

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

OPTIMIZACIJA LOŽIŠTA ZA IZGARANJE
BIOMASE

Doktorska disertacija

Viktor Dragičević

Rijeka, 2011.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

OPTIMIZACIJA LOŽIŠTA ZA IZGARANJE
BIOMASE

Doktorska disertacija

Viktor Dragičević

Mentor : Red. prof. dr. sc. Zmagoslav Prelec, dipl.ing.

Rijeka, 2011.

SAŽETAK

U doktorskoj disertaciji prikazane su mogućnosti optimizacije ložišta na drvenu biomasu s posebnim naglaskom na izgaranje biomase s visokim udjelom dušika. Analiziran je utjecaj različitih pogonskih i ostalih utjecajnih parametara na izgaranje u ložištima u kojima izgara drvena biomasa u sloju. Za analizu procesa u ložištu i generatoru topline korištene su numeričke i eksperimentalne metode. U tu svrhu primijenjen je matematički model fizikalnih i kemijskih pojava vezanih uz izgaranje biomase na pomičnoj rešetki u ložištu generatora topline. Matematički model je podjeljen u dvije cjeline. Prvi model je model sloja biomase na pomičnoj rešetki kojim se modeliraju procesi prijenosa topline i tvari između goriva (drvene biomase) i zraka za izgaranje. Drugi matematički model obuhvaća turbulentno strujanje u ložištu, prijenos topline i tvari, izgaranje plinova koji nastaju iz sloja biomase te tvorbu dušikovih oksida. Numerička analiza drugog modela izvršena je primjenom računalnog programa FLUENT. U radu je obuhvaćen utjecaj pogonskih parametara generatora pare (koeficijent pretička zraka, opterećenje generatora topline, udjel vlage u gorivu i temperatura u ložištu) na iskoristivost generatora topline, emisije ugljik(II)-oksida i nastajanje dušikovih spojeva. Analizirani su učinci primjene recirkulacije dimnih plinova izgaranja i miješanje sa zrakom za izgaranje te utjecaj na iskoristivost i emisije štetnih plinova. Rezultati dobiveni primjenom matematičkog modela, uspoređeni su s rezultatima eksperimentalnih mjerenja koja su izvršena na generatoru topline u stvarnim pogonskim uvjetima. Na temelju dobivenih rezultata definirani su zaključci o optimalnim uvjetima izgaranja s obzirom na iskoristivost te emisije ugljik(II)-oksida i dušikovih oksida.

SUMMARY

This thesis shows the possibilities of optimization of furnaces that use wooden biomass fuel, with special consideration to biomass fuels with an elevated concentration of nitrogen. An analysis of various influential parameters, that effect combustion in furnaces in which biomass combustion takes place in a packed bed. Numerical and experimental methods have been used to analyze the combustion in both the packed bed as well as the area in the combustion chamber itself. The mathematical model is divided in two parts. The first model describes the packed bed of biomass fuel with heat and mass transfer phenomena that occur in the packed bed of biomass particles. The second model analyzes turbulent flow in the combustion chamber and the boiler, heat and mass transfer, combustion of gases that originate from the packed biomass bed and the formation of nitrous oxides. The numerical analysis of the second model has been performed with the FLUENT software package. The analysis on the influence of heat load, primary excess air ration, biomass water content and the furnace temperature, on the boiler efficiency and emission of harmful gasses has been performed. The effects of flue gas recirculation on efficiency and emission has been performed. Results obtained with the numerical analysis have been compared against the experimental measurement data. Based on the results, several suggestions on optimal combustion conditions have been pointed out, regarding efficiency and harmful gasses emissions.

Sadržaj

1	UVOD	4
1.1	Motivacija za izradu doktorske disertacije.....	6
1.2	Znanstveni doprinos	6
2	OSNOVE IZGARANJA BIOMASE	8
2.1	Sastav i svojstva biomase.....	8
2.2	Fizikalna svojstva.....	8
2.3	Kemijska svojstva	9
2.1	Izvedbe ložišta na drvenu biomasu	11
2.2	Izvedbe ložišta s izgaranjem u sloju.....	11
	Nastajanje dušikovih oksida u ložištima s izgaranjem krutog goriva (biomase) u sloju	19
	Homogene reakcije.....	20
	Mehanizam nastajanja termičkog dušik(II)-oksida	23
	Mehanizam nastajanja promptnog dušik(II)-oksida.....	26
	Nastajanje dušikovih oksida iz dušik-peroksida (N_2O).....	27
2.4	Napredni sustavi i tehnologije za izgaranje biomase	27
3	MATEMATIČKI MODEL	29
3.1	Modeliranje izgaranja biomase u sloju na rešetki	29
3.1.1	Empirijski model sloja biomase	31
3.1.2	Temperature na površini sloja biomase.....	32
3.2	Jednodimenzijski zonalni model izgaranja sloja biomase.....	32
	Sastav plinova na izlazu iz sloja biomase	33
3.3	Jednodimenzijski nestacionarni model izgaranja biomase u sloju.....	34
	Opis matematičkih modela za simulaciju izgaranja biomase u sloju.....	34
	Devolatilizacija biomase	35
	Uplinjavanje i izgaranje krutog ostatka nakon oslobađanja volatila.....	37
	Transportne jednačbe za plinsku i krutu fazu.....	38
	Jednačbe očuvanja mase i količine tvari za plinsku fazu	39
	Jednačbe očuvanja za krutu fazu (čestice)	41
	Prijelaz topline zračenjem unutar sloja čestica na pomičnoj rešetki.....	42
	Model konverzije dušika vezanog u gorivu	42

