

$$V_{L,\text{stv}} = \lambda \cdot \frac{V_{O,\min}}{0,21} \quad (3.31)$$

Produkti izgaranja

Nastala količina suhih dimnih plinova izražena u Nm^3 određuju se izrazom:

$$V_{\text{sdp}} = \frac{22,30}{12,011} \cdot c + \frac{23,39}{32,066} \cdot s + 0,79 \cdot V_{L,\text{stv}} + (\lambda - 1) \cdot V_{O,\min} \quad (3.32)$$

Nastala količina vlažnih dimni plinova izražena u Nm^3 određuju se izrazom:

$$V_{\text{vdp}} = V_{\text{sdp}} + \frac{44,4}{4,032} \cdot h + \frac{22,2}{18,016} \cdot w \quad (3.33)$$

Adijabatska temperatura izgaranja

Adijabatska temperatura izgaranja određuje se prema:

$$\vartheta_{\text{teor}} = \frac{H_u}{V_{\text{vdp}} \cdot [c_p]_{\vartheta_{\text{ok}}}^{\vartheta_{\text{teor}}}} + \vartheta_{\text{ok}} \quad (3.34)$$

gdje H_u predstavlja ogrjevnu vrijednost goriva, c_p specifični toplinski kapacitet dimnih plinova.

Proračun toplinskih gubitaka

Osjetni toplinski gubici dimnim plinovima mogu se odrediti prema:

$$Q_A = V_{\text{vdp}} \cdot [c_p]_{\vartheta_{\text{ok}}}^{\vartheta_{\text{dp}}} \cdot (\vartheta_{\text{dp}} - \vartheta_{\text{ok}}) \quad (3.35)$$

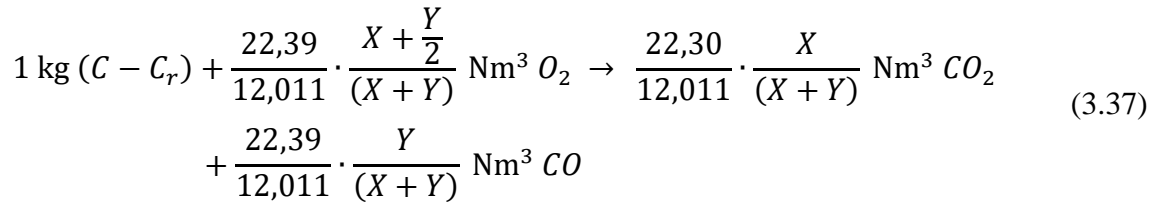
gdje je ϑ_{dp} temperatura dimnih plinova na izlazu iz kotla.

Relativni toplinski gubici osjetne topline dimnim plinovima računaju se prema:

$$q_a = \frac{Q_A}{H_u} \quad (3.36)$$

3.3.3 Proračun realnog izgaranja

Reakcijom spajanja ugljika (C) i kisika (O₂) nastaje ugljikov dioksid (CO₂) i ugljikov monoksid (CO) uz oslobađanje topline. U izrazu (3.37) udio ugljika se smanjuje za udio neizgorenog ugljika svedenog na ukupnu masu goriva (C_r). Udio hlapivih organskih spojeva (OGC) u dimnim plinovima se može zanemariti.



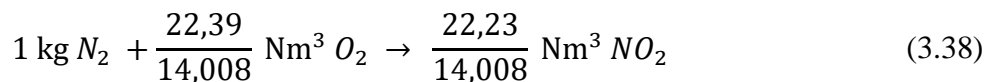
U izrazu (3.37) X i Y predstavljaju stehiometrijske koeficijente jednadžbe izgaranja ugljika. Fizikalno, X/(X+Y) predstavlja udio izgorenog ugljika oksidiranog u CO₂, a Y/(X+Y) udio izgorenog ugljika oksidiranog u CO.

Reakcijom spajanja vodika (H₂) i kisika (O₂) nastaje vodena para (H₂O) uz oslobađanje topline. Reakcija je dana izrazom (3.27).

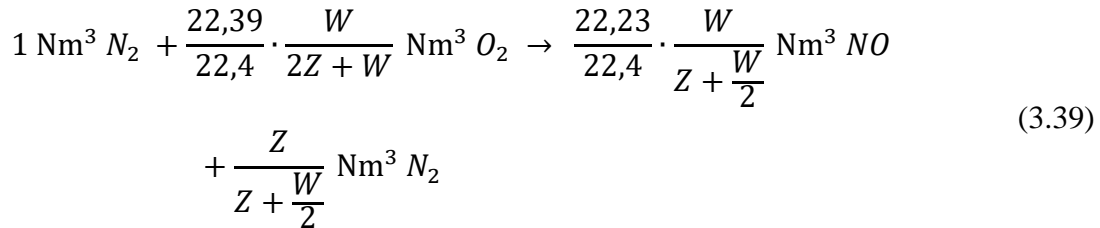
Reakcijom spajanja sumpora (S) i kisika (O₂) nastaje sumporov dioksid (SO₂) uz oslobađanje topline. Reakcija je dana izrazom (3.28).

Vlaga prisutna u biomasi/gorivu podvrgnuta je isparavanju pri čemu se koristi dio topline oslobođene izgaranjem goriva. Reakcija je opisana izrazom (3.29).

Reakcijom spajanja dijela dušika iz goriva (N₂) i kisika (O₂) nastaju dušikovi oksidi (NO_x) prema izrazu:



Reakcijom spajanja dušika iz zraka (N_2) i kisika (O_2) nastaju dušikovi oksidi (NO_x) prema izrazu:



U izrazu (7.39) W i Z predstavljaju stehiometrijske koeficijente jednadžbe nastanka NO_x -a iz dušika iz zraka. Fizikalno, $W/(2Z+W)$ predstavlja udio dušika iz zraka pretvorenog u NO , a $Z/(2Z+W)$ udio neizreagirano dušika.

Stehiometrijski koeficijenti X , Y , W , Z određuju se iterativno na način da se rezultati proračuna izjednače s podacima dobivenim mjerenjem.

Potrebna količina zraka za izgaranje

Minimalna količina kisika i stvarna količina zraka potrebnog za izgaranje određuju se prema izrazima (3.30) i (3.31).

Produkti izgaranja

Nastala količina CO_2 u dimnim plinovima izražena u Nm^3 određuje se prema:

$$V_{CO_2} = \frac{22,30}{12,011} \cdot \frac{X}{(X + Y)} \cdot \left(c - \frac{C_r}{100} \right) \quad (3.40)$$

Nastala količina CO u dimnim plinovima mora odgovarati izmjerenoj količini.

$$V_{CO} = \frac{22,39}{12,011} \cdot \frac{Y}{(X + Y)} \cdot \left(c - \frac{C_r}{100} \right) = \frac{CO}{1000000} \cdot V_{sdp} \quad (3.41)$$

Nastala količina NO_x u dimnim plinovima mora odgovarati izmjerenoj količini.

$$V_{NO_x} = x \cdot \frac{22,23}{14,008} \cdot n_{fuel} + \frac{22,23}{22,4} \cdot \frac{W}{Z + \frac{W}{2}} \cdot 0,79 \cdot V_{L,stv} = \frac{NO_x}{1000000} \cdot V_{sdp} \quad (3.42)$$

gdje x predstavlja udio dušika iz goriva (N) koje je podvrgnut reakciji spajanja s kisikom.

Količina N_2 u dimnim plinovima izražena u Nm^3 računa se prema:

$$V_{N_2} = \frac{Z}{Z + \frac{W}{2}} \cdot 0,79 \cdot V_{L,stv} \quad (3.43)$$

Nastala količina SO_2 u dimnim plinovima izražena u Nm^3 računa se prema (uz pretpostavku potpune konverzije S iz goriva u SO_2):

$$V_{SO_2} = \frac{22,39}{32,066} \cdot s \quad (3.44)$$

Preostali količina O_2 u dimnim plinovima izražena u Nm^3 mora odgovarati stvarno izmjerenoj vrijednosti.

$$\begin{aligned} V_{O_2} &= \lambda \cdot V_{O,\min} - \frac{22,39}{32,066} \cdot s - \frac{22,39}{22,4} \cdot \frac{W}{2Z + W} \cdot 0,79 \cdot V_{L,stv} - x \cdot \frac{22,39}{14,008} \\ &\cdot n_{\text{fuel}} - \frac{22,39}{4,032} \cdot h - \frac{22,39}{12,011} \cdot \frac{X + \frac{Y}{2}}{(X + Y)} \cdot (c - C_r) + \frac{22,39}{4,032} \cdot \frac{o}{8} \\ &= \frac{O_2}{100} \cdot V_{\text{sdp}} \end{aligned} \quad (3.45)$$

Nastala količina suhih dimni plinovi izražena u Nm^3 određuju se izrazom:

$$V_{\text{sdp}} = V_{CO_2} + V_{CO} + V_{NO_x} + V_{N_2} + V_{SO_2} + V_{O_2} \quad (3.46)$$

Opisani set jednadžbi (3.40-3.46) moguće je jedino riješiti uz poznati udio dušika u goriva koji je podvrgnut reakciji spajanja s kisikom (x), jednadžba (3.38). Za potrebe takve analize potrebno je poznavati udjele konverzije dušika iz goriva u NO_x , a koji se mogu odrediti prema literaturnim podacima (slika 8), uzevši u obzir udio dušika u suhom gorivu.

Nastali vlažni dimni plinovi određuju prema izrazu (3.31).

Proračun toplinskih gubitaka i teoretska temperatura izgaranja realnog izgaranja

Adijabatska temperatura izgaranja koja uzima u obzir kemijske gubitke izgaranja, kao i gubitke što dio goriva nije podvrgnut reakciji izgaranja određuje se prema sljedećem postupku, u kojem je potrebno izračunati redefiniranu ogrjevnju moć.

Reducirana ogrjevna moć koja u obzir uzima gubitke neizgorenog goriva računa se prema:

$$H_{u-b} = H_u - \frac{C_r}{100} \cdot 33.910 \quad (3.47)$$

Relativni toplinski gubici zbog neizgorenog goriva u ostatku mogu se odrediti prema:

$$q_b = \left(1 - \frac{H_{u-b}}{H_u}\right) \quad (3.48)$$

Reducirana ogrjevna moć koja u obzir uzima kemijske toplinske gubitke računa se prema:

$$H_{u-CO} = H_u - n_{CO} \cdot \Delta H_{CO} \quad (3.49)$$

Relativni kemijski toplinski gubici određuju se prema:

$$q_u = \left(1 - \frac{H_{u-CO}}{H_u}\right) \quad (3.50)$$

Osjetni toplinski gubici određuju se prema izrazima (3.35-3.36).

3.4 Numeričke simulacije izgaranja

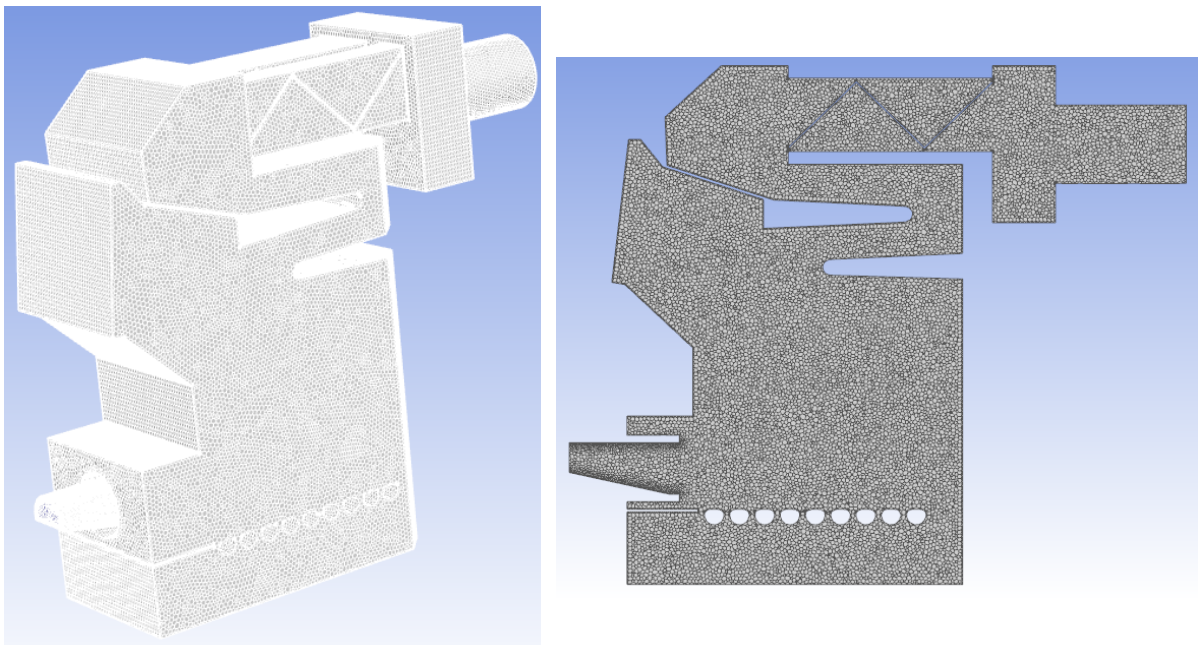
Numerička simulacija izgaranja i naknadnog izgaranja u umetcima provedena je samo za klasične drvne pelete. Iste simulacije nisu provedene za pelete iz poljoprivredne biomase zbog velike neujednačenosti u sastavu i kvaliteti pojedine vreće goriva što bi uzrokovalo probleme kod eksperimentalne potvrde modela. Također, u literaturi nisu pronađeni radovi koji se bave računalnom simulacijom izgaranja nedrvne biomase u ložištima toplovodnih kotlova manjih snaga. Pretpostavljeno je da će dobiveni zaključci za izgaranje drvnih peleta vrijediti i kod izgaranja peleta iz poljoprivredne biomase. Sumarni prikaz korištenih parametara u numeričkim simulacijama prikazani je u tablici 3.

Tablica 3. Pregled korištenih parametara u modelima numeričkih simulacija

Model	Toplovodni kotao	Sačasti umetak za naknadno izgaranje	Lamelni umetak za naknadno izgaranje
broj kontrolnih volumena	784.494	1.401.768	2.175.383
tip kontrolnih volumena	pretežno oktaedri	pretežno oktaedri	pretežno oktaedri
rubni uvjeti strujanja	maseni protok/ izlazni tlak	maseni protok/ izlazni tlak	maseni protok/ izlazni tlak
ostali rubni uvjeti	zid/konvekcija zid/adijabatski	simetrija zid/konvekcija zid/adijabatski	simetrija zid/konvekcija zid/adijabatski
korekcije tlaka i brzine ("pressure velocity coupling")	SIMPLE	SIMPLE	SIMPLE
interpol. shema tlaka	PRESTO	PRESTO	PRESTO
scheme i red točnosti – ostali parametri	programski postavljeno	programski postavljeno	programski postavljeno
$k-\varepsilon$ model	ostvarljiv/ metoda proširene stijenke	ostvarljiv/ metoda proširene stijenke	ostvarljiv/ metoda proširene stijenke
model zračenja	DO (4x4x2x2)/ WSGGM	DO (4x4x2x2)/ WSGGM	DO (4x4x2x2)/ WSGGM
jedn. transporta tvari	model konačnih brzina reakcije/ model disipacije vrtloga (A=1,4; B=0,5)	model konačnih brzina reakcije/ model disipacije vrtloga (A=0,8; B=0,5)	model konačnih brzina reakcije/ model disipacije vrtloga (A=0,8; B=0,5)

3.4.1 Numeričko-eksperimentalna simulacija procesa izgaranja u toplovodnom kotlu

Pomoću komercijalnog programskog paketa Ansys Fluent, kod kojeg se numerički model zasniva na metodi konačnih volumena, provedeno je numeričko modeliranje procesa izgaranja i izmjene topline u korištenom toplovodnom kotlu s plamenikom. Domena je diskretizirana sa 782.494 konačnih volumena (slika 21). Mreža, koja određuje konačne volumene mješovitog je tipa, a definirana je pretežno oktaedrima. Prilikom modeliranja turbulentnog strujanja, a kako bi se osiguralo da vrijede aproksimacije korištene kod razvoja turbulentnih modela, pažnja se posvećuje izradi mreže u područjima uz stijenku. To zahtijeva da određeni geometrijski zahtjevi, koji su navedeni u poglavlju 2.2.2, moraju biti ispoštovani. Međutim, to se može djelomično zanemariti ukoliko se razmotre posebni podmodeli turbulencije. U ovom radu korišten je ostvarljivi $k-\varepsilon$ modela turbulencije, koji omogućuje korištenje podmodela „metodu proširene stijenke“. Stoga, zbog fleksibilnosti metode proširene stijenke, posebna pažnja nije posvećena stvaranju gušće mreže u područjima uz stijenku. Područje uz stijenku je također područje gdje, u pravilu, kemijske reakcije nisu toliko značajne [26] te nije od posebnog značaja u kontekstu ovog rada. Prilagodljivost metode proširene stijenke je pogodna za smanjenje računskih zahtjeva ovakvih simulacija. Za generiranje mreže korišten je programski paket dostupan u okviru Ansysa.



Slika 21. Prikaz toplovodnog kotla s mrežom konačnih volumena

Kod diskretizacije prostora, u obzir je uzeta kompletna geometrija toplovodnog kotla (uključujući i turbulatore u trećem prolazu), od ulazne „virtualne“ površine plinova nastalih raspadom biomase (H_2O , wood_vol, CO) do izlaznog presjeka kroz koji dimni plinovi izlaze iz kotla. „Wood_vol“ je plin kemijske formule $CH_{2,382}O_{1,075}$ koji je dostupan u Fluent-ovoj bazi plinova i može se koristiti za opis nastalih para ugljikovodika. Izgaranje drvenog ugljena je, kao i u ostalim radovima dostupnim u literaturi, opisano preko izgaranja ugljikovog monoksida.

Korišten je jednosmjerni način modeliranja plinova nastalih raspadom biomase, gdje su isti nezavisni o kasnijem procesu izgaranja. Tako je, za ovaj empirijski model dovoljno poznavati sastav i maseni protok goriva, maseni protok zraka za izgaranje te literaturne podatke o karakterističnim temperaturama isparavanja vlage, pirolize i izgaranja drvnog ugljena (ostatka nakon isplinjavanja drva).

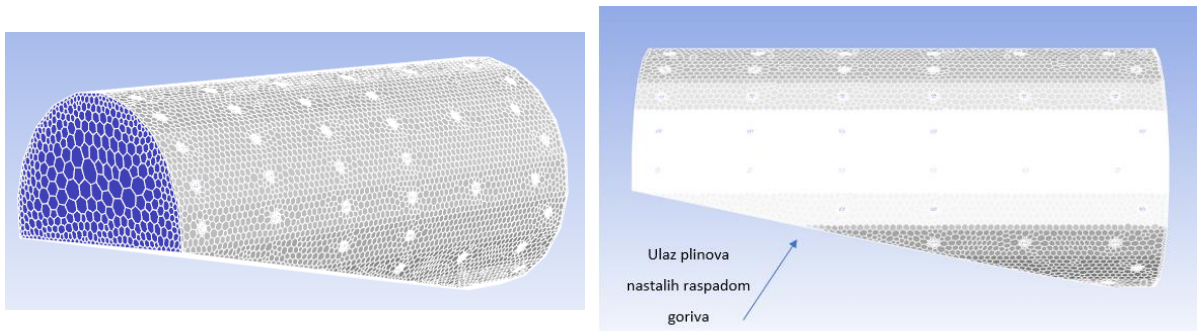
Cilj je bio razviti realističan, ali opet jednostavan postupak CFD modeliranja izgaranja biomase u formi peleta u plameniku kućanskog toplovodnog kotla. Zbog svoje jednostavnosti, metodologija primijenjena u ovom radu pruža nekoliko prednosti prilikom modeliranja izgaranja biomase u uređajima manjih snaga, gdje se konverzija krutog goriva može promatrati kao savršeni miješajući reaktor, gdje je mala debljina sloja kroz koji zrak struji te gdje je vrijeme zadržavanja dimnih plinova kraće od vremena potrebnog za reakciju (reakcije se ne odvijaju u ili na krutoj fazi, već na virtualnoj površini između krute i plinovite faze) [30]. Prikaz plamenika s mrežom kontrolnih volumena je dan na slikama 22 i 23. Prikaz ulaznih domena goriva i zraka za izgaranje prikazan je na slici 20. Na slici 22 prikazan je položaj „virtualne“ površine (granica krute i plinovite faze). Visina krute faze duž rešetke određena je vizualno. Primarni zrak za izgaranje se dovodi kroz samo gorivo i površinu polukružnog oblika (slika 20). Sekundarni zrak dovodi se kroz otvore na gornjem djelu oplošja plamenika. „Prazne“ površine na „virtualnoj“ površini (slika 23) predstavljaju mjesta naizmjeničnog ulaska primarnog zraka i plinova nastalih izgaranjem biomase.

Izgaranje nastalih plinova opisano je sa shemom izgaranja od ukupno 5 jednadžbi transporta tvari koje uključuju modele konačnih brzina reakcije i modele disipacije vrtloga (modeli opisani u poglavlju 2.2.2). Korištena shema izgaranja je djelomično modificirana shema korištena u [26, 30]. Reakcije i korišteni rubni uvjeti dani su u tablici 4. Empirijska vrijednost konstante A koja limitira brzinu miješanja goriva i zraka određena je iterativno na način da se numerički

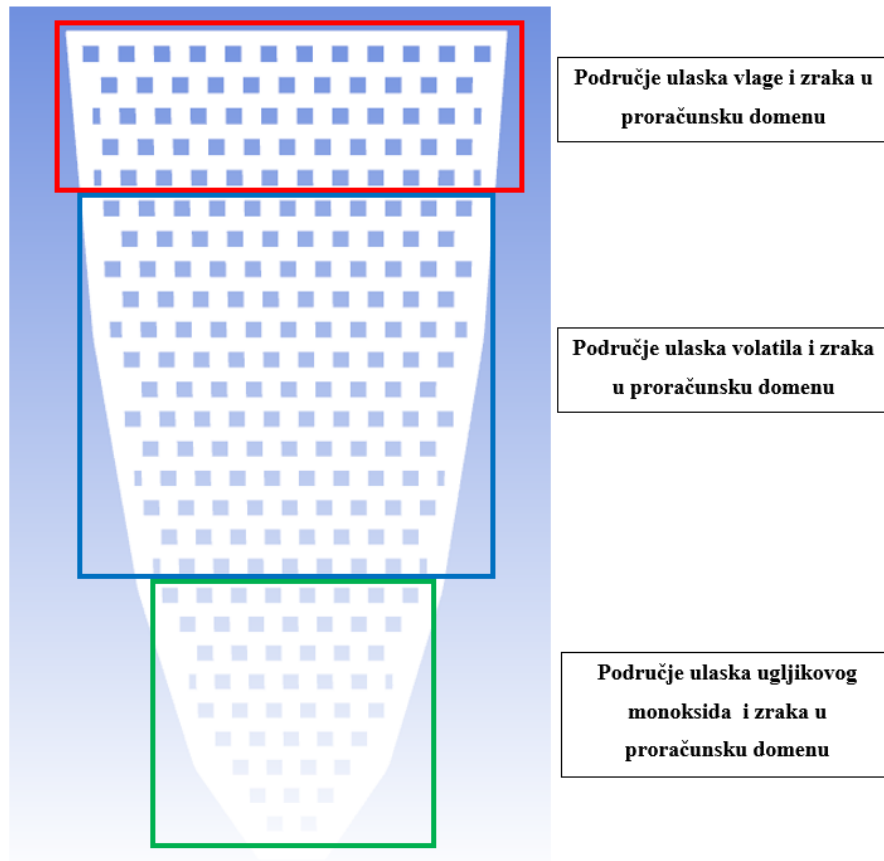
dobivene vrijednosti emisija ugljikovog monoksida poklope s istima dobivenim eksperimentalno.

Tablica 4. Reakcije izgaranja biomase

Rd. br.	Kemijska jednadžba	Brzina kemijske reakcije	A	B
(1)	$\text{wood_vol} + 0,558\text{O}_2 \rightarrow 1\text{CO} + 1,191\text{H}_2\text{O}$	$R = 2,027 \cdot 10^{11} \cdot e^{\left(-\frac{1 \cdot 10^8}{RT}\right)} [\text{wood_vol}]^{0,2} [\text{O}_2]^{1,3}$	1,4	0,5
(2)	$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$R = 2,239 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(-\frac{1,7 \cdot 10^8}{RT}\right)} [\text{CO}][\text{O}_2]^{0,25}$	1,4	0,5
(3)	$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$R = 9,87 \cdot 10^8 \cdot e^{\left(-\frac{3,1 \cdot 10^7}{RT}\right)} [\text{H}_2][\text{O}_2]$	1,4	0,5
(4)	$\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$R = 2,78 \cdot 10^0 \cdot e^{\left(-\frac{1,255 \cdot 10^7}{RT}\right)} [\text{H}_2\text{O}][\text{CO}]$	1,4	0,5
(5)	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$	$R = 9,369 \cdot 10^4 \cdot e^{\left(-\frac{4,695 \cdot 10^7}{RT}\right)} [\text{CO}_2][\text{H}_2]$	1,4	0,5



Slika 22. Prikaz plamenika s mrežom kontrolnih volumena



Slika 23. Modeliranje ulaznih parametara „virtualne“ površine – ulazne površine plinova nastalih izgaranjem biomase

Određene površine u modelu opisuju prijenos toplinskog toka prema vodi, dok su druge izolirane ili opisuju toplinske gubitke kroz ovojnici. Vodena strana toplovodnog kotla nije simulirana, već je umjesto toga toplinski tok prema vodi modeliran preko stacionarnog rubnog uvjeta, s vanjskim koeficijentom konvektivnog prijelaza topline od $1.500 \text{ W/m}^2\text{K}$ i srednjom temperaturom vode korištene u eksperimentu (raspon od 70 do $80 \text{ }^\circ\text{C}$). Slične vrijednosti konvektivnog prijelaza topline korištene su i u [30]. Korištena pretpostavka ne bi trebala imati značajan utjecaj na ukupni toplinski tok kroz površine oplakivane vodom zbog toga što je koeficijent konvektivnog prijelaza topline na strani vode puno veći od onog na strani dimnih plinova. Vanjske površine dimne komore također su modelirane s vanjskim koeficijentom konvektivnog prijelaza topline od $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ [32, 33] i temperaturom okolnog zraka od 27°C .

Zračenje je modelirano metodom diskretnih ordinata (*DO model*), gdje je svaki oktant sfere diskretiziran s 4×4 prostorna kuta. Smjesa nastalih dimnih plinova aproksimirana je kompozicijom sivih plinova, a koeficijent apsorpcije modeliran je modelom težinske sume sivih plinova. Detaljan opis korištenog modela i koeficijenta apsorpcije dan je u poglavlju 2.2.2.

Temperature i maseni protoci zraka i goriva korišteni u simulaciji dani su tablicom 5. Maseni udio hlapivih plinova i drvnog ugljena (modelirano kao CO) određeni su na način da u konačnici maseni udio svakog konstituenta (*c, h, o*) u suhom gorivu odgovara istima dobivenim eksperimentalno (određeni maseni udio wood_vol iznosi 86,4%, a *c*=13,6% u suhom drvetu bez pepela). Količina goriva i zraka dovedenog za izgaranje određena je iz ostvarenog toplinskog učina i stehiometrije idealnog izgaranja (poglavlje 3.3.2) na temelju eksperimentalno određenih podataka (za točku br. 2 detaljne analize emisija polutanata korištenjem drvnog peleta PD2, poglavlje 4.5.1). Također, oslanjajući se na iskustvene podatke, pretpostavljeno je da se 80% zraka dovodi kroz primarni, a 20% kroz sekundarni zrak za izgaranje.

Tablica 5. Ulazni parametri u domenu simulacije cijelog kotla

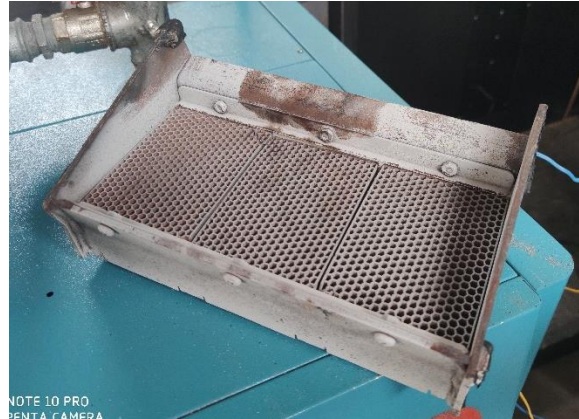
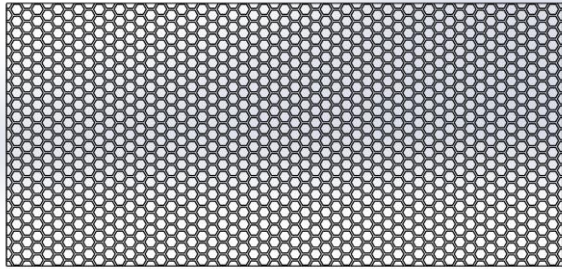
Naziv	Temperatura [°C]	Sastav	Maseni protok [kg/s]
Primarni zrak	26,85	zrak	0,011237*
Sekundarni zrak	26,85	zrak	0,002809
Vlaga	150	H ₂ O	0,000147
Hlapivi plinovi	650	wood_vol	0,001453
Drvni ugljen	800	CO	0,000228**

* maseni protok ubačen u simulaciju je manji zbog toga što je dio O₂ već reagirao prilikom nastanka CO

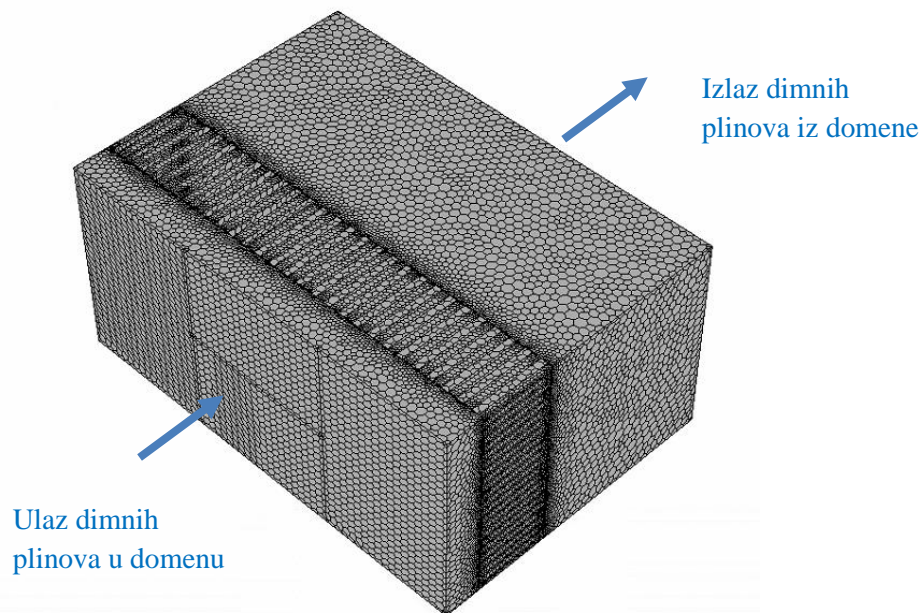
** maseni protok ubačen u simulaciju je veći zbog toga što sadrži dio O₂ iz zraka potreban za reakciju nastanka CO

Iako su emisije dušikovih oksida prvenstveno posljedica prisustva dušika u gorivu (poglavlje 2.1.3), zbog kompletnosti modela, za predviđanje emisija dušikovih oksida korištena su tri gotova modela (iz programskog paketa Ansys Fluent) za njihovo nastajanje: termalni, promptni i NO_x iz goriva (iz spojeva koji prethode nastanku NO_x za goriva drvene biomase različitog podrijetla i udjela dušika u gorivu - amonijak i cijanovodik). S obzirom na to da reakcije nastanka dušikovih oksida imaju vrlo mali utjecaj na predviđenu raspodjelu temperatura, strujanja i glavnih produkata izgaranja, reakcije njihovog nastanka su računata tek kod analize rješenja (nakon što je dobivena kompletna temperaturna raspodjela i simulacija strujanja). Za simulaciju je pretpostavljeni faktor konverzije dušika iz goriva u NO_x u iznosu od 0,2% [18].

3.4.2 Numerička simulacija naknadnog izgaranja na saćastom umetku za naknadno izgaranje Domena naknadnog izgaranja na saćastom umetku (slika 24) diskretizirana je s 1.401.768 konačnih volumena (slika 25). Mreža, koja određuje konačne volumene mješovitog je tipa, a definirana je pretežno oktaedrima, kao i u slučaju prethodnog modela.



Slika 24. Saćasti umetak za naknadno izgaranje



Slika 25. Prikaz saćastog umetka za naknadno izgaranje s mrežom kontrolnih volumena

Kod diskretizacije prostora, u obzir je uzeta kompletna geometrija saćastog umetka, te prostor neposredno ispred i nakon umetka (prostor od 25 mm ispred i nakon umetka).

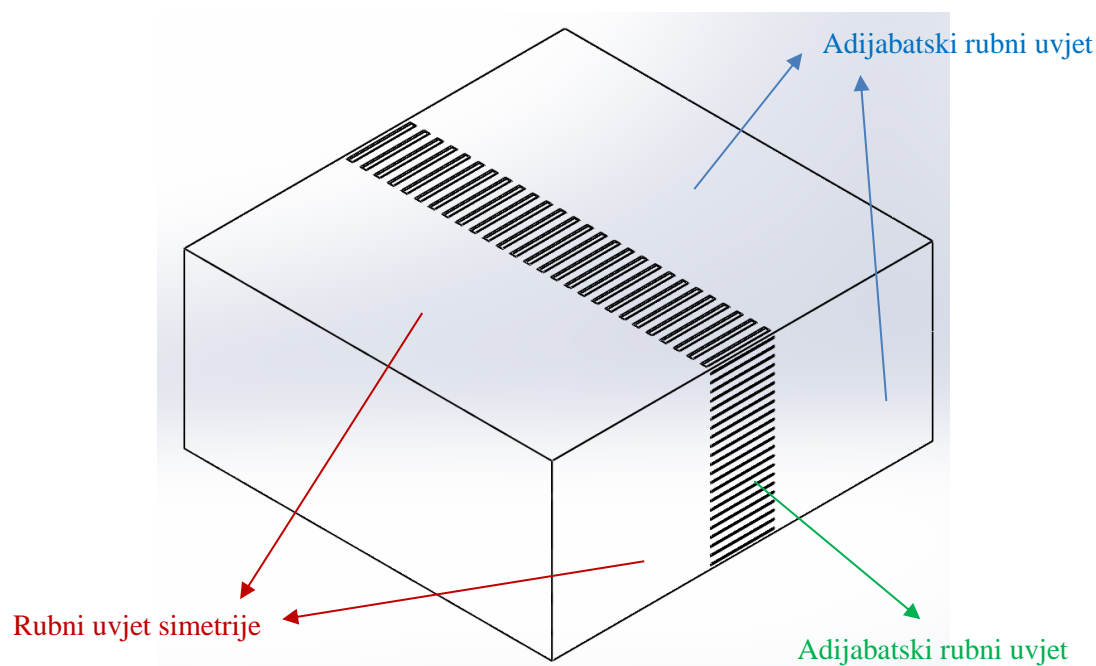
Izgaranje plinova opisano je jednačbom transporta tvari koja uključuje model konačnih brzina reakcije i model disipacije vrtloga (modeli opisani u poglavlju 2.2.2) s predefiniranim parametrima za izgaranje ugljikovog monoksida, dostupnih u okviru programskog paketa

Fluent (tablica 6). Vrijednost konstante A uzeta je sukladno literaturnim podacima za izgaranje biomase (u rasponu od 0,6 do 1,0) [26]. Rubni uvjeti na ulaznoj površini korišteni u ovom modelu određeni su iz simulacije cijelog toplovodnog kotla (prosječne vrijednosti dane su u tablici 9).

Tablica 6. Reakcije naknadnog izgaranja CO

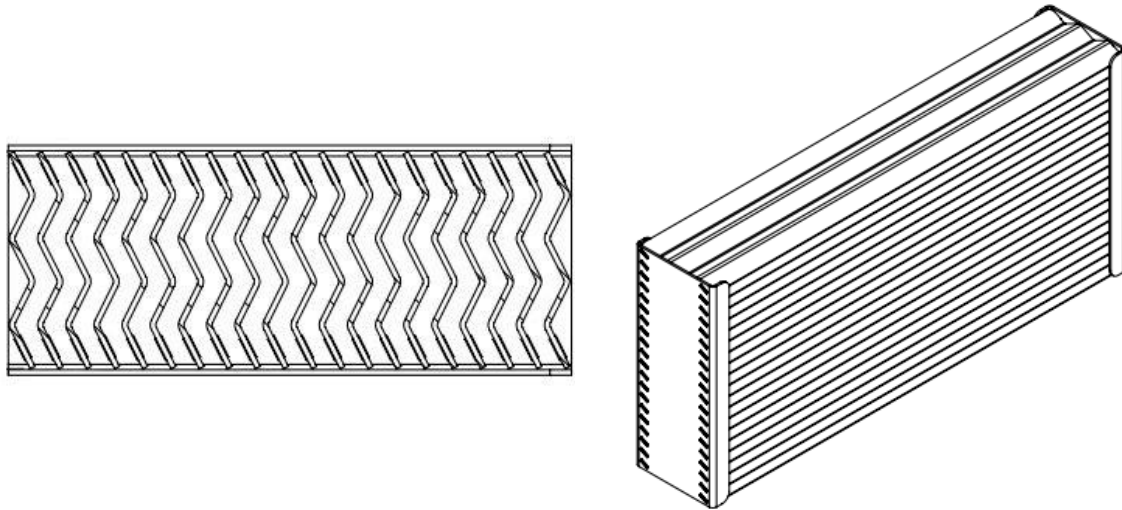
Rd. br.	Kemijska jednažba	Brzina kemijske reakcije	A	B
(1)	$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$R = 2,239 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(-\frac{1,7 \cdot 10^8}{RT}\right)} [\text{CO}][\text{O}_2]^{0,25}$	0,8	0,5
(2)	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$	$R = 9,369 \cdot 10^4 \cdot e^{\left(-\frac{4,695 \cdot 10^7}{RT}\right)} [\text{CO}_2][\text{H}_2]$	0,8	0,5

Površine koje omeđuju domenu ispred samog umetka modelirane su s rubnim uvjetom simetrije (na taj način su izbjegnuti rubni uvjeti i osigurano jednoliko nastrujavanje na umetak), dok površine koje omeđuju domenu nakon samog umetka s adijabatskim rubnim uvjetom (na taj način je opisana situacija u toplovodnom kotlu gdje se odmah nakon umetka nalazi prvi prolaz dimnih plinova). Površine samog umetka također su modelirane adijabatskim rubnim uvjetom. Grafički prikaz rubnih uvjeta dan je na slici 26. Korišteni modeli za rješavanje turbulentnog strujanja i zračenja isti su kao i kod prethodnog modela.

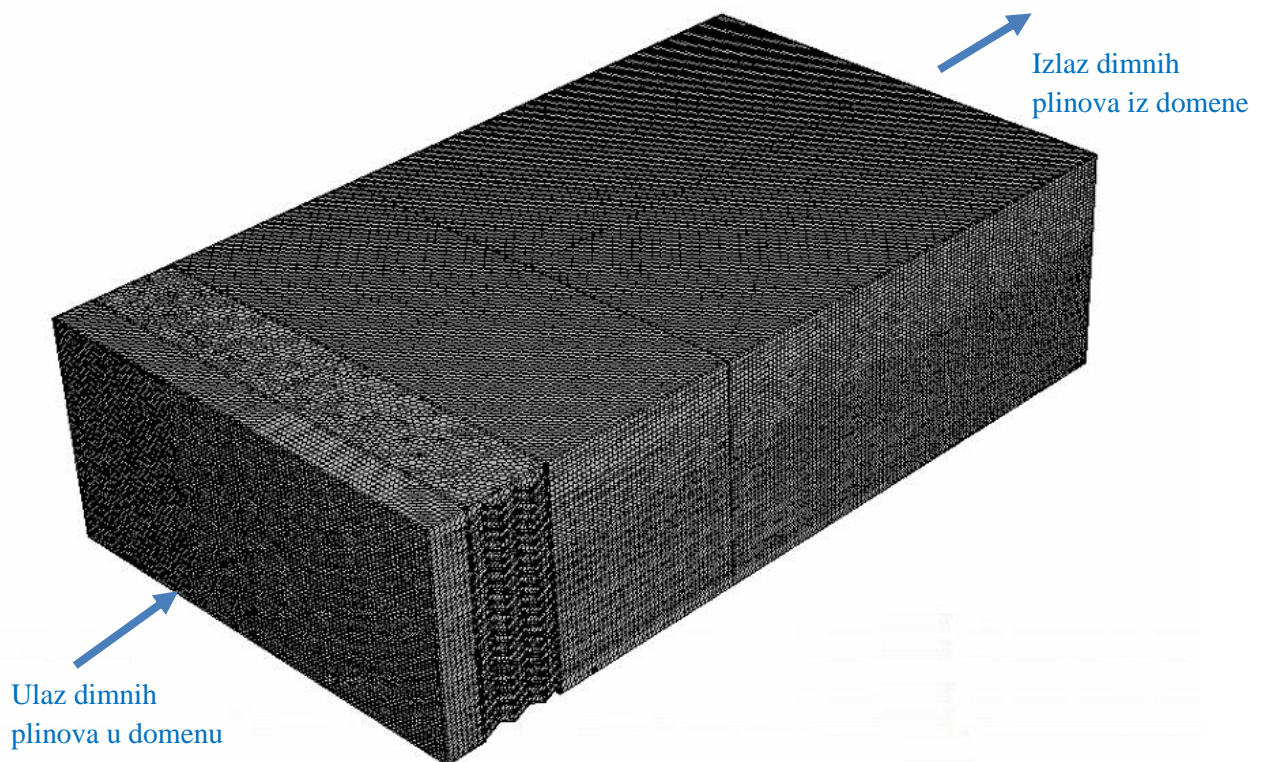


Slika 26. Grafički prikaz korištenih rubnih uvjeta

3.4.3 Numerička simulacija naknadnog izgaranja na lamelnom umetku za naknadno izgaranje Domena naknadnog izgaranja na lamelnom umetku (slika 27) diskretizirana je sa 2.175.383 konačnih volumena (slika 28). Mreža, koja određuje konačne volumene mješovitog je tipa te je također pretežno definirana oktaedrima.



Slika 27. Lamelni umetak za naknadno izgaranje



Slika 28. Prikaz lamelnog umetka za naknadno izgaranje s mrežom kontrolnih volumena

Kod diskretizacije prostora, u obzir je uzeta kompletna geometrija lamelnog umetka, te prostor neposredno ispred i nakon umetka (prostor od 25 mm ispred i 325 mm nakon umetka). U odnosu na računalnu simulaciju naknadnog izgaranja na saćastom umetku, domena korištena u ovoj simulaciji je dulja kako bi se spriječio utjecaj povratnog strujanja na analizirano područje (prostor do 125 mm nakon umetka, kao i u slučaju saćastog umetka).

Korišteni modeli, reakcije izgaranja i rubni uvjeti identične su onima korištenim za simulaciju naknadnog izgaranja na saćastom umetku (tablica 5 i 6). Provedena je i dodatna simulacija gdje su korišteni nešto izmijenjeni ulazni rubni uvjeti kako bi se što točnije opisala situacija ostvarena prilikom mjerenja (tablica 7) te shodno tome i omogućila međusobna usporedba rezultata dobivenih numeričkom simulacijom i mjerenjem. Mjerenja s ugrađenim lamelnim umetkom za naknadno izgaranje provedena su s većim pretičkom zraka (većim protokom zraka za izgaranje), što ujedno znači i većim ukupnim protokom dimnih plinova i nižom temperaturom dimnih plinova. Volumni protok zraka za izgaranje te molni udjeli kisika i ugljikovog dioksida određeni su iz stehiometrije idealnog izgaranja (poglavlje 3.3.2). Kako bi se odredio molni udio ugljikovog monoksida i temperatura dimnih plinova na ulazu u konvektivni pretpostavljena je linearna korelacija između CO emisija dobivenih mjerenjem i onih na ulazu u konvektivni dio dobivenih numeričkom simulacijom.

Tablica 7. Molni sastav dimnih plinova na ulasku u lamelni umetak za naknadno izgaranje

Parametar	Vrijednost
O ₂	7,35 %
CO ₂	11,19 %
H ₂ O	10,77 %
CO	650 ppm
Temperatura	479,5 °C

4. REZULTATI I ANALIZA

4.1 Fizikalno-kemijska analiza korištenih peleta

Varijacija fizikalnih i kemijskih svojstava među korištenim peletima je velika (tablica 8). Sadržaj vlage varira od 8,4% do 9,5%. Utvrđeno je da su mehanička izdržljivost i nasipna gustoća nekih korištenih peleta iz poljoprivredne biomase (PPL, PUR) ispod zahtjeva iz [53]. Najniže vrijednosti navedenih parametara ustanovljene su za PUR. To se pokazalo da uzrokuje velike probleme u transportu peleta (od spremnika do plamenika) te ponekad zapunjavanje plamenika. Nadalje to dovodi do problema u regulaciji rada samog plamenika, pogotovo u slučaju kad se regulacija vrši preko fotosenzora instaliranog u samom plameniku. Najveći udio pepela ima PP (8,4%), a najniži PD1 (0,3%). Utvrđeni sadržaj Cl kod PPL te sadržaj S i Cl kod PUR iznad su graničnih vrijednosti iz [53] za pelete iz slame žitarica. Sadržaj S i Cl zadovoljava zahtjeve klase B nedrvnih peleta iz [53]. Svi ovi podaci jasno pokazuju na neadekvatnu kvalitetu većine peleta iz poljoprivredne biomase korištenih u ovom istraživanju te ukazuju na potrebu za obaveznom certifikacijom peleta na tržištu.