Rješavanje sustava diferencijalnih jednadžbi.....	43
3.4 Matematički model plinske faze	45
Jednadžba očuvanja mase.....	45
Jednadžba očuvanja količine gibanja	46
Jednadžba prijenosa tvari	47
Jednadžba očuvanja energije.....	48
Modeli turbulencije	49
Favreovo i Reynoldsovo usrednjavanje	50
Realistični k-ε model.....	53
3.5 Model izgaranja u plinskoj fazi (homogene reakcije).....	54
Jednadžba transporta tvari.....	54
Model konačnih brzina kemijskih reakcija	55
Model disipacije vrtloga (Eddy Dissipation Model).....	56
Model prijenosa topline zračenjem	57
Model diskretnih ordinata	59
3.6 Model nastajanja dušik(II)-oksida.....	60
Transportne jednadžbe za dušik(II)-oksid.....	61
Modeliranje tvorbe termičkog dušik(II)-oksida	61
Modeliranje tvorbe promptnog dušik(II)-oksida.....	62
Modeliranje tvorbe dušik(II)-oksida iz dušika vezanog u gorivu	64
Model reduciranja (disocijacije) dušik(II)-oksida.....	68
4 REZULTATI.....	72
4.1 Ispitivani generator topline.....	72
4.2 Eksperimentalna mjerenja na ložištu.....	75
4.3 Mjerene veličine	79
4.4 Analiza krutog goriva (biomase).....	83
4.5 Izračun iskoristivosti generatora topline	86
5 REZULTATI SIMULACIJE I VALIDACIJA MODELA	91
5.1 Prikaz prikaz modela i diskretizacije domene.....	91
5.2 Rezultati simulacije modela sloja biomase	93
5.3 Rezultati simulacije modela plinske faze i usporedba s izmjerenim vrijednostima.....	98
5.4 Utjecaj količine primarnog zraka i recirkulacije dimnih plinova.....	100

5.5	Utjecaj vlage u gorivu	103
5.6	Profili temperatura i kemijskih tvari u ložištu i generatoru topline	104
5.7	Komentar rezultata	106
6	ZAKLJUČAK	108
	LITERATURA	110
	POPIS OZNAKA I SIMBOLA	113
	POPIS SLIKA	117
	POPIS TABELA	119

1 UVOD

Drvena biomasa je kao izvor energije poznata čovjeku od davnina, prije početka civilizacije. Veći dio povijesti drvo (drvena biomasa) je bilo jedino gorivo za proizvodnju topline za zagrijavanje prostorija, kuhanje ili prve oblike proizvodnje metala. Unatoč pojavi fosilnih goriva i drugih načina dobivanja energije, drvena biomasa se koristi i do današnjeg dana.

U posljednja dva desetljeća postaje aktualno globalno zatopljenje kao „gorući“ problem današnjeg svijeta. Značajna skupina istraživača okupljena u IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) navodi da je uzrok porastu temperatura povećana koncentracija ugljik(IV)-oksida (CO_2) u atmosferi. Jedan od uzroka tom povećanju koncentracije CO_2 je ljudska djelatnost i korištenje fosilnih goriva koja izgaranjem proizvode CO_2 .

Posve drugi problem je činjenica da se s razvojem i povećanjem broja stanovnika, iz godine u godinu povećava potreba za energijom. Energetske potrebe svijeta se uglavnom namiruju korištenjem fosilnih goriva. Fosilna goriva: ugljen, nafta i zemni plin dobivaju se raznim tehnološkim procesima i većinom se nalaze duboko ispod zemljine površine. Prirodne zalihe fosilnih goriva su ograničene te se, npr. za naftu, već govori da je njena proizvodnja došla do svog vrhunca (oil peak).

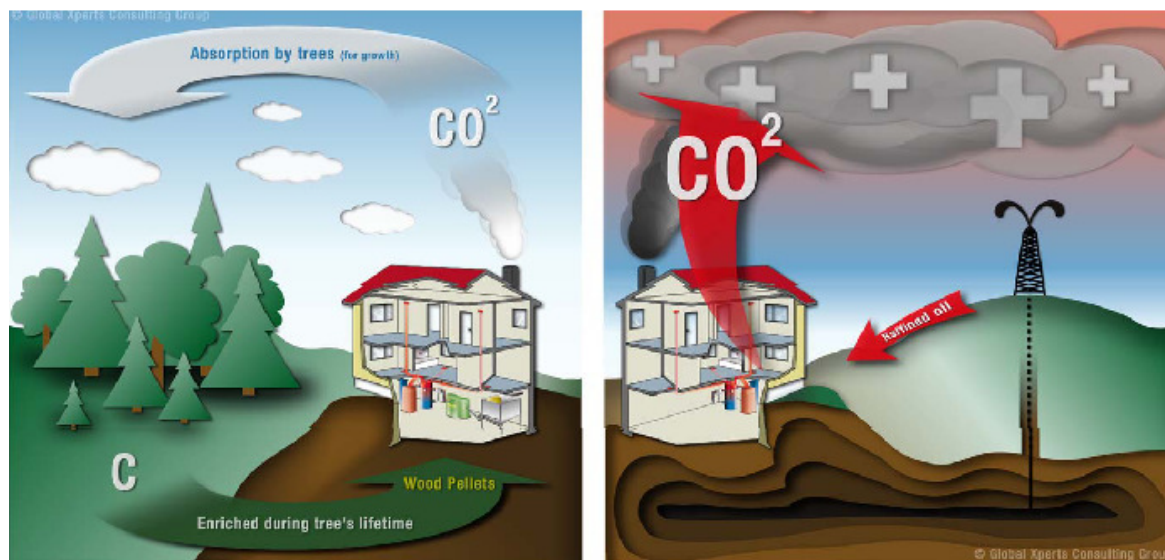
Primjena biomase, kao energenta za proizvodnju topline, smatra se korištenjem obnovljivog izvora energije. Razlog tome je činjenica da je biomasa, kao gorivo koje izgaranjem emitira CO_2 , neutralno gorivo. Sav CO_2 , koji nastaje izgaranjem biomase, se apsorbira prilikom uzgoja nove biomase koja će se koristiti za istu namjenu i tako ne rezultira povećanjem ukupnog CO_2 u atmosferi.