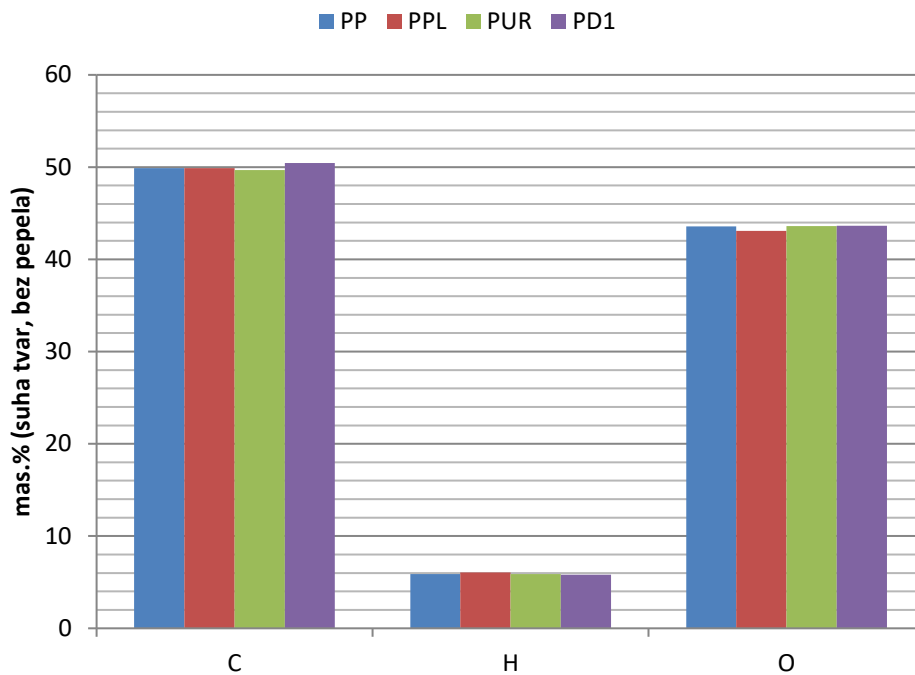
Tablica 8. Fizikalna i kemijska svojstva korištenih peleta [89]

	Slama pšenice (PP)	Slama pšenice i ljuska lješnjaka (PPL)	Slama uljana repice (PUR)	Granične vrijednosti [53]	Drvni pelet (PD1)	Granične vrijednosti [52] (A1/A2/B)
Sadržaj vlage (mas. %)	9.1	8.4	9.3	10/12/15	8.5	10
Nasipna gustoća (kg/m ³)	600	550	520	600	650	600
Mehanička izdržljivost (mas. %)	97.6	89.4	77.5	97.5	99.4	97.5/97.5/96.5
Sadržaj pepela (mas. %)	7.6	6.8	4.4	6.0/10.0	0.3	0.7/1.2/2.0
Donja ogrjevnost vrijednost (MJ/kg)	15.2	15.6	16.0	-	17.24	16.5
C (mas. %)	41.6	42.5	43.0	-	45.8	-
H (mas. %)	4.9	5.1	5.1	-	5.3	-

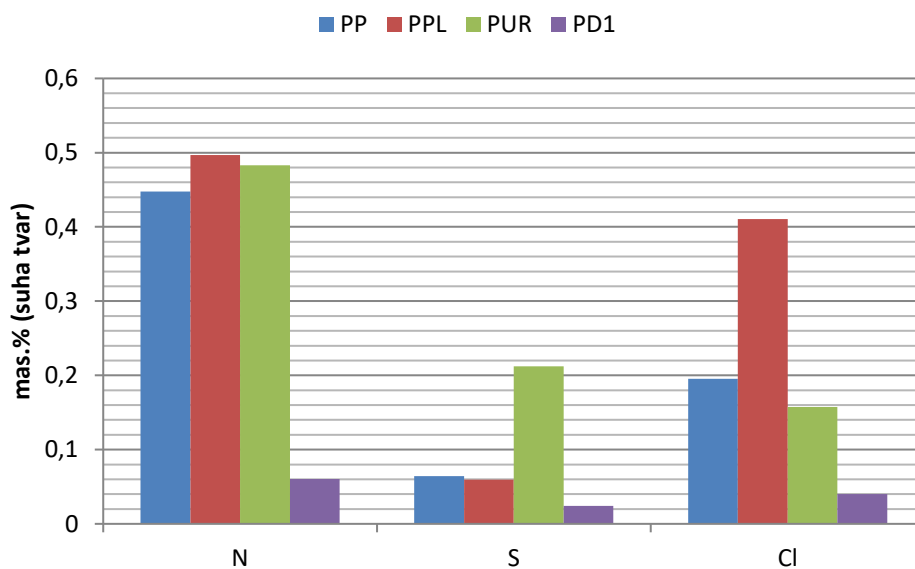
Rezultati i analiza

O (mas. %)	36.2	36.4	37.5	-	40.0	-
N (mas. %)	0.37	0.42	0.42	0.7/1.5/2.0	0.05	0.3/0.5/1.0
S (mas. %, suha tvar)	0.059	0.055	0.202	0.1/0.2/0.3	0.024	0.04/0.05/0.05
Cl (mas. %, suha tvar)	0.179	0.380	0.150	0.1/0.3	0.004	0.02/0.02/0.03
Si (mg/kg, suha tvar)	32700	23450	2310	-	390	-
P (mg/kg, suha tvar)	489	874	2000	-	615	-
K (mg/kg, suha tvar)	10196	18896	10196	-	8626	-
Ca (mg/kg, suha tvar)	5274	6724	11764	-	11664	-
Mg (mg/kg, suha tvar)	1610	1240	1440	-	2170	-

Sadržaj C, H i O sveden na suhu tvar bez pepela je praktično isti za sve korištene vrste peleta (slika 29). U pravilu, peleti iz poljoprivredne biomase imaju veći sadržaj Cl, N i S (slika 30), kao i sadržaj ostalih anorganskih elemenata (odgovorni su za emisije čestica i aerosola), u usporedbi s drvnim peletima. Otprilike osam puta je veći sadržaj S u PUR u odnosu na DP1. To znači da se prilikom izgaranja PUR očekuju više-manje istog iznosa veće emisije SO_x u usporedbi s DP1. Stoga prilikom konstruiranja ložišta za takvu namjenu treba u obzir uzeti povećani rizik od korozije. Povećani sadržaj Cl, P i K može rezultirati povećanim emisijama klorida, fosfata i drugih kemijskih spojeva [44].



Slika 29. Usporedba sadržaja C, H, O (suha tvar, bez pepela) [89]



Slika 30. Usporedba sadržaja N, S, Cl (suha tvar) [89]

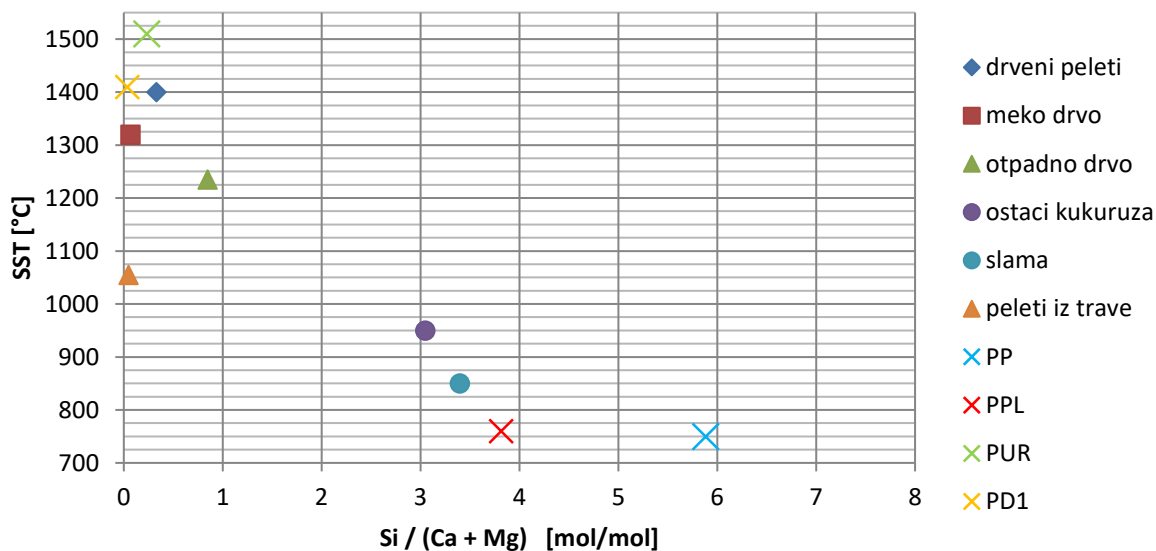
4.2 Temperature taljenja pepela korištenih peleta

Veći sadržaj Si, P, K i manji sadržaj Ca i Mg uzrokuje niže temperature skupljanja pepela (tablica 9, Slika 31 i 32). Vidljivo je da se molarni udio $(Si+P+K)/(Ca+Mg)$ pokazao boljim indikatorom nego $Si/(Ca+Mg)$ udio u predviđanju temperaturnog ponašanja pepela. Manja odstupanja od linearne korelacije između molarnog $(Si+P+K)/(Ca+Mg)$ udjela i temperature skupljanja pepela (SST) pokazala se samo u slučaju pepela PUR (odstupanje je usporedivo s odstupanjem travnatih peleta iz [44]).

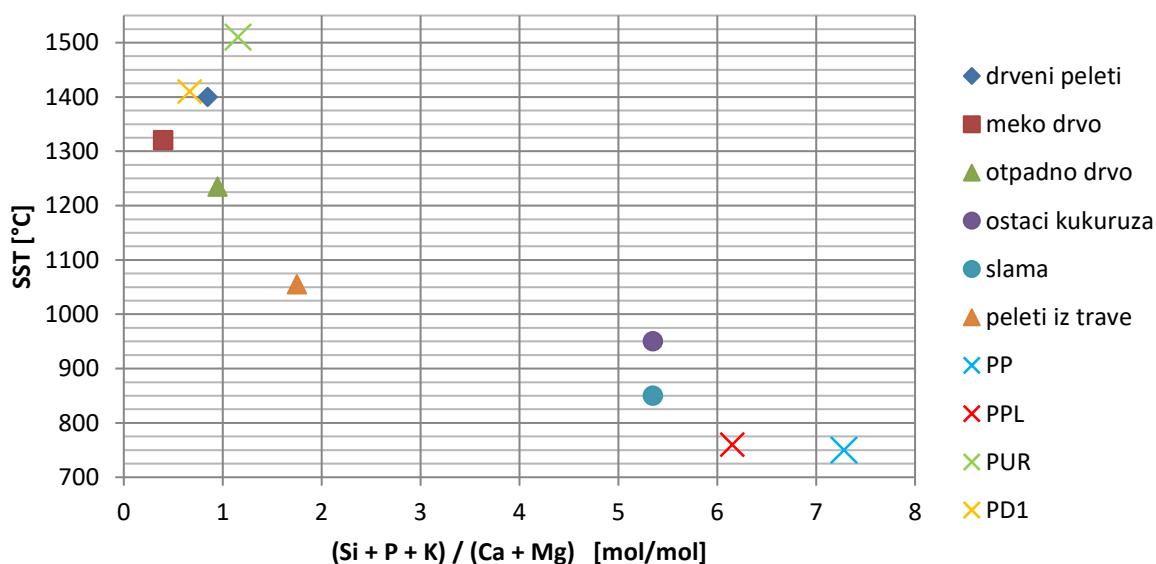
Tablica 9. Fizikalna i kemijska svojstva pepela korištenih peleta [89]

	Slama pšenice (PP)	Slama pšenice i ljuska lješnjaka (PPL)	Slama uljana repice (PUR)	Drvni pelet (PD)
Si (mg/kg, suha tvar)	32.700	23.450	2.310	390
P (mg/kg, suha tvar)	489	874	2.000	615
K (mg/kg, suha tvar)	10.196	18.896	10.196	8.626
Ca (mg/kg, suha tvar)	5.274	67.24	11.764	11.664
Mg (mg/kg, suha tvar)	1.610	1.240	1.440	2.170
SST (°C)	750	760	>1.510	1.410
DT (°C)	1.020	820	>1.510	1.420
HT (°C)	1.400	1.240	>1.510	1.510
FT (°C)	1.460	1.250	>1.510	>1.510

SST = Temperatura skupljanja pepela
 DT = Temperatura deformacije pepela
 HT = Temperatura hemisfere pepela
 FT = Temperatura tečenja pepela



Slika 31. Odnos Si/(Ca+Mg) i SST [89]

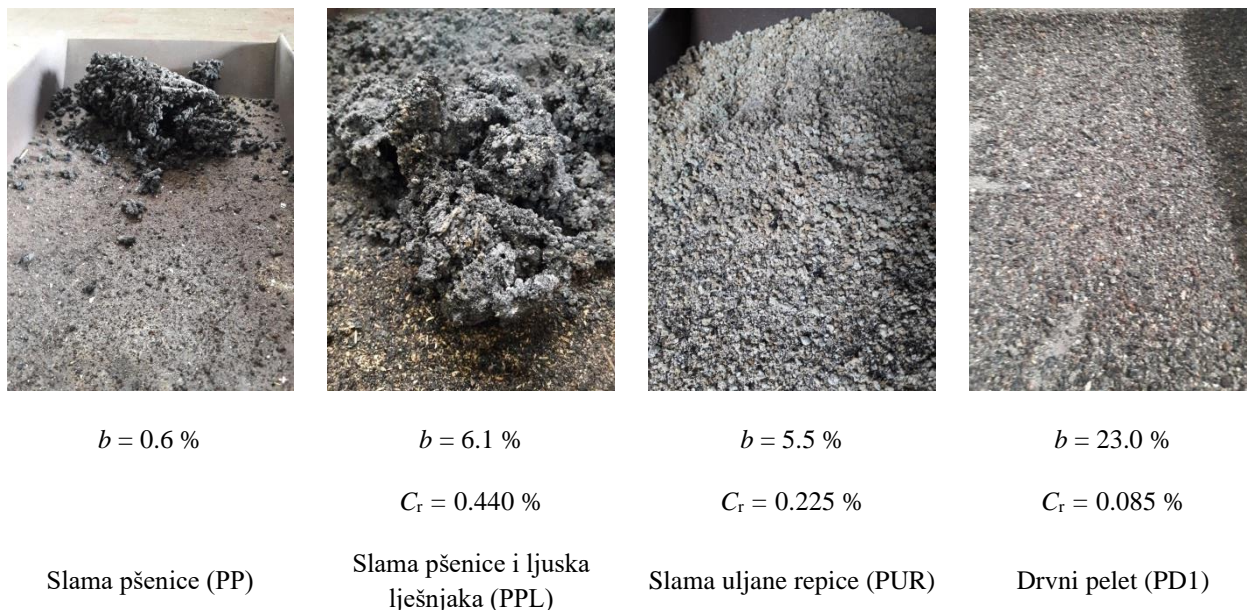


Slika 32. Odnos (Si+P+K)/(Ca+Mg) i SST [89]

4.3 Fizikalno-kemijska analiza ostatka nakon izgaranja

Slika 33 pokazuje da se aglomeracija ostatka nakon izgaranja događa u slučaju PP i PPL, kao posljedica niže temperature taljenja pepela. Kako je taljenje pepela složen proces koji se odvija u širem intervalu temperatura [90] te može uključivati sinteriranje, skupljanje i bubrenje, nije moguće jednostavno definirati točnu temperaturu početka taljenja. Tako se za početnu temperaturu taljenja može usvojiti temperaturni interval definiran sa SST i DT (Prilog B). Aglomeracija ostatka uključuje više faza što obuhvaća taljenje pepela, koji kasnije (nakon

hlađenja) predstavlja vezno sredstvo kojim je međusobno povezana porozna struktura ostatka nakon izgaranja. Najveći sadržaj neizgorenog ugljika b u ostatku ustanovljen je u slučaju PD1 ($b=23\%$, slika 33). To se može pripisati nižem udjelu ukupnog pepela u gorivu u usporedbi s peletima iz poljoprivredne biomase. Upravo zbog toga, kao bolji parametar za procjenjivanje neizgorenog ugljika je C_r (udio neizgorenog ugljika sveden na masu korištenog goriva), koji pokazuje da manji sadržaj pepela za sobom povlači ukupno manju količinu neizgorenog ugljika.



Slika 33. Analiza ostatka nakon izgaranja [89]

Analiza ostatka od izgaranja je prikazana u tablici 10. U slučaju ostatka od PPL dominantan je SiO_2 , dok u slučaju ostatka od PUR i PD1 je CaO (što je sukladno elementarnom sadržaju goriva, tablice 19). U pravilu, ostatak od izgaranja korištenih goriva može se koristiti kao gnojivo, ali pažnja se mora posvetiti pH vrijednosti ostatka. U usporedbi s pepelom od PD1, sadržaj CaO je manji, dok sadržaj P_2O_5 , K_2O , SiO_2 je veći.

Tablica 10. Kemijska analiza pepela nakon izgaranja [89]

	Slama pšenice i ljuska lješnjaka (PPL)	Slama uljane repice (PUR)	Drvni pelet (PD1)
P ₂ O ₅ (mas. %)	3,43	11,71	2,24
Na ₂ O (mas. %)	0,38	0,50	0,99
K ₂ O (mas. %)	20,89	21,24	8,49
CaO (mas. %)	13,91	47,62	64,22
MgO (mas. %)	2,62	6,59	8,86
Al ₂ O ₃ (mas. %)	1,00	0,88	0,60
TiO ₂ (mas. %)	2,39	0,19	0,47
Fe ₂ O ₃ (mas. %)	0,43	0,54	2,55
SiO ₂ (mas. %)	54,15	5,51	3,64
MnO (mas. %)	0,11	0,24	7,12
SO ₃ (mas. %)	0,69	4,97	0,82

4.4 Usporedna analiza toplinske učinkovitosti i emisija (CO i NO_x) dobivenih izgaranjem peleta

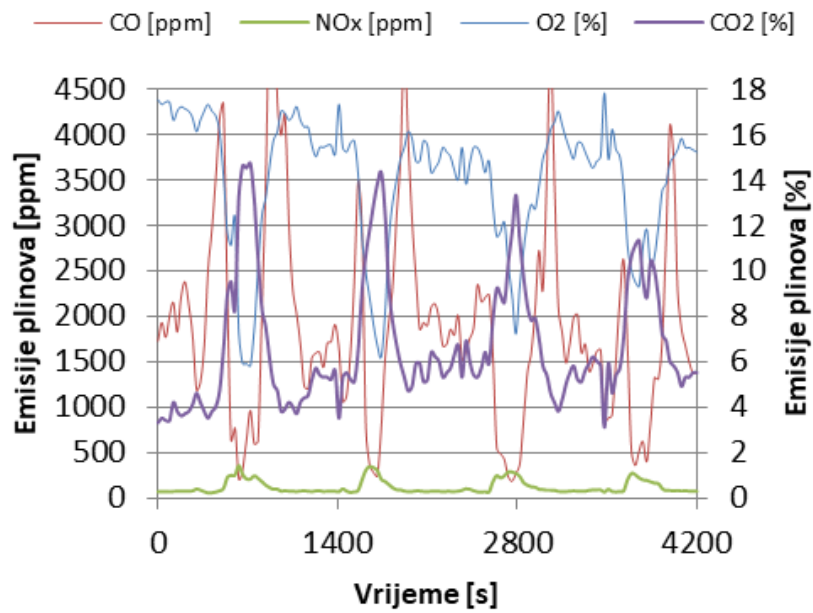
Prva (preliminarna) mjerenja toplinske učinkovitosti i emisija polutanata provedena su s ciljem dobivanja boljeg uvida u problematiku izgaranja peleta iz poljoprivredne biomase. Ispitivanja su provedena s različitim postavkama regulacije plamenika. Postavke su postavljene tako da se postignu optimalni uvjeti izgaranja (niska razina CO uz prihvatljivu razinu toplinskog učina, točka B na slici 10) za svaki korišteni pelet. Ispitivanja u slučaju PP nisu se mogla provesti zbog male poroznosti i velikog volumena mase koje izgara, uzrokovane aglomeracijom i sljepljivanjem pepela s gorivim elementima (slika 33), što je uzrokovalo probleme u regulaciji plamenika (detekcija plamena na fotosenzoru).

Svako ispitivanje sastojalo se od tri faze:

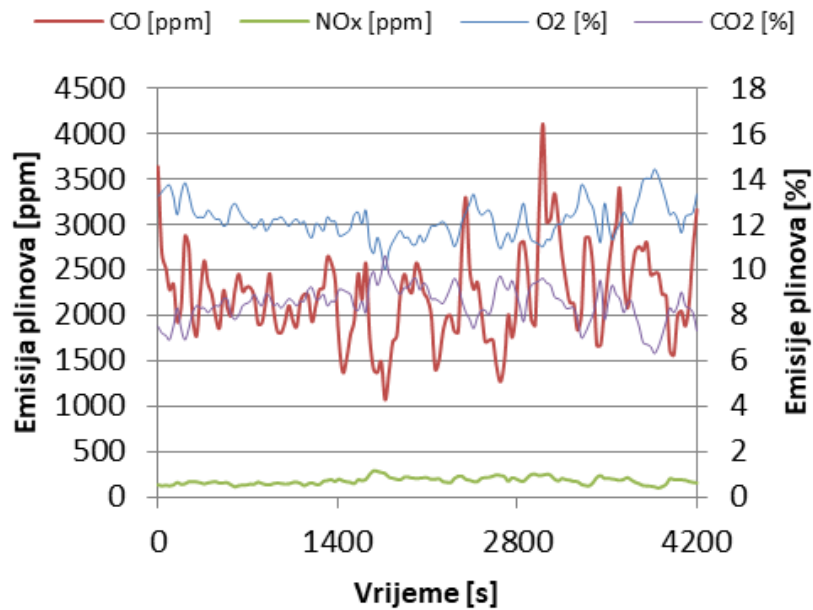
- Paljenja
- Pred-ispitni period (postizanje stacionarnog stanja)
- Ispitni period

Slike 34-36 prikazuju vremenske emisije plinova tijekom ispitnog perioda. Dobivene prosječne vrijednosti i one svedene na referentnu razinu O₂ u dimnim plinovima (od 10% O₂ u suhim dimnim plinovima) dane su u tablici 11 i na slici 37. Fluktuacije emisija uglavnom su posljedica intermitentnog režima izgaranja koji je pak posljedica ON/OFF ciklusa rada puža za dobavu

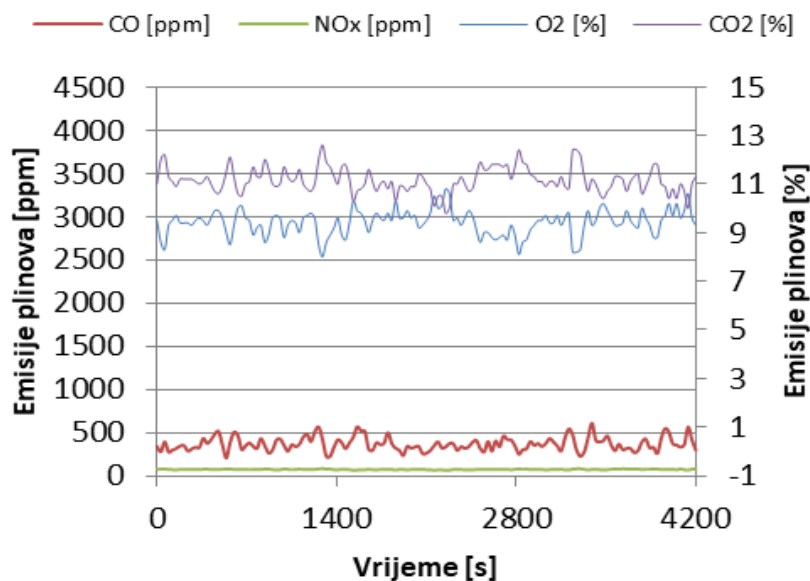
peleta i rotacijskog čišćenja rešetke plamenika do kojeg dolazi u vremenski definiranim intervalima.



Slika 34. Emisije plinova generiranih izgaranjem PPL [89]



Slika 35. Emisije plinova generiranih izgaranjem PUR [89]

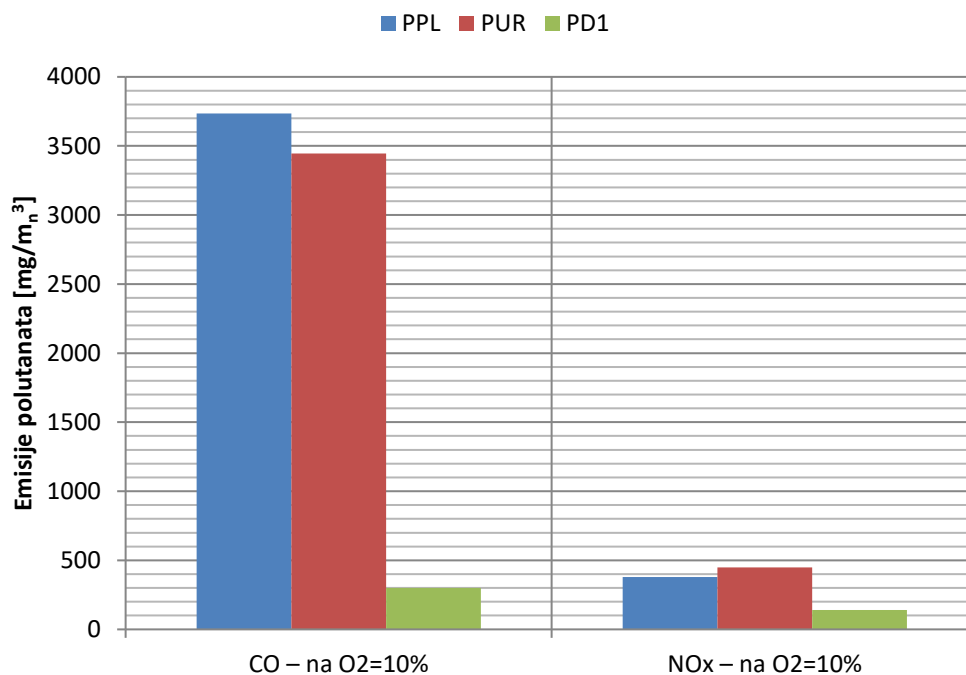


Slika 36. Emisije plinova generiranih izgaranjem PD1 [89]

Tablica 11. Prosječne vrijednosti emisija [89]

	Slama pšenice i ljuska lješnjaka (PPL)	Slama uljane repice (PUR)	Drvni pelet (PD1)	Granične vrijednosti [7]
Temperatura zraka za izgaranje (°C)	25.9	21.6	24.8	-
Izlazna temperatura dimnih plinova (°C)	136.0	163.4	181.9	-
O ₂ (%)	14.0	12.2	7.4	-
CO ₂ (%)	6.7	8.5	13.1	-
λ (-)	3.5	2.4	1.6	-
CO (ppm)	1.901	2.215	297	-
				3.000 (Klasa 3)
CO – na O ₂ =10% (mg/Nm ³)	3.736	3.446	301	1.000 (Klasa 4)
				500 (Klasa 5)
NO _x (ppm)	117	176	84	-
NO _x – na O ₂ =10% (mg/Nm ³)	378	449	140	-

$E_{NO_{x,s}}$ = Sezonske NO_x emisija (odnosi se samo na drvni pelet)

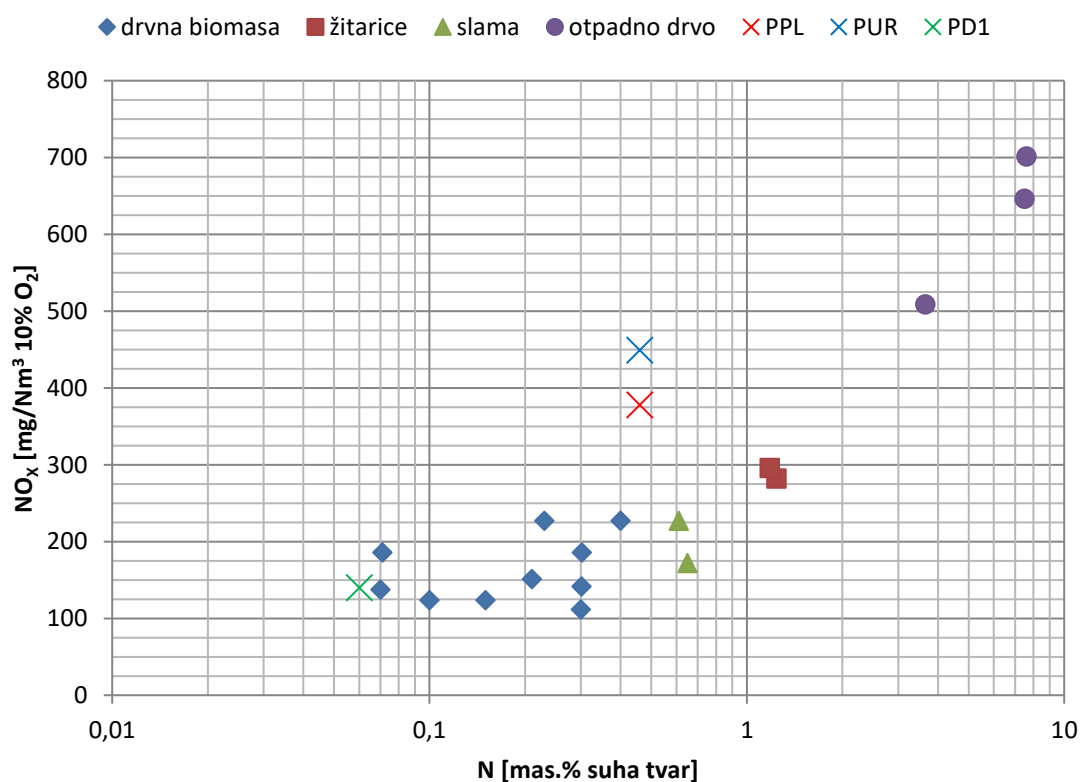


Slika 37. Usporedba emisija polutanata [89]

Povećane emisije CO mogu se primijetiti u slučaju izgaranja peleta iz poljoprivredne biomase, što ukazuje na nižu toplinsku učinkovitost izgaranja takve vrste goriva. Povećane CO emisije mogu biti rezultat niže temperature izgaranja (niža gustoća mase i ogrjevne vrijednosti goriva što rezultira nižom gustoćom energije te visokog pretička zraka) ili prekratkog vremena zadržavanja nastalih plinova na visokim temperaturama (zbog velike brzine protoka uzrokovane visokom vrijednošću pretička zraka, $\lambda = 3.5$). λ je prilikom izgaranja održavan toliko visok kako bi se ubrzao proces izgaranja i izbjeglo izbacivanje neizgorenog goriva van plamenika, zbog vrlo kratkog vremena između ciklusa čišćenja rešetke plamenika (koje je postavljeno puno kraće od standardnih tvorničkih postavki). Na takav su način problemi vezani uz regulaciju plamenika povezanih s aglomeracijom i sljepljivanjem ostataka svedeni na minimalnu razinu.

PPL emitira najviše CO (3.736 mg/Nm^3 - na 10% O₂), što je 1,08 i 12,41 puta veće od emisija dobivenih s PUR, odnosno PD1. Veće NO_x emisije također su otkrivene u slučaju peleta iz poljoprivredne biomase, cca. 3 puta više nego u slučaju PD1. Kao što je prije spomenuto, NO_x emisije su prvenstveno posljedica dušika iz goriva i mogu biti izravno povezane s tim sadržajem [44]. Slika 38 prikazuje emisije NO_x, ovisno o sadržaju N u gorivu. NO_x emisije dobivene izgaranjem peleta iz poljoprivredne biomase su cca. 1,8 puta veće od onih dobivenih u [44],

gdje se ispitivanje vršilo korištenjem modernog postrojenja koje koristi izgaranje na rešetci s tehnički optimalnom tehnologijom stupnjevanog dovođenja zraka za izgaranje. Tehnički optimalnu/teorijsku tehnologiju stupnjevanog dovođenja zraka nije zbog vrlo oskudnog volumena moguće primijeniti u slučaju plamenika za kruta goriva. Vrlo visoke NO_x emisije mogu se, osim višem udjelu dušika u gorivu, pripisati vrlo visokom sadržaju pepela u gorivu, što uz neadekvatnu konstrukciju kotla (ne može prihvatiti tako veliku količinu ostatka) prouzrokuje da nastali plamen struji kroz nakupljeni ostatak, što rezultira dodatnim NO_x emisijama kao posljedica katalitičkih učinaka na površini ostatka aglomeriranog na rešetci kotla. Nadalje, dio tih „dodatnih“ NO_x emisija može se pripisati visokim vrijednostima λ . Kao što je objavljeno u [61], povećanje λ dovodi do povećanja NO_x emisije za goriva bogata dušikom ($N > 1,0\%$) i gotovo ne utječe na povećanje NO_x emisije za dušikom siromašna goriva (npr. drvena biomasa).



Slika 38. Usporedba NO_x emisije u ovisnosti o sadržaju dušika u gorivu [89]

Najveća toplinska učinkovitost ostvarena je za PD1 (tablica 12). Rezultati dobiveni izgaranjem peleta iz poljoprivredne biomase ukazuju na pad toplinske učinkovitosti od cca. 5% u odnosu na učinkovitost ostvarenu PD1. Gubici osjetne topline dimnim plinovima veći su u slučaju peleta iz poljoprivredne biomase iako je izlazna temperatura dimnih plinova niža nego u slučaju PD1. Razlog tome je visoka razina pretička zraka ostvarenom tijekom ispitivanja. Kemijski gubici topline otprilike su 12 puta veći, dok toplinski gubici zbog neizgorenog goriva su 3,3-5,9 puta veći u slučaju peleta iz poljoprivredne biomase u odnosu na PD1.

Tablica 12. Ostvarena toplinska učinkovitost [89]

	Slama pšenice i ljuska lješnjaka (PPL)	Slama uljane repice (PUR)	Drvni pelet (PD1)	Grafične vrijednosti [7]
Gubici osjetne topline dimnim plinovima (%)	11,92	12,32	9,58	-
Kemijski toplinski gubici (%)	1,77	1,60	0,14	-
Toplinski gubici zbog neizgorenog goriva (%)	0,95	0,53	0,16	-
Toplinska učinkovitost (%) (bez toplinskih gubitaka kroz ovojnicu kotla)	85,36	85,55	90,12	75,5 (Klasa 3) 82,8 (Klasa 4) 88,4 (Klasa 5)

Toplinska učinkovitost određena prema detaljnom proračunu opisanom u poglavlju 3.3.3 (tablica 13) je u prosjeku 0,5% veća u odnosu na proračun opisan u europskim normama (tablica 12). Razlika leži u tome što pristup iz CEN standarda uzima u obzir manje precizan sastav dimnih plinova u odnosu na postupak opisan u poglavlju 3.3.3.

Tablica 13. Ostvarena toplinska učinkovitost (prema postupku iz 3.3.3)

	Slama uljane repice (PUR)	Drvni pelet (PD1)	Granične vrijednosti [7]
Gubici osjetne topline dimnim plinovima (%)	11,86	9,12	-
Kemijski toplinski gubici (%)	1,59	0,14	-
Toplinski gubici zbog neizgorenog goriva (%)	0,48	0,17	-
Toplinska učinkovitost (%)			75,5 (Klasa 3)
(bez toplinskih gubitaka kroz ovojnicu kotla)	86,07	90,58	82,8 (Klasa 4) 88,4 (Klasa 5)

4.5 Detaljna analiza toplinskih/kemijskih gubitaka i emisija polutanata (CO i NO_x)

4.5.1 Drvni peleti (PD2)

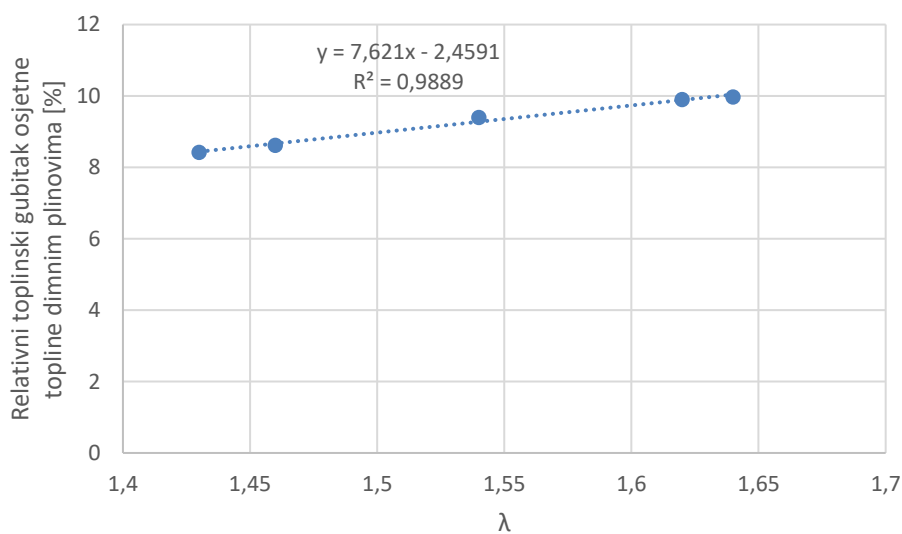
Nakon početnih ispitivanja, rađena su detaljna ispitivanja toplinske učinkovitosti i emisija polutanata (CO i NO_x) ostvarenih izgaranjem PD2. Ciljevi ovog ispitivanja su sljedeći:

- Istražiti utjecaj pretička zraka (λ) na termo-kemijske procese unutar korištenog toplovodnog kotla prilikom izgaranja
- Dobiti podatke potrebne za kalibraciju i validaciju provedenog postupka numeričkog modeliranja izgaranja u toplovodnom kotlu

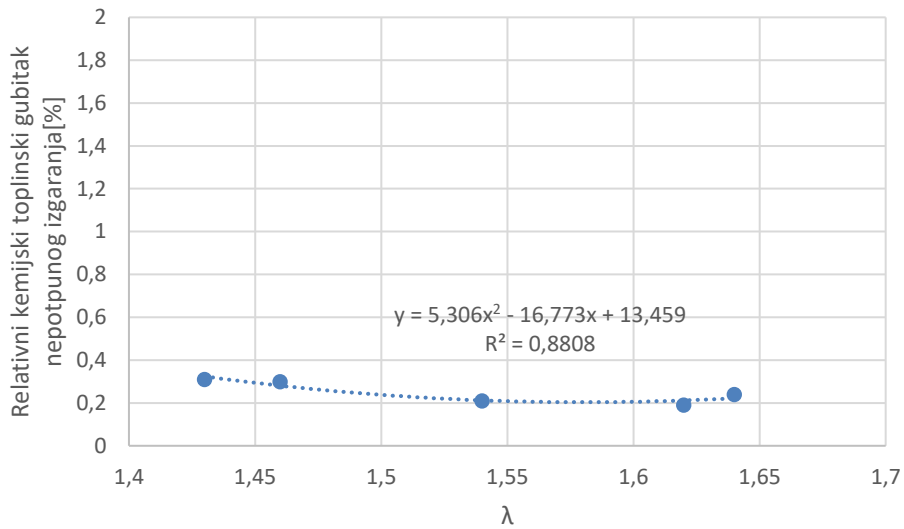
Korišteni drvni peleti PD2 različitog su proizvođača od onog korištenog u prethodnom djelu istraživanja. PD2 također su klase A1 (prema deklaraciji proizvođača), no izrađen je kao mješavina crnogorice i bukve, što je i razlog nekim odstupanjima u emisijama polutanata. Dobiveni rezultati prikazani su tablicom 14 i Slikama 39-46.

Tablica 14. Rezultati detaljnih ispitivanja PD2

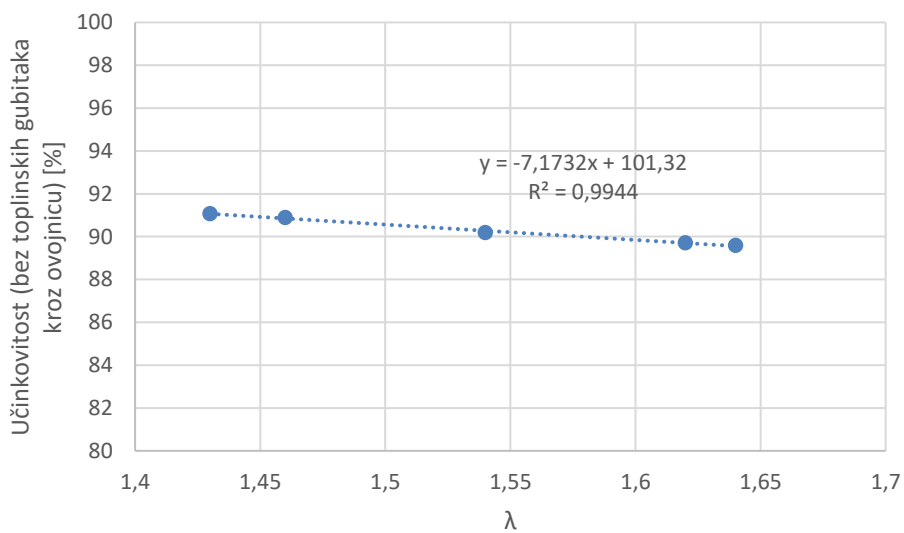
Točka ispitivanja		1.	2.	3.	4.	5.	Granične vrijednosti (Klasa 3/4/5) [7]
λ	-	1,46	1,54	1,64	1,62	1,43	-
Relativni toplinski gubitak osjetne topline	%	8,62	9,40	9,97	9,90	8,42	-
Relativni kemijski toplinski gubitak	%	0,30	0,21	0,24	0,19	0,31	-
Toplinska učinkovitost	%	90,89	90,19	89,59	89,71	91,07	75,5/82,8/88,4
Toplinski učin	kW	25,3	25,3	25,0	24,91	24,8	-
Temperatura u ložištu	°C	588,9	581,2	545,2	571,9	612,5	-
Temperatura u konvektivnom dijelu	°C	268,9	272,4	274,3	271,0	268,9	-
Temperatura dimnih plinova na izlazu	°C	174,8	181,7	183,9	184,8	176,6	-
CO	mg/Nm ³ na 10% O ₂	628	434	509	404	644	3.000/ <u>1.000</u> / <u>500</u>
NO _x	mg/Nm ³ na 10% O ₂	209	220	226	233	205	-



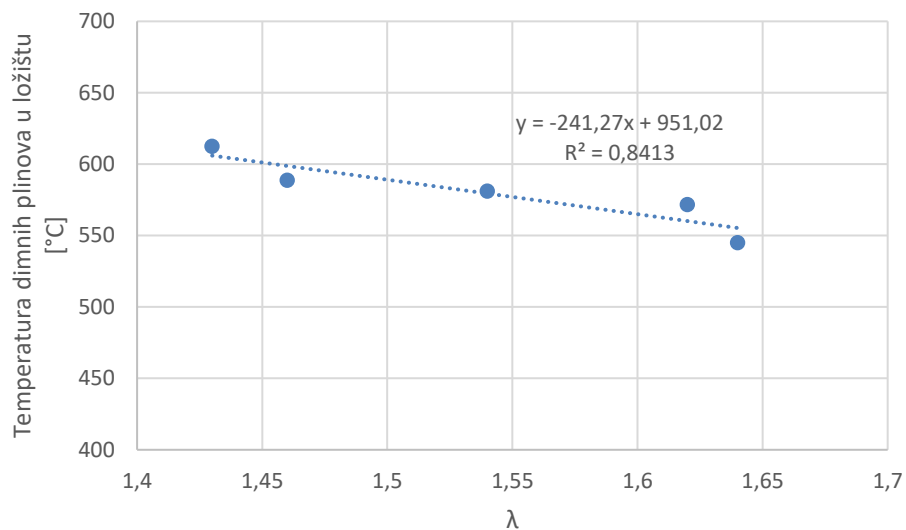
Slika 39. Relativni toplinski gubitak osjetne topline u ovisnosti o pretičku zraka



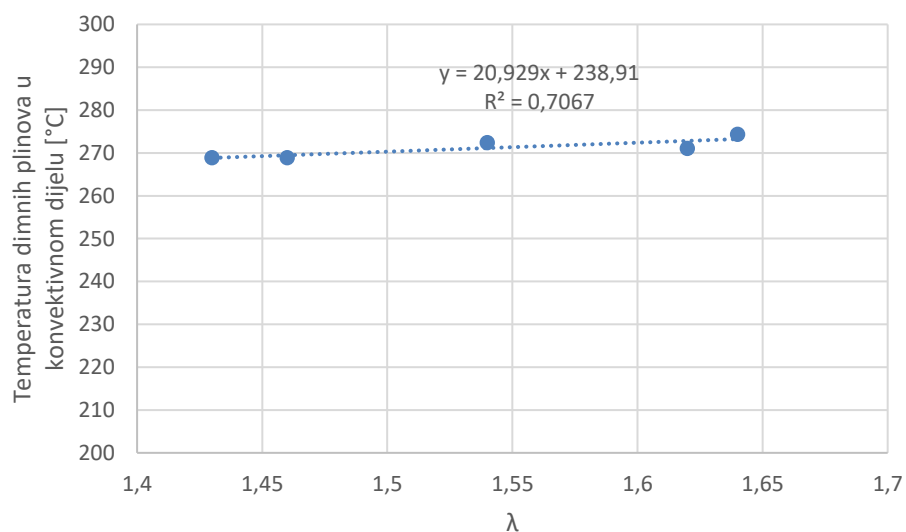
Slika 40. Relativni kemijski toplinski gubitak nepotpunog izgaranja u ovisnosti o pretičku zraka



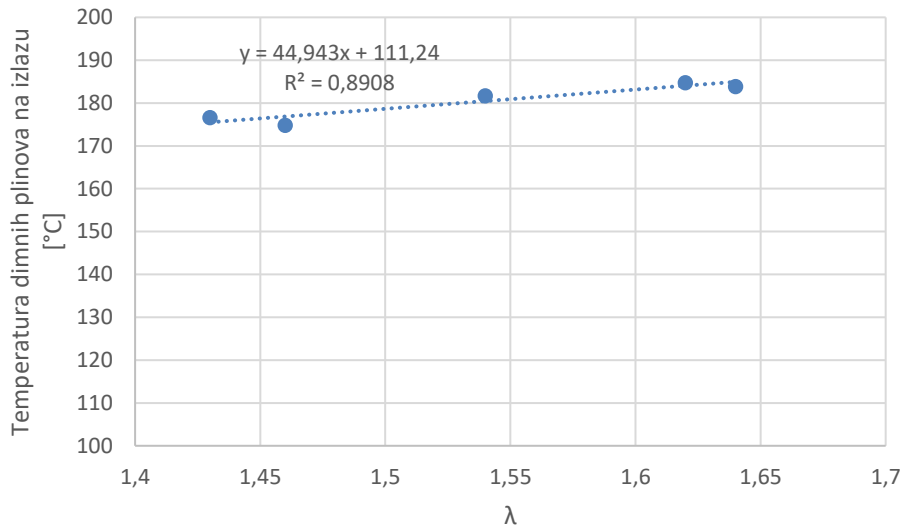
Slika 41. Ostvarena toplinska učinkovitost u ovisnosti o pretičku zraka



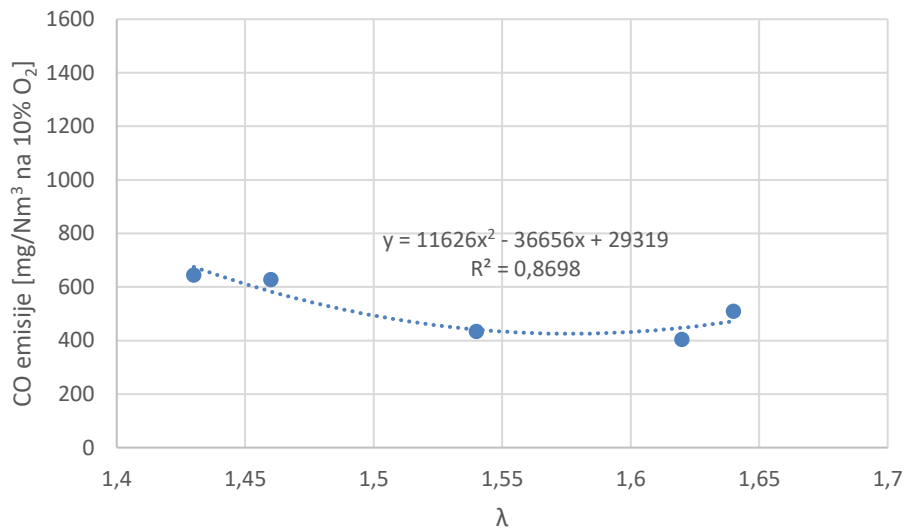
Slika 42. Temperature dimnih plinova u ložištu u ovisnosti o pretičku zraka



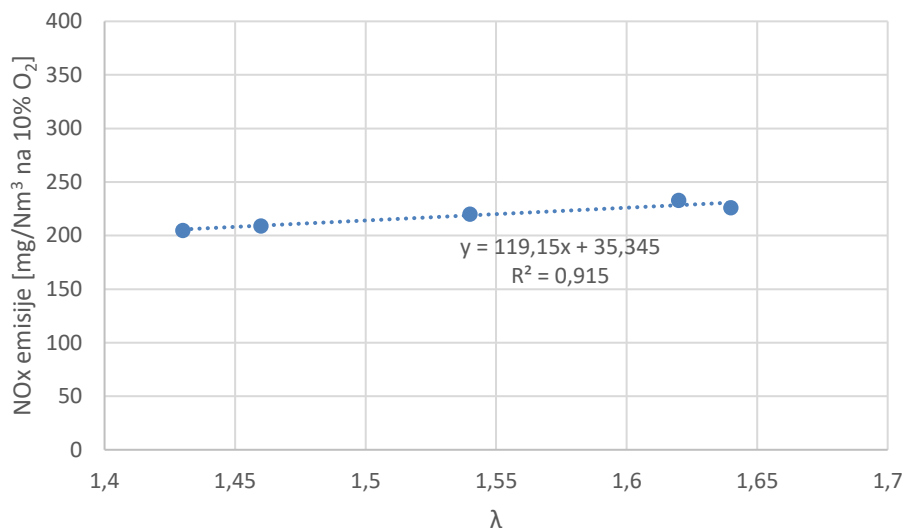
Slika 43. Temperature dimnih plinova u konvektivnom dijelu u ovisnosti o pretičku zraka



Slika 44. Temperature dimnih plinova na izlazu iz kotla u ovisnosti o pretičku zraka



Slika 45. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka

Slika 46. NO_x emisije u ovisnosti o pretičku zraka

Iz dijagrama na slikama 39-46 vidljivo je da povećanjem pretička zraka očekivano raste gubitak osjetne topline dimnim plinovima. Kemijski toplinski gubitak se u apsolutnom iznosu manje mijenja u ovisnosti o pretičku zraka, a najmanja vrijednost je povezana s najmanjim CO emisijama svedenim na referentne uvjete. Prema tome, jasno je da povećanjem pretička zraka pada toplinska učinkovitost (slika 41). Povećanjem pretička zraka pada temperatura dimnih plinova u ložištu, no raste ona na izlazu iz kotla (slika 42 i 44). Temperatura dimnih plinova u ložištu pada jer se većim protokom zraka iz ložišta odvodi više topline, dok ona na izlazu raste zbog činjenice da veći protok dimnih plinova uzrokuje njihovo sporije hlađenje. Emisije CO svedene na referentne vrijednosti ostvaruju minimum u području $1,54 \leq \lambda \leq 1,62$ (slika 45), dok su NO_x emisije svedene na referentne uvjete pokazuju porast s porastom pretička zraka (slika 46). U uskom području ($1,54 \leq \lambda \leq 1,62$), emisije CO ispod su granične vrijednosti za klasu 5, dok su u ostalom području iznad te granične vrijednosti i zadovoljavaju zahtjeve za klasu 4 prema [7].