Slika 1 Prikaz kružnog prijenosa CO_2 u atmosferi

Ukupni svjetski resursi biomase, koji posredno potiču od sunčevog zračenja, imaju teoretski potencijal koji je deset puta veći od ukupne svjetske potrošnje primarne energije, što je oko 7 milijardi tona u ekvivalentu nafte (EN) godišnje. Ukupni energetske potencijal sve biomase koja raste na zemlji, procjenjuje se na 70 milijardi tona EN. Svjetske rezerve nafte i plina se

procjenjuju na 50-70 godina, dok je procjena za ugljen oko 200 godina. S obzirom na već navedene probleme s globalnim zatopljenjem i promjenom klime, koju između ostaloga uzrokuje emisija CO₂ u atmosferu, nije prihvatljivo da se nastavi s dosadašnjim modelom korištenja fosilnih goriva, već je potrebno postepeno ih zamijeniti s obnovljivim izvorima energije koji nisu izvori emisije CO₂.



Slika 2 Razlika između emisija CO₂ kod izgaranja biomase i nafte

Tehnika korištenja biomase, pogotovo drvene biomase, poznata je već dugo godina. U posljednjih 20 godina došlo je do značajnog razvoja tehnike izgaranja drvene biomase iz razloga što je sve veći broj generatora topline koji koriste drvenu biomasu kao gorivo.

Tehnologije pripreme goriva (biomase) uznapredovale su do tog stupnja da je moguće postaviti sustav za proizvodnju topline iz biomase posve bez nadzora ložača. To je omogućila proizvodnja peleta i drvene sječke, koji omogućuju automatsku dobavu goriva i nadzor nad radom takvih postrojenja.

1.1 Motivacija za izradu doktorske disertacije

Izgaranje biomase se s gledišta emisije stakleničkih plinova (CO_2) smatra neutralnim, te je iznimno važno da su emisije i drugih polutanata (NO_x , CO i krutih čestica) što je moguće manje. Razvoj novih industrijskih plamenika, generatora topline i pare s visokim stupnjem iskorištenja i niskom emisijom polutanata jedan je od glavnih ciljeva istraživača u području tehnike izgaranja, projektanata i proizvođača.

Kako bi se ostvarili ovi ciljevi, novi tehnički koncepti i inovacije u vođenju procesa izgaranja se neprekidno razvijaju i usavršavaju. Ovaj segment tehničkog razvoja je izuzetno propulzivan i predmet je rada velikog broja istraživača.

Kod razvoja novih tehnologija izgaranja biomase, prvenstveno komparativnih prednosti efikasnosti i niskih troškova, sve se više koristi CFD (computational fluid dynamics) tehnologija. CFD omogućuje primjenu na proces konstruiranja i projektiranja, sustava za izgaranje biomase u samom početku te znatno skraćuje razvojni proces novih, naprednih plamenika, generatora topline i generatora pare.

U posljednja dva desetljeća računalne simulacije pomoću numeričkih metoda pružaju znatno bolji pristup, od korištenja tradicionalnih eksperimentalnih metoda i fizikalnih modela. Razlog tome je činjenica da su računala postala izuzetno brza i jeftinija. Pored toga, modeli turbulentnog strujanja s kemijskim reakcijama, koji se primjenjuju za simulacije izgaranja, toliko su napredovali da zajedno s dostupnom znatnom računalnom snagom omogućuju primjenu na vrlo kompleksne sustave u industrijskoj primjeni.

Unatoč razvoju modela, numeričke metode mogu dovesti do grešaka koje su veće od onih koje proizlaze iz pretpostavki koje modeli turbulentnog strujanja s kemijskim reakcijama uključuju.

Pored toga, numeričke sheme, koje se koriste za simulacije realnih sustava izgaranja, su sa izuzetno složenim fizikalnim i kemijskim procesima te složenim geometrijskim oblicima. To može biti uzrok problema kod numeričke stabilnosti. Kako bi se ovi problemi riješili, razni modeli su u fazi razvoja kako bi omogućili transfer tehnologije iz istraživačke faze na praktičnu primjenu u fazi projektiranja i izrade sustava za izgaranje biomase.

1.2 Znanstveni doprinos

U ovom je radu analiziran problem izgaranja biomase u ložištima s pomičnom rešetkom, odnosno izgaranje biomase u pomičnom sloju. Analiziran je slučaj izgaranja krutog goriva koje nastaje kao otpad u procesu proizvodnje namještaja. Ova vrsta drvene biomase je karakterizirana s visokim udjelom dušika u gorivu. Za izradu modela prijenosa topline i tvari, kao i strujanja plinske faze, primijenjen je komercijalni programski paket FLUENT. Za model izgaranja biomase izrađen je prilagođeni jednodimenzijski nestacionarni model izgaranja biomase u nepomičnom sloju, prema (1). Jednodimenzijski model je prilagođen tako da prikazuje temperature i sastav plinova na izlazu iz ložišta uključivo s nastajanjem i razgradnjom dušikovih oksida u sloju biomase u ložištu. Nestacionarni model je prilagođen tako da prikazuje stacionarni dvodimenzijski model, uz poznatu brzinu kretanja biomase po

dužini rešetke. Postavljeni matematički model je validiran eksperimentalnim mjerenjima na fizikalnom modelu ložišta u stvarnoj veličini. Mjerenja su provedena za karakteristične veličine izgaranja, sastav i temperaturu dimnih plinova te iskoristivost generatora topline.

Za izradu modela nastajanja dušikovih oksida korištena su istraživanja (2) i (3) koja su istraživala modalitete nastajanja dušikovih oksida i spojeva koji prethode nastanku dušikovih oksida, amonijaka (NH_3) i cijanovodika (HCN), za goriva drvene biomase različitog porijekla i udjela dušika u gorivu.

Numeričke simulacije su provedene za različite mogućnosti poboljšanja promjenama parametara rada ložišta, a u cilju povećanja iskoristivosti i smanjenja emisija ugljik(II)-oksida i dušikovih oksida (NO_x).

Znanstveni doprinos rada je izrada specifičnog modela izgaranja drvene biomase s nastajanjem dušikovih oksida koji je integriran s komercijalnim računalnim programskim paketom FLUENT. Dobiveni su rezultati koji prikazuju načine optimiziranja ložišta s izgaranjem drvene biomase u sloju s povećanim udjelom dušika, a u cilju smanjenja emisija dušikovih oksida (NO_x) i ugljik(II)-oksida, uz izgaranje s visokom učinkovitošću.

2 OSNOVE IZGARANJA BIOMASE

2.1 Sastav i svojstva biomase

U ovom se poglavlju prikazuju osnovna svojstva biomase kao i pojave koje se odvijaju prilikom zagrijavanja biomase. Biomasa pripada skupini krutih goriva i kao takva prolazi kroz određene faze prilikom izgaranja, slično kao i druga kruta goriva (npr. ugljen). Ipak, biomasa, odnosno drvena biomasa, ima određene specifičnosti na koje je potrebno obratiti pozornost kod modeliranja i proračuna izgaranja. Kruta se goriva dijele u tri osnovne skupine:

1. Ugljeni
2. Biomasa
3. Ostalo (otpad i dr.)

Ugljeni i biomasa su goriva koja su sačinjena od skupine organskih polimera koji se pretežno sastoje od lanaca aromatskih ugljikovodika u kombinaciji s ugljikovodicima i drugim elementima (kisikom, dušikom, sumporom, natrijem i drugim). Ugljeni nastaju pretežno polaganim raspadom biomase, čiji stupanj raspadanja određuje vrstu ugljena.

2.2 Fizikalna svojstva

Najvažnija fizikalna svojstva, koja su bitna za izgaranje i daljnja razmatranja u ovom radu, su:

- veličina i distribucija veličina čestica
- oblik čestica
- poroznost čestica

Kako je u ovom radu analizirano izgaranje biomase u sloju na pomičnoj rešetci, jasno je da veličina čestica ima najznačajniji utjecaj na izgaranje biomase.

Prije dovođenja u ložište, na rešetku, biomasa se usitnjava u posebnim strojevima, tzv. hakerima. Veličina na koju se usitnjava biomasa može varirati od 10^{-6} do 10^{-2} m. Srednja veličina biomase je važan faktor kod projektiranja sustava za izgaranje biomase, ali i kod transporta biomase do ložišta.

Srednja veličina biomase se utvrđuje laboratorijski, pomoću nekoliko metoda. Najčešće korištena metoda je pomoću pregrada sa kalibriranim otvorima koje se nalaze poredane vertikalno, od najvećih otvora prema manjim. Vibriranjem biomase postiže se da se na svakoj pregradi grupira određena masa tvari, pomoću koje se utvrđuje distribucija veličina čestica.

Iz ovako dobivenih podataka, za potrebe matematičkog modeliranja, određuje se srednji promjer čestica prema izrazu:

$$d_{\check{c},sr} = \sum_{i=1}^n d_{\check{c},i} \cdot w_i \quad (2.2.1)$$

gdje su:

- $d_{\check{c},i}$ – srednji promjer skupine čestica
 w_i – maseni udio skupine čestica u ukupnoj masi
 n – broj skupina veličina čestica

Pored veličina čestica, oblik čestica je također bitan za procese izgaranja biomase na rešetki. Brzine heterogenih reakcija (plin-kruta faza), među kojim je i oksidacija i izgaranje krutog ostatka devolatilizacije, ovise o površini čestica na kojoj se odvijaju navedene reakcije. Za isti volumen čestice, one s većom površinom imaju veće brzine navedenih heterogenih reakcija. Za određivanje oblika čestica koristi se parametar koji se naziva sferičnost. Sferičnost čestice, kao bezdimenzijsku oznaku možemo označiti kao :

$$\varphi_{\check{c}} = \frac{A_{\check{c},sfera}}{A_{\check{c}}} \quad (2.2.2)$$

- $A_{\check{c},sfera}$ – površina sfere s istim volumenom promatrane čestice
 $A_{\check{c}}$ – površina promatrane čestice

Sferičnost kao vrijednost se približava broju 1 kada je čestica približno oblika kugle. Čestice su rijetko sferičnog oblika, čak i kad su posebno obrađene i pripremljene. Npr., čestice ugljena ili pijeska su u rasponu od $\varphi_{\check{c}} = 0.6$ do 0.9. Čestice biomase, koje čine tipičnu drvenu sječku, imaju $\varphi_{\check{c}} = 0.2$.

Poroznost čestica je bitan čimbenik jer su kruta goriva pretežno vrlo porozna. Gotovo je pola volumena čestica krutih goriva ispunjeno šupljinama (prosječno kod svih krutih goriva). Većina tih šupljina je na mikroskopskom nivou, unutar čestica. Poroznost se može definirati pomoću dvije definicije gustoće:

1. Prividna gustoća čestica – omjer mase prosječne čestice i volumena koji ona zauzima uključujući volumen šupljina unutar i između čestica – kod biomase se kreće oko 700 kg/m³
2. Stvarna gustoća – omjer mase prosječne čestice i volumena koji zauzima bez volumena unutarnjih šupljina i pora – kod biomase ova se gustoća kreće oko 1400 kg/m³

Poroznost je omjer volumena koji zauzimaju šupljine unutar čestice i ukupnog volumena čestice:

$$\theta_{\check{c}} = 1 - \frac{\rho_{prividna}}{\rho_{stvarna}} \quad (2.2.3)$$

2.3 Kemijska svojstva

Sastav i molekularna struktura krutih goriva (ugljena i biomase) su vrlo kompleksni te uključuju niz anorganskih i organskih kemijskih spojeva. Najveći dio organskih spojeva je u

obliku lanaca ugljikovodika. Pored atoma C,H,O i N, u sastavu su također S, Fe, Ca, K, Cl i metali u tragovima. U sastavu biomase su često prisutni alkalni K, Na i spojevi klora (Cl) u značajnijim količinama.

Analize, kojima se definiraju kemijska svojstva krutih goriva, su analiza sastava (eng. proximate analysis) i elementarna analiza (eng. ultimate analysis). Analiza sastava određuje:

- udjel vlage u gorivu (određuje se održavanjem uzorka goriva u inertnom plinu na 378 K, pri atmosferskom tlaku, dok se masa uzorka ne stabilizira);
- udjel hlapive tvari – eng. volatiles (određuje se održavanjem uzorka goriva u inertnom plinu na 1300 K, dok se masa uzorka ne stabilizira);
- preostali ugljik – eng. fixed carbon (određuje se tako da se uzorku, nakon ishlapljivanja na 1300 K, dovodi kisik zbog čega isti oksidira do izgaranja svog gorivog ugljika);
- udjel pepela (omjer početne mase uzorka i ostatka nakon navedenih postupaka).