4.5.2 Peleti iz slame uljane repice (PUR)

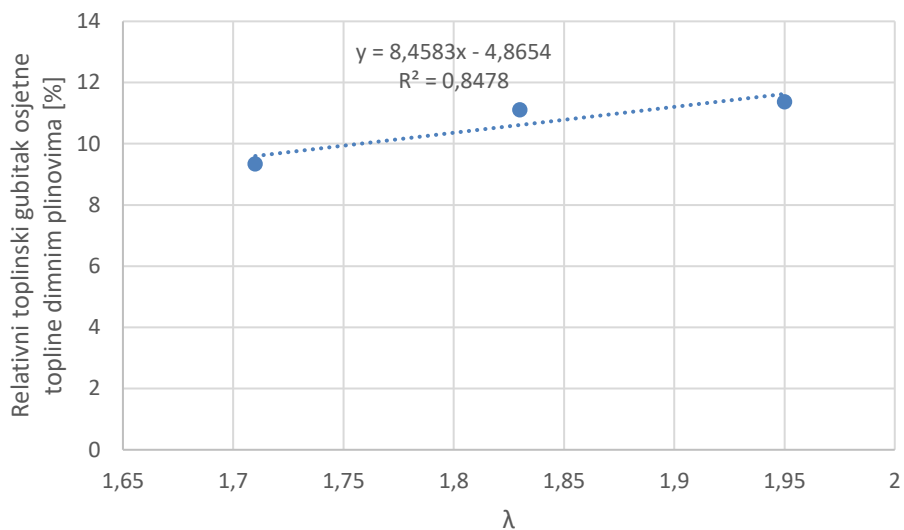
Iako neprikladnog kemijskog sastava prema [53] za pelete iz slame žitarica, temeljem ponašanja prilikom izgaranja, peleti slame uljane repice odabrani su kao najprikladnije (od korištenih peleta iz poljoprivredne biomase), od korištenih goriva, za izgaranje u ložištima kućanskih toplovodnih kotlova pri uobičajenim režimima rada. S odabranim gorivom provedena su ispitivanja toplinske učinkovitosti i emisija polutanata sa sljedećim ciljevima:

- Istražiti utjecaj pretička zraka (λ) na termo-kemijske procese unutar korištenog toplovodnog kotla prilikom izgaranja
- Usporediti dobivene podatke s onima dobivenim za izgaranje PD2

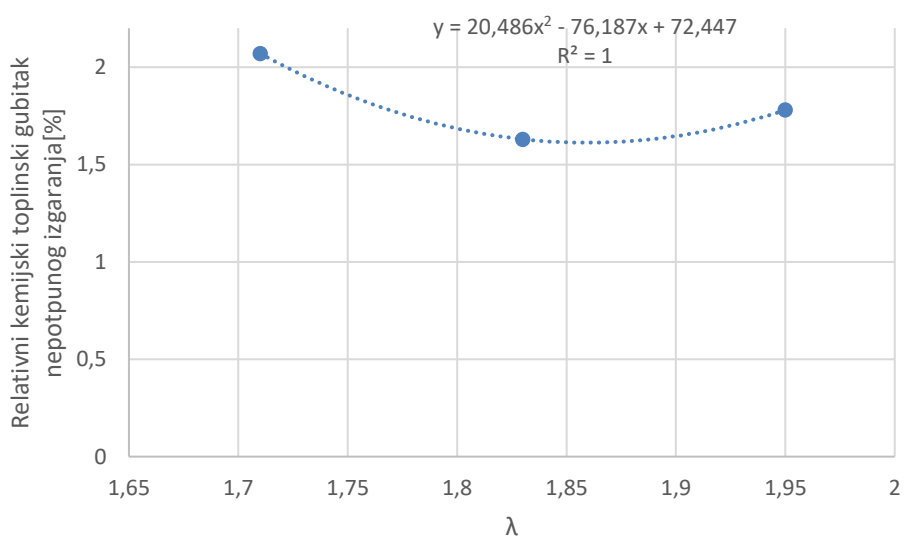
Dobiveni rezultati detaljnih ispitivanja prikazani su tablicom 15 i Slikama 47-54.

Tablica 15. Rezultati detaljnih ispitivanja peleta slame uljane repice

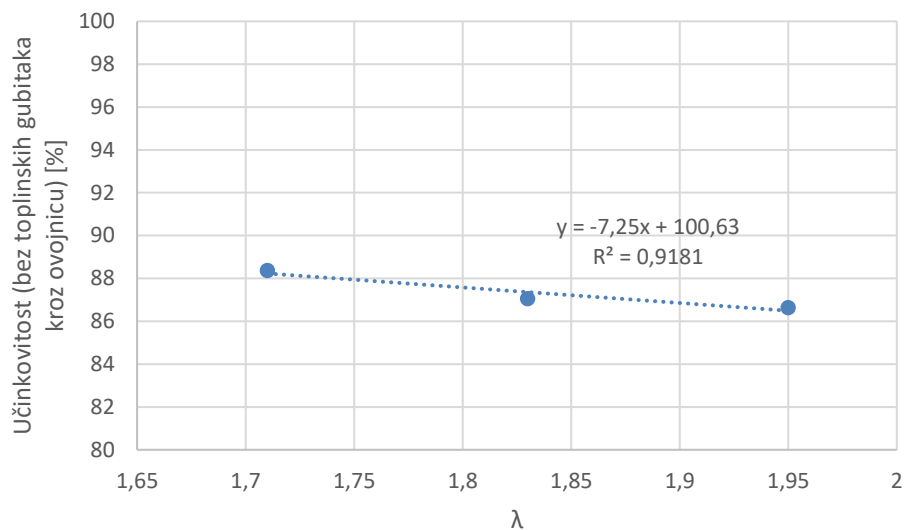
Točka ispitivanja		1.	2.	3.	Granične vrijednosti (Klasa 3/4/5) [7]
λ	-	1,71	1,83	1,95	-
Relativni toplinski gubitak osjetne topline	%	9,35	11,11	11,38	-
Relativni kemijski toplinski gubitak	%	2,07	1,63	1,78	-
Toplinska učinkovitost	%	88,38	87,06	86,64	75,5/82,8/88,4
Toplinski učin	kW	19,1	20,2	18,2	-
Temperatura u ložištu	°C	492,3	511,5	516,5	-
Temperatura u konvektivnom dijelu	°C	246,2	265,9	257,7	-
Temperatura dimnih plinova na izlazu	°C	166,6	183,1	179,7	-
CO	mg/Nm ³ na 10% O ₂	3.772	3.281	3.593	3.000/1.000/500
NO _x	mg/Nm ³ na 10% O ₂	369	421	395	-



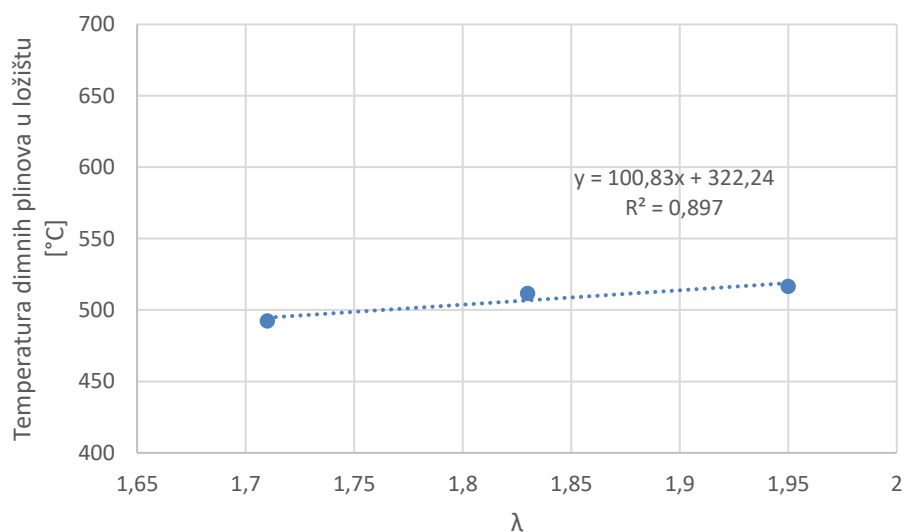
Slika 47. Relativni toplinski gubitak osjetne topline u ovisnosti o pretičku zraka



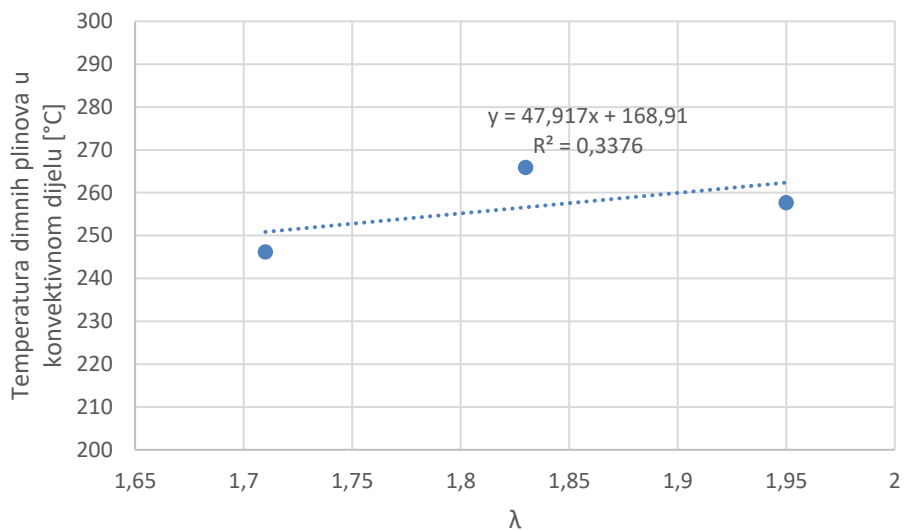
Slika 48. Relativni kemijski toplinski gubitak nepotpunog izgaranja u ovisnosti o pretičku zraka



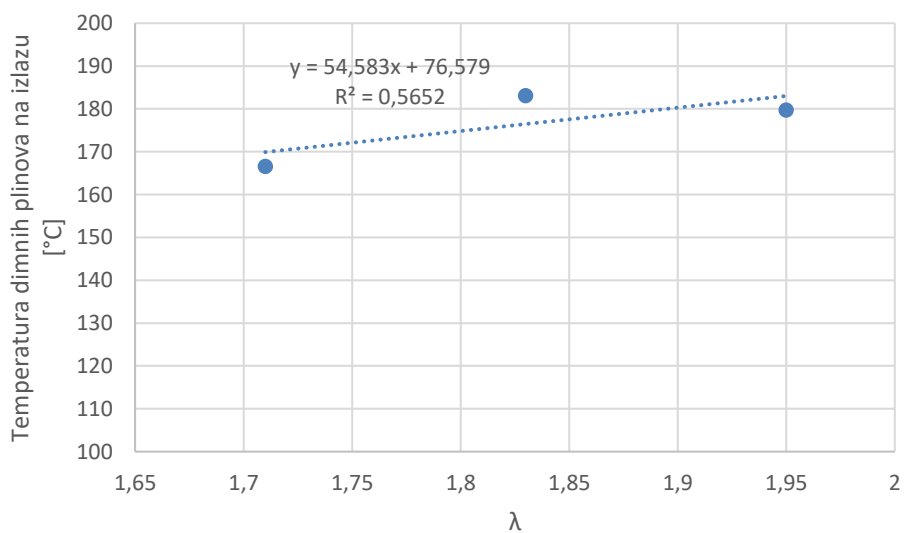
Slika 49. Ostvarena toplinska učinkovitost u ovisnosti o prečišćavanju zraka



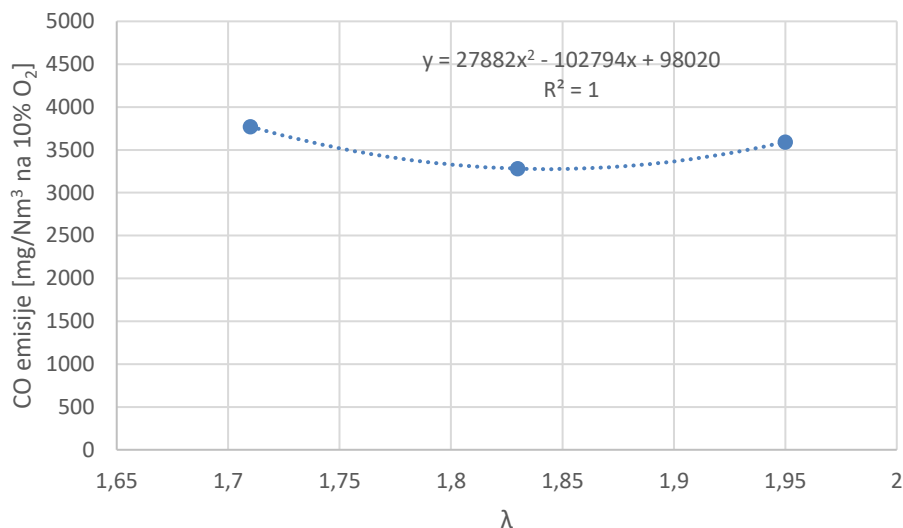
Slika 50. Temperature dimnih plinova u ložištu u ovisnosti o prečišćavanju zraka



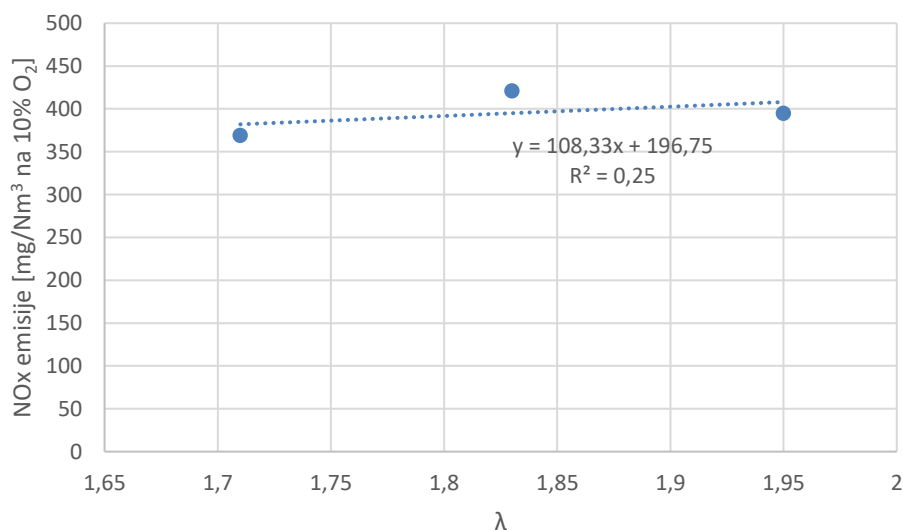
Slika 51. Temperature dimnih plinova u konvektivnom dijelu u ovisnosti o pretičku zraka



Slika 52. Temperature dimnih plinova na izlazu iz kotla u ovisnosti o pretičku zraka

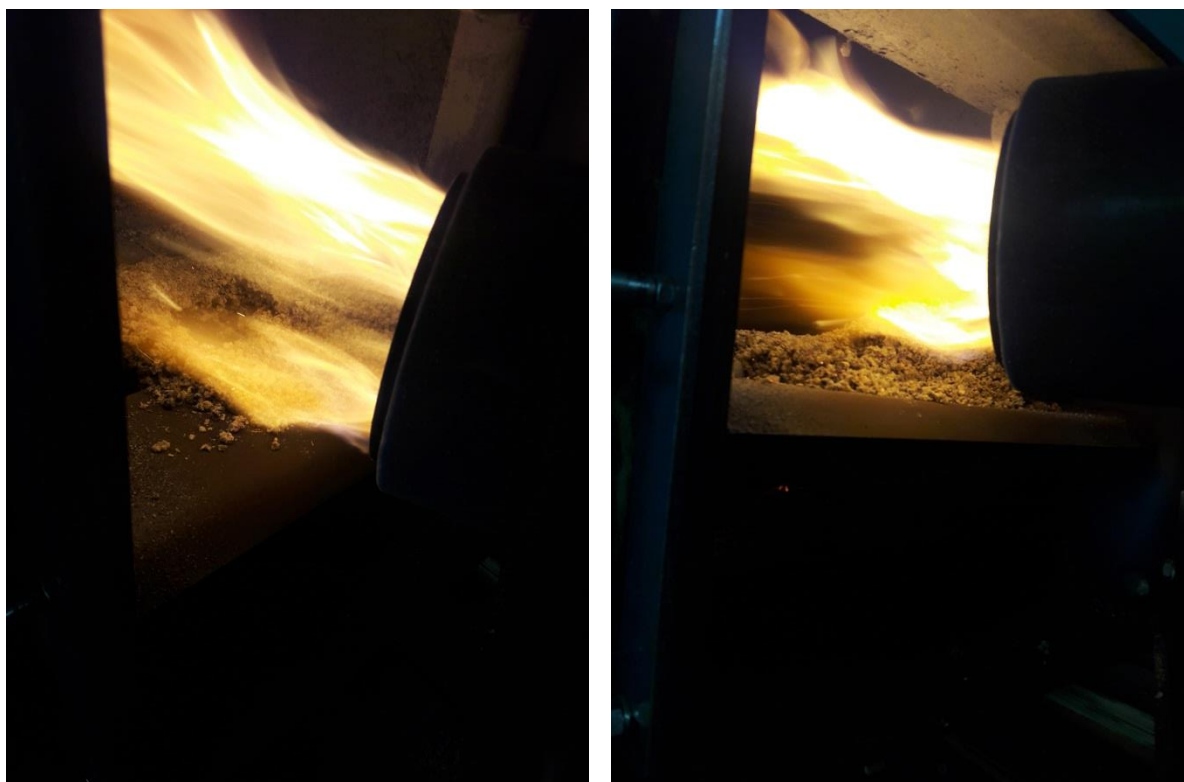


Slika 53. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka

Slika 54. NO_x emisije u ovisnosti o pretičku zraka

U usporedbi s rezultatima dobivenim kod preliminarnog ispitivanja PUR, ostvareno je izgaranje s manjim pretičkom zraka. Rasipanje izmjerenih temperatura dimnih plinova i rasipanje izračunatih toplinskih gubitaka posljedica su neujednačene i loše kvalitete proizvodnje korištenih peleta, što rezultira u različitim masenim protocima goriva koje izgara kroz sam tijekom jednog ispitivanja. Uz navedeno, rasipanje izmjerenih NO_x emisija posljedica je i katalitičkih reakcija na površini aglomeriranog ostatka kroz koji plamen prolazi prilikom izgaranja (kao posljedica neadekvatne konstrukcije rešetke kotla, slika 55). Emisije CO svedene na referentne vrijednosti ostvaruju minimum u području oko $\lambda=1,83$ (slika 53). Veće emisije CO dijelom su

posljedica nižih temperatura dimnih plinova ostvarenih u ložištu (tablica 15) u odnosu na iste ostvarene prilikom izgaranja drvnih peleta (tablica 14). Ostvarene emisije CO iznad su graničnih vrijednosti iz [7]. Zanimljivo je primijetiti da kako kod ovih ispitivanja porastom pretička zraka raste i temperatura dimnih plinova u ložištu, što je u suprotnosti s prethodno dobivenim zaključcima i možemo je smatrati greškom mjerenja. To se može pripisati poznatoj problematici mjerenja temperature plinova gdje su prisutni značajni izvori zračenja. U takvim slučajevima osjetnik mjernog uređaja ne mjeri stvarnu temperaturu plina, već neku između temperature plina i „temperature zračenja“ (fiktivna uniformna temperatura zamišljenog ograđenog prostora koja zračenjem izmjenjuje jednaki toplinski tok zračenjem kao i stvarni prostor). Promjenom pretička zraka mijenja se oblik i položaj vanjskog obrisa nastalog plamena te na taj način može utjecati na „temperature zračenja“ koju osjetnik mjeri.



Slika 55. Izgaranje i prolaz dimnih plinova preko sloja ostatka

Na temelju komparativne analize izgaranja PD2 i PUR može se zaključiti:

- Prilikom izgaranja PUR ostvarene su značajno veće emisije CO i NO_x
- Optimalno izgaranje postignuto je na različitim vrijednostima pretička zraka
- Prilikom izgaranja PUR postignute su niže temperature dimnih plinova
- S porastom pretička zraka može se primijetiti slično ponašanje u temperaturi dimnih plinova, ostvarenim emisijama i toplinskoj učinkovitosti za korištena goriva

4.6 Numeričke simulacije izgaranja

4.6.1 Numeričko-eksperimentalna simulacija procesa izgaranja u toplovodnom kotlu

U tablici 16 prikazani su rezultati sastava dimnih plinova na izlazu iz kotla, temperatura dimnih plinova na izlazu iz kotla i na ulazu u konvektivni dio te toplinski učin predan vodi dobiveni računalnom simulacijom. Osim dobivenih rezultata, dani su i isti svedeni na referentno stanje O_2 u suhim dimnim plinovima te oni dobiveni mjerenjem (za točku br. 2 detaljne analize emisija polutanata korištenjem PD2, poglavlje 4.5.1). U zagradama u stupcu *Mjerenja* prikazana su relativna odstupanja rezultata dobivenih numeričkom simulacijom u odnosu na one dobivene mjerenjem. Usporedba rezultata dobivenih numeričkom simulacijom i mjerenjima prikazana je i dijagramima na slici 56.

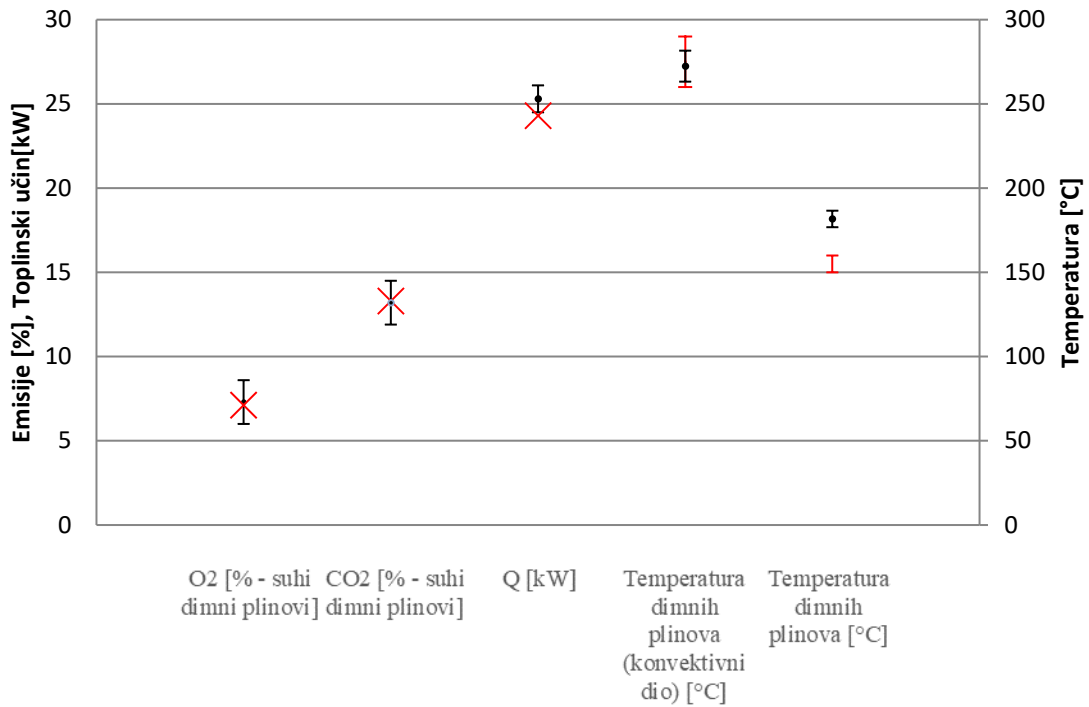
Tablica 16. Temperature i molni sastav dimnih plinova te toplinski učin dobiven numeričkom simulacijom (usporedba s mjerenjem)

Parametar	Numerička simulacija	Numerička simulacija		Mjerenja
		10% O ₂ u suhim dimnim plinovima	10% O ₂ u suhim dimnim plinovima	10% O ₂ u suhim dimnim plinovima
OGC	≈0	≈0	-	-
O ₂	6,28 %	7,1 %	7,32 % (3%)	
CO ₂	11,81 %	13,34 %	13,18 % (1,2%)	
H ₂ O	11,49 %	-	-	
CO	454 ppm	507 mg/Nm ³	434 mg/Nm ³ (16,8%)	
H ₂	≈0	≈0	-	
N ₂	70,37 %	79,5 %	-	
NO _x	96 ppm	176 mg/Nm ³	220 mg/Nm ³ (20 %)	
Temperatura na izlazu iz kotla	140,78 °C (150-160 °C)*	-	181,7 °C	
Temperatura na ulazu u treći prolaz	260-290 °C	-	272,4 °C	
Toplinski učin	24,294 kW	-	25,3 kW (4 %)	

* vrijednost na mjestu postavljanja mjernog uređaja

✗ simulacija (vrijednost) I simulacija (interval) I mjerjenje [$\mu \pm 2\sigma$]

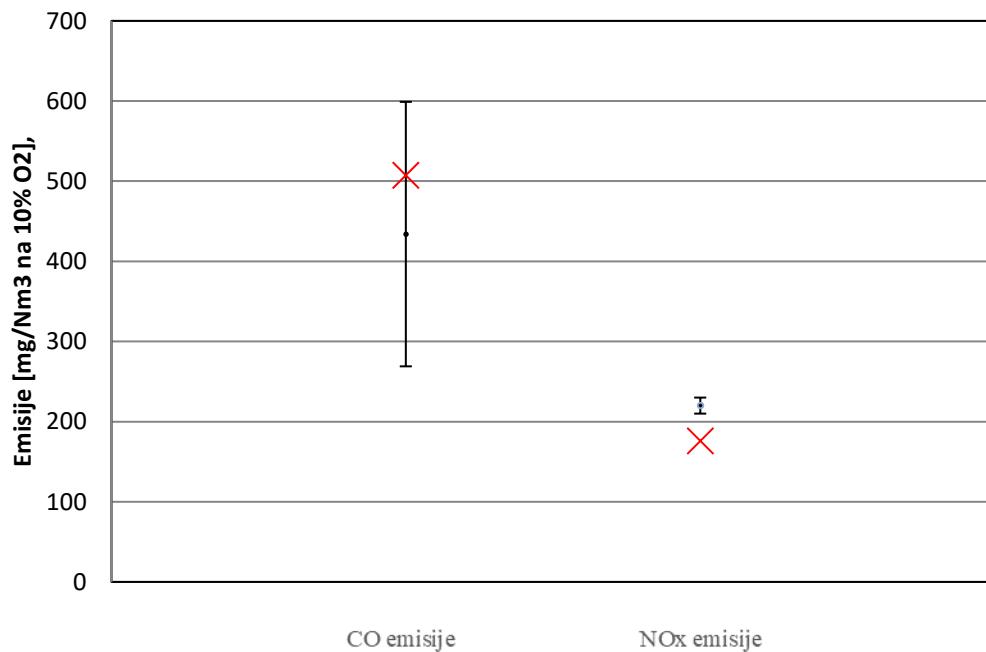
μ – srednja vrijednost σ – standardna devijacija



a) Usporedba rezultata numeričke simulacije i onih dobivenih mjerenjem

✗ simulacija (vrijednost) I mjerjenje [$\mu \pm \sigma$]

μ – srednja vrijednost σ – standardna devijacija



b) Usporedba emisija polutanata dobivenih numeričkom simulacijom i mjerenjem

Slika 56. Usporedba numeričke simulacije i mjerenja

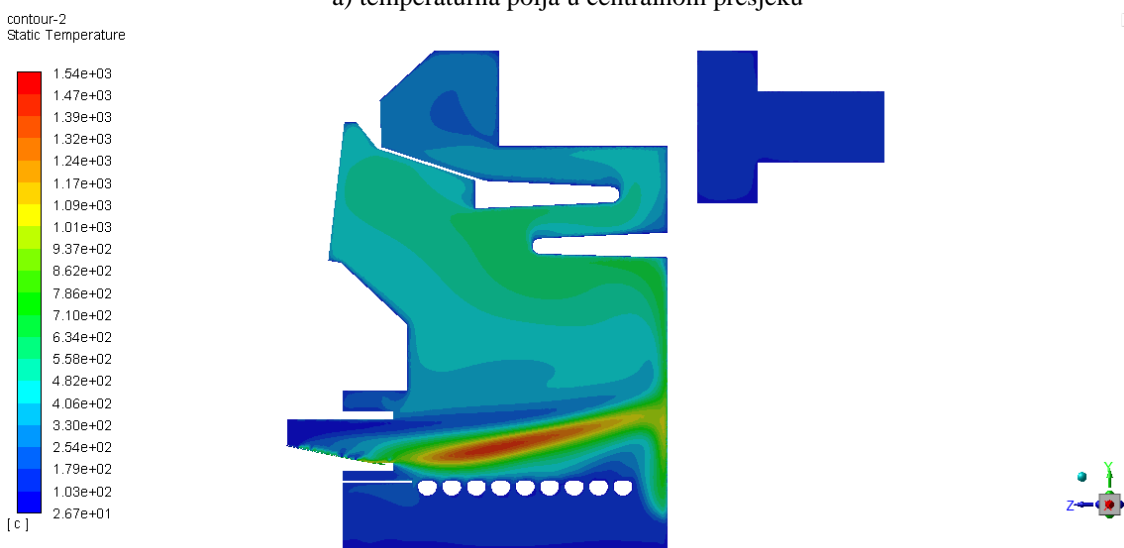
Na točnost određivanja sastava goriva i količine zraka koji se dovodi za izgaranje ukazuju vrlo mala relativna odstupanja u molnim udjelima kisika (3%) te ugljikovog dioksida (1,2%) u dimnim plinovima dobivenih računalnom simulacijom u odnosu na one dobivene mjerenjem. Temperature dimnih plinova u centru dimnjače (na mjernu mjestu postavljanja mjernog uređaja) za cca. 25 °C niža je od iste dobivene mjerenjem. Mjerena temperatura dimnih plinova na ulazu u treći prolaz dimnih plinova (272,4 °C) nalazi se unutar intervala određenog numeričkom simulacijom (260-290 °C). Mjereni toplinski učin je za 4% veći od onog dobivenog računalnom simulacijom. Odstupanja emisija polutanata (CO i NO_x) dobivenih računalnom simulacijom nalaze se unutar 20% u odnosu na one dobivene mjerenjem. Uzevši u obzir činjenicu da i do većih razlika u emisijama ovih polutanata može doći samo ukoliko se koristi druga vreća goriva istog proizvođača te s obzirom na prethodno opisana poklapanja u temperaturama dimnih plinova i ostvarenom toplinskom učinku, smatra se da rezultati dobiveni numeričkom simulacijom daju realan prikaz strujanja, temperaturnih polja i odvijanja kemijskih reakcija izgaranja unutar samog kotla. Usporedbe rezultata dobivenih numeričkom simulacijom i mjerenjima grafički je prikazana dijagramima na slici 56. Iako se svi parametri regulacije plamenika drže konstantnim, zbog načina dobave peleta i varijacije njihovih svojstava, nije moguće održavati konstantan omjer zraka i goriva tijekom ispitivanja. Stoga su rezultati mjerenja izraženi sa srednjom vrijednošću dobivenih rezultata i njihovom disperzijom (dvije standardne devijacije za slučaj emisija O₂, CO₂, toplinskog učina i temperature dimnih plinova – slika 56a; standardne devijacije za slučaj emisija polutanata – slika 56b). Uzevši u obzir disperziju emisija CO prikazanu na slici 56b ($\pm 165 \text{ mg/Nm}^3$ na 10% O₂ u suhim dimnim plinovima uz vjerojatnost pokrivanja koje pri normalnoj razdiobi odgovara 65%) dobivamo još jedan dodatni argument zbog kojeg možemo smatrati da rezultati dobiveni numeričkom simulacijom daju realan prikaz procesa koji se odvijanju unutar toplovodnog kotla. Zbog očekivanih emisija OGC-a, koje su u pravilu reda veličine manje u odnosu na emisije CO i NO_x (tablica B.5), istima nije dan poseban značaj prilikom modeliranja računalne simulacije.

Na sljedećim slikama prikazane su raspodjele temperaturnih polja u okomitim i horizontalnim presjecima. Jasno su vidljiva područja plamena, kao područja najviših temperatura. Najviša ostvarena temperatura iznosi 1.540 °C, što je uobičajena vrijednost za ovu vrstu sustava izgaranja [30, 31, 91]. Na slikama 57a i 58c može se primijetiti prodor zraka u područje ložišta kotla (područje prikazano tamno plavo bojom koje prolazi kroz gornji dio plamenika i ulazi u prostor ložišta kotla). To je zapravo zrak koji se ne iskorištava za izgaranje unutar plamenika te potencijalno predstavlja izvor toplinskih gubitaka. Usmjeravanjem tog zraka u glavnu zonu

plamena (konstrukcijska mjera opisana u poglavlju 5.7) potencijalno je moguće ostvariti učinkovito izgaranje s manjim pretičkom zraka. Udaljavanjem od centralnog presjeka (slike 57 b, c, d) manje je izražen ili uopće nije primjetan prodor hladnog zraka u prostor ložišta, što je posljedica pozicije slobodne površine istrujavanja plamenika na tijelu kotla. Središnje hladne zone (omeđene zonama više temperature) na slici 58 posljedica su načina strujanja dimnih plinova unutar prostora ložišta kotla. Duž strujanja može se primijetiti uzgonski efekt dimnih plinova (također vidljivo i na slici 57) te raspršenje strujanja pri sudara sa stijenkom. Kao posljedica tog sudara i raspršenja dolazi do strujanja dimnih plinova više temperature (prikazano zelenom bojom na slici 58) u područjima uz stijenku.

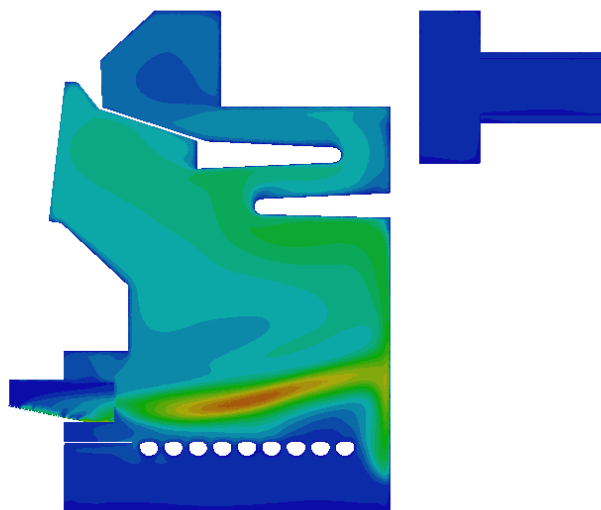
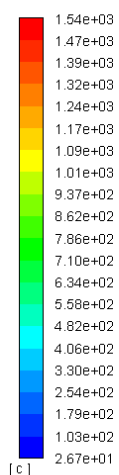


a) temperaturna polja u centralnom presjeku



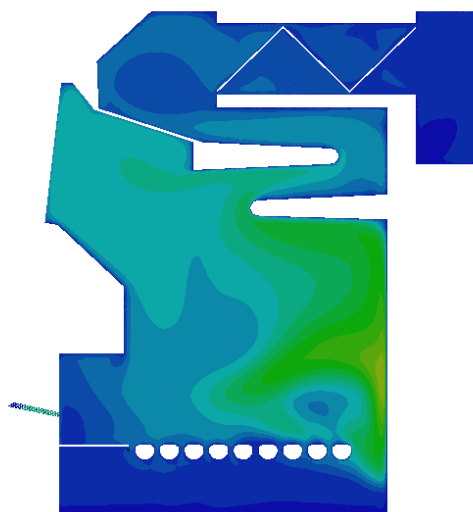
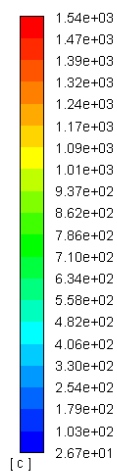
b) temperaturna polja u presjeku pomaknutom 25 mm od centra

contour-2
Static Temperature



c) temperaturna polja u presjeku pomaknutom 50 mm od centra

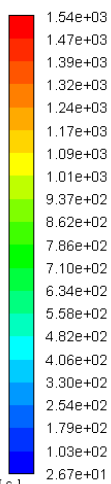
contour-2
Static Temperature



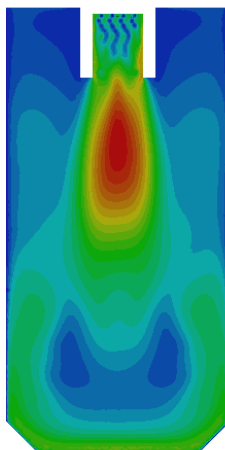
d) temperaturna polja u presjeku pomaknutom 100 mm od centra

Slika 57. Raspodjele temperaturnih polja u okomitim uzdužnim presjecima

contour-2
Static Temperature

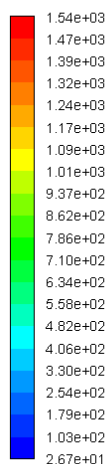


[c]

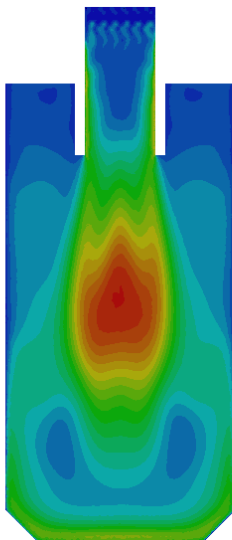


a) temperaturna polja u presjeku pomaknutom 25 mm ispod središta plamenika

contour-2
Static Temperature

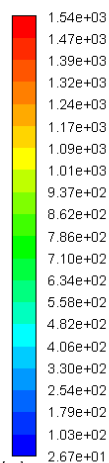


[c]

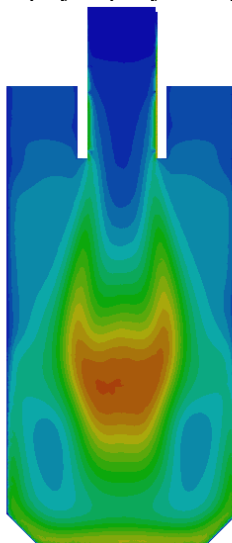


b) temperaturna polja u presjeku koji prolazi središtem plamenika

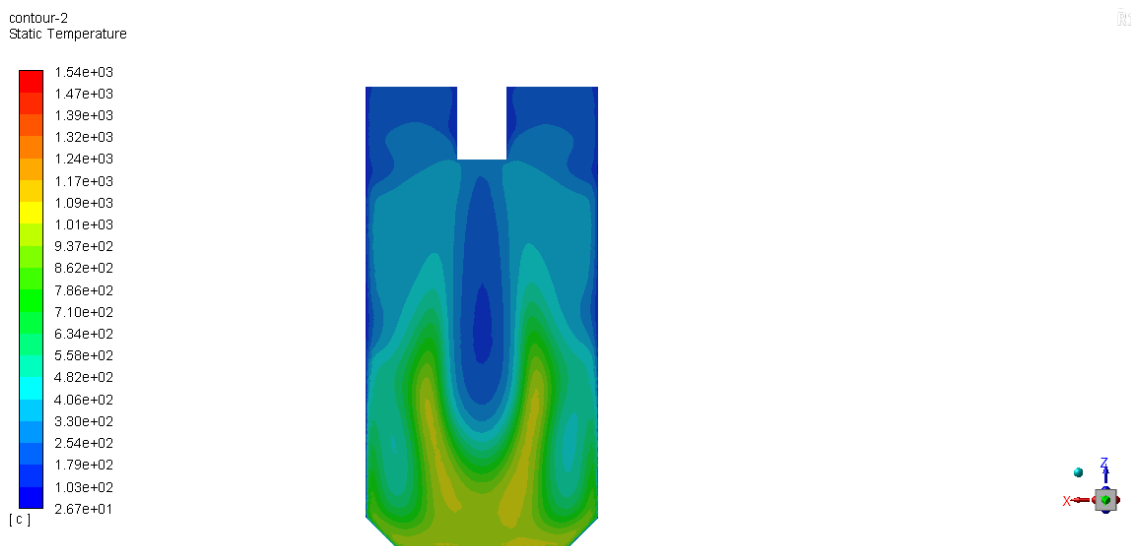
contour-2
Static Temperature



[c]



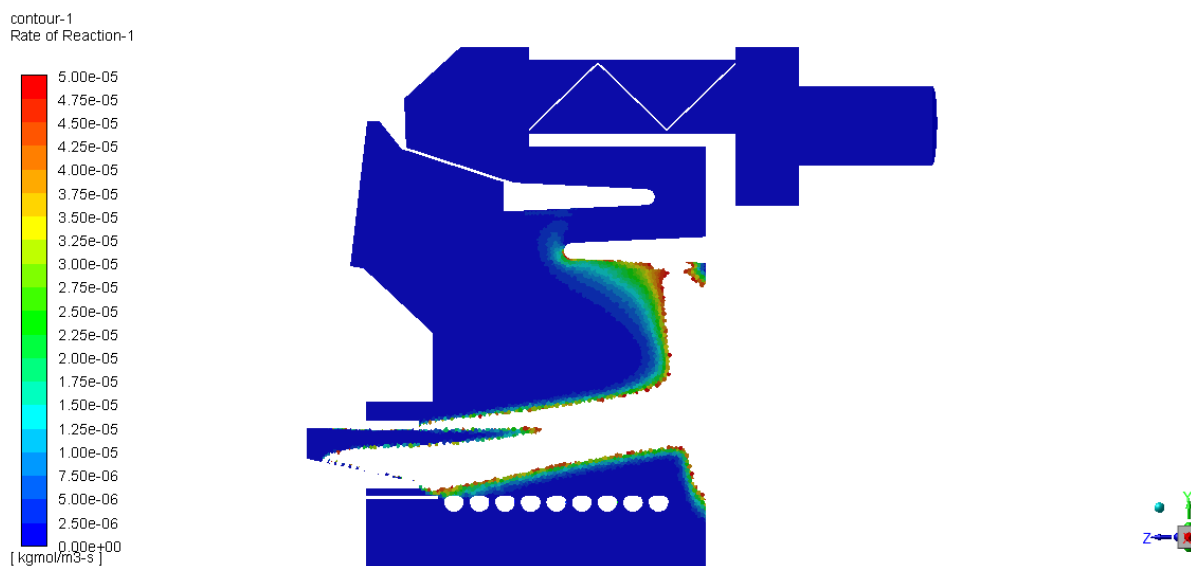
c) temperaturna polja u presjeku pomaknutom 25 mm iznad središta plamenika



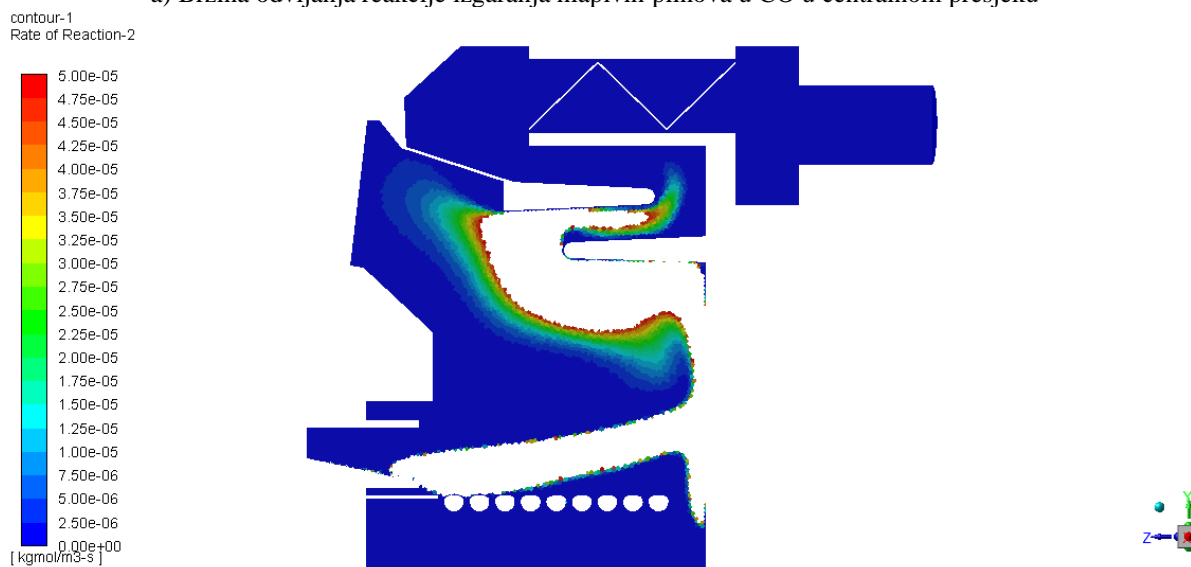
d) temperaturna polja u presjeku pomaknutom 62 mm iznad središta plamenika

Slika 58. Raspodjele temperaturnih polja u horizontalnim uzdužnim presjecima

Na sljedećim slikama prikazane su brzine odvijanja reakcija izgaranja u okomitim i horizontalnim uzdužnim presjecima. Potrebno je naglasiti da unutar cijele domene kotla postoji dovoljni udio kisika u dimnim plinovima za odvijanje kemijskih reakcija (što je posljedica pretička zraka) te je stoga izgaranje prvenstveno limitirano ostvarenim miješanjem/turbulencijom (izrazi 2.60, 2.61), temperaturama dimnih plinova i udjelu gorivih plinova prisutnih u pojedinom dijelu domene (izraz 2.58, 2.59). Analizom glavnih područja odvijanja kemijskih reakcija izgaranja (hlapivih plinova i CO) mogu se uočiti područja ložišta u kojemu ne dolazi do značajnijeg odvijanja reakcija (plavo područje na slikama 59 i 60), iako je dovoljna koncentracija kisika za odvijanje izgaranja (slika 61). Može se primijetiti da je u najvećem dijelu ložišta izgaranje slabo izraženo. Intenzivno izgaranje hlapivih plinova u CO događa se u područja jezgre plamena i području uz stražnju stijenku ložišta kotla. Za razliku od izgaranja hlapivih plinova, izgaranje CO u CO₂ izraženo je još u području prvog prolaza dimnih plinova, a kao posljedica ostvarenog miješanja/turbulencije i temperature dimnih plinova (slika 57).



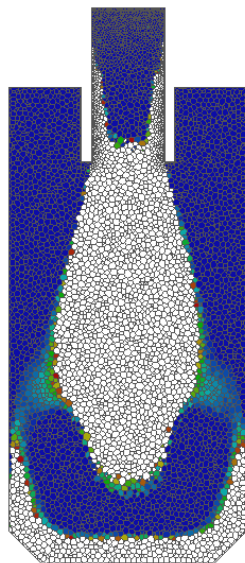
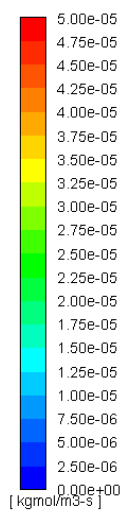
a) Brzina odvijanja reakcije izgaranja hlapivih plinova u CO u centralnom presjeku



b) Brzina odvijanja reakcije izgaranja CO u CO₂ u centralnom presjeku

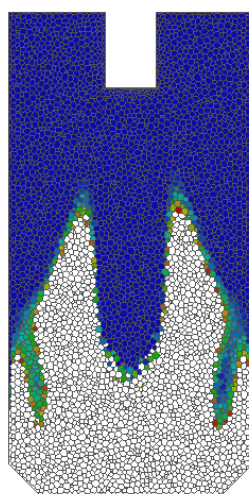
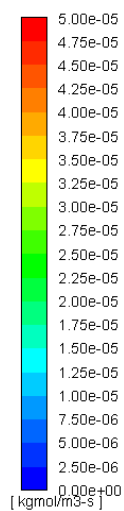
Slika 59. Brzine odvijanja reakcija izgaranja hlapivih plinova i CO u okomitim uzdužnim presjecima

contour-1
Rate of Reaction-2



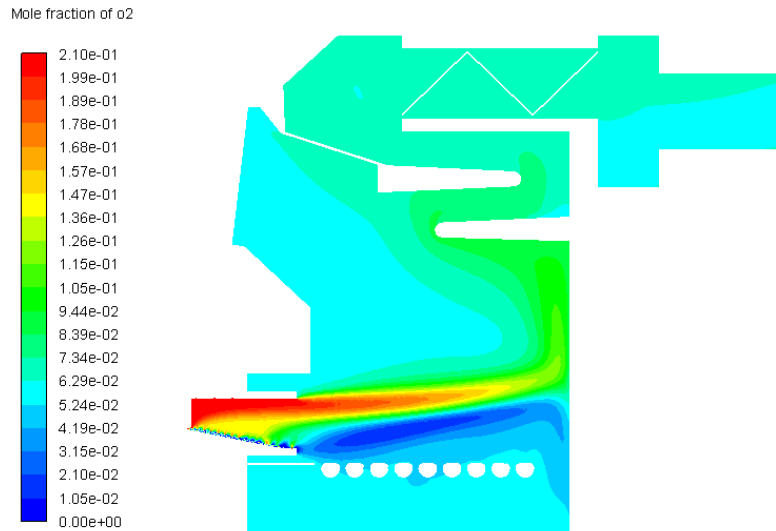
a) Brzina odvijanja reakcije izgaranja CO u CO₂ u presjeku koji prolazi središtem plamenika

contour-1
Rate of Reaction-2



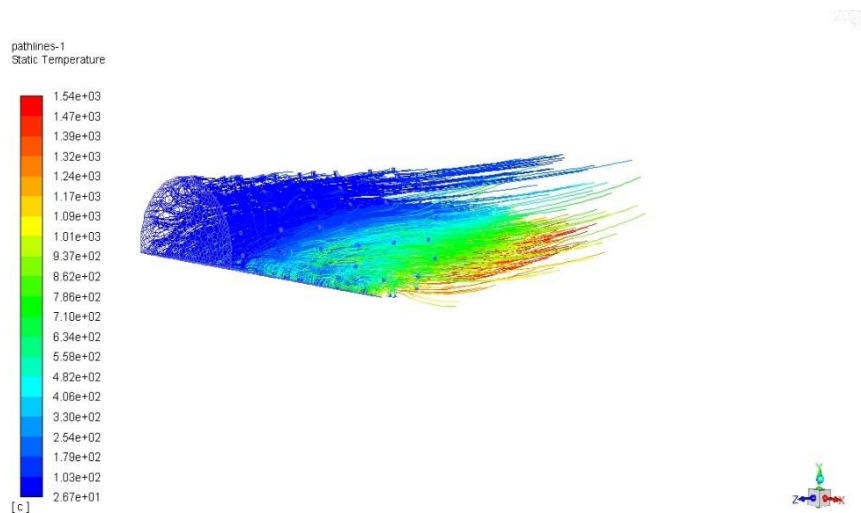
b) Brzina odvijanja reakcije izgaranja CO u CO₂ presjeku pomaknutom 62 mm iznad središta plamenika

Slika 60. Brzine odvijanja reakcija izgaranja CO u horizontalnim uzdužnim presjecima

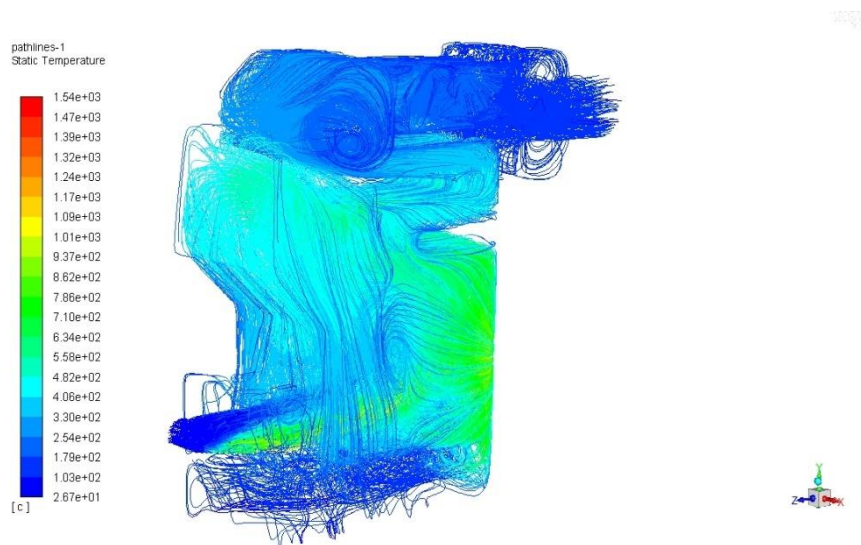


Slika 61. Raspodjele molarnog udjela O₂ u vlažnim dimnim plinovima u okomitom uzdužnom presjeku

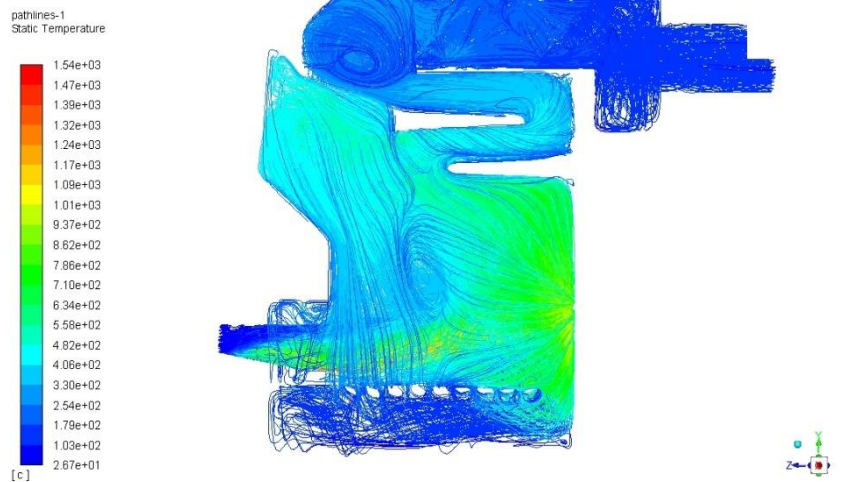
Na sljedećim slikama dan je prikaz strujanja dimnih plinova kroz plamenik te kroz cijeli kotao. Na slici 62 još je vidljivije područje prodora „neiskorištenog“ zraka u područje ložišta kotla. Na slici 63 primjetno je odvajanje struje dimnih plinova, gdje jedan dio dimnih plinova ulazi u konvektivni dio, a drugi u recirkulaciju.



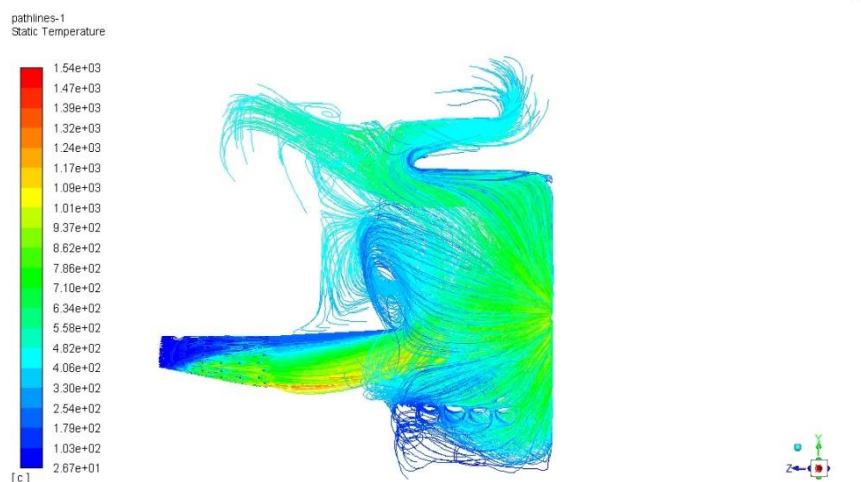
Slika 62. Prikaz strujanja kroz plamenik



a) 3D pogled



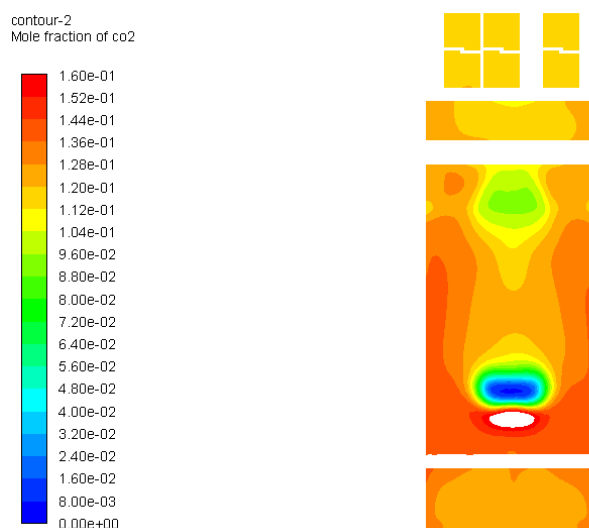
b) bočni pogled



c) 3D pogled sa skraćenim prikazom strujanja

Slika 63. Prikaz strujanja unutar kotla

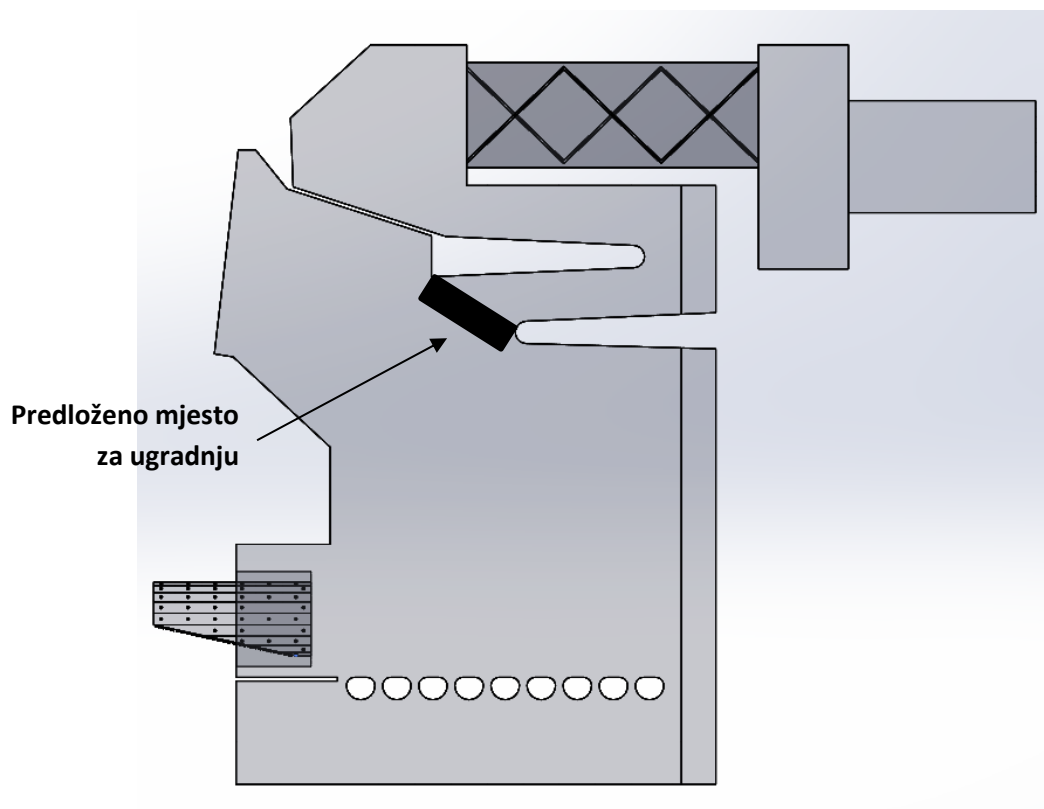
Zbog takvog načina strujanja (djelomične recirkulacije) udio CO₂ je veći uz bočne stijenke nego u centralnom presjeku, kao posljedica duljeg zadržavanja dijela dimnih plinova unutar prostora ložišta (slika 54).



Slika 64. Prikaz raspodjele molnih udjela CO₂ u okomitom poprečnom presjeku.

Načelno, smanjenje emisija polutanata koji su posljedica nepotpunog izgaranja (poglavlje 2.1.3) može se ostvariti produljenjem vremena zadržavanja dimnih plinova unutar toplovodnog kotla, povećanjem turbulencije (disipacije turbulentne kinetičke energije - ϵ) i/ili ostvarivanjem viših temperatura dimnih plinova u pojedinom dijelovima toplovodnog kotla. Kako je vrijeme zadržavanja dimnih plinova određeno masenim protokom goriva i konstrukcijom korištenog toplovodnog kotla, na isto nije moguće značajnije utjecati. Zbog toga su u ovom radu analizirane mjere koje uzrokuju lokalno povećanje turbulencije i temperature dimnih plinova te na taj način utječu na smanjenje emisija polutanata.

Na temelju provedene analiza strujanja, temperaturnih polja i područja odvijanja kemijskih reakcija izgaranja, kao mjera za smanjenje emisija polutanata koji su posljedica nepotpunog izgaranja predlaže se ugradnja umetka za naknadno izgaranje na ulazu u konvektivni dio kotla (konstrukcijske mjere opisane u poglavljima 5.2 i 5.3). Glavna funkcija analiziranih umetaka je značajno ubrzavanje reakcija izgaranja unutar vrlo malog volumena/prostora. Predloženo mjesto za ugradnju (slika 65) nalazi se unutar područja značajnijeg odvijanja kemijske reakcije izgaranja ugljikovog monoksida s jedne strane (slika 59b), a s druge strane predloženo mjesto ne bi trebalo imati značajan utjecaj na strujanje koje se ostvaruje unutar prostora ložišta kotla. Za potrebe daljnjih analiza određena je temperatura i molni sastav glavnih dimnih plinova na predloženom mjestu ugradnje umetka za naknadno izgaranje (tablica 17 i slike 66-68).

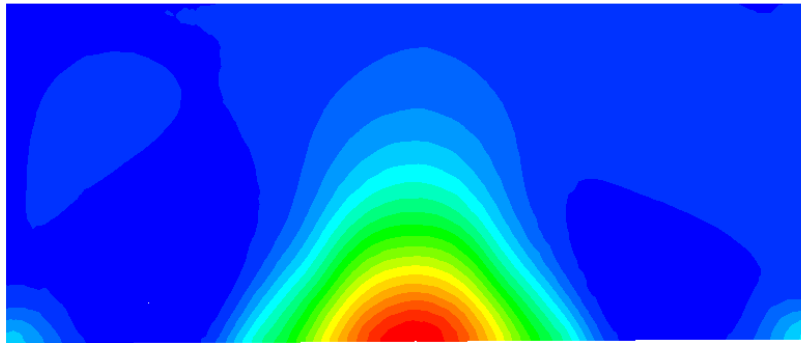
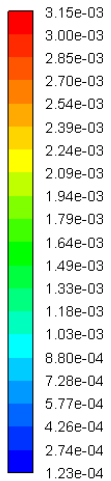


Slika 65. Predloženo mjesto za ugradnju umetka za naknadno izgaranje

Tablica 17. Temperature i molni sastav glavnih dimnih plinova na ulasku u konvektivni dio kotla

Parametar	Vrijednost
O ₂	6,31 %
CO ₂	11,80 %
H ₂ O	11,46 %
CO	516 ppm
N ₂	70,38 %
<i>k</i>	≈0,6
<i>ε</i>	≈10
Temperatura	515,47 °C

contour-3
Mole fraction of co

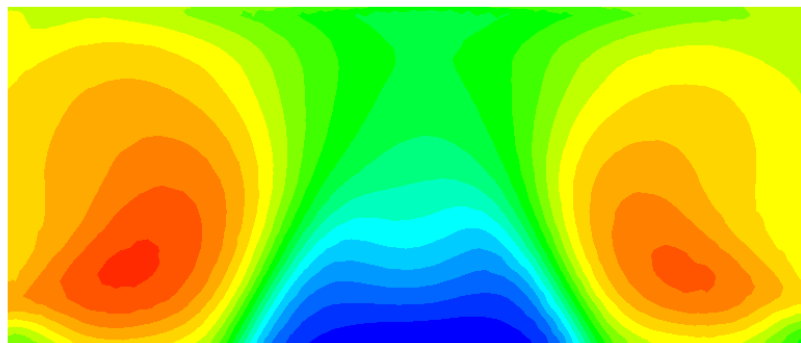
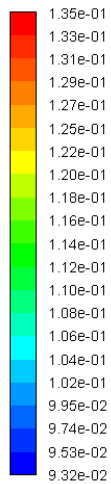


R19



Slika 66. Prikaz raspodjele molnih udjela CO na ulasku u konvektivni dio kotla

contour-3
Mole fraction of co2

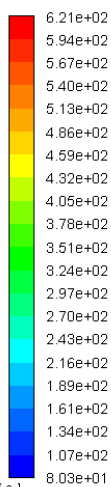


R19

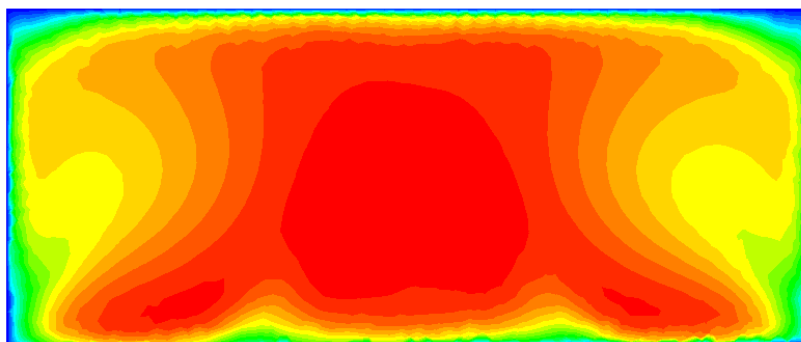


Slika 67. Prikaz raspodjele molnih udjela CO₂ na ulasku u konvektivni dio kotla

contour-3
Static Temperature



[c]



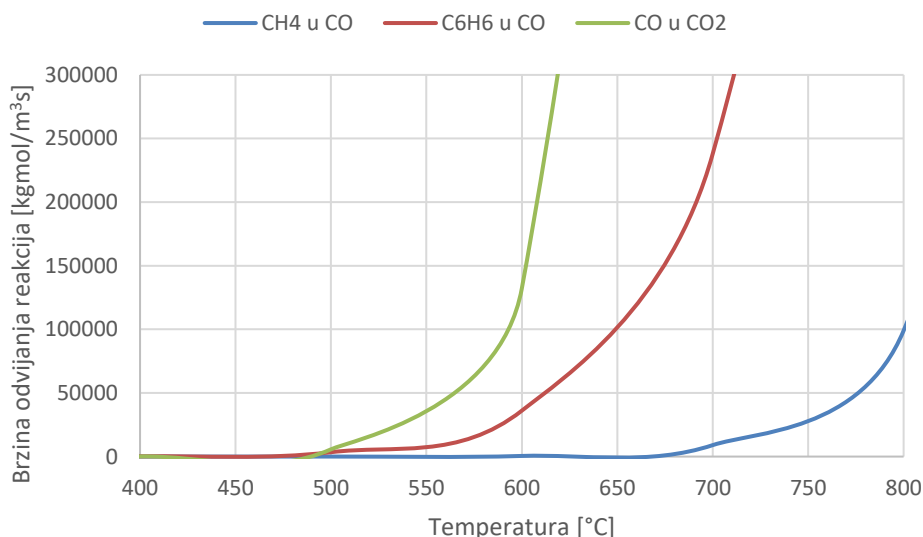
R19



Slika 68. Prikaz temperaturnih polja na ulasku u konvektivni dio kotla

Računalnom simulacijom dobiva se viša temperatura (≈ 580 °C) i molni udio CO (≈ 1940 ppm) u središnjem području ulaska u konvektivni dio u odnosu na prosječne vrijednosti (515,5 °C i 516 ppm). Veća koncentracija CO₂, odnosno niža koncentracija CO u bočnim područjima posljedica je duljeg zadržavanja dijela dimnih plinova ostvarenog prethodno opisanom recirkulacijom unutar ložišta kotla (slike 63-64, 66-68).

Uzimajući u obzir koeficijente brzina odvijanja reakcija izgaranja CO, CH₄ i C₆H₆ (CH₄ i C₆H₆ predstavljaju OGC) vidljivo je da su u području temperatura 500-600 °C (temperaturni raspon na predloženom mjestu ugradnje, slika 68) koeficijenti brzina izgaranja OGC-a značajno manji od onih za izgaranje CO (slika 69). Sukladno tome može se zaključiti da predložena konstrukcijska izmjena i mjesto ugradnje, uz postojeće vrijeme zadržavanja, neće imati značajan utjecaj na smanjenje emisija OGC-a. Ovdje vrijedi naglasiti da prilikom korištenja pojedine vrste ostataka iz poljoprivredne proizvodnje na temperaturama iznad 750 °C postoji opasnost od stvaranja trajnih naslaga unutar samih umetaka (tablica 1). S obzirom na temperaturne režima na predloženom mjestu ugradnje ne očekuje se da će do istih dolaziti u značajnoj mjeri. Krivulje prikazane na slici 69 izvedene su na temelju literaturnih parametara za određivanje koeficijenta brzine odvijanja kemijskih reakcija prema Arrheniusu (izraz 2.59) dostupne u okviru programskog paketa Ansys Fluent.



Slika 69. Koeficijent brzine odvijanja reakcije u ovisnosti o temperaturi

Temeljem gore navedene analize, u sklopu ovog rada pristupilo se analizi dvaju umetaka za naknadno izgaranje (saćasti i lamelni) te su njihovi učinci na smanjenje emisija CO analizirani

numerički i eksperimentalno. Konstrukcija samih umetaka za naknadno izgaranje dana je u poglavlju 5.2 (saćasti) i 5.3 (lamelni).

Korištenjem saćastog umetka za naknadno izgaranje (slika 24), izgaranje se nastoji potaknuti porastom temperatura dimnih plinova i turbulencije unutar malih kanala. Konstrukcija ovakvog umetka, analiziranog u ovom radu, može se pronaći kod toplovodnih kotlova na cjepanice, kao umetak ugrađen u zadnjem prolazu dimnih plinova, odnosno neposredno prije dimne kutije. Isti ostvaruju smanjenje emisija CO u iznosu od cca. 30%. Kod kotlova na drvene pelete, s obzirom na općenito niže izlazne temperature dimnih plinova i manje emisije CO, ugradnjom umetka na postojeća mjesta očekuje se njegov značajno manji učinak. U konkretnom slučaju, na ulazu u treći prolaz temperatura dimnih plinova iznosi 272,4 °C, što prema dijagramu na slici 69. donosi zanemarivo mali koeficijent brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja neizgorelih plinova. Upravo iz tog razloga se pristupilo prethodno opisanoj analizi i odabiru novog mjesta za ugradnju.

Lamelni umetak za naknadno izgaranje (slika 27), analiziran u ovom radu, vlastite je konstrukcije. Konstrukcija umetka je takva da se izgaranje neizgorelih plinova nastoji potaknuti porastom turbulencije zahvaljujući višestrukoj promjeni smjera strujanja dimnih plinova i pojavi lokalnih vrtloga. Takve strukture su poznate u praksi i često se koriste za povećanje turbulencije. Također, zbog način strujanja, za očekivati je da će takva struktura ostvarivati veće smanjenje emisija prašine u odnosu na saćastu.

4.6.2 Numerička simulacija naknadnog izgaranja u saćastom umetku

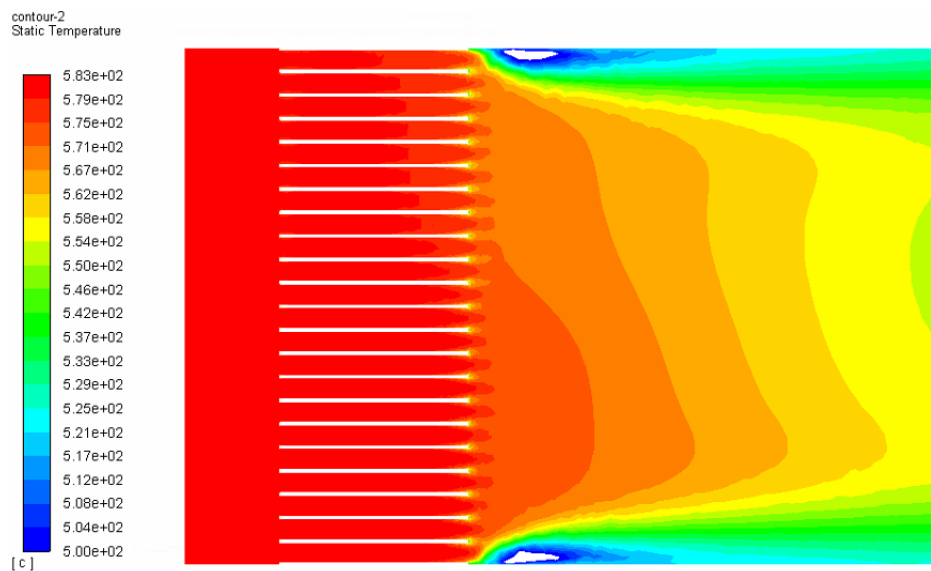
Sastav dimnih plinova na izlasku iz saćastog umetka za naknadno izgaranje dan je tablicom 18. Temperaturna polja i polja disipacije turbulentne kinetičke energije prikazana su na slikama 70 i 71.

Tablica 18. Temperature i molni sastav dimnih plinova na izlasku iz saćastog umetka za naknadno izgaranje

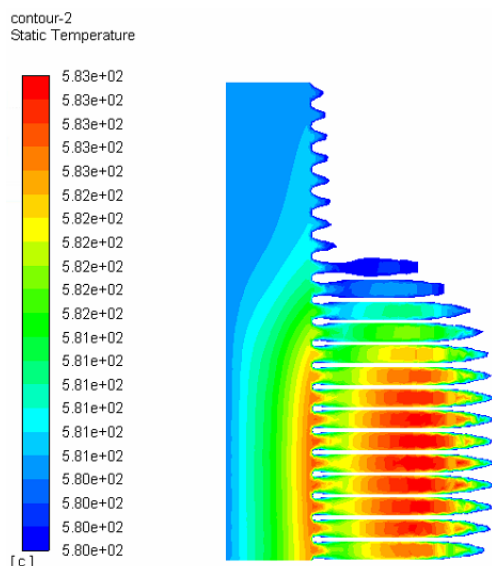
Parametar	Numerička simulacija	Numerička simulacija
		10% O ₂ u suhim dimnim plinovima
O ₂	6,28 %	7,09 %
CO ₂	11,85 %	13,38 %
H ₂ O	11,46 %	-
CO	282 ppm*	318 mg/Nm ³ *

* rezultat ne uključuje izgaranje do kojeg dolazi u konvektivnom dijelu kotla

Računalnom simulacijom dobiveno smanjenje emisija CO na samom umetku iznosi 172 ppm (194 mg/Nm³ svedeno na 10% O₂ u suhim dimnim plinovima), odnosno 38%.

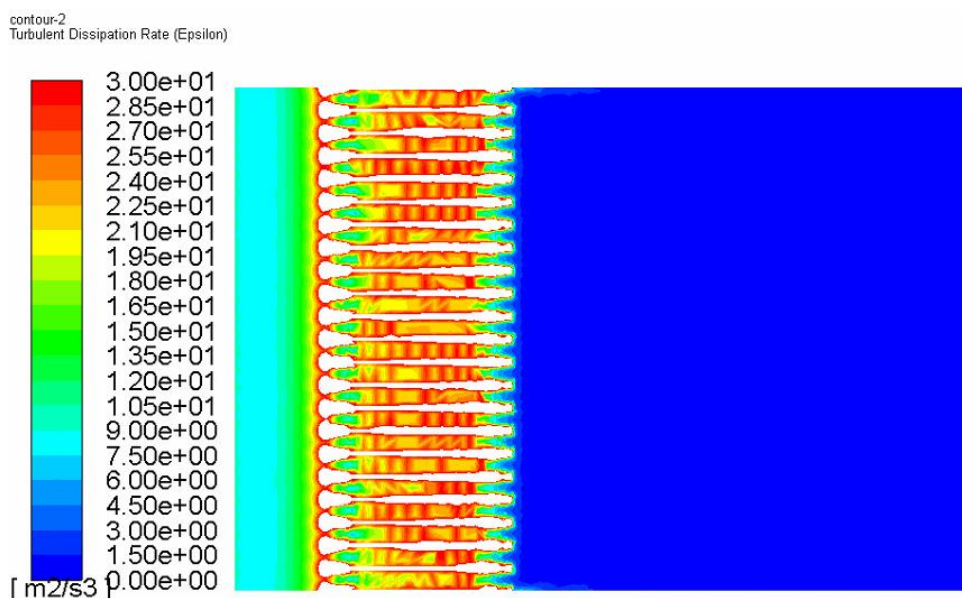


a) temperaturni raspon 500-583 °C



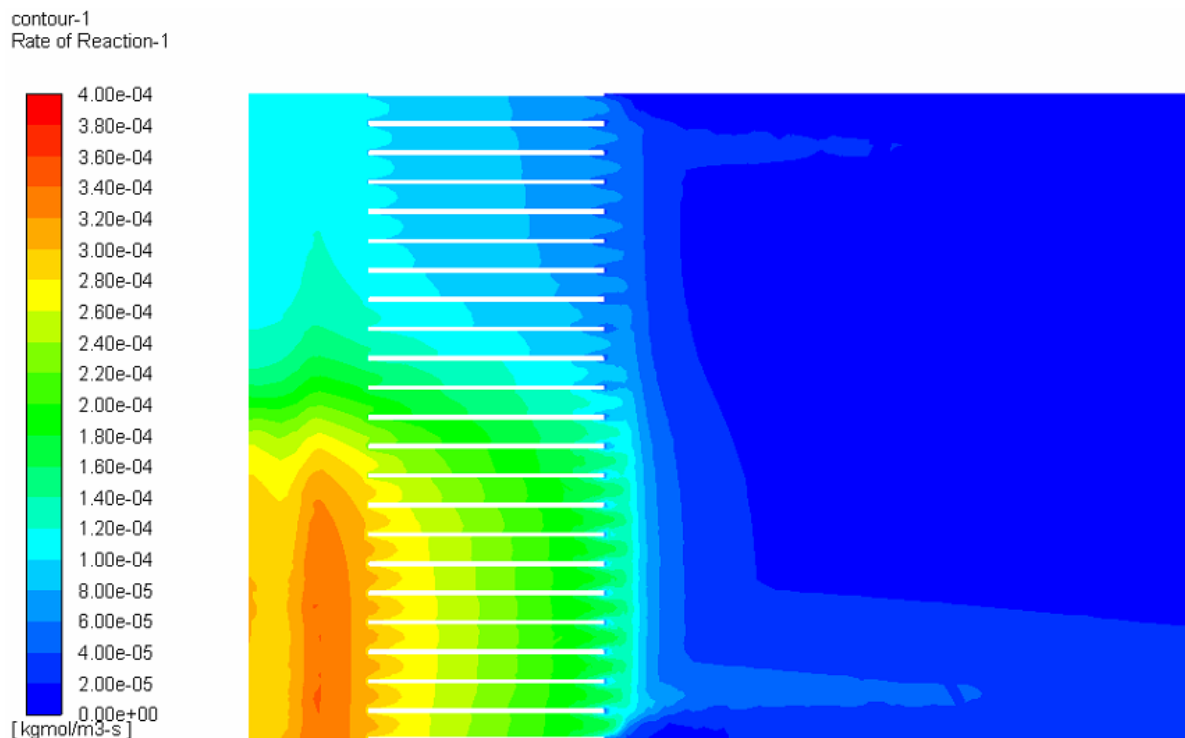
b) temperaturni raspon 580-583 °C

Slika 70. Prikaz temperaturnih polja unutar sačastog umetka

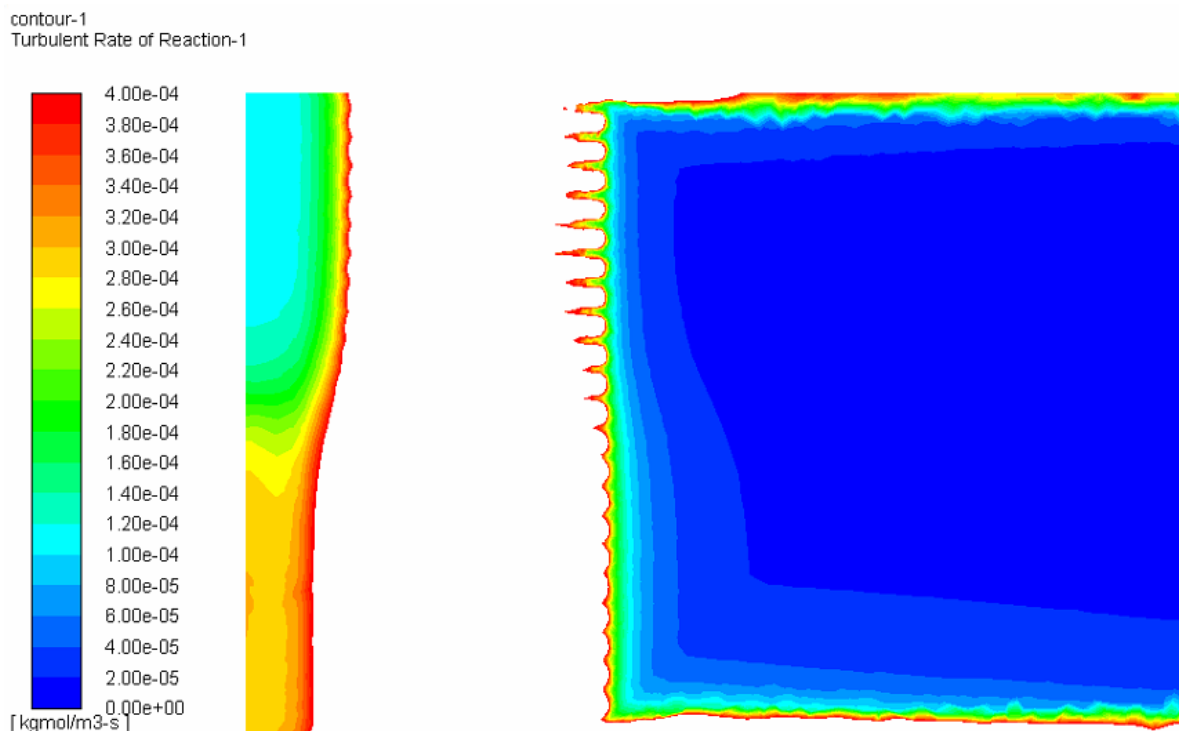
Slika 71. Prikaz polja disipacije turbulentne kinetičke energije (ϵ) unutar sačastog umetka

Zbog toga što su mali kanali sačastog umetka izvedeni od izolacijskog materijala (keramike), toplinski tok oslobođen izgaranjem molekula CO se većim djelom očituje u povećanju temperature dimnih plinova koji struje kroz kanale. Na slici 70b može se primijetiti mali porast temperature dimnih plinova (cca. 3 °C) prilikom strujanja kroz sačasti umetak za naknadno izgaranje. U odnosu na mali porast temperature dimnih plinova, povećanje turbulencije (disipacije turbulentne kinetičke energije - ϵ) je ipak značajnije (slika 71). Utjecaj tih povećanja povoljno utječe na brzinu odvijanja kemijskih reakcija izgaranja i zbog toga je ovom procesu pridodan naziv „naknadno izgaranje“ (slike 72-74). Na slici 72 prikazana su polja brzine

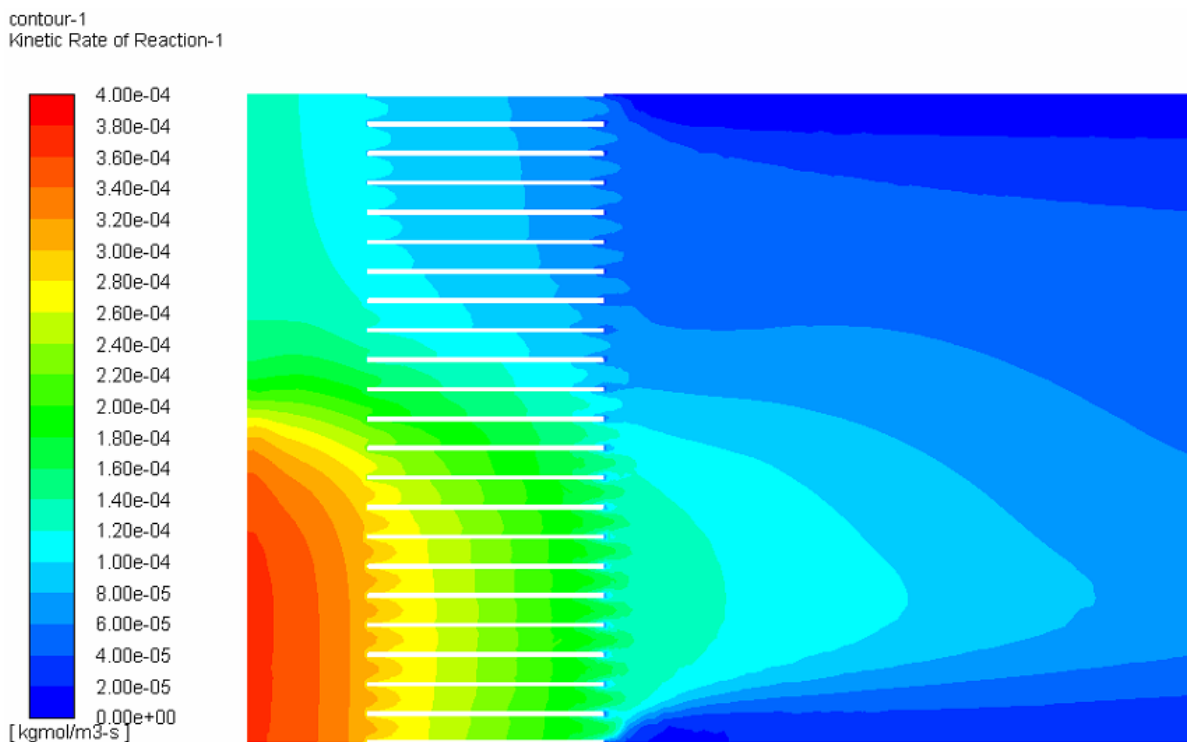
odvijanja kemijskih reakcija izgaranja unutar umetka. Prikazani dijagram zapravo predstavlja minimalnu vrijednost dobivenih brzina odvijanja kemijskih reakcija uslijed miješanja/turbulencije (slika 73) i temperatura dimnih plinova (slika 74). Radi lakše usporedbe svi dijagrami u nastavku su prikazani s istom skalom.