Elementarnom analizom se određuju maseni udjeli kemijskih elemenata koji čine kruto gorivo. U najvećem su dijelu zastupljeni ugljik, vodik, dušik i kisik. Ostali elementi čine pepeo koji se pretežno sastoji od oksida metala.

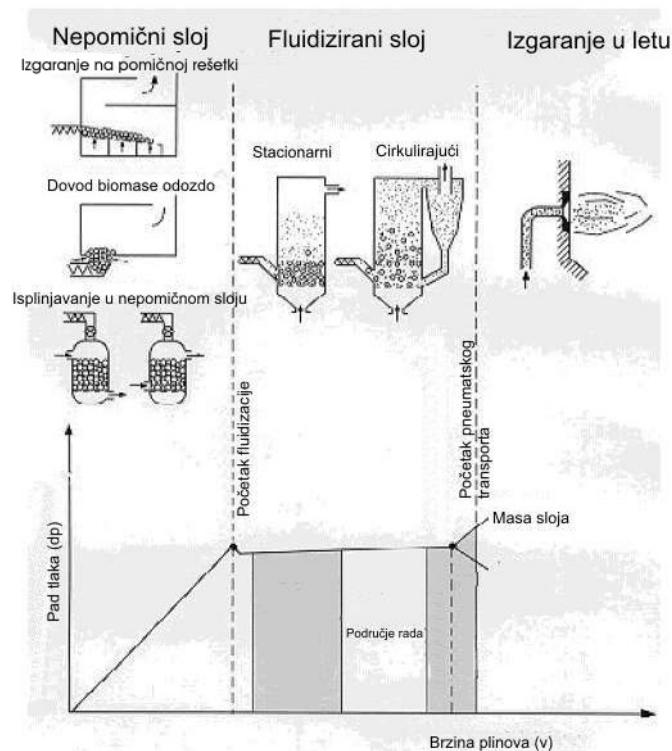
Jedna od razlika između krutih goriva – biomase i ugljena je omjer ugljika i vodika (C/H). Taj se omjer kod biomase kreće oko 10, dok je kod lignita oko 14, a kod antracita čak 30. Osnovni razlog tome je činjenica što su produkti raspadanja biomase plinovi manje molekularne mase i organske tekućine s većim udjelom vodika. Tako se kod pretvorbe biomase u ugljen taj omjer povećava s protokom vremena.

Biomasa, kao kruto gorivo, u pogledu kemijskih svojstava ima određene prednosti, ali i nedostatke. Biomasa je obnovljivi izvor energije te se smatra da je emisija CO₂ koja nastaje izgaranjem biomase praktički jednaka nuli. Većina goriva iz biomase je s vrlo malim udjelom pepela, što olakšava održavanje opreme i zbrinjavanje otpadnog pepela koji nastaje izgaranjem.

Nedostaci goriva iz biomase su znatni udjeli vlage u sastavu goriva (u vezanom i nevezanom obliku), alkalnih spojeva (kalij i natrij) i klora. Povećana vlaga u gorivu smanjuje ogrjevnost i zahtjeva izvedbe ložišta s velikim površinama za zagrijavanje i sušenje biomase. Alkalni spojevi i klor doprinose koroziji i eroziji ogrjevnih površina generatora pare ili generatora topline.

2.1 Izvedbe ložišta na drvenu biomasu

Izvedbe ložišta koja kao gorivo koriste drvenu biomasu su različita i dijele se prema nekoliko kriterija. Osnovna podjela je na ložišta s obzirom na vrstu i karakteristike biomase i strujanje zraka odnosno dimnih plinova. Na dijagramu je ilustrirana ova osnovna podjela:



Slika 3 Podjela ložišta za biomasu prema vrsti i brzini strujanja (4)

Ložišta kod kojih se izgaranje odvija u na pomičnoj rešetki u sloju spadaju u klasične tipove ložišta. Postoje različite vrste izvedbi ložišta koja karakterizira ovaj tip izgaranja, a dijele se prema načinu pomicanja rešetke (kosa nepomična rešetka, kontinuirano pomična rešetka, rešetka s sustavom pomicanja naprijed-nazad, vibrirajuća rešetka). Za različita goriva postoje druge izvedbe, na primjer tzv. “cigar burner“ za izgaranje slamnatog goriva. Sve ove različite izvedbe su u principu izgaranje biomase u sloju.

Novije izvedbe su dovodom biomase odozdo (tzv. Stoker) za manje ili srednje toplinske učine te izgaranje u fluidiziranom sloju (FBC), u izvedbi cirkulirajućeg tipa (CFB) i pod tlakom (PFBC) za veće toplinske učine.

2.2 Izvedbe ložišta s izgaranjem u sloju

Sloj čestica krutog goriva smješten je u zbijenom sloju na rešetki koja se nalazi na dnu ložišta. Ispod rešetke se dovodi zrak na sloj čestica goriva. Na kraju sloja se kontinuirano dozira kruto