Slika 72. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja unutar saćastog umetka za naknadno izgaranje



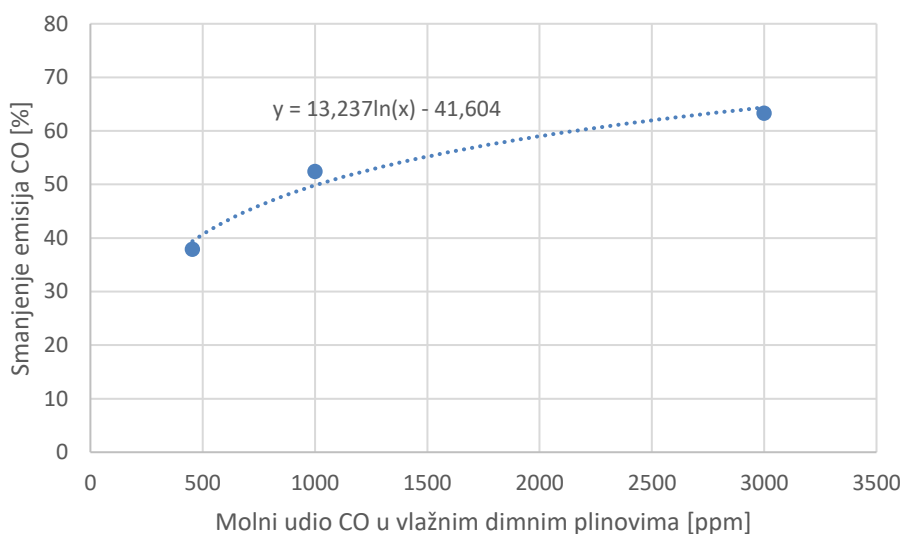
Slika 73. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed miješanja/turbulencije (*Model disipacije vrtloga*, poglavlje 2.2.2)



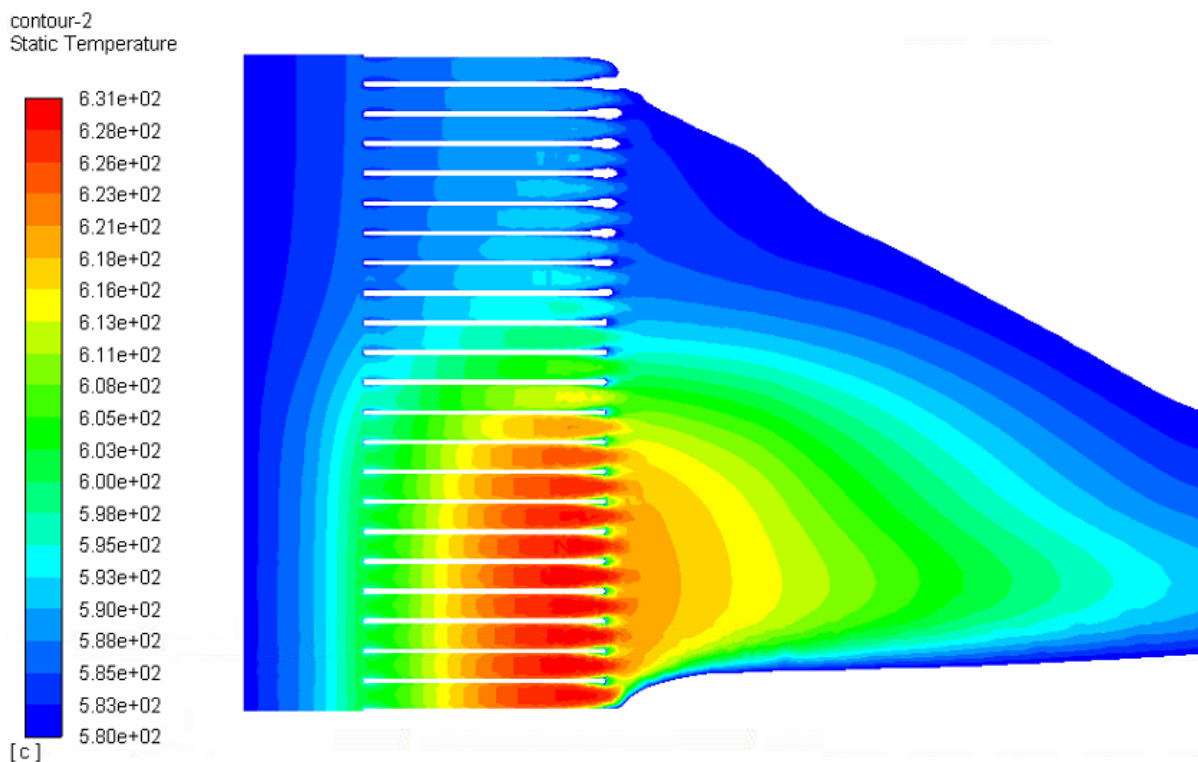
Slika 74. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed temperature dimnih plinova (*Model konačnih brzina reakcije*, poglavlje 2.2.2)

Analizom kontura na slikama 72-74 može jasno vidjeti kako je u području ispred umetka brzina odvijanja kemijskih reakcija limitirana miješanjem/turbulencijom, dok na ulasku i unutar umetka temperaturom dimnih plinova.

Temeljem razvijenog modela napravljena je simulacija naknadnog izgaranja na saćastom umetku za naknadno izgaranje za različite ulazne molne udjele CO (maseni protok, raspodjela temperatura i udjela O₂ konstantni su u svim točkama). Rezultati su prikazani u dijagramu na slici 75. Važno je napomenuti da prikazani dijagram vrijedi samo za temperaturnu raspodjelu dimnih plinova i parametre turbulencije (k i ϵ) na ulazu u umetak određene iz numeričke simulacije toplovodnog kotla (slika 68). Jasno je vidljivo da je učinak umetka na smanjenje emisija veći, što je veća ulazna koncentracija CO. Porast temperature dimnih plinova unutar kanala saćastog umetka od cca. 50 °C (u centralnom dijelu) može se uočiti pri ulaznom molnom udjelu CO od 3.000 ppm (slika 76).



Slika 75. Procjena smanjenja emisija CO u ovisnosti o molnom udjelu CO na ulazu u saćasti umetak za naknadno izgaranje



Slika 76. Prikaz temperaturnih polja unutar saćastog umetka za naknadno izgaranje (za molni udio CO u vlažnim dimnim plinovima od 3.000 ppm)

4.6.3 Numerička simulacija naknadnog izgaranja u lamelnom umetku

Sastav dimnih plinova na izlasku iz lamelnog umetka za naknadno izgaranje dan je tablicom 19. Temperaturna polja i polja disipacije turbulentne kinetičke energije prikazana su na slikama 77 i 78.

Tablica 19. Temperature i molni sastav dimnih plinova na izlasku iz lamelnog umetka za naknadno izgaranje

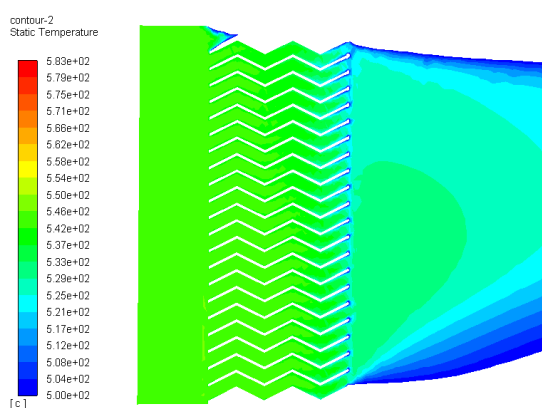
Parametar	Numerička simulacija	Numerička simulacija
		10% O ₂ u suhim dimnim plinovima
O ₂	7,32 %**/6,28 %***	8,21 %**/7,09 %***
CO ₂	11,28 %**/11,85 %***	12,64 %**/13,38 %***
H ₂ O	10,77 %**/11,46 %***	-
CO*	461 ppm**/272 ppm***	555 mg/Nm ³ ** / 307 mg/Nm ³ ***

* rezultat ne uključuje izgaranje do kojeg dolazi u konvektivnom dijelu kotla

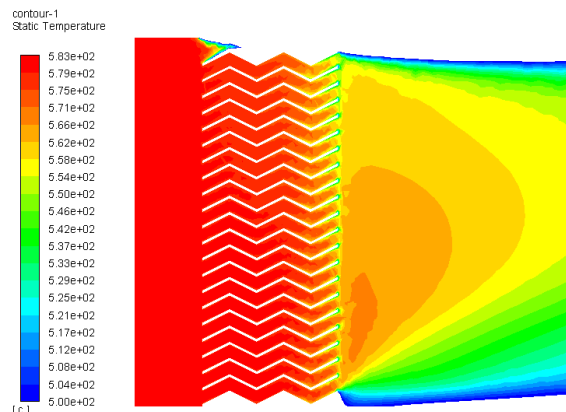
** situaciju s većim pretičkom zraka λ i udjelom CO u dimnim plinovima te nižom temperaturom (usporedba s provedenim mjerenjima, za potrebe validacije modela)

*** situaciju s identičnim rubnim uvjetima kao što su korišteni za za saćasti umetak (za potrebe termodinamičke usporedbe umetaka)

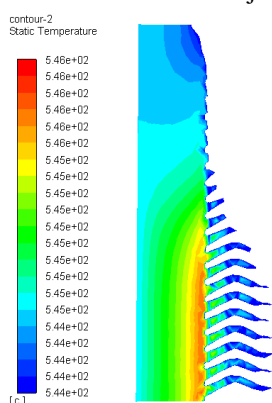
Računalnom simulacijom dobiveno smanjenje emisija CO na samom umetku za situaciju s većim pretičkom zraka i udjelom CO u dimnim plinovima te nižom temperaturom iznosi 189 ppm (228 mg/Nm³ svedeno na 10% O₂ u suhim dimnim plinovima), odnosno 29%. Simulacijom s identičnim rubnim uvjetima kao što su korišteni za sačasti umetak dobivamo smanjenje emisija CO slično onom ostvarenom u sačastom umetku (182 ppm ili 205 mg/Nm³ svedeno na 10% O₂ u suhim dimnim plinovima, odnosno 40%).



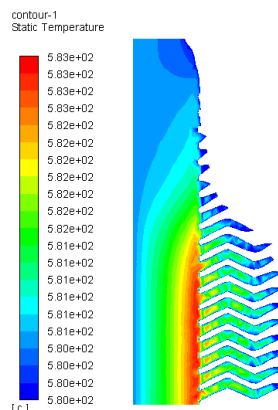
a) temperaturni raspon 500-583 °C (usporedba s mjerenjima)



b) temperaturni raspon 500-583 °C (usporedba sa sačastim)

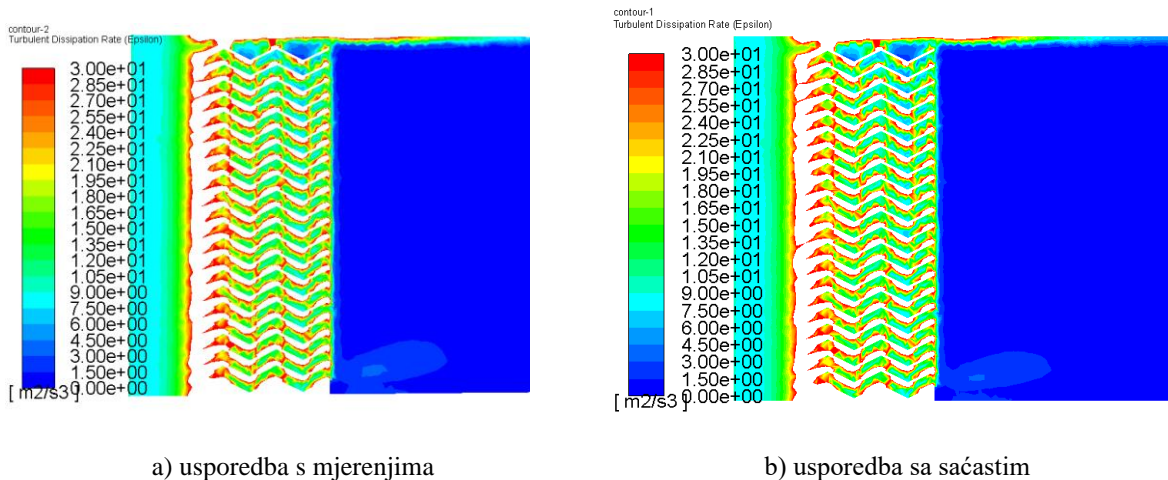


c) temperaturni raspon 544-546 °C (usporedba s mjerenjima)



d) temperaturni raspon 580-583 °C (usporedba sa sačastim)

Slika 77. Prikaz temperaturnih polja unutar lamelnog umetka za naknadno izgaranje



a) usporedba s mjerenjima
b) usporedba sa sačastim

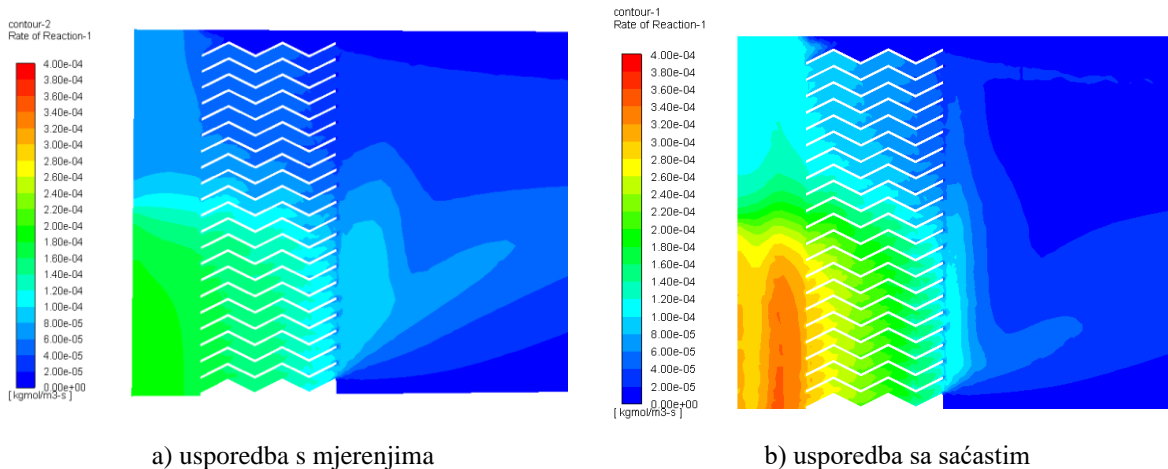
Slika 78. Prikaz polja disipacije turbulentne kinetičke energije (ϵ) unutar lamelnog umetka za naknadno izgaranje

Na slikama 77-81 lijevi stupac prikazuje situaciju s većim pretičkom zraka λ i udjelom CO u dimnim plinovima te nižom temperaturom (usporedba s provedenim mjerenjima, za potrebe validacije modela), a desni stupac prikazuje situaciju s identičnim rubnim uvjetima kao što su korišteni za sačasti umetak (za potrebe termodinamičke usporedbe umetaka). Iako je količina neizgorenog CO na ulazu u domenu veća, a izgorena količina CO otprilike ista, ne dolazi do porasta temperature dimnih plinova unutar kanala lamelnog umetka (slika 77c i d) kao što je slučaj za sačasti umetak (slika 70b). Usporedbom kontura na slikama 71 i 78 može se također primijetiti manje povećanje disipacije turbulentne kinetičke energije (ϵ) unutar kanala kod lamelnog (slika 78), u odnosu na sačasti umetak (slika 71). Razlozi za manji/zanemariv porast temperature dimnih plinova i manji porast disipacije turbulentne kinetičke energije (ϵ) opisani su u nastavku.

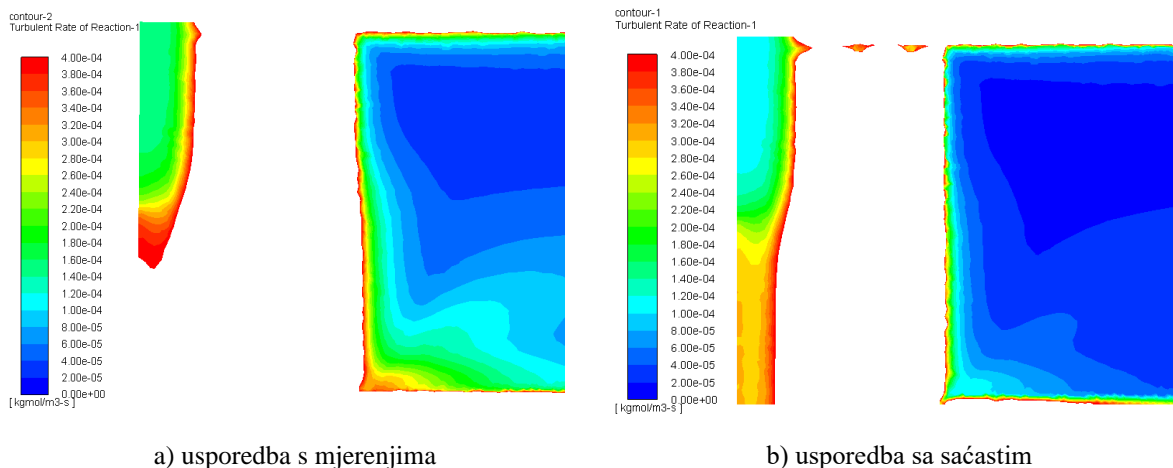
Za razliku od sačastog umetka koji je izrađen od keramike (izolacijski materijal) i gdje je strujanje ostvareno unutar malih kanala šesterokutnog presjeka (pregrada u dvije osi), lamelni je izrađen od čeličnih limova (toplinski vodljiv materijal) te se strujanje ostvaruje između lamela (pravokutni presjek). Pri tome je hidraulički promjer ($D_h=4 \cdot A/O$) znatno veći i omogućeno je miješanje dimnih plinova, tj. izmjena topline i tvari, okomito na smjer strujanja. Kod takve konstrukcije postoje temperaturni gradijenti okomito na smjer strujanja pa se generirana toplina/tvari izmjenjuje prema hladnijim dijelovima fluida, čime se centralni dijelovi fluida s intenzivnijim izgaranjem hlade (što sve nije slučaj kod sačastog). Iako su temperature dimnih plinova koji struje kroz susjedne kanale bliske prisutna je kondukcija kroz same lamele, ali i u smjeru te okomito na smjer strujanja (opisana kondukcija nije modelirana u numeričkoj

simulaciji). U konačnici sve to uzrokuje smanjenje lokalnih temperaturnih maksimuma i povećavanje lokalnih temperaturnih minimuma (u odnosu na sačasti umetak). Zbog toga što opisana kondukcija nije uzeta u obzir prilikom modeliranja numeričke simulacije, za očekivati je da će ostvareni temperaturni maksimumi ipak biti manji od onih prikazanih na slikama 77c i 77d. S obzirom da su polja temperaturnih maksimuma usko povezana s područjima viših molnih udjela CO, isto utječe na smanjenje brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja. Također bitno je naglasiti da sačasta struktura zbog mogućnosti akumulacije topline u kombinaciji s velikom dodirnom površinom omogućuje vrlo stabilno izgaranje (manje oscilacije temperatura i emisija na izlazu iz kotla), što dodatno doprinosi smanjenju emisija. Sve to ukazuje na potrebu za dodatnim usavršavanjem konstrukcije lamelnog umetka, što je u planu za daljnja istraživanja.

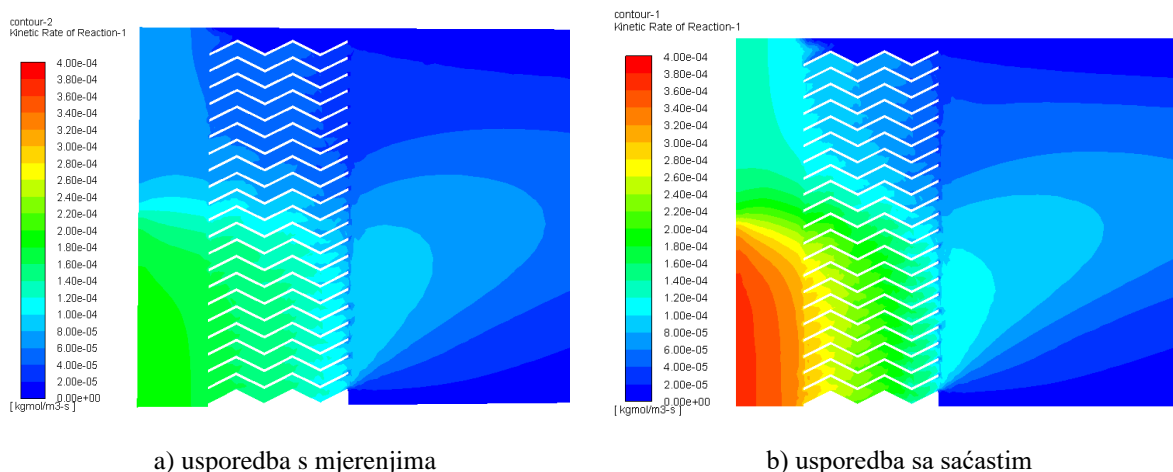
Na slici 79 prikazana su polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja unutar lamelnog umetka. Prikazani dijagram zapravo predstavlja minimalnu vrijednost dobivenih brzina odvijanja kemijskih reakcija uslijed miješanja/turbulencije (slika 80) i temperatura dimnih plinova (slika 81). Radi lakše usporedbe svi dijagrami u nastavku su prikazani s istom skalom.



Slika 79. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja unutar lamelnog umetka za naknadno izgaranje



Slika 80. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed miješanja/turbulencije (*Model disperzije vrtloga*, poglavlje 2.2.2)



Slika 81. Prikaz polja brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja uslijed temperature dimnih plinova (*Model konačnih brzina reakcije*, poglavlje 2.2.2)

Analizom kontura na slici 79a može se primijetiti da je zbog niže temperature dimnih plinova brzina odvijanja kemijskih reakcija izgaranja sporija u odnosu na situaciju prikazanu na slici 79b, iako je udio neizgorenog CO veći. Analizom kontura na slikama 79b, 80b i 81b mogu se donijeti slični zaključci kao i za sačasti umetak (poglavlje 4.6.2).

4.7 Detaljna analiza emisija polutanata (CO i NO_x) uz konstrukcijske izmjene

4.7.1 Drvni peleti (PD2)

Ugradnja saćastog umetka za naknadno izgaranje

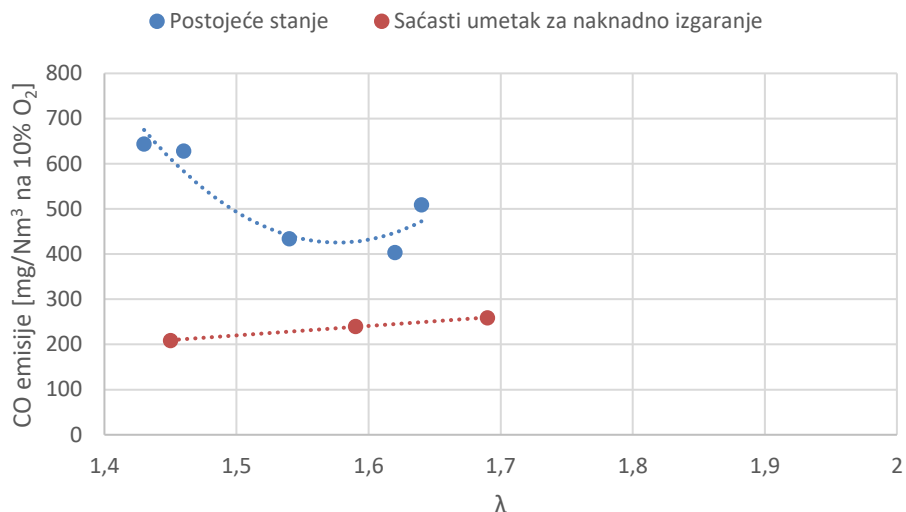
Nakon konstrukcijske izmjene, ugradnje saćastog umetka za naknadno izgaranje (prijedlog opisan u poglavlju 5.2 i numerički analiziran u poglavlju 4.6.2), ponovljena su mjerenja za slučaj PD2. Ciljevi ovog ispitivanja su:

- Istražiti utjecaj pretička zraka (λ) i različitih emisija CO na termo-kemijske procese unutar saćastog umetka za naknadno izgaranje prilikom izgaranja PD2
- Validacija provedenog postupka numeričkog modeliranja izgaranja u saćastom umetku za naknadno izgaranje

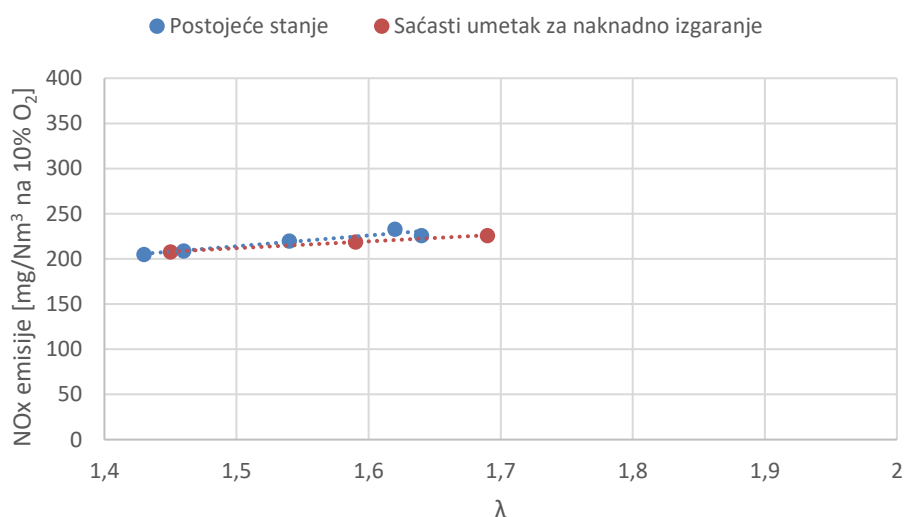
Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 20 te su usporedni dijagramima (sa slučajem bez umetka) dani na slikama 82 i 83.

Tablica 20. Rezultati detaljnih ispitivanja drvnih peleta nakon ugradnje saćastog umetka za naknadno izgaranje

Točka ispitivanja		1.	2.	3.	Granične vrijednosti (Klasa 3/4/5) [7]
λ	-	1,59	1,69	1,45	-
Temperatura dimnih plinova na izlazu	°C	172,9	171,7	167,9	-
CO	mg/Nm ³ na 10% O ₂	240	259	209	3.000/1.000/ 500
NO _x	mg/Nm ³ na 10% O ₂	219	226	208	-



Slika 82. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka



Slika 83. NO_x emisije u ovisnosti o pretičku zraka

Mjerenjem određeno smanjenje emisija CO ugradnjom sačastog umetka iznosi minimalno cca. 40%. Na ostalim radnim točkama smanjenje emisija CO je još značajnije (zbog viših CO emisija bez konstrukcijskih izmjena), što je sukladno zaključcima dobivenim dijagramom na slici 75. Smanjenje emisija CO u točki za koju je proveden postupak numeričkog modeliranja iznosi $197 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (svedeno na 10% O_2 u suhim dimnim plinovima). Isto smanjenje dobiveno računalnom simulacijom iznosi $194 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ (svedeno na 10% O_2 u suhim dimnim plinovima), čime je potvrđeno da rezultate dobivene numeričkom simulacijom možemo smatrati realnim prikazom odvijanja procesa „naknadnog“ izgaranja u sačastom umetku.

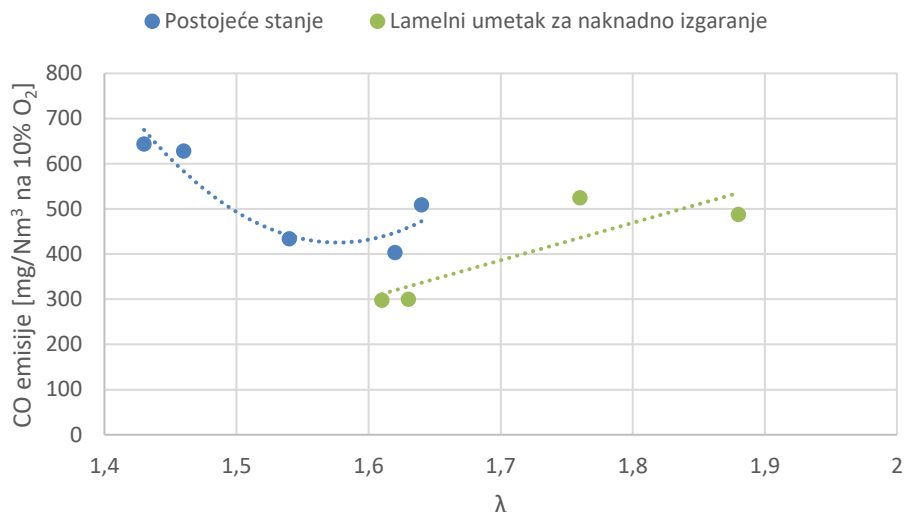
Mjerenjem se pokazalo da ugradnja umetka omogućava optimalno izgaranje s manjim pretičkom zraka što dovodi do još dodatnog smanjenja emisija CO (ostvarene emisije CO u cijelom analiziranom području ispod su granične vrijednosti iz [7]). Smanjenje emisija CO u kombinaciji s manjim pretičkom zraka doprinosi većoj toplinskoj učinkovitosti rada kotla. Nadalje, konstrukcijska izmjena ugradnje sačastog umetka nije imala značajan utjecaj na NO_x emisije. Malo smanjenje emisija NO_x moguće je ostvariti kao posljedica rada s manjim pretičkom zraka.

Ugradnja lamelnog umetka za naknadno izgaranje

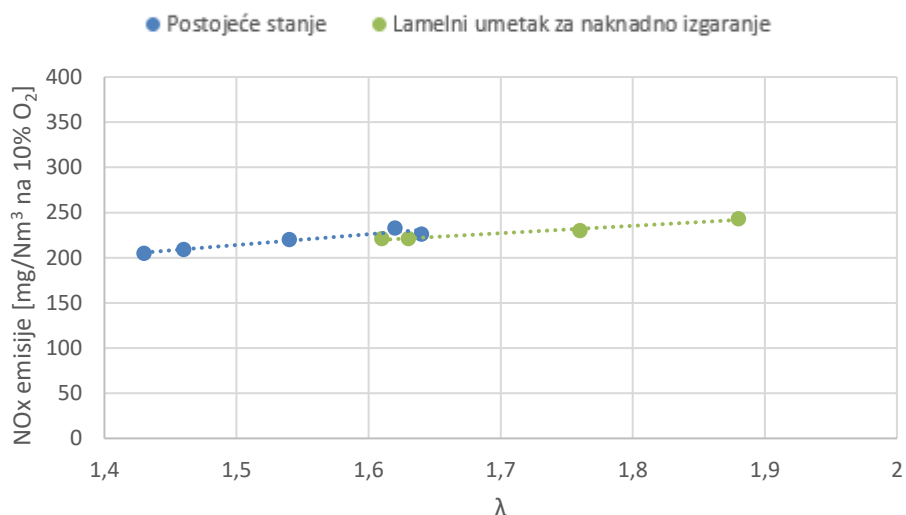
Nakon konstrukcijske izmjene, ugradnje lamelnog umetka za naknadno izgaranje (prijedlog opisan u poglavlju 5.3 i numerički analiziran u poglavlju 4.6.3), ponovljena su mjerenja za slučaj PD2. Ciljevi ovog ispitivanja isti su onima za sačasti umetak. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 21 te su usporedni dijagramima (sa slučajem bez umetka) dani na slikama 84 i 85. Zbog korištenja drugih vreća goriva (istog proizvođača), koja su naknadno kupljena, nije bilo moguće postići učinkovito izgaranje pri pretičcima zraka (λ) manjim od 1,6. Tako da je ovaj set mjerenja proveden na većim vrijednostima pretička zraka. Ponavljanjem mjerenja za slučaj bez konstrukcijskih izmjena i s ugrađenim sačastim umetkom utvrđeno je da se i dalje ostvaruju emisije polutanata i temperature dimnih plinova koje su usporedive sa svim prethodnim mjerenjima u području $1,6 < \lambda < 1,7$.

Tablica 21. Rezultati detaljnih ispitivanja drvnih peleta nakon ugradnje lamelnog umetka za naknadno izgaranje

Točka ispitivanja		1.	2.	3.	4.	Granične vrijednosti (Klasa 3/4/5) [7]
λ	-	1,61	1,63	1,76	1,88	-
Temperatura dimnih plinova na izlazu	°C	185,9	188,2	189,3	188,4	-
CO	mg/Nm ³ na 10% O ₂	298	300	525	488	3.000/1.000/ 500
NO _x	mg/Nm ³ na 10% O ₂	221	221	230	243	-



Slika 84. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka



Slika 85. NO_x emisije u ovisnosti o pretičku zraka

Mjerenjem određeno smanjenje emisija CO ugradnjom lamelnog umetka iznosi minimalno 30%. Također se pokazalo da konstrukcijska izmjena nije imala značajan utjecaj na NO_x emisije.

Mjerenom smanjenje emisija CO u točki za koju je proveden postupak numeričkog modeliranja iznosi 209 mg/Nm³ (svedeno na 10% O₂ u suhim dimnim plinovima). Isto smanjenje dobiveno računalnom simulacijom iznosi 228 mg/Nm³ (svedeno na 10% O₂ u suhim dimnim plinovima), čime je potvrđeno da rezultate dobivene numeričkom simulacijom možemo smatrati realnim prikazom odvijanja procesa „naknadnog“ izgaranja u lamelnom umetku.

Kao i za slučaj ugradnje saćastog umetka može se pretpostaviti da se ugradnjom lamelnog umetka za naknadno izgaranje može ostvariti optimalno izgaranje s manjim pretičkom zraka u odnosu na slučaj bez. Ostvarene emisije CO u analiziranom području u pravilu zadovoljavaju zahtjeve klase 5 prema [7].

Usporedba analiziranih konstrukcijskih izmjena na smanjenje CO emisija

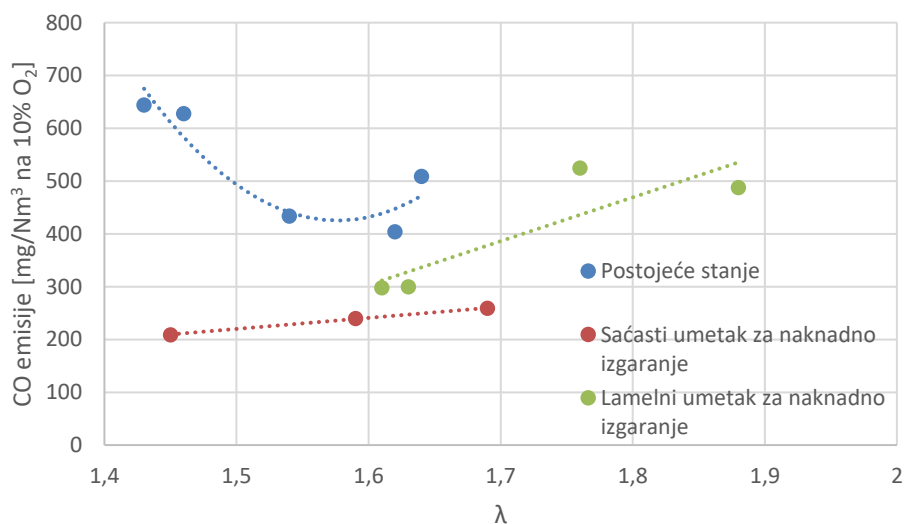
Pozitivan učinak na smanjenje emisija CO pokazali su oba analizirana umetka (slika 86). Nešto veće smanjenje emisija CO i „stacionarnije izgaranje“ (manje oscilacije mjerenih vrijednosti tijekom jedne periode, slika 87) pokazalo je konstrukcijsko rješenje s ugrađenim saćastim umetkom. Također, vidljivo je kako su veća smanjenja emisija CO ostvarena prilikom izgaranja s pretičcima zraka kod kojih su prilikom izgaranja bez ugrađenih umetaka ostvarene veće emisije CO (tablica 14). Time su potvrđeni zaključci dobiveni numeričkim simulacijama (slika 75) koji su također predvidjeli da se veće smanjenje emisija postiže kod većih molnih udjela CO na ulazu u umetak. Važno je napomenuti da slika 75, koje su izvedene za isti pretičak zraka i temperature dimnih plinova nisu direktno usporedive s rezultatima danim u tablici 22 (različite temperature i pretičci zraka) .

Tablica 22. Sumarni prikaz ostvarenih smanjenja CO emisija u ovisnosti o CO emisijama bez ugrađenih umetaka za naknadno izgaranje

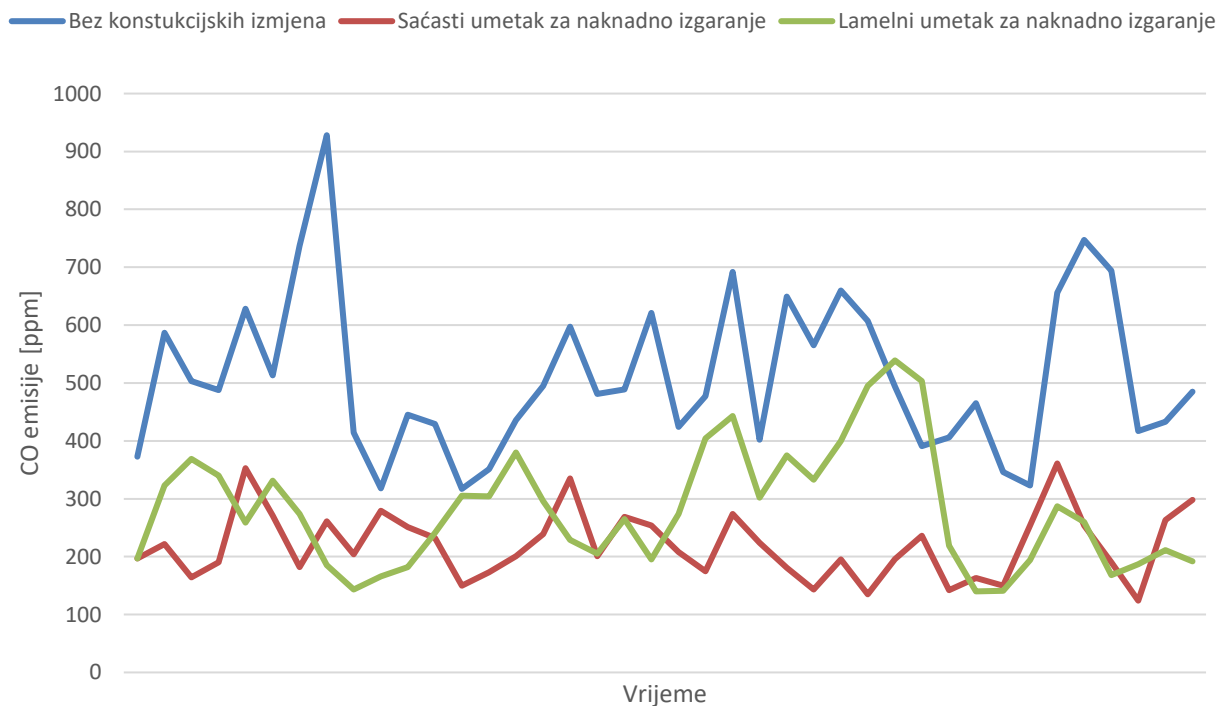
Razina CO emisija bez ugrađenih umetaka	Smanjenje CO emisija (%)
Saćasti umetak za naknadno izgaranje	
400-450 mg/Nm ³ na 10% O ₂	> 40
450-550 mg/Nm ³ na 10% O ₂	> 50
600-700 mg/Nm ³ na 10% O ₂	> 70
Lamelni umetak za naknadno izgaranje	
400-450 mg/Nm ³ na 10% O ₂	> 30
450-550 mg/Nm ³ na 10% O ₂	> 40

Nadalje, vidljivo je da je nagib krivulje ostvarenog smanjenja CO emisija lamelnog umetka veći od onog za saćasti. To znači da će se na većim pretičcima zraka povećavati razlika u ostvarenom smanjenju emisija između ta dva umetka. Takvo ponašanje može se pripisati

izmjeni topline i tvari okomito na smjer strujanja. Povećanjem pretička zraka raste ukupni protok dimnih plinova, brzina strujanja dimnih plinova i Reynoldsov broj. Kako je porast Reynoldsova broja usko povezan s porastom izmjene topline i tvari, može se pretpostaviti da se porastom Reynoldsova broja intenzivira hlađenje centralnih dijelova fluida u umetku (opisano u poglavlju 4.6.3).



Slika 86. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka



Slika 87. Vremenski prikaz CO emisija

Iako numeričke simulacije predviđaju slično smanjenje emisija CO, mjerenjem je veće smanjenje emisija postignuto sa saćastim umetkom. Rezime usporedbe saćastog i lamelnog umetka za naknadno izgaranje (numerička simulacija i mjerenja) je dan u nastavku:

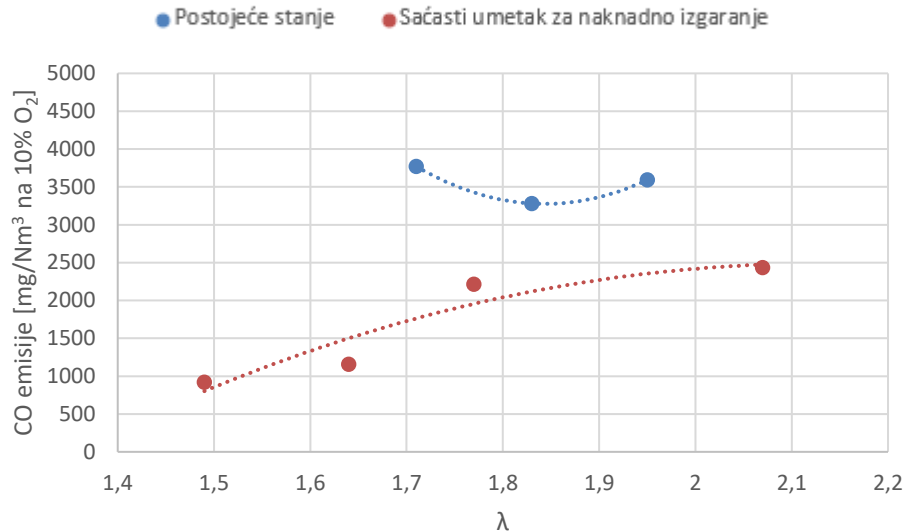
- Numeričkom simulacijom je utvrđen veći porast temperature dimnih plinova unutar saćastog, u odnosu na zanemarivi kod lamelnog umetka (slike 70b i 77d).
- Numeričkom je simulacijom je utvrđen veći porast disipacije turbulentne kinetičke energije (ϵ) unutar saćastog umetka (slike 71 i 78b).
- Kao posljedica veće kontaktne površine (umetak/dimni plinovi) prilikom korištenja saćastog umetka ostvareno je „stacionarnije izgaranje“.
- Sve to ukazuje na potrebu za dodatnim usavršavanjem konstrukcije lamelnog umetka (npr. ugradnja dodatnih vertikalnih pregrada), što je u planu za daljnja istraživanja.

4.7.2 Peleti iz slame uljane repica (PUR)

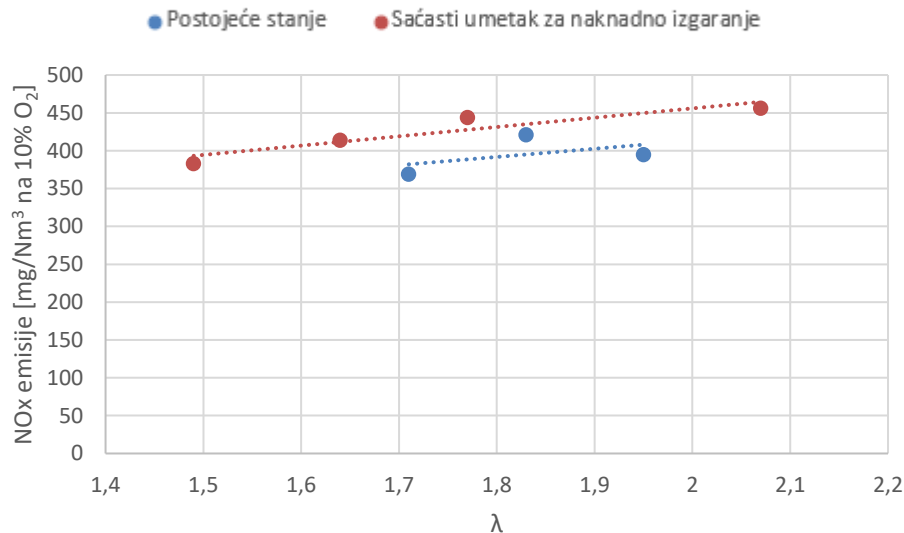
Cilj ovog ispitivanja je istražiti utjecaj pretička zraka (λ) i različitih emisija CO na termokemijske procese unutar saćastog umetka za naknadno izgaranje prilikom izgaranja PUR. U ovoj fazi, ispitivanja za slučaj lamelnog umetka topline nisu provedena zbog toga što je uočena potreba za daljnjim razvojem (preinaka kojom će se ostvariti manji hidraulički promjer reducirati izmjena topline i tvari između centralnih i hladnijih rubnih dijelova). No, ne očekuju se značajno različiti rezultati od onih za saćasti umetak s obzirom na slične rezultate dobivene prilikom izgaranja drvnih peleta (numerički i eksperimentalno). Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 23 te su usporedni dijagramima (sa slučajem bez umetka) dani na slikama 88 i 89.