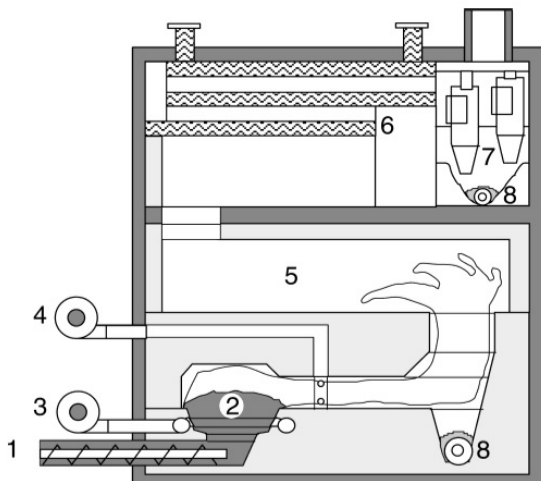
gorivo što rezultira i potrebom da se pomiče sloj goriva mehanizmom pomične rešetke. Dio gorivih tvari iz goriva izgara u samom sloju goriva i u neposrednoj blizini iznad sloja goriva, uslijed čega nastaje ugljik(IV)-oksid i vodena para u uvjetima dovoljne količine zraka. U slučaju podstehiometrijskog dovođenja zraka nastaje i ugljik(II)-oksid te neizgoreni ugljikovodici (C_xH_y). Isti izgaraju u ložištu tako da se dovodi sekundarni zrak za izgaranje, čime se postiže spomenuto stupnjevano izgaranje. Drugi produkti izgaranja su pepeo i lebdeće krute čestice koje odlaze iz sloja ložišta nošene strujom plinova.

Kod sustava za izgaranje biomase, koji koriste tehnologiju izgaranja u sloju na rešetki, razlikuju se dva područja ili zone. To su zona fluida iznad sloja biomase (over-bed zona) te zona koja je u osnovi sloj biomase (fuel-bed zona).

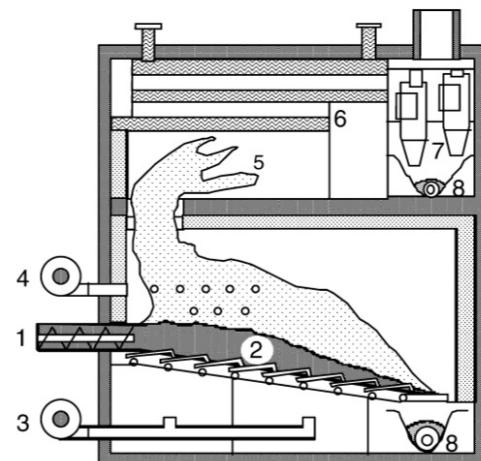
Zona fluida se definira kao plinska faza koja izlazi iz sloja biomase na rešetki, a sastoji se od plinova koji nastaju u procesima izgaranja biomase u sloju. Donja granica ove zone je površina sloja biomase. Unutar ove zone uvode se sekundarni i tercijarni zrak za izgaranje kao i recirkulacija dimnih plinova.

Sloj biomase je zona s dvije faze; u osnovi se sastoji od krutih čestica goriva (biomase) i plinova koji ih okružuju. Neke od pojava, koje se odvijaju unutar sloja biomase, su izmjena topline i tvari te kemijske reakcije.

Postoje dvije izvedbe ložišta gdje gorivo izgara u sloju: ložište s izgaranjem uz dovod goriva odozdo (eng. understoker) i ložište s pomičnom rešetkom. Osnovna je razlika u načinu dovoda goriva i odvoda pepela koji preostaje nakon izgaranja.



Slika 4 Ložište s dovodom goriva odozdo



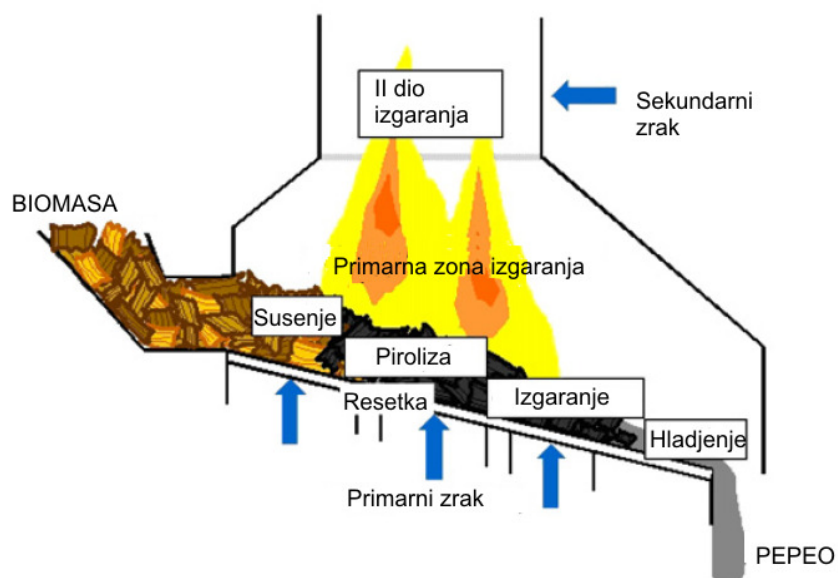
Slika 5 Ložište s pomičnom rešetkom

- 1 – dovod goriva (drvene biomase)
- 2 – zona nepomičnog sloja
- 3 – dovod primarnog zraka
- 4 – dovod sekundarnog zraka
- 5 – ložište
- 6 – cijevi za predaju topline
- 7 – ciklonski otprašivač
- 8 – odvod pepela iz ložišta

Procesi koji se odvijaju u ova dva tipa ložišta su različiti. Smjerovi kretanja goriva za izgaranje i zraka za izgaranje su kod ložišta na Slika 4 istosmjerni, dok se kod ložišta prikazanog na Slika 5 zrak za izgaranje i gorivo kreću poprečno.

Ložišta s pomičnom rešetkom

Kako se kruto gorivo zagrijava na rešetki, u prvoj fazi vlaga iz goriva isparava, nakon čega dolazi do razgradnje organskih tvari i oslobađanja volatila. Količina volatila koji će se osloboditi ovisi o više utjecajnih faktora, od čega prevladavaju udio volatila u biomasi i temperatura. Proces oslobađanja volatila može biti egzoterman ili endoterman. Količina topline kod ovih procesa je dovoljno mala da se može zanemariti, te se ovaj proces može smatrati toplinski neutralnim.