Tablica 23. Rezultati detaljnih ispitivanja peleta iz slame uljane repice nakon ugradnje saćastog umetka za naknadno izgaranje

Točka ispitivanja		1.	2.	3.	4.	Granične vrijednosti (Klasa 3/4/5)
						[7]
λ	-	1,49	1,64	1,77	2,07	-
Temperatura dimnih plinova na izlazu	°C	183,4	186,4	182,9	186,0	-
CO	mg/Nm ³ na 10% O ₂	920	1.157	2.218	2.435	3.000/1.000/500
NO _x	mg/Nm ³ na 10% O ₂	383	414	444	456	-



Slika 88. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka



Slika 89. NO_x emisije u ovisnosti o pretičku zraka

Mjerenjem određeno smanjenje emisija CO ugradnjom sačastog umetka topline iznosi minimalno 30%. Na ostalim radnim točkama smanjenje emisija CO je još značajnije (gdje su veće emisije CO bez konstrukcijskih izmjena), što je sukladno zaključcima dobivenim dijagramom na slici 75 i kod ispitivanja drvnih peleta (tablica 22).

Nadalje, pokazalo se da ugradnja umetka omogućava optimalno izgaranje s manjim pretičkom zraka što dovodi do još dodatnog smanjenja emisija CO. U analiziranom području, ostvarene emisije CO ispod su granične vrijednosti za klasu 3, a za $\lambda=1,49$ ispod granične vrijednosti za klasu 4 prema [7]. Već je prije naglašeno da smanjenje emisija CO u kombinaciji s manjim

pretičkom zraka doprinosi većoj toplinskoj učinkovitosti rada kotla. S obzirom na to da ugradnja sačastog umetka omogućava rad kotla s manjim pretičkom zraka a time i dodatno manjim emisija CO (svedene na referentne uvjete), mjerenja su pokazala da se s predloženom konstrukcijskom izmjenom kotao prilikom izgaranja PUR može zadovoljiti klasu 4 prema graničnim vrijednostima emisija CO navedenim u [7].

Manje relativno smanjenje emisija CO u usporedbi s onima predviđenim za drvene pelete (slika 75) može se pripisati nižim temperaturama u ložištu ostvarenim prilikom izgaranja PUR (tablica 15) u usporedbi s ostvarenim temperaturama prilikom izgaranja drvnih peleta (tablica 14).

Iako se u ovom ispitivanju pokazalo da analizirana konstrukcijska izmjena ima utjecaj na NO_x emisije, isti se također može prepisati nejednolikosti kemijskog sastava korištenog goriva prilikom različitih ispitivanja.

4.8 Mjerenja emisije provedena od strane akreditiranog laboratorija

Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane akreditiranog laboratorija prikazana je slikama 96-99. Vremenski prikaz emisija polutanata (CO, NO, SO₂ i OGC) dan je u prilogu D.

Prilikom provedbe ispitivanja od strane akreditiranog laboratorija korišteni su drvni peleti istog proizvođača kao i kod prethodnih mjerenja, no koji su nabavljeni naknadno (PD2). Isto se ne odnosi na PUR. Dobiveni rezultati prikazani su tablično (tablica 24) i dijagramski (slika 90). Razlika u ostvarenim pretičcima zrak (λ) posljedica je nekonzistentnosti fizikalno-kemijskih svojstava korištenih peleta slame uljane repice (PUR).

Tablica 24. Rezultati završnog ispitivanja emisija

Točka ispitivanja		Drvni pelet (PD2)		Pelet uljane repice (PUR)		Granične vrijednosti (Klasa 3/4/5) [7]
		A	B	A	B	
λ	-	1,85	1,79	1,97	2,26	-
Toplinski učin	kW	24,0	23,6	21,2	21,9	-
Temperatura dimnih plinova	°C	170,0	163,4	168,2	151,1	-
CO	mg/Nm ³ na 10% O ₂	973	272	3.221	1.879	3.000/1.000/500
NO _x	mg/Nm ³ na 10% O ₂	202	187	433	425	-
SO ₂	mg/Nm ³ na 10% O ₂	5,9	5,3	36	32	-
OGC	mg/Nm ³ na 10% O ₂	11	10	13	14	100/30/ 20
Prašina	mg/Nm ³ na 10% O ₂	87	59	678	622	150/60/40 200*

* granična vrijednost za kotlove koji koriste nedrvnu biomasu

A – dobivene vrijednosti se odnose na kotao bez umetka

B – dobivene vrijednosti se odnose na kotao sa sačastim umetkom za naknadno izgaranje

Prilikom izgaranja PUR s ugrađenim sačastim umetkom za naknadno izgaranje ostvaren se veći učin ($\approx 3\%$) uz nižu izlaznu temperaturu dimnih plinova (13,1 °C) i veći pretičak zraka za izgaranje ($\approx 15\%$). Postizanje niže izlazne temperature dimnih plinova uz veći pretičak zraka (i manje CO emisije) može se učiniti da je u suprotnosti s prethodnim zaključcima. Sigurno je da

se ovakvo ponašanje jednim dijelom može pripisati varijaciji fizikalno-kemijskih svojstava peleta. Za razliku od izgaranja PD2, a s obzirom na značajno više emisije CO možemo pretpostaviti da će do značajnijih brzina kemijskih reakcija izgaranja dolazi i u cijelom konvektivnom dijelu kotla. Iako će koeficijent brzina reakcija prema Arrheniusovom izrazu (2.59) biti relativno nizak (zbog nižih temperatura dimnih plinova u konvektivnom dijelu), Arrheniusova brzina odvijanja reakcija (2.58) će ipak biti veća u odnosu na onu kod izgaranja PD2 upravo zbog većih molarnih koncentracija neizgorenih plinova ostvarenih prilikom izgaranja PUR. Ugradnjom umetka, osim što je ostvareno odvijanje većeg broja reakcija izgaranja (manje emisije CO), postignuto je da do njih dolazi ranije (u ugrađenom umetku). To ujedno znači da dolazi do i ranijeg oslobađanja kemijske energije sadržane u neizgorenim plinovima i većeg toplinskog učina. Kao posljedica većeg ostvarenog toplinskog učina temperatura dimnih plinova na izlazu može biti niža. Temeljem toga može se zaključiti kako, osim smanjenja emisija, ugradnjom umetka povećavamo toplinsku učinkovitost toplovodnog kotla i to na sljedeće načine:

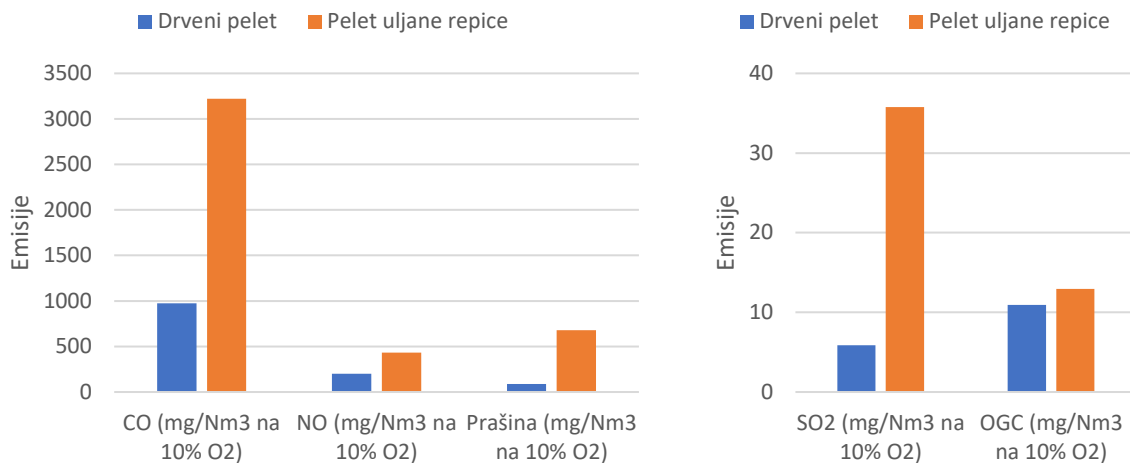
- kao posljedica smanjenja emisija neizgorenih plinova
- kao posljedica ostvarivanja optimalne točke izgaranja na manjem pretičku zraka
- kao posljedica ranijeg oslobađanja kemijske energije sadržane u neizgorenim plinovima

Prilikom izgaranja PD2 uz ugradnju sačastog umetka za naknadno izgaranje postignuto je:

- emisije CO ispod granične vrijednosti za klasu 5 (bez umetka klasa 4)
- emisije OGC ispod granične vrijednosti za klasu 5 (bez umetka isto klasa 5)
- emisije prašine ispod granične vrijednosti za klasu 4 (bez umetka klasa 3)

Prilikom izgaranja PUR uz ugradnju sačastog umetka za naknadno izgaranje postignuto je:

- emisije CO ispod granične vrijednosti za klasu 3 (bez umetka iznad granične vrijednosti za klasu 3)
- emisije OGC ispod granične vrijednosti za klasu 5 (bez umetka isto klasa 5)
- emisije prašine iznad granične vrijednosti za klasu 3 (potrebna ugradnja dodatnih filtera)

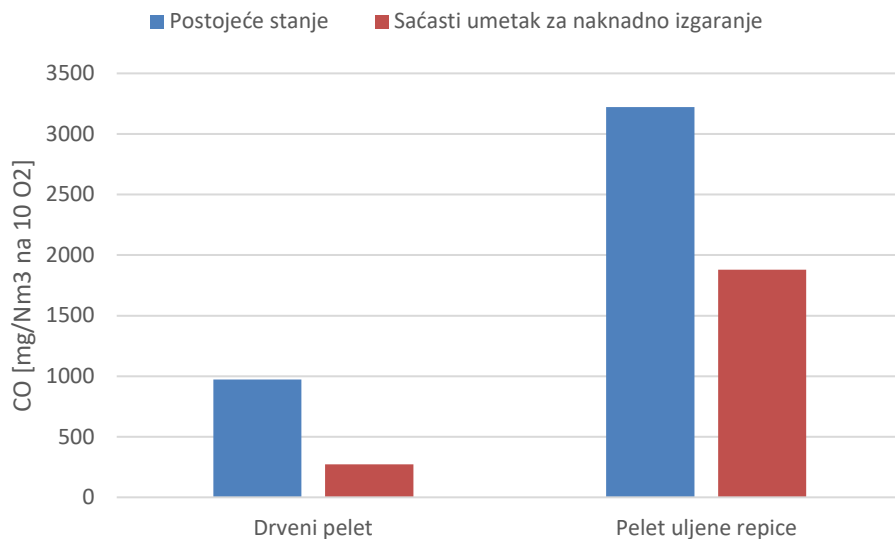


Slika 90. Usporedba emisija onečišćujućih tvari – kotao bez umetka

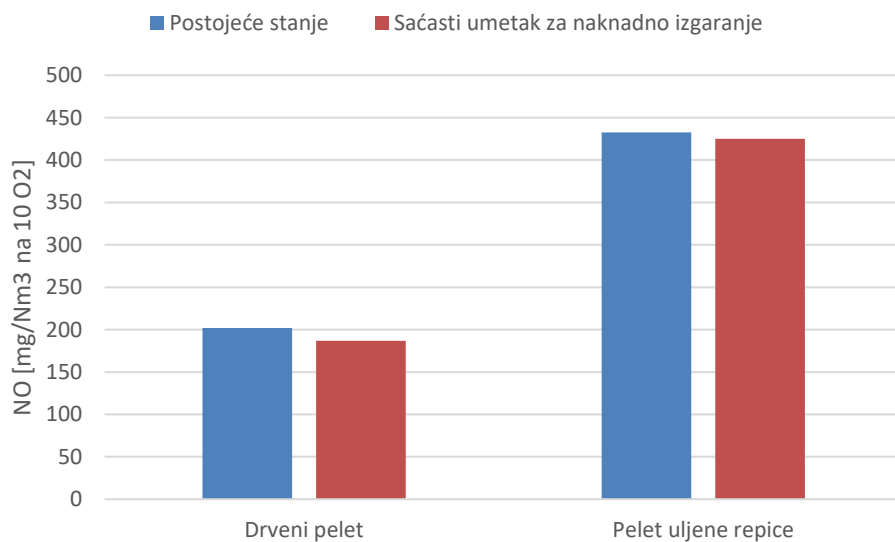
Iz dijagrama na slici 90 može se primijetiti porast emisija onečišćujućih tvari u okoliš PUR u odnosu na PD2. Svedeno na referentne uvjete izgaranjem PUR ostvaruju se 3,3 puta veće emisije CO, NO_x emisije su 2,1 puta veće, SO₂ emisije su 6,1 puta veće te emisije prašine su 7,8 puta veće. Emisije OGC-a kod oba goriva su otprilike iste i one su na vrlo niskim razinama.

Iako su obzirom na CO emisije očekivane veće emisije OGC-a, u slučaju PUR, izmjerene niske razine OGC-a mogu se pripisati različitom ligno-celuloznom sastavu slame uljane repice u odnosu na drvo. Može se pretpostaviti da hlapivi plinovi koji nastaju raspadom organske strukture slame uljane repice lakše izgaraju, u odnosu na iste koji nastaju raspadom organske strukture drvene biomase. U odnosu na rezultate prvog mjerenja (tablica 11) ostvareno je smanjenje NO_x emisija (3-10%) kao posljedica ostvarivanja optimalnog izgaranja s manjim pretičkom zraka. Omjer SO₂ emisija ostvarenih izgaranjem PUR i onih ostvarenih izgaranjem PD2 više-manje je konzistentan omjeru sadržaja S u gorivu. Značajno veće emisije prašine kod PUR (najvećim dijelom su soli zbog su emitirane čestice pretežno bijele, slika 10) također su, najvećim dijelom, posljedica sastava goriva.

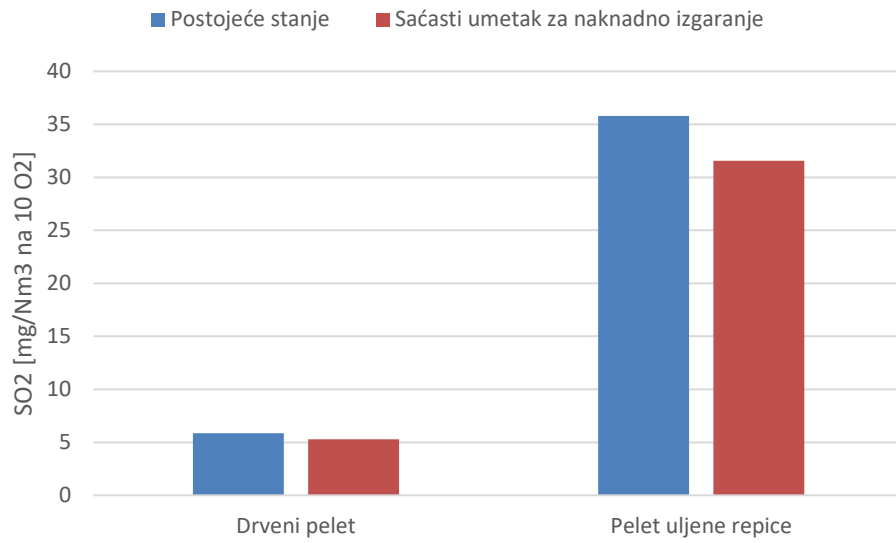
Učinak ugrađenog saćastog umetka za naknadno izgaranje na smanjenje emisije onečišćujućih tvari dimnim plinovima prikazani su na sljedećim dijagramima.



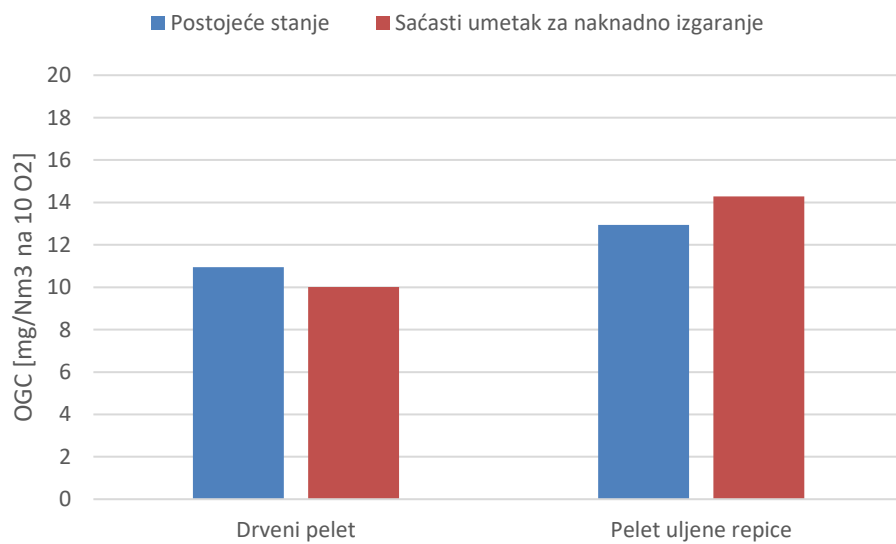
Slika 91. CO emisije s/bez umetaka



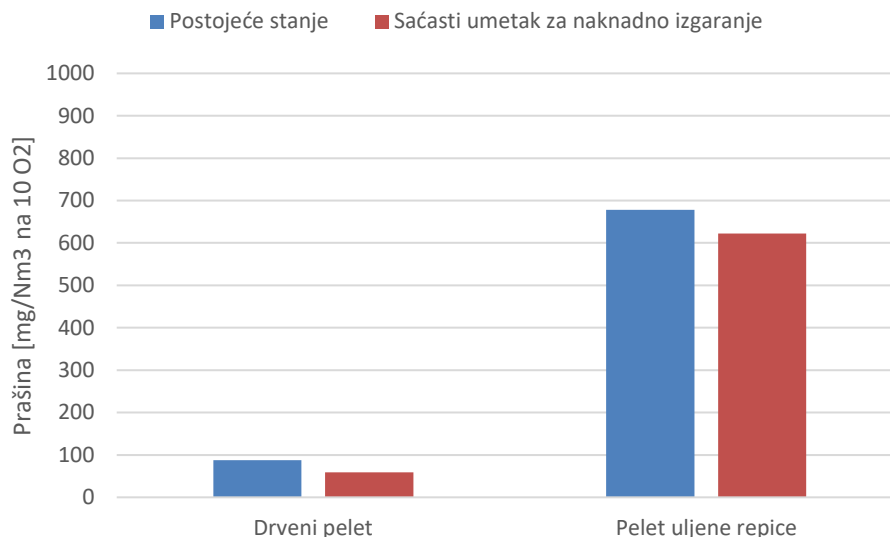
Slika 92. NO emisije s/bez umetaka



Slika 93. SO₂ emisije s/bez umetaka



Slika 94. OGC emisije s/bez umetaka



Slika 95. Emisije prašine s/bez umetaka

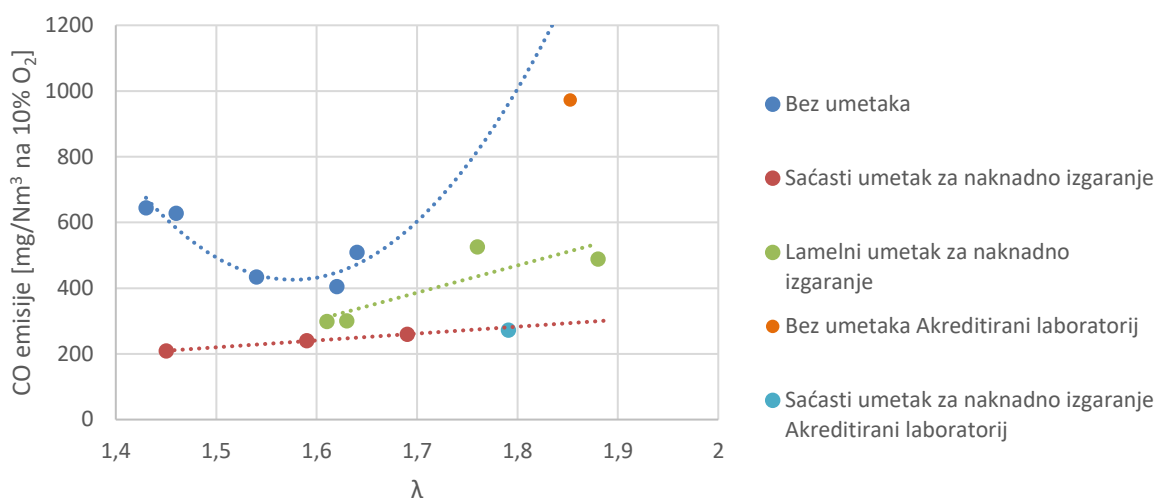
Ugradnjom sačastog umetka za naknadno izgaranje ostvareno je za slučaj izgaranja PD2 smanjenje emisija CO u iznosu od 701 mg/Nm³ (72%) svedeno na referentni sadržaj O₂ u dimnim plinovima. Utvrđeno smanjenje emisija veće je od prethodno analiziranih (numerički i eksperimentalno) iz razloga što je ispitivanje provedeno na radnoj točki u kojoj se ostvaruju veće emisije CO, a za pretpostaviti je i višim temperaturama. Na slici 75 numerički je pokazano da je učinak umetka na smanjenje emisija veći što je emisije CO veće.

Za slučaj izgaranja PUR ostvareno je smanjenje emisija CO u iznosu od 1.342 mg/Nm³ (41,7%) svedeno na referentni sadržaj O₂ u dimnim plinovima. Manje relativno smanjenje emisija CO može se pripisati nižim temperaturama u ložištu ostvarenim prilikom izgaranja PUR u usporedbi s onima ostvarenim prilikom izgaranja PD2.

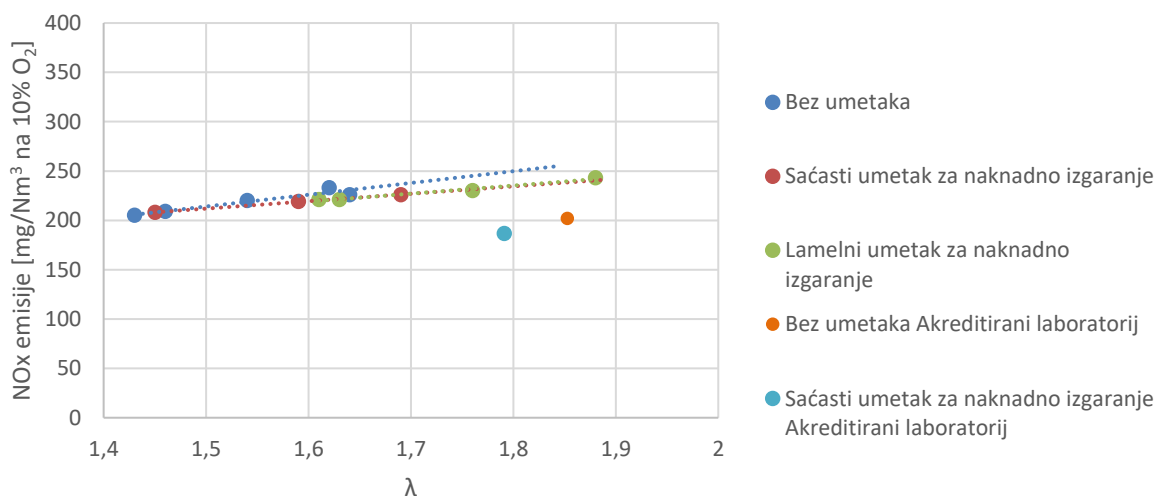
Nadalje, ugradnjom sačastog umetka ostvareno je smanjenje emisija prašine za 28 mg/Nm³ (32,2%) za slučaj izgaranja PD2, odnosno 56 mg/Nm³ (8,3%) za slučaj izgaranja PUR. Mogući razlozi dvostruko većem apsolutno smanjenje emisija prašine prilikom izgaranja PUR su kao prvo značajno veća emisija čestica te činjenica da su kod izgaranja PUR emitirane čestice većih dimenzija.

Analizirana konstrukcijska izmjena nije imale značajniji utjecaj na emisije NO_x, SO₂, OGC. Razlike u vrijednostima emisija tih parametara prvenstveno su posljedica varijacije fizikalno-kemijskih svojstava pojedine vreće korištenih peleta.

Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane akreditiranog laboratorija za PD2 prikazana je slikama 96 (CO emisije) i 97 (NO_x emisije). Iako su mjerenja Akreditiranog laboratorija provedena na većim pretičcima zraka, može se primijetiti da u slučaju CO emisija ona ipak prate trend krivulja koja su određene prethodno. U slučaju NO_x emisija može se uočiti malo odstupanje u izmjerenim vrijednostima (mjerenja Akreditiranog laboratorija daju niže vrijednosti emisija). Kao razlog odstupanja može se navesti princip rada korištenih analizatora. Tako analizator Akreditiranog laboratorija koristi NDIR metodu koja je daleko preciznija od elektrokemijske temeljem koje radi analizator u vlasništvu Fakulteta.

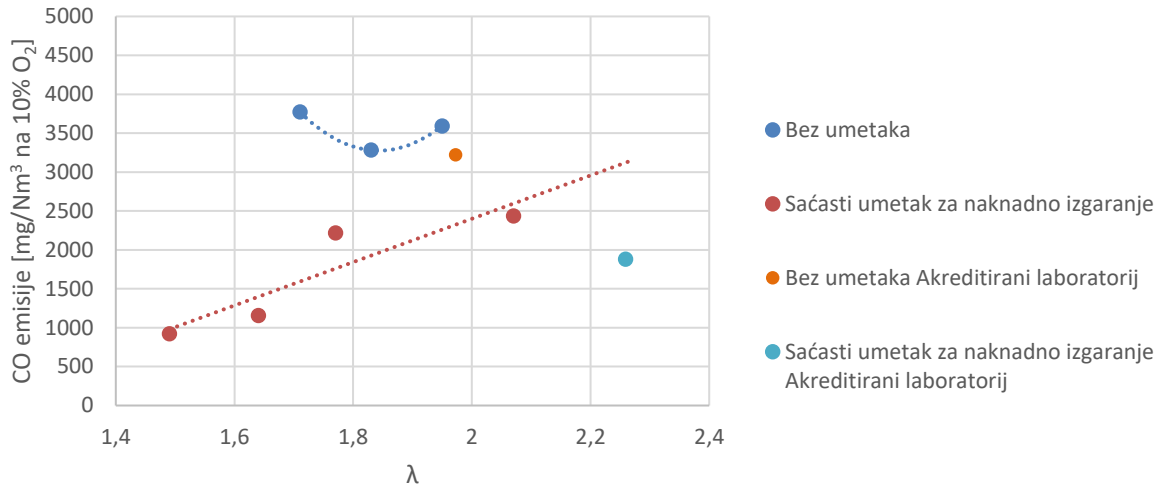


Slika 96. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PD2 – CO emisije

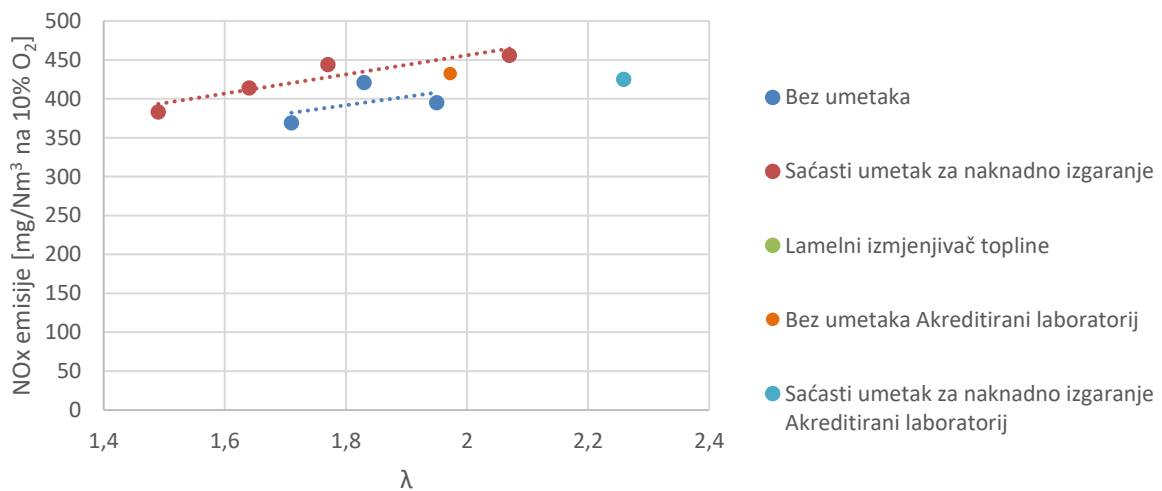


Slika 97. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PD2 – NO_x emisije

Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane akreditiranog laboratorija za PUR prikazana je slikama 98 (CO emisije) i 99 (NO_x emisije). Uočena odstupanja najvećim dijelom su posljedica značajne nekonzistentnosti fizikalno-kemijskih svojstava korištenog goriva.



Slika 98. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PUR – CO emisije



Slika 99. Usporedba vlastitih mjerenje emisija te onih provedenih od strane Akreditiranog laboratorija za PUR – NO_x emisije

5. PRIJEDLOG KONSTRUKCIJSKIH IZMJENA

5.1 Ugradnja plamenika koji omogućuje izgaranje peleta s većim sadržajem pepela

Izgaranje peleta iz poljoprivredne biomase nije moguće korištenjem klasičnih plamenika namijenjenih za izgaranje drvnih peleta, već je potrebno koristiti plamenike koji omogućuju izgaranje goriva s većim sadržajem pepela niske temperature taljenja. Za tu svrhu na tržištu postoje dva tipa plamenika:

- a) Rotacijski plamenik sa samočistećom rešetkom (slika 19)
- b) Plamenik s pomičnom rešetkom (slika 100)



Slika 100. Plamenik s pomičnom rešetkom [92]

Za očekivati je da plamenik s pomičnom rešetkom, konstrukcije kao na slici 100 ostvaruje veće emisije polutanata u odnosu na rotacijski plamenik, kao posljedica niže temperature izgaranja uzrokovane odavanjem većeg toplinskog tokom s površine goriva koje izgara (u usporedbi s rotacijskim plamenikom). Kao posljedica toga takvi plamenici će zahtijevati šamotiranje djela ložišta što dovodi do snižavanja toplinskog učina kotla za ostvarivanje iste toplinske učinkovitosti.

5.2 Ugradnja saćastog umetka za naknadno izgaranje

Ugradnjom saćastog umetka za naknadno izgaranje (slika 24) smanjuju se emisije CO i emisije prašine te omogućuje rad plamenika s manjom količinom zraka za izgaranje (manji pretičak zraka). Sve to ima za posljedicu porast toplinske učinkovitosti kotla za istu ubačenu količinu goriva.

Korišteni saćasti umetak izrađen je od keramike. Prolazi dimnih plinova izvedeni su obliku šesterokuta promjera opisane kružnice 6 mm, a debljina granične stijenke između prolaza iznosi 1 mm. Ukupna duljina umetka iznosi 50 mm.

Izgaranje krutog goriva, zbog nekontinuirane dobave (doziranje u intervalima) i sastava, karakteriziraju prodori većeg pretička zraka koji sa sobom odvodi veće količine neizgorenih plinova niže temperature (u odnosu na ostvarene prosječne vrijednosti). Mogućnost akumulacije topline u kombinaciji s velikom dodirnom površinom (struktura šesterokuta) omogućuje stabilnije izgaranje, gdje unutar kanala malog hidrauličkog promjera dolazi do njihovog naknadnog izgaranja.

Mjesto ugradnje određeno je temeljem podataka dobivenih numeričkom simulacijom i mjesta pogodnih za ugradnju u korištenom kotlu. Načelna smjernica je ugradnja na mjesta s temperaturom dimnih plinova većom od 500 °C kako bi se postigla dovoljna brzina odvijanja kemijskih reakcija.

5.3 Ugradnja lamelnog umetka za naknadno izgaranje

Ugradnjom lamelnog umetka za naknadno izgaranje (slika 27) ostvaruje se slično ili manje smanjenje emisija CO u odnosu na sačasti umetak te također omogućuje rad plamenika s manjom količinom zraka za izgaranje (manji pretičak zraka). Sve to ima za posljedicu porast toplinske učinkovitosti kotla za istu ubačenu količinu goriva.

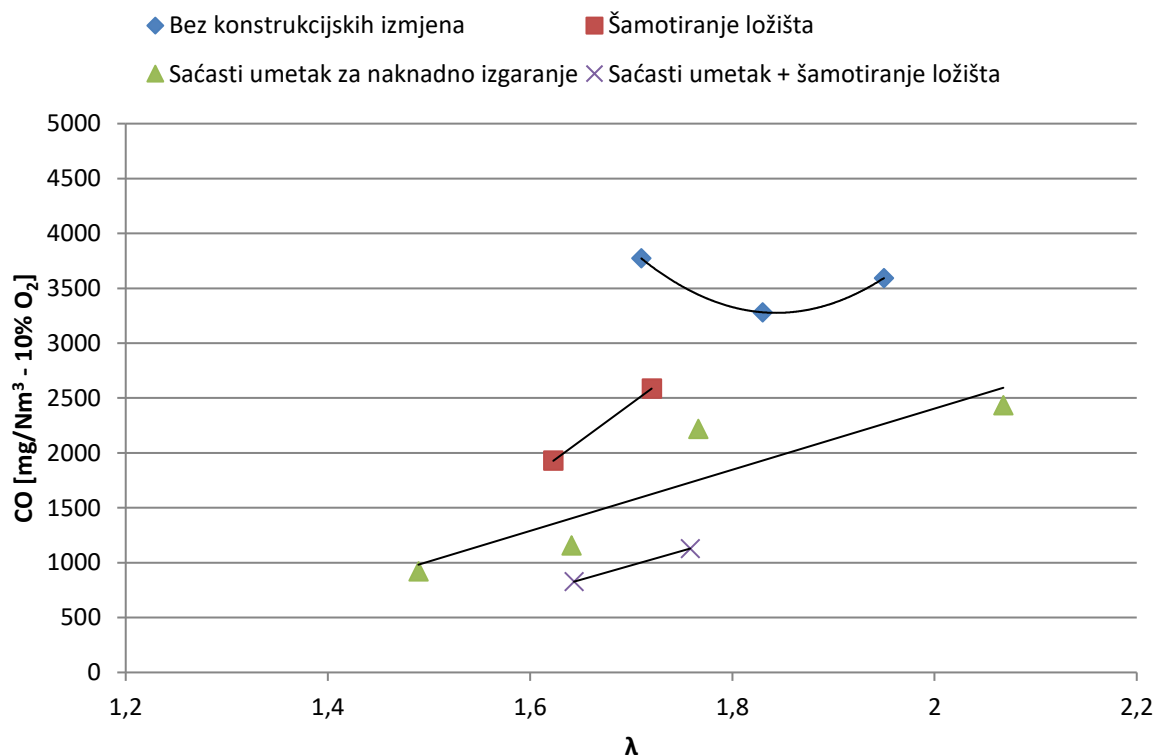
Korišteni lamelni umetak izrađen je od čeličnog lima u obliku V-valova. Poprečni presjek kroz koji struje dimni plinovi je pravokutnog presjeka dimenzija 4,6x284 mm. Ukupna duljina umetka iznosi 50 mm.

V-valovite ploče, osim funkcije akumulacije topline za cilj prvenstveno imaju ostvariti intenzivnije miješanje između neizgorelih plinova i kisika te na taj način dodatno pojačati njihovo izgaranje.

Mjesto ugradnje isto je kao i za sačasti umetak, a određeno je temeljem podataka dobivenih numeričkom simulacijom i mjesta pogodnih za ugradnju u korištenom kotlu. Također, može se očekivati da će lamelni umetak ostvarivati veće smanjenje emisija prašine te, s obzirom na jednostavnost izrade, biti jeftiniji od sačastog.

5.4 Šamotiranje ložišta

Šamotiranje ložišta dobro je poznata mjera za smanjenje emisija onečišćujućih tvari, naročito produkata nepotpunog izgaranja. Negativna posljedica šamotiranja je smanjenje ogrjevnog učinka kotla. Mjera je djelomično istražena u sklopu ovog istraživanja (samo za slučaj izgaranja peleta iz poljoprivredne biomase), no zbog značajnog utjecaja na smanjenje toplinske učinkovitosti (za istu količinu ubačenog goriva) nije detaljnije analizirana. Učinak šamotiranja na smanjenje emisija CO prikazan je na slici 101.



Slika 101. CO emisije u ovisnosti o pretičku zraka – pelet uljane repice (bez konstrukcijskih izmjena, šamotiranje ložišta, sačasti umetak za naknadno izgaranje, sačasti umetak + šamotiranje ložišta)

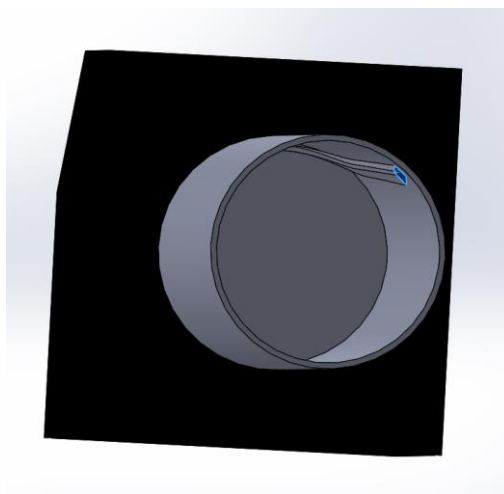
Na dijagramu na slici 101 jasno je vidljiv utjecaj šamotiranja ložišta na smanjenje CO emisija, odnosno utvrđeno je da se već samim šamotiranjem postižu zahtjevi za klasu 3 toplovodnih kotlova (u pogledu emisija CO). Također, jasno je vidljivo da je u slučaju izgaranja peleta iz poljoprivredne biomase, postizanje klase 5 (u pogledu emisija CO) moguće jedino kombinacijom šamotiranja i ugradnje serije umetaka sličnih konstrukcija kao što su analizirani u ovom radu.

5.5 Ugradnja mehaničke prepreke unutar plamenika tzv. „strugač“

Ispitivanjem je utvrđeno da niti korištenjem rotacijskog plamenika sa samočišćenom rešetkom nije u potpunosti moguće izbjeći probleme povezane s velikom količinom pepela (kao što je slučaj kod poljoprivredne biomase). Korištenje peleta iz poljoprivredne biomase zahtjeva vrlo čestu potrebu za ručnim čišćenjem plamenika (slika 102). Učestalost čišćenja može se smanjiti ugradnjom fiksne prepreke (tzv. strugača) unutar samog plamenika (slika 103), koji bi uslijed rotacije plamenika odvajao po obodu nakupljeni ostatak. Za očekivati je da će se sa „strugačem“ i ugradnjom dodatnog fotosenzora (poglavlje 5.8) moći ostvariti dulji kontinuirani period izgaranja peleta iz poljoprivredne biomase (6 sati i više).



Slika 102. Nakupljivanje i lijepljenje pepela na rešetci plamenika



Slika 103. Prikaz predloženog konstrukcijskog rješenja – ugradnje mehaničke prepreke (strugača) u plamenik

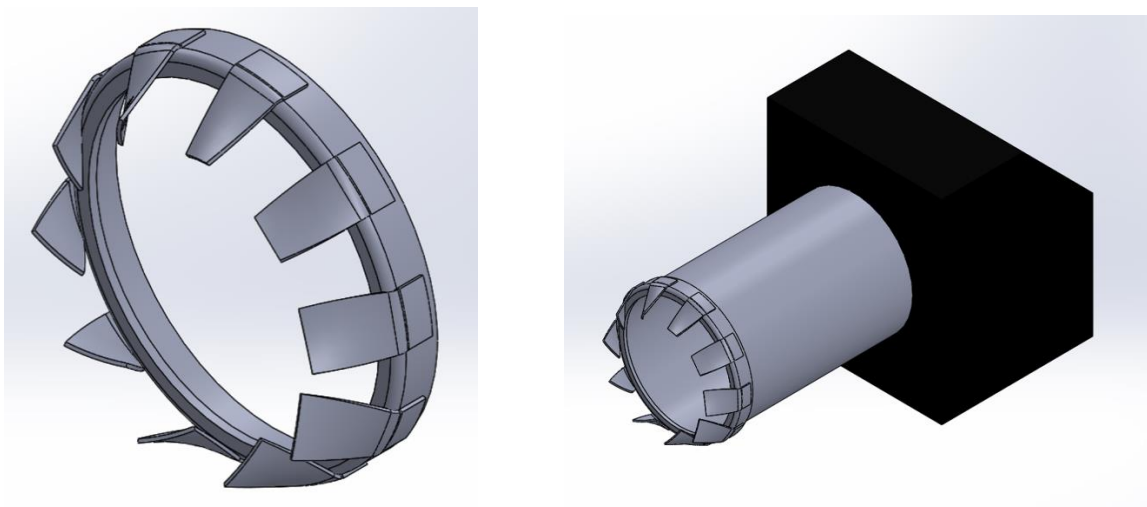
5.6 Veći prostor za skupljanje pepela uz veći razmak između rešetki

Korišteni peleti iz poljoprivredne biomase imaju 25/23/15 puta veću količinu pepela u odnosu na A1 drvene pelete. Jasno je da takvo gorivo zahtjeva i veći prostor za njegovo odlaganje. Također, poželjno je da kotlovi namijenjeni za izgaranje poljoprivredne biomase budu opremljeni sa sustavom automatskog vađenja pepela iz kotla.

Također, potrebno je ostvariti veći razmak između rešetki. Time bi se omogućilo propadanje aglomeriranog ostatka od izgaranja u pepeljaru te potencijalno smanjile NO_x emisije koje nastaju kao posljedica katalitičkih reakcija na površini ostatka od izgaranja.

5.7 Ugradnja nastavka za miješanje i vrtloženje na izlasku iz plamenika

Analizom rezultata numeričke simulacije (slike 57a, 58c i 61) te vizualnim promatranjem plamena koji izlazi iz plamenika, jasno je vidljivo područje prodora „neiskorištenog“ zraka. S obzirom da je cilj ostvariti što intenzivnije miješanje na što višim temperaturama, predlaže se ugradnja nastavka za miješanje i vrtloženje na izlasku iz plamenika (slika 104).



Slika 104. Nastavak za miješanje i vrtloženje

5.8 Ugradnja dodatnog fotosenzora

Izgaranje peleta iz poljoprivredne biomase uzrokovalo je probleme u regulaciji korištenog plamenika. Zbog velike količine pepela, često i niske temperature taljenja, u plameniku se nalazi znatno veći volumen mase male poroznosti koja izgara (uzrokovane aglomeracijom i sljepljivanjem pepela) u odnosu na situaciju kad izgaraju drveni peleti. Isto je često znalo sprječavati detekciju plamena na fotosenzoru regulacije plamenika, zbog čega nije bilo moguće ostvariti kontinuirani rad plamenika. Nakon što ne dođe do detekcije plamena, regulacija vodi plamenik u ponovno paljenje, iako plamen postoji. Kao rješenje nameće se ugradnja više fotosenzora unutar kotla gdje je regulaciji za upravljanje procesom izgaranja dovoljna informacija samo s jednog od instaliranih fotosenzora.

5.9 Ugradnja sustava filtera na izlasku iz kotla

Izmjerena emisija prašine korištenjem peleta uljane repice veća je više od 3 puta od gornje vrijednosti propisane EN normom [7]. Izmjerene količine emisija prašine zahtijevaju ugradnju sustava filtera nakon kotla, počevši od ciklona kao predfiltra te nakon toga elektrostatskog.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu izneseno je ukupno devet smjernica (konstrukcijskih i regulacijskih) za izradu prototipa komercijalnog kotla na biomasu iz poljoprivrednih ostataka koji zadovoljava sve zahtjeve EN normi u pogledu emisija onečišćujućih tvari u okoliš, toplinske učinkovitosti, konstrukcije i načina korištenja. Cjelokupno istraživanje obuhvaćalo je tri faze: analiza i odabir prikladnog goriva, numeričko modeliranje procesa izgaranja biomase u obliku peleta u toplovodnom kotlu i umetcima za naknadno izgaranje uz eksperimentalnu validaciju te razvoj smjernica za konstrukciju komercijalnog prototipa toplovodnog kotla koji kao gorivo koristi ostatke iz poljoprivredne proizvodnje.

Analiza i odabir prikladnog goriva

U sklopu analize i odabira prikladnog goriva provedena su ispitivanja s ukupno 4 vrste goriva: peleta iz slame pšenice, peleta iz slame pšenice i ljuske lješnjaka, peleta iz slame uljane repice te drvnih peleta. Ispitivanja su uključivala određivanje njihovih fizikalno-kemijskih svojstva, temperature taljenja pepela te termo-kemijske karakteristika prilikom izgaranja u toplovodnim kotlovima. Utvrđeno je da korišteni peleti iz slame pšenice i ljuske lješnjaka te peleti iz slame uljane repice ne zadovoljavaju zahtjevima iz ISO 17225-6:2014 u pogledu mehaničke izdržljivosti i nasipne gustoće, što se pokazalo da uzrokuje velike probleme u transportu peleta (od spremnika do plamenika) te ponekad zapunjivanje samog plamenika što uzrokuje probleme u njegovoj regulaciji putem fotosenzora. Drugi problem je nekonzistentnost kemijsko-fizikalnih svojstva korištenih peleta iz poljoprivredne biomase (naročito mehaničkih svojstva), koja se pokazala kao značajan problem u provedbi ovog istraživanja (naročito kod analize podataka). Sadržaj pepela analiziranih peleta iz poljoprivredne biomase veći je 14,7-25,3 puta od sadržaja pepela drvnih peleta. Sadržaj pepela peleta iz slame pšenice te slame pšenice i ljuske lješnjaka iznad je graničnih vrijednosti iz ISO 17225-6:2014 za pelete iz slame žitarica i za klasu A nedrvnih peleta. U pravilu, u usporedbi s drvnim peletima, peleti iz poljoprivredne biomase imaju veći sadržaj Cl, N i S, kao i sadržaj ostalih anorganskih elemenata. Sadržaj Cl kod peleta iz slame pšenice i ljuske lješnjaka iznad je gornje granične vrijednosti iz ISO 17225-6:2014. Temperature skupljanja pepela (SST) kod peleta koji u svom sastavu imaju pšenicu iznose 750-760 °C i značajno su niže od istih kod ostalih peleta (>1.400 °C). Najveće emisije CO utvrđene su za pelet iz slame pšenice i ljuske lješnjaka, dok su najveće emisije NO_x utvrđene za pelete iz slame uljane repice. Analizom ostatka nakon izgaranja utvrđeno je da kod goriva s

većim sadržajem pepela u ostatku ostaje i veća količina neizgorenog goriva. Temeljem cjelokupne analize, iako niti jedno od analiziranih goriva iz ostataka poljoprivredne proizvodnje ne zadovoljava sve zahtjeve, peleti iz slame uljane repice odabrani su kao tehnički najprikladnije gorivo za potrebe ovog istraživanja. Prilikom izgaranja tih peleta dolazilo je do najmanje aglomeracije i sljepljivanja pepela s gorivim elementima te su shodno tome problemi u regulaciji plamenika bili najmanji.