Slika 6 Shematski prikaz procesa u ložištu

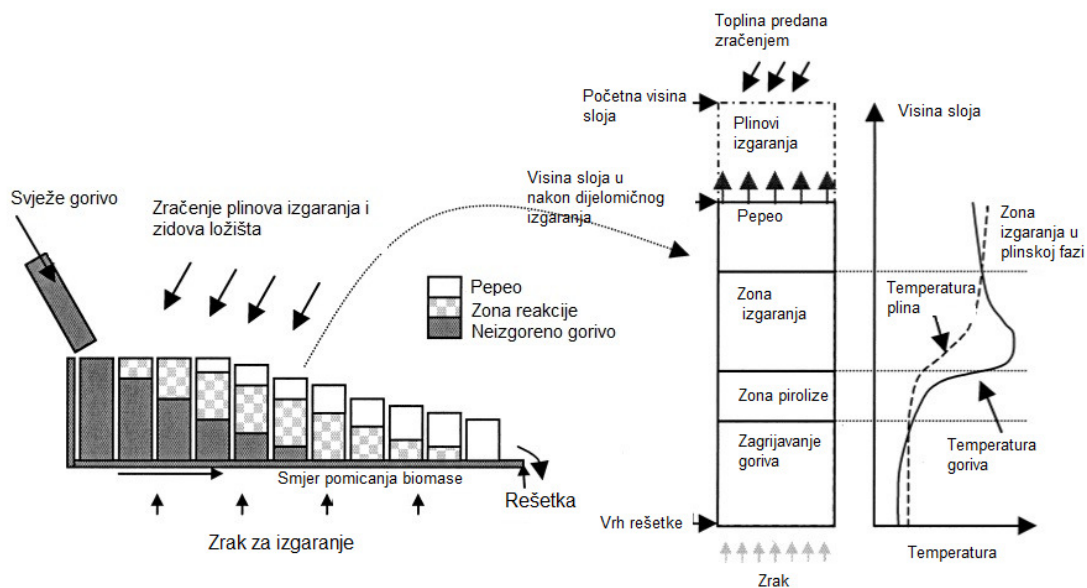
Ispod zone sloja biomase nalazi se rešetka koja po izvedbi može biti fiksna ili pomična, horizontalna ili nakošena.

2.3 Procesi kod izgaranja biomase

Procesi koji prate izgaranje biomase su brojni, složeni i često se događaju istodobno, pa je izgaranje biomase zahtjevan problem za matematičko modeliranje.

U ovom se radu analizira ložište s rešetkom na kojoj se odvijaju procesi vezani uz izgaranje drvene biomase. U nastavku je dan prikaz osnovnih i najvažnijih procesa te pojava koje se

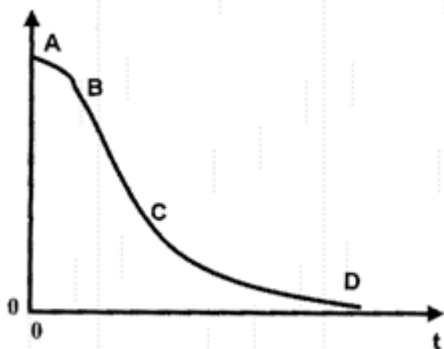
vezuju uz izgaranje biomase na rešetki. Izgaranje biomase karakteriziraju pojave sušenja, primarne i sekundarne devolatilizacije (isplinjavanja), izgaranje krutog ostatka.



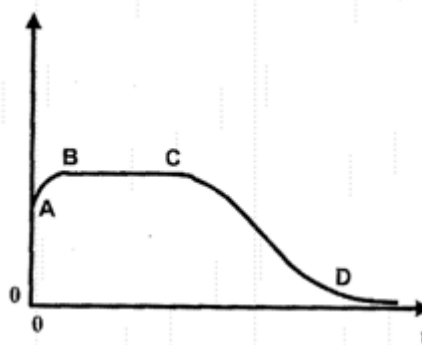
Slika 7 Prikaz procesa kod izgaranja biomase u sloju na rešetki

Sušenje biomase

Kada biomasa ulazi u ložište, prvi proces koji otpočinje je proces sušenja, gdje se oslobađa voda odnosno vlaga vezana u biomasi. Taj je proces najviše ovisan o sadržaju vlage u samoj biomasi, ali i o načinu izgaranja i temperaturama u ložištu. Mehanizam oslobađanja vlage ovisi o temperaturi biomase u zoni sušenja, te se može odvijati kao ishlapljivanje ili isparivanje. Sušenje čestice krutog goriva uključuje tri faze, vodu kao kapljevину, vodenu paru i poroznu česticu krutog goriva kroz koju prolazi voda u obliku kapljevine i pare. Na Slika 8 i Slika 9 prikazani su procesi sušenja poroznih čestica goriva i promjena udjela vlage i brzine sušenja u ovisnosti o vremenu t . Čestica goriva je izložena atmosferi s konstantnom temperaturom i udjelom vlage ispod zasićenja.



Slika 8 Udio vlage ($\rho_{H_2O_{tek}}$) u ovisnosti o vremenu sušenja porozne čestice biomase



Slika 9 Brzina sušenja porozne čestice biomase $d(\rho_{H_2O_{tek}})/dt$ u ovisnosti o vremenu

Vremenski interval od točke A do točke B je zagrijavanje čestice goriva. U tom se vremenu čestica zagrijava na dva moguća načina:

1. U slučaju da je temperatura čestice jednaka ili viša od temperatura zasićenja za tlak u promatranom slučaju, voda na površini čestice se zagrijava na temperaturu zasićenja plina koji je u blizini površine čestice.
2. U slučaju da je temperatura ispod točke vrenja za promatrani slučaj, voda na površini čestice se zagrijava do adijabatske temperature zasićenja za plinove koji su u blizini površine čestice

Vremenski interval od B do C je sušenje konstantnom brzinom. Kada je čestica dovoljno zagrijana i kada se na površini nalazi sloj vode u kapljevitom obliku, voda isparava u plinsku fazu koja okružuje česticu. Voda iz unutrašnjih slojeva čestice se putem različitih mehanizama prenosi na površinu čestice. Brzina toga prijelaza diktirana je fizikalnim i kemijskim svojstvima čestice i ona limitira isparivanje vode u ovoj fazi.