Nakon odabira prikladnog goriva, provedena su detaljna ispitivanja karakteristika izgaranja za drvene pelete i pelete iz slame uljane repice, gdje se kao parametar varirala količina zraka koji se dobavlja za izgaranje (pretičak zraka). Prilikom izgaranja peleta slame uljane repice, regulacija plamenika putem samo jednog fotosenzora se pokazala neprikladnom te je to glavni razlog zbog čega često provedba dugotrajnih mjerenja nije bila moguća.

Numeričko modeliranje procesa izgaranja biomase

U drugom dijelu rada provedeno je numeričko modeliranje procesa izgaranja drvene biomase u obliku peleta te izgaranja nastalih produkata rasplinjavanja drva i izgaranja drvnog ugljena. Podaci dobiveni detaljnim ispitivanjem karakteristika izgaranja korišteni su za kalibraciju i validaciju provedenog numeričkog modeliranja. Validirani model, koji se temelji na metodi kontrolnih volumena, obuhvaća procese izgaranja i prijelaza topline na strani dimnih plinova te je za razliku od ostalih dostupnih u literaturi primjenjiviji za korištenje u industriji jer ne zahtijeva implementaciju zasebnih numeričkih modela (preko UDF funkcija). Temeljem navedenog modela određeni su sastav i temperatura dimnih plinova unutar toplovodnog kotla te polja intenzivnijeg odvijanja kemijskih reakcija izgaranja. Ujedno su dobivene spoznaje o mehanizmima nastajanja tih polja odnosno parametrima koji utječu na intenziviranje brzine reakcija (turbulencija, temperature, udio neizgorelih plinova). Analizom dobivenih polja te uzimajući u obzir vezu između temperature dimnih plinova i brzine odvijanja kemijskih reakcija izgaranja, određeno je prikladno mjesto za ugradnju umetka za naknadno izgaranje dimnih plinova.

Smjernice za konstrukciju

Od ukupno devet smjernica za izradu komercijalnog prototipa toplovodnog kotla, u ovom istraživanju provedena je analiza njih dvije. Numeričkom i eksperimentalnom analizom dva umetka za naknadno izgaranje (lamelni i sačasti) kvantificirani su njihovi učinci na smanjenje emisija CO. Numeričkom analizom se pokazalo da je pojava naknadnog izgaranja posljedica

pojačanja turbulencije unutar umetka te kako je sama brzina izgaranja u njima ovisna o temperaturi dimnih plinova i udjelu neizgorenih plinova. Utvrđeno smanjenja emisije CO uz ugrađeni sačasti umetak iznosi minimalno 40% za korištenje drvnog peleta te minimalno 30% za korištenje peleta iz slame uljane repice. Određeno smanjenje emisija prašine iznosi 28 mg/Nm³ (32,2%) za drveni pelet i 56 mg/Nm³ (8,3%) za pelet slame uljane repice. Smanjenja emisije CO uz ugrađeni lamelni umetak iznosi minimalno 30% za korištenje drvnog peleta. Prednost lamelnog umetka, iako ostvaruje slično ili manje smanjenje emisija CO, je u jednostavnosti same izrade zbog čega se može očekivati da će biti jeftiniji.

Osim smanjenja emisija, utvrđeno je da ugradnjom analiziranih umetaka (na predloženo mjesto) povećavamo i toplinsku učinkovitost toplovodnog kotla i to kroz:

- smanjenje emisija neizgorenih plinova
- ostvarivanja optimalne točke izgaranja na manjem pretičku zraka
- ranije oslobađanje kemijske energije sadržane u neizgorenim plinovima

Na taj način je, uz ugradnju umetka i sustava za filtraciju dimnih plinova, moguće zadovoljiti sve zahtjeve EN normi u pogledu emisija onečišćujućih tvari u okoliš, toplinske učinkovitosti, konstrukcije i načina korištenja prilikom izgaranja ostataka iz poljoprivredne proizvodnje. Važna značajka predloženih umetaka za naknadno izgaranje je i u tome što se kao gotova rješenja mogu ugraditi u gotove sve rezidencijalne uređaje za izgaranje krutog goriva i na taj način smanjiti emisije štetnih tvari i povećati toplinsku učinkovitost.

Daljnja istraživanja

U sklopu daljnjih istraživanja planira se istražiti utjecaj lamelnog umetka (nakon konstrukcijskih izmjena) na smanjenje emisija štetnih tvari kod poljoprivredne biomase te utjecaj na smanjenje emisija prašine kod drvnog peleta.

Nadalje, planira se istražiti utjecaj analiziranih umetaka na smanjenje emisija OGC. Za potrebe tog istraživanja koristiti će se drveni pelet klase A2 prema ISO 17225-2:2014 uz ostvarivanje viših temperatura na ulazu u umetak. U konačnici, cilj je predložiti konstrukciju toplovodnog kotla sa serijom ugrađenih umetaka za naknadno izgaranje koji zadovoljava sve zahtjeve za klasu 5 prema HRN EN 303-5:2012 u pogledu emisija onečišćujućih tvari u okoliš uz korištenje drvnih peleta klase A2.

7. PRILOZI

PRILOG A. TABLICE

Tablica A.1. Prosječni sastav različite biomase [36]

Vrsta biomase	C	H	O	N	K	Ca	Mg	P	S	Cl
	% suhe tvari									
Smreka (s korom)	49,8	6,3	43,2	0,13	0,13	0,70	0,08	0,03	0,015	0,005
Bukva (s korom)	47,9	6,2	45,2	0,22	0,15	0,29	0,04	0,04	0,015	0,006
Toplola	0,475	6,2	44,1	0,42	0,35	0,51	0,05	0,10	0,031	0,004
Vrba	47,1	6,1	44,3	0,54	0,26	0,68	0,05	0,09	0,045	0,004
Slama pšenice	45,6	5,8	42,4	0,48	1,01	0,31	0,10	0,10	0,082	0,19
Slama ječma	47,5	5,8	41,4	0,46	1,38	0,49	0,07	0,21	0,089	0,40
Slama uljane repice	47,1	5,9	40,0	0,84	0,79	1,70	0,22	0,13	0,27	0,47
Slama kukuruza	45,7	5,3	51,7	0,65					0,12	0,35
Slama konoplje	46,1	5,9	42,5	0,74	1,54	1,34	0,20	0,25	0,10	0,20
Slama suncokreta	42,5	5,1	39,1	1,11	5,00	1,90	0,21	0,20	0,15	0,81
Miskantus	47,5	6,2	41,7	0,73	0,72	0,16	0,016	0,07	0,15	0,22
Radi usporedbe:										
Kameni ugljen	72,5	5,6	11,1	1,3					0,94	0,13
Mrki ugljen	65,9	4,9	23,0	0,7					0,39	0,1

Tablica A.2. Tehnički parametri izgaranja biomase [36]

Vrsta biomase	Donja ogrjevna vrijednost	Gornja ogrjevna vrijednost	Sadržaj pepela	Hlapiva tvar	Temperatura početak skupljanja pepela – SST [83]	Temperatura hemisfere pepela – HT [83]	Temperatura tečenja pepela [83]
	MJ/kg	MJ/kg	%	%	°C	°C	°C
Smreka (s korom)	18,8	20,2	0,6	82,9	1.426		1.583
Bukva (s korom)	18,4	19,7	0,5	84,0			
Toplola	18,5	19,8	1,8	81,2	1.335		1.475
Vrba	18,4	19,7	2,0	80,3	1.283		1.490
Slama pšenice	17,2	18,5	4,8	16,4	1.002	1.147	1.188
Slama ječma	17,5	18,5	4,8	77,3	980	1.113	1.1753
Slama uljane repice	17,1	18,9	6,7	76,8	1.273		1.403
Slama kukuruza	17,7	18,9	6,7	76,8	1.050	1.120	1.140
Slama konoplje	17,0	18,2	4,8	81,4	1.336	1.420	1.456
Slama suncokreta	15,8	16,9	12,2	72,7	839	1.178	1.270
Miskantus	17,6	19,1	3,9	77,6	973	1.097	1.170
Radi usporedbe:							
Kameni ugljen	29,7		8,3	34,7	1.250		
Mrki ugljen	20,6		5,1	52,1	1.050		

PRILOG B. EUROPSKI STANDARDI**B.1 Norme koje propisuju zahtjeve za kvalitetu peleta**

ISO 17225-2:2014 [52]

ISO 17225-2:2014 [52] utvrđuje klase kvalitete goriva i svojstva drvnih peleta proizvedenih od sljedećih sirovina:

- Drvo iz šuma i plantaža
- Ostaci od prerade drva
- Korišteno drvo koje nije kemijski tretirano

Norma ne uključuje termički obrađene pelete (toreficirani peleti). Svojstva drvnih peleta za kućansku primjenu prikazana su u tablici B.1.

Tablica B.1 Svojstva drvnih peleta za komercijalnu i kućansku upotrebu prema ISO 17225-2:2014 [52]

Svojstvo	Jedinica	A1	A2	B
Promjer D i dužina L (ISO 17829)	mm	D06, 6±1; 3,15<L≤40 D08, 8±1; 3,15<L≤40	D06, 6±1; 3,15<L≤40 D08, 8±1; 3,15<L≤40	D06, 6±1; 3,15<L≤40 D08, 8±1; 3,15<L≤40
Sadržaj ukupne vlaga (ISO 18134-1, ISO 18134-2)	mas. % dostavno stanje, ukupna tvar	M10<10	M10<10	M10<10
Sadržaj pepela (ISO 18122)	mas. % suha tvar	A0.7<0,7	A1.2<1,2	A2.0<2,0
Mehanička izdržljivost (ISO 17831-1)	mas. %	DU97.5≥97,5	DU97.5≥97,5	DU96.5≥96,5
Aditivi	mas. % dostavno stanje, ukupna tvar	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Donja ogrjevna vrijednost (ISO 18125)	MJ/kg ukupna tvar	Q16.5≥16,5	Q16.5≥16,5	Q16.5≥16,5
Nasipna gustoća (ISO 17828)	kg/m ³ dostavno stanje	BD600≥600	BD600≥600	BD600≥600
Sadržaj N (SO 16948]	mas. % suha tvar	N0.3≤0,3	N0.5≤0,5	N1.0≤1,0
Sadržaj S (ISO 16994=	mas. % suha tvar	S0.04≤0,04	S0.05≤0,05	S0.05≤0,05
Sadržaj Cl (ISO 16994)	mas. % suha tvar	Cl0.02≤0,02	Cl0.02≤0,02	Cl0.03≤0,03

Sadržaj As (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Sadržaj Cd (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Sadržaj Cr (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Cu (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Pb (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Hg (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
Sadržaj Ni (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Zn (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 100	≤ 100	≤ 100

Klasa peleta A1 i A2 predstavlja čisto drvo i kemijski netretirane ostatke od prerade drva. Klasa A1 predstavlja gorivo niskog sadržaja pepela i dušika, dok su u klasi A2 dopušteni nešto veći sadržaj istih. Klasa peleta B uključuje korištenje i kemijski tretiranih ostataka iz industrije te prethodno korišteno drvo.

ISO 17225-6:2014 [53]

ISO 17225-6:2014 [53] utvrđuje klase kvalitete goriva i svojstva nedravnih peleta proizvedenih od sljedećih sirovina:

- Travnata biomasa
- Stabljike i ostaci jednogodišnjih biljaka
- Smjese i mješavine biomase

Norma ne uključuje termički obrađene pelete (toreficirani peleti). Svojstva nedravnih peleta prikazani su u Tablici B.2 i B.3.

Tablica B.2 Svojstva nedravnih peleta prema ISO 17225-6:2014 [53]

Svojstvo	Jedinica	A	B
Promjer D i dužina L (ISO 17829)	mm	D06-D25, D±1; 3,15<L≤50	D06-D25, D±1; 3,15<L≤50
Sadržaj ukupne vlaga (ISO 18134-1, ISO 18134-2)	mas. % dostavno stanje, ukupna tvar	M12<12	M15<15
Sadržaj pepela (ISO 18122)	mas. % suha tvar	A6.0<6,0	A10<10
Mehanička izdržljivost (ISO 17831-1)	mas. %	DU97.5≥97,5	DU96≥96
Aditivi	mas. % dostavno stanje, ukupna tvar	≤ 5	≤ 5
Donja ogrjevna vrijednost (ISO 18125)	MJ/kg ukupna tvar	Q14.5≥14,5	Q14.5≥14,5
Nasipna gustoća (ISO 17828)	kg/m ³ dostavno stanje	BD600≥600	BD600≥600
Sadržaj N (ISO 16948)	mas. % suha tvar	N1.5≤1,5	N2.0≤2,0
Sadržaj S (ISO 16994)	mas. % suha tvar	S0.20≤0,20	S0.30≤0,30
Sadržaj Cl (ISO 16994)	mas. % suha tvar	Cl0.10≤0,10	Cl0.30≤0,30
Sadržaj As (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 1	≤ 1
Sadržaj Cd (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 0,5	≤ 0,5
Sadržaj Cr (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 50	≤ 50

Sadržaj Cu (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 20	≤ 20
Sadržaj Pb (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Hg (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
Sadržaj Ni (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Zn (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 100	≤ 100

Tablica B.3 Svojstva nedravnih peleta prema ISO 17225-2:2014 [53]

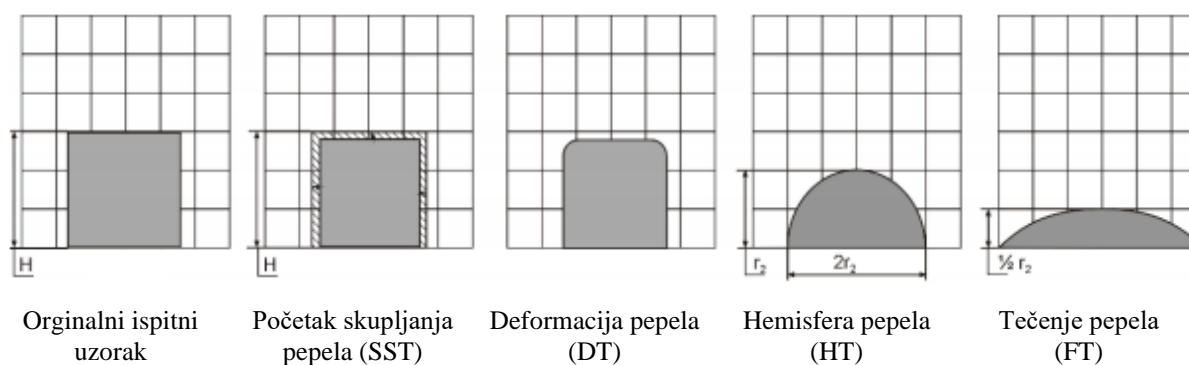
Svojstvo	Jedinica	Slama žitarica	Mischnatus	Trska
Promjer D i dužina L (ISO 17829)	mm	D06-D25, D \pm 1; 3,15<L \leq 50	D06-D25, D \pm 1; 3,15<L \leq 50	D06-D25, D \pm 1; 3,15<L \leq 50
Sadržaj ukupne vlaga (ISO 18134-1, ISO 18134-2)	mas. % dostavno stanje, ukupna tvar	M10<10	M10<10	M12<12
Sadržaj pepela (ISO 18122)	mas. % suha tvar	A6.0<6,0	A4.0<4,0	A8.0<8,0
Mehanička izdržljivost (ISO 17831-1)	mas. %	DU97.5 \geq 97,5	DU97.5 \geq 97,5	DU96.5 \geq 96,5
Aditivi	mas. % dostavno stanje, ukupna tvar	-	-	-
Donja ogrjevna vrijednost (ISO 18125)	MJ/kg ukupna tvar	-	-	Q14.5 \geq 14,5
Nasipna gustoća (ISO 17828)	kg/m ³ dostavno stanje	BD600 \geq 600	BD580 \geq 580	BD550 \geq 550
Sadržaj N (ISO 16948)	mas. % suha tvar	N0.7 \leq 0,7	N0.5 \leq 0,5	N2.0 \leq 2,0
Sadržaj S (ISO 16994)	mas. % suha tvar	S0.10 \leq 0,10	S0.05 \leq 0,05	S0.20 \leq 0,20
Sadržaj Cl (ISO 16994)	mas. % suha tvar	Cl0.10 \leq 0,10	Cl0.08 \leq 0,08	Cl0.10 \leq 0,10
Sadržaj As (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Sadržaj Cd (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$

Sadržaj Cr (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 50	≤ 50	≤ 50
Sadržaj Cu (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Sadržaj Pb (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Hg (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$
Sadržaj Ni (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Sadržaj Zn (ISO 16968)	mg/kg suha tvar	≤ 100	≤ 100	≤ 100

U odnosu na drvene pelete, nedrvni imaju veći dopušteni sadržaj pepela, dušika, sumpora i klora.

Taljenje pepela prema CEN/TS 15370-1 [83]

Taljenje pepela je složeni proces kod kojeg može doći do njegovog sinteriranja, skupljanja i bubrenja. Metoda ispitivanja opisana u [83] je empirijska i daje informacije o taljenju anorganskih konstituenata goriva na visokim temperaturama. Zasniva se na zagrijavanju ispitnog uzorka pepela konstantnom brzinom i promatranjem geometrije (oblika ispitnog uzorka). Karakteristične promjene u geometriji prikazane su na slici 21.



Slika B.1 Faze u taljenju pepela [83]

B.2 Norme koje propisuju zahtjeve za toplovodne kotlove na krutu biomasu [7, 43]

Zahtjevi za toplovodne kotlove na kruta goriva koji su namijenjeni za centralno grijanje gdje je radni medij voda, najveća dozvoljena temperatura vode 110°C, a najveći tlak 6 bara propisuje EN 303-5 [7, 43]. U toj normi, osim općih zahtjeva, detaljno su propisani konstrukcijski, sigurnosni te zahtjevi za pogonske karakteristike. Također propisan je i sam postupak ispitivanja pogonskih karakteristika. U sklopu ovog istraživanja pažnja se posvećuje samo pogonskim karakteristikama.

Toplinska učinkovitost

EN 303-5 [7, 43] propisuje minimalnu toplinsku učinkovitost toplovodnih kotlova na nazivnoj i minimalnoj snazi, u ovisnosti o željenoj klasi i nazivnom toplinskom učinku, prema sljedećim izrazima:

- za Klasu 5 i nazivni toplinski učin manji od 100 kW

$$\eta_k = 87 + \log Q \quad (\text{B.1})$$

- za Klasu 5 i nazivni toplinski učin veći od 100 kW

$$\eta_k = 89\% \quad (\text{B.2})$$

- za Klasu 4 i nazivni toplinski učin manji od 100 kW

$$\eta_k = 87 + 2 \cdot \log Q \quad (\text{B.3})$$

- za Klasu 4 i nazivni toplinski učin veći od 100 kW

$$\eta_k = 84\% \quad (\text{B.4})$$

- za Klasu 3 i nazivni toplinski učin manji od 300 kW

$$\eta_k = 67 + 6 \cdot \log Q \quad (\text{B.5})$$

- za Klasu 3 i nazivni toplinski učin veći od 300 kW

$$\eta_k = 82\% \quad (\text{B.6})$$

gdje Q predstavlja nazivni toplinski učin izražen u kW.

Standard [43] navodi i zahtjeve za sezonsku toplinsku učinkovitost propisane Direktivom 2009/125/EZ [93] Uredbom Komisije (EU) 2015/1189 [54], koja za toplovodne kotlove nazivnog učina do 20 kW ne smije biti manja od 75%, a za kotlove nazivnog učina iznad 20 kW manja od 77%. Proračun sezonske toplinske učinkovitosti [54] prikazan je izrazima (B.7-B.9).

Sezonska toplinska učinkovitost računa se prema:

$$\eta_s = \eta_{\text{soon}} - F(1) - F(2) - F(3) \quad (\text{B.7})$$

pri čemu se sezonska učinkovitost pri zagrijavanju prostora u aktivnom načinu rada za automatski ložene kotlove na kruta goriva (η_{soon}) računa kao:

$$\eta_{\text{soon}} = 0,85\eta_p + 0,15\eta_n \quad (\text{B.8})$$

U izrazu (B.8) η_p se odnosi na toplinsku učinkovitost određenu na reduciranom opterećenju (30 ili 50% nazivnog opterećenja), a η_n na toplinsku učinkovitost na nazivnoj snazi. $F(1)$ u izrazu (B.7) predstavlja gubitak sezonske toplinske učinkovitosti zbog prilagođenih doprinosa uređaja za upravljanje temperaturom i uzima se kao fiksna vrijednost od 3%. Negativan doprinos sezonskoj toplinskoj učinkovitosti zbog dodatne potrošnje električne energije u izrazu (B.7) opisan je pomoću $F(2)$. $F(2)$ se za automatski ložene kotlove na kruta goriva računa prema izrazu (B.9). $F(3)$ predstavlja pozitivan doprinos sezonskoj toplinskoj učinkovitosti zbog električne iskoristivosti i odnosi se samo na kogeneracijske kotlove na kruta goriva.

$$F(2) = \frac{2,5 \cdot (0,15 \cdot el_{\text{max}} + 0,85 \cdot el_{\text{min}} + 1,3 \cdot P_{\text{SB}})}{0,15 \cdot P_n + 0,85 \cdot P_p} \quad (\text{B.9})$$

U izrazu (B.9) el_{max} predstavlja potrošnju električne energije na nazivnom opterećenju u kW, el_{min} potrošnju na reduciranom opterećenju (30 ili 50%) u kW, a P_{SB} potrošnju električne energije u stanju mirovanja u kW. P_n je korisna toplinska snaga pri nazivnom opterećenju u kW, a P_p je korisna toplinska snaga pri reduciranom opterećenju u kW.

Emisije polutanata

Granične emisije polutanata na nazivnoj i minimalnoj snazi (u ovisnosti o željenog klasi) prikazani su u tablici B.4 (prikazane vrijednosti odnose se na automatizirane kotlove koji kao gorivo koriste biomasu).

Tablica B.4 Granične emisije polutanata [7, 43]

Nazivni učin [kW]	CO			OGC			Prašina		
	mg/Nm ³ svedeno na 10% O ₂ u suhim dimnim plinovima								
	Klasa 3	Klasa 4	Klasa 5	Klasa 3	Klasa 4	Klasa 5	Klasa 3	Klasa 4	Klasa 5
≤50	3.000	1.000	500	100	30	20	150	60	40
>50≤150	2.500	1.000	500	80	30	20	150	60	40
>150≤500	1.200	1.000	500	80	30	20	150	60	40

Toplovodni kotlovi koji kao gorivo koriste nedrvnu biomasu ne moraju zadovoljiti zahtjeve za emisijama prašine u ovisnosti o klasi. Granična vrijednost propisana za kotlove na nedrvnu biomasu iznosi 200 mg/Nm³ svedeno na 10% O₂ u suhim dimnim plinovima.

Nadalje, [43] navodi i zahtjeve za sezonske emisije polutanata (Tablica B.5) propisane Direktivom 2009/125/EZ [93] Uredbom Komisije (EU) 2015/1189 [54]. Također je navedeno da isti zahtjevi ne moraju biti zadovoljeni za toplovodne kotlove koji su namijenjeni samo za korištenje nedrvne biomase. Proračun sezonske emisije polutanata E_s za automatski ložene kotlove [54] dani je izrazom (B.11), gdje E označuje emisije pojedinačnih polutanata (CO, OGC, PM, NO_x).

Tablica B.5 Sezonske granične emisije polutanata za drvenu biomasu [43]

CO _s	OGC _s	PM _s	NO _x _s
mg/Nm ³ svedeno na 10% O ₂ u suhim dimnim plinovima			
500	20	40	200

Norma [43] ujedno prepoznaje i činjenicu da NO_x emisije većim dijelom potječu iz dušika prisutnog u gorivu, koji je rezultat prirodnog ciklusa kruženja dušika u prirodi. S ciljem usporedbe različitih konstrukcija ložišta NO_x emisije se izražavaju za referentnu koncentraciju dušika u gorivu od 0,08% suhe tvari. Zbog toga se primjenjuje sljedeća korekcija:

$$NO_x = NO_{x_{meas}} \cdot 0,27 \cdot N^{-0,511} \quad (\text{B.10})$$

gdje je:

$NO_{x_{meas}}$ – mjerena vrijednost emisija NO_x, [ppm]

N – maseni udio dušika u gorivu (svedeno na suhu tvar), [%]

Izraz (B.10) primjenjuje se na najveću vrijednost $N=0,3\%$ za drvenu biomasu i $N=0,7\%$ za ostale izvore biomase.

$$E_s = 0,85E_p + 0,15E_n \quad (\text{B.11})$$

U izrazu (B.11) E_p označava emisije lebdećih čestica, organskih plinskih spojeva, ugljičnog monoksida i dušikovih oksida izmjerene na reduciranom opterećenju, a E_n emisije na nazivnom opterećenju.

PRILOG C. MJERNA NESIGURNOST PRI ODREĐIVANJU TOPLINSKE UČINKOVITOSTI TOPLOVODNOG KOTLA

Mjerna nesigurnost predstavlja parametar koji je pridružen rezultatu mjerenja/ispitivanja pomoću kojeg se može izvršiti opis rasipanja vrijednosti na način da se one mogu prepisati mjernoj veličini. Određivanje mjerne nesigurnosti prilikom određivanja nekog parametra (u ovom slučaju toplinske učinkovitosti) koji je zavisan o više parametara (koji se zasebno mjere različitim vrstama uređaja) naročito je komplicirano. Za razliku od određivanja mjerne nesigurnosti uređaja/osjetnika neke veličine, određivanje mjerne nesigurnosti veličine koja se dobiva nekom jednadžbom zahtjeva primjenu diferencijalnih jednadžba. Obično se iskazuje kao proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukoj vrijednosti standardne nesigurnosti ($k=2$) s razinom pouzdanosti od 95% [94].

Direktna metoda

Toplinska učinkovitost toplovodnog kotla prema direktnoj metodi (jednadžbi C.1) ovisna je o veličinama Q_N i Q_B . Mjerna nesigurnost određivanja toplinske učinkovitosti s obzirom na mjernu nesigurnost određivanja Q_N određuje se prema jednadžbi (C.2), odnosno s obzirom na mjernu nesigurnost određivanja Q_B prema jednadžbi (C.3).

$$\eta_K = \frac{Q_N}{Q_G} \cdot 100 \quad (C.1)$$

gdje je Q_G ulazna toplinska snaga sadržana u gorivu.

$$\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_N} \cdot u(Q_N) = \frac{100}{Q_G} \cdot u(Q_N) \quad (C.2)$$

$$\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_G} \cdot u(Q_G) = -\frac{100 \cdot Q_N}{Q_G^2} \cdot u(Q_G) \quad (C.3)$$

gdje je:

$u(Q_N)$ - mjerna nesigurnost određivanja izlazne snage predane ogrjevnoj vodi, W

$u(Q_B)$ - mjerna nesigurnost određivanja ulazne snage, W

Proširena mjerna nesigurnost određivanja toplinske učinkovitosti kotla prema direktnoj metodi određuje se prema jednadžbi (C.4).

$$U(\eta_K) = 2 \cdot u(\eta_K) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_N} \cdot u(Q_N)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_G} \cdot u(Q_G)\right)^2} \quad (\text{C.4})$$

Određivanja izlazne snage Q_N ovisno je o masenom protok hladne vode, specifičnom toplinskom kapacitetu vode, temperaturi vode na izlazu iz kotla i temperaturi hladne vode. Prilikom proračuna mjerne nesigurnosti ovog parametra može se zanemariti utjecaj mjerne nesigurnosti određivanja gustoće vode i specifičnog toplinskog kapaciteta vode (zbog mjerne nesigurnosti određivanja tlaka i temperature ogrjevnog medija). Mjerna nesigurnost određivanja izlazne snage s obzirom na parametre W_1 , T_V , T_E određuje se prema jednadžbama (C.5-C.7).

$$\frac{\partial Q_N}{\partial W_1} \cdot u(W_1) = c_{w1} \cdot (T_V - T_E) \cdot u(W_1) \quad (\text{C.5})$$

$$\frac{\partial Q_N}{\partial T_V} \cdot u(T_V) = W_1 \cdot c_{w1} \cdot u(T_V) \quad (\text{C.6})$$

$$\frac{\partial Q_N}{\partial T_E} \cdot u(T_E) = W_1 \cdot c_{w1} \cdot u(T_E) \quad (\text{C.7})$$

gdje je:

$u(W_1)$ - mjerna nesigurnost određivanja masenog protoka ogrjevne vode (podatak iz umjernice vodomjera), kg/s

$u(T_V)$ - mjerna nesigurnost određivanja temperature ogrjevne vode na izlazu iz kotla (podatak iz umjernice osjetnika), °C

$u(T_E)$ - mjerna nesigurnost određivanja temperature hladne vode (podatak iz umjetnice osjetnika), °C

Proširena mjerna nesigurnost određivanja izlazne snage predane ogrjevnoj vodi određuje se prema jednadžbi (C.8).

$$U(Q_N) = 2 \cdot u(Q_N) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Q_N}{\partial W_1} \cdot u(W_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_N}{\partial T_V} \cdot u(T_V)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_N}{\partial T_E} \cdot u(T_E)\right)^2} \quad (\text{C.8})$$

Mjerna nesigurnost određivanja ulazne snage Q_B koja ovisi je o masenom protoku goriva i donjoj ogrjevnoj vrijednosti goriva određuje se prema jednadžba (C.9-C.10).

$$\frac{\partial Q_G}{\partial B} \cdot u(B) = H_u \cdot u(B) \quad (C.9)$$

$$\frac{\partial Q_G}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = B \cdot u(H_u) \quad (C.10)$$

gdje je:

$u(B)$ - mjerna nesigurnost određivanja masenog protoka goriva, kg/s

$u(H_u)$ - mjerna nesigurnost određivanja donje ogrjevne vrijednosti (podatak iz analize goriva), J/kg

Proširena mjerna nesigurnost određivanja ulazne snage goriva određuje se prema jednadžbi (C.11).

$$U(Q_G) = 2 \cdot u(Q_G) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Q_G}{\partial B} \cdot u(B)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_G}{\partial H_u} \cdot u(H_u)\right)^2} \quad (C.11)$$

Mjerna nesigurnost određivanja masenog protoka goriva određuje se prema jednadžba (C.12- C.14).

$$\frac{\partial B}{\partial m_1} \cdot u(m_1) = \frac{1}{t_{\text{per}}} \cdot u(m_1) \quad (C.12)$$

$$\frac{\partial B}{\partial m_2} \cdot u(m_2) = \frac{1}{t_{\text{per}}} \cdot u(m_2) \quad (C.13)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t_{\text{per}}} \cdot u(t_{\text{per}}) = -\frac{m_1 - m_2}{t_{\text{per}}^2} \cdot u(t_{\text{per}}) \quad (C.14)$$

gdje je:

$u(m_1)$ - mjerna nesigurnost određivanja mase na početku ispitivanja (podatak iz umjernice), kg

$u(m_2)$ - mjerna nesigurnost određivanja mase na kraju ispitivanja (podatak iz umjernice), kg

Proširena mjerna nesigurnost određivanja masenog protoka goriva određuje se prema jednadžbi (C.15).

$$\begin{aligned}
 U(B) &= 2 \cdot u(B) \\
 &= 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial m_1} \cdot u(m_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial m_2} \cdot u(m_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial t_{\text{per}}} \cdot u(t_{\text{per}})\right)^2} \quad (\text{C.15})
 \end{aligned}$$

Indirektna metoda

Proširena mjerna nesigurnost određivanja toplinske učinkovitosti kotla prema indirektnoj metodi računa se prema jednadžbi (C.16).

$$U(\eta_K) = 2 \cdot u(\eta_K) = 2 \cdot \sqrt{u(q_A)^2 + u(q_U)^2 + u(q_S)^2 + u(q_B)^2} \cdot 100 \quad (\text{C.16})$$

gdje je:

$u(q_A)$ mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka osjetne topline dimnih plinova

$u(q_U)$ mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja

$u(q_S)$ mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zračenjem, konvekcijom i provođenjem kroz ovojnicu (zbog vrlo načina određivanja koji je upitne točnosti isti se procjenjuje prema iskustvu)

$u(q_B)$ mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka osjetne topline dimnih plinova određuje se prema jednadžbama (C.17-C.18). Prilikom proračuna mjerne nesigurnosti ovog parametra može se zanemariti utjecaj mjerne nesigurnosti specifičnog toplinskog kapaciteta suhih dimnih plinova C_{pmd} te vode u suhim dimnim plinovima $C_{\text{pH}_2\text{O}}$ kao funkcije temperature dimnih plinova i koncentracije CO_2 .

$$\frac{\partial q_A}{\partial Q_A} \cdot u(Q_A) = \frac{1}{H_u} \cdot u(Q_A) \quad (\text{C.17})$$

$$\frac{\partial q_A}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = -\frac{Q_A}{H_u^2} \cdot u(H_u) \quad (\text{C.18})$$

gdje je:

$u(Q_A)$ mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka osjetne topline, W

Proširena mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka osjetne topline određuje se prema jednadžbi (C.19).

$$U(q_A) = 2 \cdot u(q_A) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial q_A}{\partial Q_A} \cdot u(Q_A)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_A}{\partial H_u} \cdot u(H_u)\right)^2} \quad (\text{C.19})$$

Mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka osjetne topline računa se prema jednadžbama (C.20-C.27).

$$\frac{\partial Q_A}{\partial t_a} \cdot u(t_a) = \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \cdot u(t_a) \quad (\text{C.20})$$

$$\frac{\partial Q_A}{\partial t_r} \cdot u(t_r) = \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \cdot u(t_r) \quad (\text{C.21})$$

$$\frac{\partial Q_A}{\partial C} \cdot u(C) = (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}}}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} \right] \cdot u(C) \quad (\text{C.22})$$

$$\frac{\partial Q_A}{\partial C_r} \cdot u(C_r) = (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}}}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} \right] \cdot u(C_r) \quad (\text{C.23})$$

$$\frac{\partial Q_A}{\partial CO} \cdot u(CO) = (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)^2} \right] \cdot u(CO) \quad (\text{C.24})$$

$$\frac{\partial Q_A}{\partial CO_2} \cdot u(CO_2) = (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)^2} \right] \cdot u(CO_2) \quad (\text{C.25})$$

$$\frac{\partial Q_A}{\partial H} \cdot u(H) = (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92 \cdot 9}{100} \right] \cdot u(H) \quad (\text{C.26})$$

$$\frac{\partial Q_A}{\partial W} \cdot u(W) = (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92}{100} \right] \cdot u(W) \quad (\text{C.27})$$

gdje je:

$u(t_a)$ mjerna nesigurnost određivanja temperature dimnih plinova (podatak iz umjernice), °C

$u(t_r)$ mjerna nesigurnost određivanja temperature zraka u prostoriji (podatak iz umjernice), °C

$u(C)$ mjerna nesigurnost određivanja masenog udjela ugljika u gorivu (podatak iz analize goriva)

$u(C_r)$ mjerna nesigurnost određivanja masenog udjela ugljika u ostatku (podatak iz umjernice)

$u(CO)$ mjerna nesigurnost određivanja koncentracije CO u suhim dimnim plinovima

$u(CO_2)$ mjerna nesigurnost određivanja koncentracije CO₂ u suhim dimnim plinovima

$u(H)$ mjerna nesigurnost određivanja masenog udjela vodika u gorivu (podatak iz analize goriva)

$u(W)$ mjerna nesigurnost određivanja masenog udjela vlage u gorivu (podatak iz analize goriva)

Mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka osjetne topline određuje se prema jednadžbi (C.28).

$$U(Q_A) = 2 \cdot u(Q_A) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_A}{\partial t_a} \cdot u(t_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_A}{\partial t_r} \cdot u(t_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_A}{\partial C} \cdot u(C)\right)^2 + \dots} \quad (C.28)$$

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja određuje se prema jednadžbama (C.29-C.30).

$$\frac{\partial q_U}{\partial Q_U} \cdot u(Q_U) = \frac{1}{H_u} \cdot u(Q_U) \quad (C.29)$$

$$\frac{\partial q_U}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = -\frac{Q_U}{H_u^2} \cdot u(H_u) \quad (C.30)$$

gdje je:

$u(Q_U)$ mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja, W

Proširena mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja određuje se prema jednadžbi (C.31).

$$U(q_U) = 2 \cdot u(q_U) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial q_U}{\partial Q_U} \cdot u(Q_U)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_U}{\partial H_u} \cdot u(H_u)\right)^2} \quad (C.31)$$

Mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja računa se prema jednadžbama (C.32-C.35).

$$\frac{\partial Q_U}{\partial CO} \cdot u(CO) = \frac{12644 \cdot CO_2 \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)^2 \cdot 100} \cdot u(CO) \quad (C.32)$$

$$\frac{\partial Q_U}{\partial C} \cdot u(C) = \frac{12644 \cdot CO}{0,536 \cdot (CO + CO_2) \cdot 100} \cdot u(C) \quad (C.33)$$

$$\frac{\partial Q_U}{\partial C_r} \cdot u(C_r) = \frac{12644 \cdot CO}{0,536 \cdot (CO + CO_2) \cdot 100} \cdot u(C_r) \quad (C.34)$$

$$\frac{\partial Q_U}{\partial CO_2} \cdot u(CO_2) = \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)^2 \cdot 100} \cdot u(CO_2) \quad (C.35)$$

Proširena mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja određuje se prema jednadžbi (C.36).

$$\begin{aligned}
 U(Q_U) &= 2 \cdot u(Q_U) \\
 &= 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial Q_U}{\partial CO} \cdot u(CO)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_U}{\partial C} \cdot u(C)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_U}{\partial C_r} \cdot u(C_r)\right)^2 + \frac{\partial Q_U}{\partial CO_2} \cdot u(CO_2)} \quad (C.36)
 \end{aligned}$$

Proširena mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku određuje se prema jednadžbi (C.37).

$$U(q_B) = 2 \cdot u(q_B) = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial q_B}{\partial Q_B} \cdot u(Q_B)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_B}{\partial H_u} \cdot u(H_u)\right)^2} \quad (C.37)$$

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku računa se prema jednadžbama (C.38-C.39).

$$\frac{\partial q_B}{\partial Q_B} \cdot u(Q_B) = \frac{1}{H_u} \cdot u(Q_B) \quad (C.38)$$

$$\frac{\partial q_B}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = -\frac{Q_B}{H_u^2} \cdot u(H_u) \quad (C.39)$$

gdje je:

$u(Q_B)$ mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku, W

Mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku računa se prema jednadžbi (C.40).

$$u(Q_B) = \frac{\partial Q_B}{\partial C_r} \cdot u(C_r) = 335 \cdot u(C_r) \quad (C.40)$$

Proširena mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku određuje se prema jednadžbi (C.41).

$$U(Q_B) = 2 \cdot u(Q_B) \quad (C.41)$$

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zračenjem, konvekcijom i provođenjem kroz ovojnicu nije moguće jednostavno matematički opisati. Ista se određuje prema iskustvu.

Primjer izračuna mjerne nesigurnosti

Naziv ispitivanja: <i>Test title:</i>	Ispitivanje toplinske učinkovitosti, određivanje sastav dimnih plinova <i>Test of efficiency, test of flue gas content</i>	
Ispitna metoda: <i>Test method:</i>	HRN EN 303-5:2012 Art. 4.4.2, 4.4.3, 5.7-5.10	
Ispitivanje <i>Test</i>	Nazivna snaga <i>Nominal power</i>	Reducirana snaga <i>Reduced power</i>
Ispitni period <i>Test period</i>	3 h	3 h
Nazivna snaga Nominal heat output	30 kW	
Donja ogrjevna vrijednost goriva <i>Fuel calorific value</i>	17 690 kJ/kg	
Izlazna temperatura dimnih plinova <i>Flue gas temperature</i>	193,04 °C	114,76 °C
Maseni protok goriva <i>Fuel mass flow</i>	6,867 kg/h	2,052 kg/h
Maseni protok ogrjevnog vode <i>Heating water mass flow</i>	1,764 m ³ /h	0,685 m ³ /h
Temperatura polaznog voda <i>Flow temperature</i>	78,24 °C	76,70 °C
Temperatura povratnog voda <i>Return temperature</i>	63,59 °C	65,68 °C
Podtlak <i>Draught</i>	19 Pa	10 Pa
Temperatura okoliša <i>Ambient temperature</i>	23,90 °C	25,20 °C
Analiza dimnih plinova <i>Flue gas analysis</i>		
Kisik, O ₂ <i>Oxygen, O₂</i>	7,34 %	13,10 %
Ugljikov dioksid, CO ₂ <i>Carbon dioxide, CO₂</i>	13,17 %	7,57 %
Ugljikov monoksid, CO* <i>Carbon monoxide, CO</i>	323,32 mg/Nm ³	285,17 mg/Nm ³
Ukupni organski ugljik, OGC** <i>Higher hydrocarbons, OGC</i>	1,38 mg/Nm ³	8,20 mg/Nm ³
Prašina** <i>Dust</i>	30,12 mg/Nm ³	85,28 mg/Nm ³

Izračun toplinskih gubitaka <i>Heat loss calculation</i>		
Gubici osjetne topline dimnih plinova <i>Flue gas sensible heat loss</i>	10,29 %	8,63 %
Toplinski gubici zbog nepotpunog izgaranja <i>Loss of gas underburning</i>	0,12 %	0,19 %
Toplinski gubici zbog neizgorenog goriva u ostatku <i>Loss of mechanical underburning</i>	0,11 %	0,3 %
Toplinski gubici kroz ovojniciu kotla <i>Loss of heat transfer into enviroment</i>	3 %	5,95 %
Toplinska učinkovitost – indirektna metoda <i>Efficiency – indirect method</i>	86,51 %	84,93 %
Ulazna snaga goriva <i>Heat input</i>	33,74 kW	10,08 kW
Izlazna snaga <i>Heat output</i>	29,4 kW	8,60 kW
Toplinska učinkovitost – direktna metoda <i>Efficiency – direct method</i>	87,15 %	85,27 %
Izlazna/nazivna snaga <i>Output/nominal power</i>	98 %	29 %

Direktna metoda

Mjerna nesigurnost određivanja masenog protoka goriva iznosi:

$$u(B) = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial m_1} \cdot u(m_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial m_2} \cdot u(m_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial t_{\text{per}}} \cdot u(t_{\text{per}})\right)^2}$$

$$= \sqrt{0,0000022^2 + 0,0000022^2 + 0,000001^2} = 0,0000033 \text{ kg/s}$$

gdje:

$$\frac{\partial B}{\partial m_1} \cdot u(m_1) = \frac{1}{t_{\text{per}}} \cdot u(m_1) = \frac{1}{10590} \cdot 0,023 = 0,0000022 \text{ kg/s}$$

$$\frac{\partial B}{\partial m_2} \cdot u(m_2) = \frac{\partial B}{\partial m_1} \cdot u(m_1) = 0,0000022 \text{ kg/s}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t_{\text{per}}} \cdot u(t_{\text{per}}) = -\frac{m_1 - m_2}{t_{\text{per}}^2} \cdot u(t_{\text{per}}) = -\frac{20,2}{10590^2} \cdot 5 = -0,000001 \text{ kg/s}$$

Mjerna nesigurnost određivanja snage goriva iznosi:

$$u(Q_G) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_G}{\partial B} \cdot u(B)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_G}{\partial H_u} \cdot u(H_u)\right)^2} = \sqrt{59^2 + 287^2} = 293 \text{ W}$$

gdje:

$$\frac{\partial Q_G}{\partial B} \cdot u(B) = H_u \cdot u(B) = 17690000 \cdot 0,0000033 = 59 \text{ W}$$

$$\frac{\partial Q_G}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = Q_G \cdot u(H_u) = 0,001907 \cdot 150000 = 287 \text{ W}$$

Mjerna nesigurnost određivanja izlazne snage iznosi:

$$u(Q_N) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_N}{\partial W_1} \cdot u(W_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_N}{\partial T_V} \cdot u(T_V)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_N}{\partial T_E} \cdot u(T_E)\right)^2} = \sqrt{292^2 + 126^2 + 126^2} \\ = 342 \text{ W}$$

gdje:

$$\frac{\partial Q_N}{\partial W_1} \cdot u(W_1) = c_{w1} \cdot (T_V - T_E) \cdot u(W_1) = 4190,72 \cdot (78,24 - 20,17) \cdot 0,0012 = 292 \text{ W}$$

$$\frac{\partial Q_N}{\partial T_V} \cdot u(T_V) = W_1 \cdot c_{w1} \cdot u(T_V) = 0,12 \cdot 4190,72 \cdot 0,25 = 126 \text{ W}$$

$$\frac{\partial Q_N}{\partial T_E} \cdot u(T_E) = W_1 \cdot c_{w1} \cdot u(T_E) = 0,12 \cdot 4190,72 \cdot 0,25 = 126 \text{ W}$$

Mjerna nesigurnost određivanja toplinske učinkovitosti iznosi:

$$u(\eta_K) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_N} \cdot u(Q_N)\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_G} \cdot u(Q_G)\right)^2} = \sqrt{1,01^2 + 0,05^2} = 1,01$$

gdje:

$$\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_N} \cdot u(Q_N) = \frac{100}{Q_G} \cdot u(Q_N) = \frac{100}{33743} \cdot 342 = 1,01$$

$$\frac{\partial \eta_K}{\partial Q_G} \cdot u(Q_G) = -\frac{100 \cdot Q_N}{Q_G^2} \cdot u(Q_G) = -\frac{100 \cdot 29408}{33743^2} \cdot 293 = 0,05$$

Proširena mjerna nesigurnost određivanja toplinske učinkovitosti direktnom metodom iznosi:

$$U(\eta_K) = 2 \cdot u(\eta_K) = 2 \cdot 2,29 = 2,02 \%$$

Indirektna metoda

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka osjetne topline iznosi:

$$(q_A) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_A}{\partial Q_A} \cdot u(Q_A)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_A}{\partial H_u} \cdot u(H_u)\right)^2} = 0,0014$$

gdje:

$$\frac{\partial q_A}{\partial Q_A} \cdot u(Q_A) = \frac{1}{H_u} \cdot u(Q_A) = \frac{1}{17690000} \cdot 18687 = 0,001$$

$$\frac{\partial q_A}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = -\frac{Q_A}{H_u^2} \cdot u(H_u) = -\frac{1819445,3}{17690000^2} \cdot 150000 = -0,0009$$

Mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka osjetne topline iznosi:

$$u(Q_A) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_A}{\partial t_a} \cdot u(t_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_A}{\partial t_r} \cdot u(t_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_A}{\partial C} \cdot u(C)\right)^2 + \dots} = 18687 \text{ J/kg}$$

gdje:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_A}{\partial t_a} \cdot u(t_a) &= \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \cdot u(t_a) \\ &= \left[\frac{1368 \cdot (47,3 - 0,06)}{0,536 \cdot (0,026 + 13,17)} + \frac{1521 \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot 5,5 + 6)}{100} \right] \cdot 0,75 \\ &= 7948,7 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_A}{\partial t_r} \cdot u(t_r) &= \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} + \frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot H + W)}{100} \right] \cdot u(t_r) \\ &= \left[\frac{1368 \cdot (47,3 - 0,06)}{0,536 \cdot (0,026 + 13,17)} + \frac{1521 \cdot 1,92 \cdot (9 \cdot 5,5 + 6)}{100} \right] \cdot 0,25 \\ &= 2649,6 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_A}{\partial C} \cdot u(C) &= (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}}}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} \right] \cdot u(C) \\ &= (193,04 - 23,9) \cdot \left[\frac{1368}{0,536 \cdot (0,026 + 13,17)} \right] \cdot 0,125 = 4089,2 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_A}{\partial C_r} \cdot u(C_r) &= (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}}}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} \right] \cdot u(C_r) \\ &= (193,04 - 23,9) \cdot \left[\frac{1368}{0,536 \cdot (0,026 + 13,17)} \right] \cdot 0,003 = 98,2 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_A}{\partial \text{CO}} \cdot u(\text{CO}) &= (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (\text{CO} + \text{CO}_2)^2} \right] \cdot u(\text{CO}) \\ &= (193,04 - 23,9) \cdot \left[\frac{1368 \cdot (47,3 - 0,06)}{0,536 \cdot (0,026 + 13,17)^2} \right] \cdot 0,000273 = 31,97 \text{ J/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_A}{\partial \text{CO}_2} \cdot u(\text{CO}_2) &= (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pmd}} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (\text{CO} + \text{CO}_2)^2} \right] \cdot u(\text{CO}_2) \\ &= (193,04 - 23,9) \cdot \left[\frac{1368 \cdot (47,3 - 0,06)}{0,536 \cdot (0,026 + 13,17)^2} \right] \cdot 0,138 = 16194,5 \text{ J/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_A}{\partial \text{H}} \cdot u(\text{H}) &= (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92 \cdot 9}{100} \right] \cdot u(\text{H}) \\ &= (193,04 - 23,9) \cdot \left[\frac{1521 \cdot 1,92 \cdot 9}{100} \right] \cdot 0,05 = 2222,7 \text{ J/kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_A}{\partial \text{W}} \cdot u(\text{W}) &= (t_a - t_r) \cdot \left[\frac{C_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot 1,92}{100} \right] \cdot u(\text{W}) = (193,04 - 23,9) \cdot \left[\frac{1521 \cdot 1,92}{100} \right] \cdot 0,03 \\ &= 148 \text{ J/kg}\end{aligned}$$

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja iznosi:

$$u(q_U) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_U}{\partial Q_U} \cdot u(Q_U) \right)^2 + \left(\frac{\partial q_U}{\partial H_u} \cdot u(H_u) \right)^2} = \sqrt{0,00005^2 + 0,00001^2} = 0,00005$$

gdje:

$$\frac{\partial q_U}{\partial Q_U} \cdot u(Q_U) = \frac{1}{H_u} \cdot u(Q_U) = \frac{1}{17690000} \cdot 842 = 0,00005$$

$$\frac{\partial q_U}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = -\frac{Q_U}{H_u^2} \cdot u(H_u) = -\frac{21856}{17690000^2} \cdot 150000 = -0,00001$$

Mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog nepotpunog izgaranja iznosi:

$$u(Q_U) = \sqrt{\left(\frac{\partial Q_U}{\partial CO} \cdot u(CO)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_U}{\partial C} \cdot u(C)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_U}{\partial C_r} \cdot u(C_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_U}{\partial CO_2} \cdot u(CO_2)\right)^2}$$

$$= \sqrt{842^2 + 0,06^2 + 0,002^2 + 1,664^2} = 842 \text{ J/kg}$$

gdje:

$$\frac{\partial Q_U}{\partial CO} \cdot u(CO) = \frac{12644 \cdot CO_2 \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)^2 \cdot 100} \cdot u(CO)$$

$$= \frac{12644 \cdot 13,17 \cdot (47,3 - 0,06)}{0,536 \cdot (0,026 + 13,17)^2 \cdot 100} \cdot 0,000273 = 842 \text{ J/kg}$$

$$\frac{\partial Q_U}{\partial C} \cdot u(C) = \frac{12644 \cdot CO}{0,536 \cdot (CO + CO_2) \cdot 100} \cdot u(C) = 0,06 \text{ J/kg}$$

$$\frac{\partial Q_U}{\partial C_r} \cdot u(C_r) = \frac{12644 \cdot CO}{0,536 \cdot (CO + CO_2) \cdot 100} \cdot u(C_r) = 0,002 \text{ J/kg}$$

$$\frac{\partial Q_U}{\partial CO_2} \cdot u(CO_2) = \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)^2 \cdot 100} \cdot u(CO_2) = 1,664 \text{ J/kg}$$

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku iznosi:

$$u(q_B) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_B}{\partial Q_B} \cdot u(Q_B)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_B}{\partial H_u} \cdot u(H_u)\right)^2} = \sqrt{0,00000006^2 + 0,00001^2} = 0,00001$$

gdje:

$$\frac{\partial q_B}{\partial Q_B} \cdot u(Q_B) = \frac{1}{H_u} \cdot u(Q_B) = \frac{1}{17690000} \cdot 1,005 = 0,00000006$$

$$\frac{\partial q_B}{\partial H_u} \cdot u(H_u) = -\frac{Q_B}{H_u^2} \cdot u(H_u) = -\frac{20448}{17690000^2} \cdot 150000 = -0,00001$$

Mjerna nesigurnost određivanja toplinskog gubitka zbog neizgorenih sastojaka u ostatku iznosi:

$$u(Q_B) = \frac{\partial Q_B}{\partial C_r} \cdot u(C_r) = 335 \cdot u(C_r) = 335 \cdot 0,003 = 1,005 \text{ J/kg}$$

Mjerna nesigurnost određivanja relativnog toplinskog gubitka zračenjem, konvekcijom i provođenjem kroz ovojnicu određuje se prema iskustvu i procjeni. U konkretnom slučaju ona se može procijeniti na:

$$u(q_S) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_S}{\partial Q_S} \cdot u(Q_S)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_S}{\partial Q_B} \cdot u(Q_B)\right)^2} = \sqrt{0,0147^2 + 0,00013^2} = 0,0148$$

gdje:

$$\frac{\partial q_S}{\partial Q_S} \cdot u(Q_S) = \frac{1}{Q_B} \cdot u(Q_S) = \frac{1}{33743} \cdot 500 = 0,0147$$

$$\frac{\partial q_S}{\partial Q_B} \cdot u(Q_B) = -\frac{1 \cdot Q_S}{Q_B^2} \cdot u(Q_B) = -\frac{1 \cdot 500}{33743^2} \cdot 293 = 0,00013$$

Proširena mjerna nesigurnost određivanja toplinske učinkovitosti indirektnom metodom iznosi:

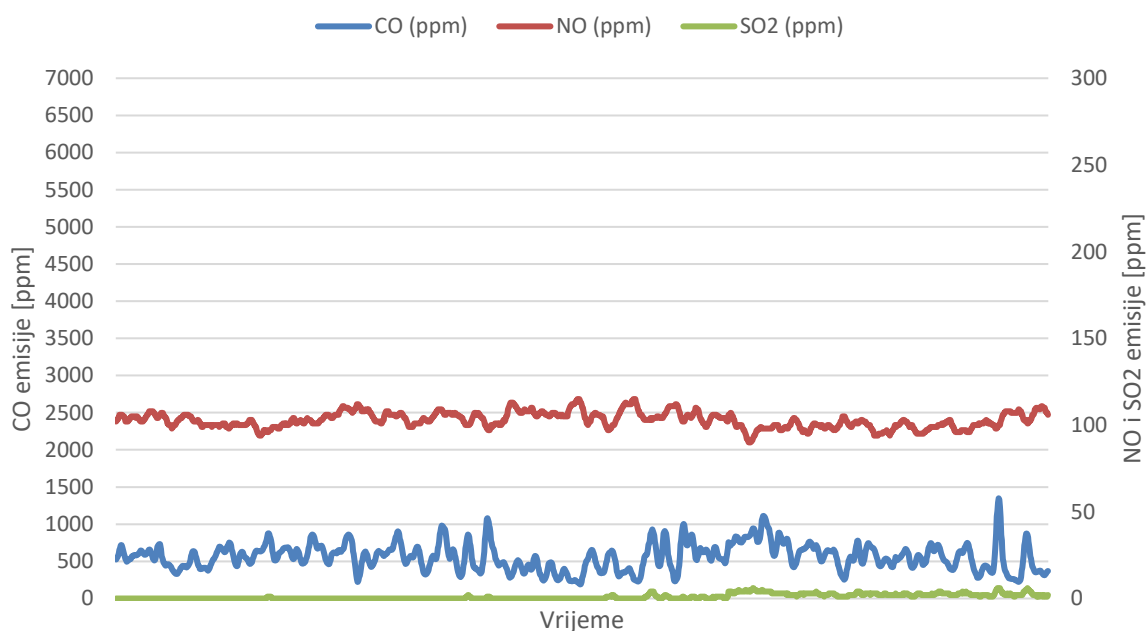
$$\begin{aligned} U(\eta_K) &= 2 \cdot u(\eta_K) = 2 \cdot \sqrt{u(q_A)^2 + u(q_U)^2 + u(q_B)^2 + u(q_S)^2} \cdot 100 \\ &= 200 \cdot \sqrt{0,0014^2 + 0,00005^2 + 0,00001^2 + 0,0148^2} = 2,97\% \end{aligned}$$

Zanemarivanjem toplinskog gubitka zračenjem, konvekcijom i provođenjem kroz ovojnicu proširena mjerna nesigurnost iznosi:

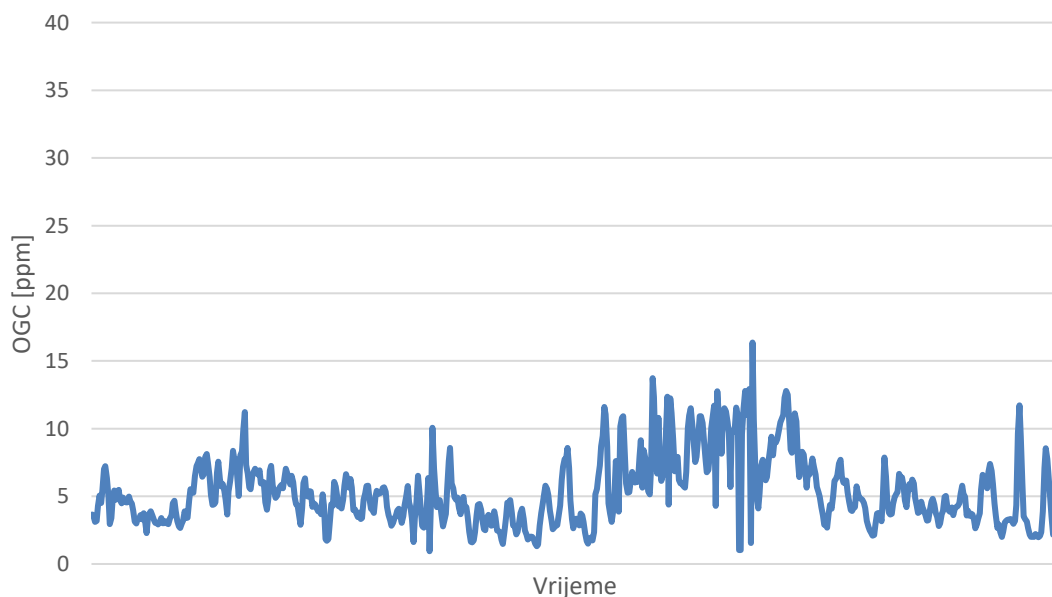
$$\begin{aligned} U(\eta_K) &= 2 \cdot u(\eta_K) = 2 \cdot \sqrt{u(q_A)^2 + u(q_U)^2 + u(q_B)^2} \cdot 100 \\ &= 200 \cdot \sqrt{0,0014^2 + 0,00005^2 + 0,00001^2} = 0,28\% \end{aligned}$$

PRIOLOG D. VREMENSKI PRIKAZ EMISIJA ZAVRŠNOG MJERENJA OD STRANE AKREDITIRANOG LABORATORIJA

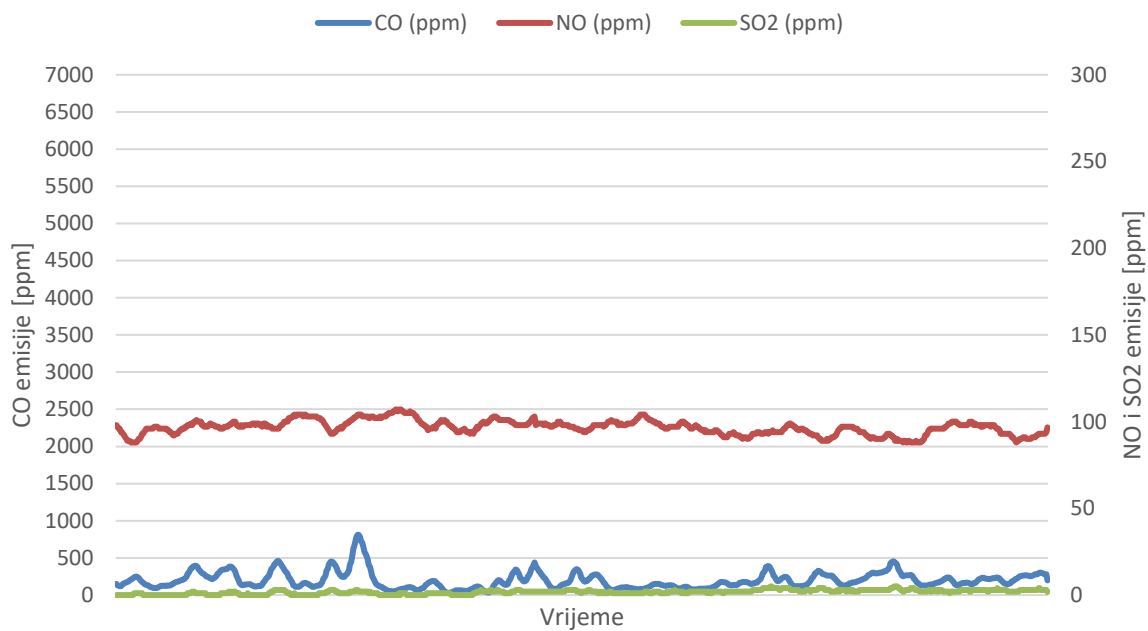
Emisije CO, NO i SO₂ u suhim dimnim plinovima - drvni peleti bez umetka



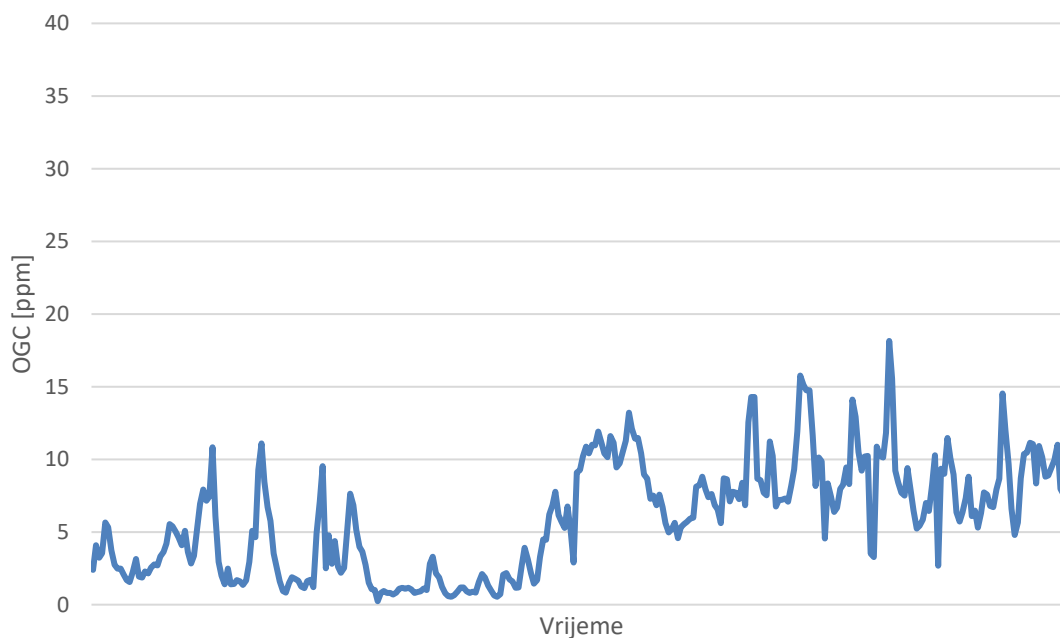
Emisije OGC u vlažnim dimnim plinovima – drvni peleti bez umetka

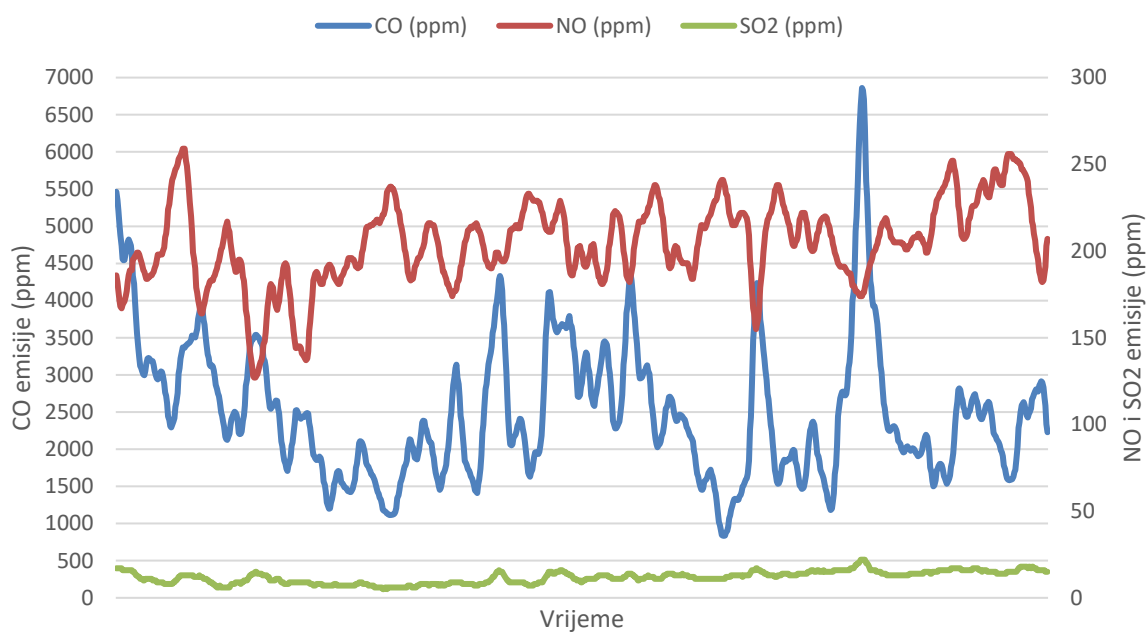
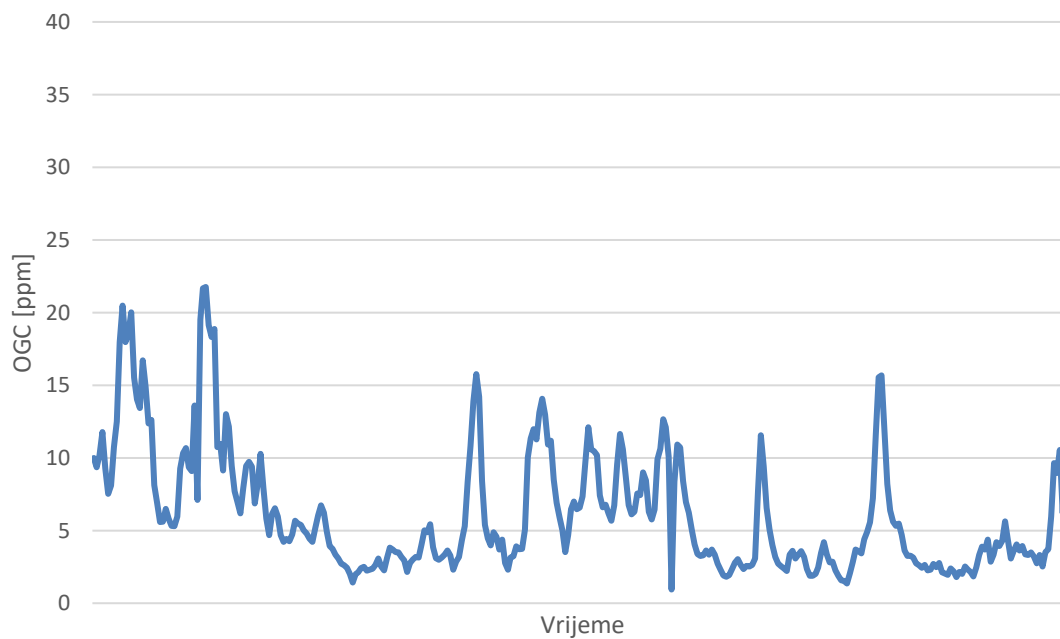


Emisije CO, NO i SO₂ u suhim dimnim plinovima - drvni peleti uz ugrađeni saćasti umetak za naknadno izgaranje

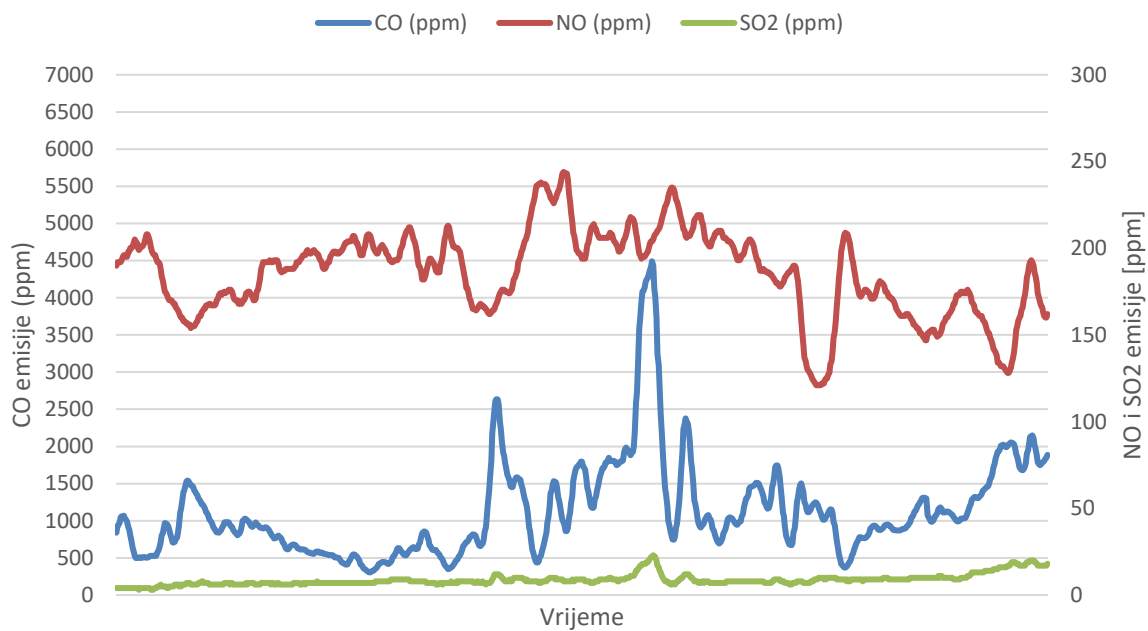


Emisije OGC u vlažnim dimnim plinovima – drvni peleti uz ugrađeni saćasti umetak za naknadno izgaranje

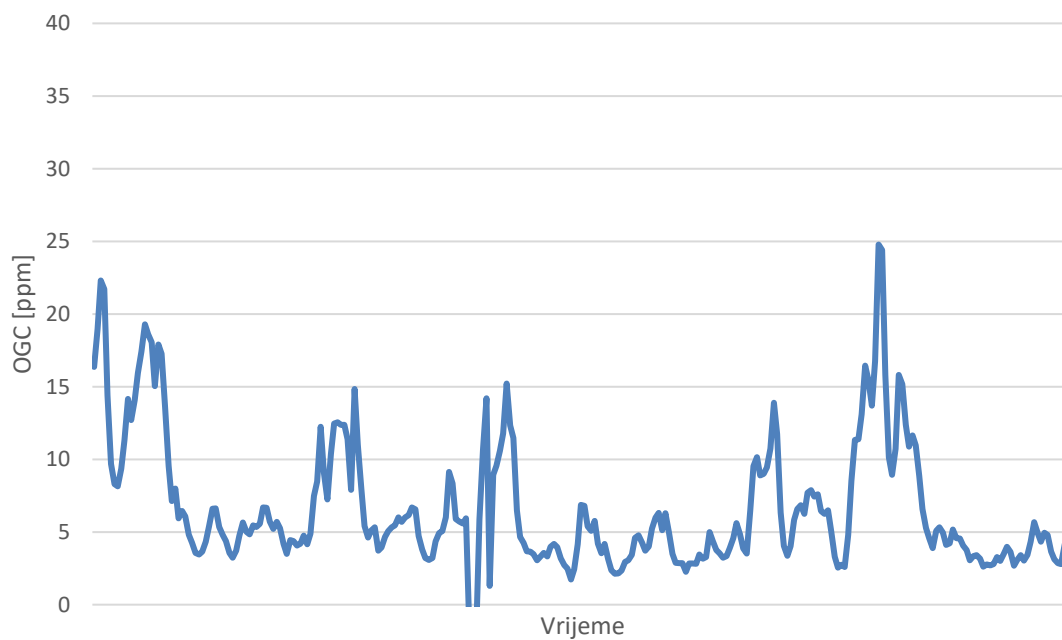


Emisije CO, NO i SO₂ u suhim dimnim plinovima – peleti slame uljane repice bez umetka*Emisije OGC u vlažnim dimnim plinovima – peleti slame uljane repice bez umetka*

Emisije CO, NO i SO₂ u suhim dimnim plinovima – peleti slame uljane repice uz ugrađeni sačasti umetak za naknadno izgaranje



Emisije OGC u vlažnim dimnim plinovima – peleti slame uljane repice uz ugrađeni sačasti umetak za naknadno izgaranje



8. LITERATURA

- [1] EU SCIENCE HUB, <<https://ec.europa.eu/jrc/en/science-update/facts-and-figures-bioenergy-eu>>. Pristupljeno 24. travnja 2020.
- [2] Balat M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*. 2011;52(2):858-75.
- [3] Demirbas A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion and Management*. 2001;42(2):183-8.
- [4] Demirbas A. Energy priorities and new strategies. *Energy Education Science and Technology*. 2016;16:53–109.
- [5] Boström C-E GP, Hanberg A, Jernström B, Johansson C, Kyrklund T, Rannug A, Törnqvist M, Victorin K, Westerholm R. Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air. *Environmental Health Perspectives*. 2002;110:451-88.
- [6] EN ISO 17225-2:2014 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets.
- [7] 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.
- [8] Ž. Warga. Heat transfer in fire-tube boilers, PhD thesis. Ljubljana: University of Ljubljana; 2000.
- [9] Marina Malinovec Puček. Razvoj metode rješavanja problema kondenzacije u niskotemperaturnom toplovodnom kotlu, Doktorski rad. Zagreb: FSB; 2009.

- [10] Werther J, Saenger M, Hartge E, Ogada T, Siagi Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000;26(1):1-27.
- [11] Jenny M Jones, Lea-Langton J.M., Ma A.R., Pourkashanian L., Williams A. *Pollutants Generated by the Combustion of Solid Biomass Fuels*. London: Springer London; 2014.
- [12] Lajili M, Jeguirim M, Kraiem N, Limousy L. Performance of a household boiler fed with agropellets blended from olive mill solid waste and pine sawdust. *Fuel*. 2015;153:431-6.
- [13] Ren X, Sun R, Meng X, Vorobiev N, Schiemann M, Levendis Y. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torrefied biomass. *Fuel*. 2017;188:310-23.
- [14] Roy M, Dutta A, Corscadden K. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*. 2013;108:298-307.
- [15] Wielgosinski G, Lechtanska P, Namiecinska O. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. *Journal of the Energy Institute*. 2017;90(5):787-96.
- [16] Iqbal Y, Lewandowski I. Biomass composition and ash melting behaviour of selected miscanthus genotypes in Southern Germany. *Fuel*. 2016;180:606-12.
- [17] Jayaraman K, Gokalp I. Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge. *Energy Conversion and Management*. 2015;89:83-91.
- [18] Zeng T, Weller N, Pollex A, Lenz V. Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices. *Fuel*. 2016;184:689-700.

- [19] Bilandzija N, Jurisic V, Voca N, Leto J, Matin A, Sito S, et al. Combustion properties of *Miscanthus x giganteus* biomass - Optimization of harvest time. *Journal of the Energy Institute*. 2017;90(4):528-33.
- [20] Chandrasekaran S, Hopke P. Kinetics of switch grass pellet thermal decomposition under inert and oxidizing atmospheres. *Bioresource Technology*. 2012;125:52-8.
- [21] Zhao B, Su Y, Liu D, Zhang H, Liu W, Cui G. SO₂/NO_x emissions and ash formation from algae biomass combustion: Process characteristics and mechanisms. *Energy*. 2016;113:821-30.
- [22] Fournel S, Marcos B, Godbout S, Heitz M. Predicting gaseous emissions from small-scale combustion of agricultural biomass fuels. *Bioresource Technology*. 2015;179:165-72.
- [23] Bugge M, Skreiberg O, Haugen N, Carlsson P, Seljeskog M, Yan J, et al. Predicting NO_x emissions from wood stoves using detailed chemistry and computational fluid dynamics. *Clean, Efficient and Affordable Energy For a Sustainable Future*. 2015;75:1740-5.
- [24] Shiehnejadhesar A SR, Mehrabian R, Obernberger I. Development and validation of CFD models for gas phase reactions in biomass grate furnaces considering gas streak formation above the packed bed. *Fuel Processing Technology*. 2015;139:142-58.
- [25] Yin C KS, Rosendahl L, Hvid SL. Co-firing straw with coal in a swirl-stabilized dual-feed burner: Modelling and experimental validation. *Bioresource Technology*. 2010;101:4169-78.
- [26] Barbas NC. Numerical study of a domestic pellet-fired boiler. Lisboa: Tecnico; 2016.

- [27] Simsek E, Brosch B, Wirtz S, Scherer V, Krüll F. Numerical simulation of grate firing systems using a coupled CFD/discrete element method (DEM). *Powder Technology*. 2009 Aug;193(3):266–73.
- [28] Gomez M, Porteiro J, Patino D, Miguez J. Eulerian CFD modelling for biomass combustion. Transient simulation of an underfeed pellet boiler. *Energy Conversion and Management*. 2015;101:666-80.
- [29] Gomez M, Porteiro J, Patino D, Miguez J. CFD modelling of thermal conversion and packed bed compaction in biomass combustion. *Fuel*. 2014;117:716-32.
- [30] Collazo J, Porteiro J, Miguez J, Granada E, Gomez M. Numerical simulation of a small-scale biomass boiler. *Energy Conversion and Management*. 2012;64:87-96.
- [31] Porteiro J, Collazo J, Patino D, Granada E, Gonzalez J, Miguez J. Numerical Modeling of a Biomass Pellet Domestic Boiler. *Energy & Fuels*. 2009;23(1-2):1067-75.
- [32] EN 304:1992/A2:2003 Heating boilers – Test code for heating boilers for atomizing oil burners.
- [33] EN 304:1992+A1:1998 Heating boilers – Test code for heating boilers for atomizing oil burners.
- [34] DIREKTIVA 2009/28/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 23. travnja 2009.
- [35] Kordić Silex, <http://www.kodric-silex.hr/ki_drvokaogorivo.html>. Pristupljeno 24. travnja 2020.

- [36] Eltrop Ludger, Hertlajn Marlis, Jesen Tin, Hensler Martin, Kruk Kristof, Ezdemir Enver Doruk, et al. Priručnik o čvrstim biogorivima. Stu ag za obn res. Beograd: Publikum d.o.o.; 2014.
- [37] Glazer A. N., Nikaido H. Microbial Biotechnology: Fundamentals of applied microbiology. Cambridge University Press; 2007.
- [38] Ogada T, Werther J. Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed - Release and combustion of the volatiles. Fuel. 1996;75(5):617-26.
- [39] Saastamionen JJ. Fundamentals of biomass drying, pyrolysis and combustion. IEA, Biomass Combustion Conference, Cambridge. 1994.
- [40] Nussbaumer T. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. Energy & Fuels. 2003;17(6):1510-21.
- [41] Nussbaumer Th. Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz. Zurich: ETH; 1989.
- [42] Dragičević V. Optimizacija ložišta za izgaranje biomase. Rijeka: Tehnički fakultet; 2011.
- [43] prEN 303-5:2019 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.
- [44] Sommersacher P, Brunner T, Obernberger I. Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. Energy & Fuels. 2012;26(1):380-90.

- [45] Nussbaumer T; LA. Formation mechanisms and physical properties of particles from wood combustion for design and operation of electrostatic precipitators. 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, 3–7 May 2010.
- [46] Nussbaumer Thomas. Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels of Particulate Matter. Zurich; 2010.
- [47] Wielgosinski G. The Reduction of Dioxin Emissions from the Processes of Heat and Power Generation. Journal of the Air & Waste Management Association. 2011;61(5):511-26.
- [48] Garcia R, Pizarro C, Lavin A, Bueno J. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. Bioresource Technology. 2012;103(1):249-58.
- [49] Larson T KJ. Wood Smoke: Emissions and Noncancer Respiratory Effects. Annual Review of Public Health. 1994;15:133-56.
- [50] Garcia-Maraver A, Zamorano M, Fernandes U, Rabacal M, Costa M. Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler. Fuel. 2014;119:141-52.
- [51] ISO 17225-1:2014 Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 1: General requirements.
- [52] ISO 17225-2:2014 Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 2: Graded wood pellets.
- [53] ISO 17225-6:2014 Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 6: Graded non-woody pellets.

- [54] UREDBA KOMISIJE (EU) 2015/1189 od 28. travnja 2015. o provedbi Direktive 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o pogledu zahtjeva za ekološki dizajn kotlova na kruta goriva.
- [55] PC-Axis baze podataka, <<https://www.dzs.hr/PXWeb/>>. Pristupljeno 24. travnja 2020.
- [56] Cosic B, Stanic Z, Duic N. Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia. *Energy*. 2011;36(4):2017-28.
- [57] Horvat I, Dovic D. COMBUSTION OF AGRICULTURAL BIOMASS - ISSUES AND SOLUTIONS. *Transactions of Famena*. 2018;42:75-86.
- [58] Meschbiz A, Krumbeck M. Combined combustion of biomass and brown coal in a pulverized fuel and fluidized bed combustion plant. In: Bemtgen JM, Hein KRG, Minchener AJ, editors. *Combined Combustion of Biomass/Sewage Sludge and Coals, Final Reports, EC-Research Project, APAS-contract COAL-CT92-0002*, 1995.
- [59] Wagenfuhr R. *Holzatlas*. 4th ed. Leipzig: Fachbuchverlag; 1996.
- [60] Cherney J, Verma V. Grass pellet Quality Index: A tool to evaluate suitability of grass pellets for small scale combustion systems. *Applied Energy*. 2013;103:679-84.
- [61] Diaz-Ramirez M, Sebastian F, Royo J, Rezeau A. Influencing factors on NOX emission level during grate conversion of three pelletized energy crops. *Applied Energy*. 2014;115:360-73.
- [62] Verma V, 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*. 2012;90(1):17-23.

- [63] Wilen C, Stahlberg P, Sipilae K, Ahokas J. Pelletization and combustion of straw: In: Energy from biomass and wastes, X. London: Elsevier Applied Science; 1987. 469–484.
- [64] Sommersacher P, Brunner T, Obernberger I, Kienzl N, Kanzian W. Combustion related characterisation of Miscanthus peat blends applying novel fuel characterisation tools. *Fuel*. 2015;158:253-62.
- [65] Bostrom D, Skoglund N, Grimm A, Boman C, Ohman M, Brostrom M, et al. Ash Transformation Chemistry during Combustion of Biomass. *Energy & Fuels*. 2012;26(1):85-93.
- [66] Tuković, Željko Metoda kontrolnih volumena na domenama promjenjivog oblika 2005., doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [67] Inc Ansys. ANSYS Fluent Theory Guide. 2013.
- [68] Yin C, Rosendahl L, Kaer S. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008;34(6):725-54.
- [69] Jordan C, Harasek M. Improvement of a Combustion Unit Based on a Grate Furnace for Granular Dry Solid Biofuels Using CFD Methods. *Heat Transfer Engineering*. 2010;31(9):774-81.
- [70] Scharler R, Obernberger I. Deriving guidelines for the design of biomass grate furnaces with CFD analysis – a new multifuel-low-NO_x furnace as example. In: 6th European conference on industrial furnaces and boilers, Estoril, Portugal. 2002.
- [71] Yang Y, Ryu C, Khor A, Yates N, Sharifi V, Swithenbank J. Effect of fuel properties on biomass combustion. Part II. Modelling approach - identification of the controlling factors. *Fuel*. 2005;84(16):2116-30.

- [72] Hermansson S, Thunman H. CFD modelling of bed shrinkage and channelling in fixed-bed combustion. *Combustion and Flame*. 2011;158(5):988-99.
- [73] Ramin Mehrabian and Ali Shiehnejadhesar. Numerical modelling of biomass grate furnaces with a particle based model. 10th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers – Porto, Portugal, (April), 2015.
- [74] EN 14780:2011 Solid biofuels -- Sample preparation.
- [75] EN ISO 18134-1:2015 Solid biofuels -- Determination of moisture content -- Oven dry method -- Part 1: Total moisture -- Reference method.
- [76] EN ISO 17828:2015 Solid biofuels -- Determination of bulk density.
- [77] ISO 17831-1:2015 Solid biofuels — Determination of mechanical durability of pellets and briquettes — Part 1: Pellets.
- [78] ISO 18122:2015 Solid biofuels — Determination of ash content.
- [79] ISO 18125:2017 Solid biofuels — Determination of calorific value.
- [80] ISO 16948:2015 Solid biofuels — Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen.
- [81] ISO 16994:2015 Solid biofuels — Determination of total content of sulfur and chlorine.
- [82] ISO 16967:2015 Solid biofuels — Determination of major elements — Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti.

- [83] CEN/TS 15370-1:2006 Solid biofuels - Method for the determination of ash melting behaviour - Part 1: Characteristic temperatures method.
- [84] EN 14785:2006 Residential space heating appliances fired by wood pellets -- Requirements and test methods EN 14785:2006.
- [85] Centrometal, <<https://www.centrometal.hr/portfolio/eko-ck-p-14-110-kw/>>. Pristupljeno 14. rujna 2020.
- [86] Blaze Harmony, <<https://www.blazeharmony.com/en/www/pellet-burner>>. Pristupljeno 14. rujna 2020.
- [87] EN 13240:2001/AC:2006 Room heaters fired by solid fuel -- Requirements and test methods.
- [88] Tom Stretton's Chemistry Page, <http://www2.ucdsb.on.ca/tiss/stretton/database/van_der_waals_constants.html>. Pristupljeno 24. travnja 2020.
- [89] Horvat I, Dovic D, Filipović P. Laboratory testing of Domestic Hot Water Boiler while fired with different Biomass Pellets
- [90] Kaknics J, Michel R, Poirier J. Miscanthus ash transformation and interaction with bed materials at high temperature. *Fuel Processing Technology*. 2016 Jan;141:178–84.
- [91] Porteiro J, Patino D, Collazo J, Granada E, Moran J, Miguez J. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor. *Fuel*. 2010;89(1):26-35.

- [92] Terming d.o.o, <<https://termingkula.rs/sr/terming/gorionik-na-agro-pelet-30-500-kw>>. Pristupljeno 24. travnja 2020.
- [93] DIREKTIVA 2009/125/EZ EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 21. listopada 2009. o uspostavi okvira za utvrđivanje zahtjeva za ekološki dizajn proizvoda koji koriste energiju.
- [94] ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995).

9. ŽIVOTOPIS / BIOGRAPHY

ŽIVOTOPIS

Ivan Horvat je rođen 15. lipnja 1990. godine u Varaždinu. Osnovnu školu završio je u Jalžabetu, a srednju (Prvu gimnaziju Varaždin – Prirodoslovno-matematički smjer) u Varaždinu. Akademske godine 2009./10. upisuje preddiplomski sveučilišni studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Završni rad pod nazivom “Projekt grijanja stambeno-poslovne zgrade” brani u rujnu 2013. te je za ostvareni uspjeh na preddiplomskom djelu studija nagrađen s pohvalom (CUM LAUDE). Akademske godine 2013./14. upisuje diplomski sveučilišni studij strojarstva, smjer Procesno-energetski. Diplomski rad pod nazivom “Dinamička simulacija potrošnje primarne energije u stambenoj zgradi” brani u prosincu 2014. godine te je za ostvareni uspjeh na diplomskom djelu studija nagrađen s najvećom pohvalom (SUMMA CUM LAUDE). U siječnju 2015. godine počinje raditi kao ispitivač i mjeritelj u Laboratoriju za toplinu i toplinske uređaje, gdje aktivno sudjeluje u pripremi dokumentacije za akreditaciju Laboratorija prema HRN EN ISO/IEC 17 025:2007. U srpnju iste godine zapošljava se na radnom mjestu asistenta na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na Zavodu za termodinamiku, toplinsku i procesnu tehniku. Tijekom rada na fakultetu aktivno je sudjelovao ili sudjeluje u nastavi kolegija: „Termodinamika 1“, „Termodinamika 2“, „Osnove termodinamike“, „Uvod u termodinamiku“, „Gradnja aparata“, „Obnovljivi izvori energije“, „Laboratorijski rad“, „Termotehnički pokus“, „Energetsko certificiranje zgrada“, „Kvantitativna infracrvena termografija“. Također sudjeluje u izvođenju nastave iz „Toplinskih aparata“ i „Solarnih toplovodnih sustava“ na Studiju energetske učinkovitosti i obnovljivih izvora energije u Šibeniku.

Akademske godine 2015./16. upisuje doktorski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Autor je više znanstvenih i stručnih radova iz područja energetske učinkovitosti i toplinske ugodnosti. Koautor je Algoritama za izračun energetske svojstva zgrada te je bio konzultant u izradi nacionalnog računalnog programa za izračun energetske svojstva zgrada. Dobitnik je nagrade Društva sveučilišnih nastavnika i drugih znanstvenika u Zagrebu za 2016. godinu.

Govori i piše engleski jezik, a služi se njemačkim jezikom.

BIOGRAPHY

Ivan Horvat was born on 15th of June 1990. in Varaždin. He attended primary school in Jalžabet and secondary school (First gymnasium Varaždin – Course of natural science and mathematics) in Varaždin. In the Academic year 2009/10 he enrolled university undergraduate study at the Faculty of mechanical engineering and naval architecture (FSB), University of Zagreb. In September 2013 he defended the bachelor thesis titled „Design of heating and cooling system for residential and commercial building“ and was awarded the praise „CUM LAUDE“. In the Academic year 2013/14 he enrolled university graduate study at the Faculty of mechanical engineering and naval architecture (FSB), University of Zagreb. In September 2013 he defended the masters thesis titled „Dynamic simulation of primary energy consumption in residential building“ and was awarded the highest praise „SUMMA CUM LAUDE“. In January 2015, he started working as an examiner at the Laboratory for thermodynamics and heat transfer equipment, where he actively participated in the preparation of documentation for the Laboratory accreditation according to HRN EN ISO/IEC 17 025: 2007. Since July 2015 he had been employed at the Faculty of mechanical engineering and naval architecture, Department of thermodynamic, thermal and process engineering as a teaching assistant.

He was or is participating in lectures within the subjects: „Thermodynamics 1“, „Thermodynamics 2“, „Fundamentals of Thermodynamics“, „Introduction to Thermodynamics“, „Heat apparatus“, „Renewable energy sources“, „Laboratory work“, „Thermotechnical experiment“, „Energy certification of buildings“, „Quantitative infrared thermography“. He also participates in lectures within the subjects "Thermal Appliances" and "Solar Heating Systems" at the Study of Energy Efficiency and Renewable Energy in Šibenik. In the Academic year 2015/2016 enrolled in doctoral studies at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. He has been actively involved in the research and has published several scientific and technical papers in the field of energy efficiency and thermal comfort. He co-authored Algorithms for the Calculation of the Energy Performance of Buildings and was a consultant in the development of national computer software for the calculation of the energy performance of buildings. For his work, in 2016 he was awarded by the Society of university teachers, scholars and other scientists in Zagreb. He speaks and writes English and speaks German.