Vremenski interval od C do D je sušenje sa sve manjom brzinom. Voda u slobodnom obliku nije više dostupna na površini čestice. Površina na kojoj se odvija isparavanje, nije više na površini čestice nego u unutrašnjosti čestice. Para, koja nastaje isparivanjem u unutrašnjosti čestice, prelazi kroz područje isušenog materijala oko središta čestice koje još uvijek sadrži vlagu. U konstantnim uvjetima plinova koji okružuju česticu, brzina isparivanja se smanjuje uslijed povećanja debljine sloja isušenog materijala oko zone isparivanja.

Kod ložišta za izgaranje biomase zona sušenja je odmah nakon ulaska biomase u ložište, a u sloju duljina zone sušenja je proporcionalna udjelu vlage u biomasi. Kod izgaranja biomase u sloju, sa povećanim udjelom vlage u biomasi (više od 40%), dolazi do pomicanja zone sušenja u tolikoj mjeri da procesi izgaranja počinju tek na kraju sloja (rešetke), pa dolazi do gašenja plamena i nepotpunog izgaranja. Za takva goriva je potrebno posebno prilagoditi konstrukciju rešetke i samoga generatora topline, kako bi se izgaranje odvijalo s prihvatljivom iskoristivosti.

Iskustvo pokazuje da je izgaranje goriva s udjelima vlage od 60% i više praktički nemoguće iz razloga što je za isparivanje vodene pare i zagrijavanje iste potrebna tolika količina energije da nije moguće održavanje dovoljno visoke temperature za stabilan proces izgaranja.

Dok se odvija proces sušenja, prije nego što se oslobodi vlaga koja je u sastavu goriva, ne započinje proces devolatilizacije, tako da se ova dva procesa, jedno vrijeme, odvijaju istovremeno.

Devolatilizacija (oslobađanje plinova)

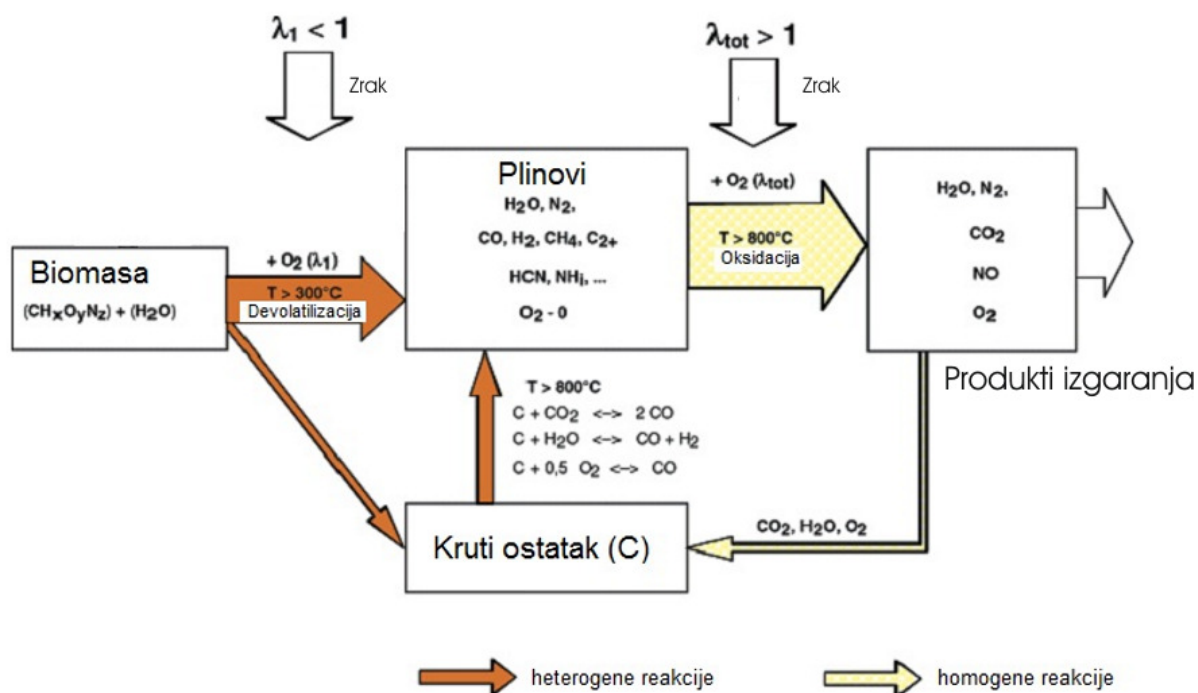
Nakon završetka procesa sušenja goriva, tijekom kojeg se oslobađa slobodna vlaga, dolazi do porasta temperature i do početka razgradnje čestica krutog goriva uz oslobađanje plinova. Kako ti plinovi izlaze iz pora i šupljina krutog goriva (drvene biomase) kisik, koji je prisutan u okolini, ne može ući unutar čestice, pa se tako faza oslobađanja plinova naziva oslobađanje volatila odnosno ponekad, pogrešno, piroliza. Brzina oslobađanja plinova ovisi o temperaturi i

vrsti krutog goriva. Plinovi, koji nastaju kao produkti ovog procesa, oksidiraju i formiraju plamen oko ovojnice čestice goriva kako kisik dolazi difuzijom u kontakt sa zapaljivim plinovima. Nastala fronta plamena zagrijava česticu što dodatno pospješuje proces oslobađanja plinova. Ako je u čestici još prisutna vlaga, proces se usporava sve dok se ne oslobodi sva vlaga sadržana unutar čestice.

Isplinjavanje ili piroliza je proces koji uključuje kemijske reakcije, prijenos topline i tvari, koji ima za rezultat oslobađanje smjese plinova i kapljevina organskog i anorganskog porijekla iz čestice krutog goriva u okolnu atmosferu.

Piroliza je proces koji podrazumijeva isplinjavanje u inertnoj atmosferi koja okružuje česticu goriva. Kako to nije slučaj za procese koji se odvijaju u ložištima koja koriste biomasu kao gorivo, u daljnjem tekstu će se koristiti termin devolatilizacija.

Tijekom procesa oslobađanja volatila odvijaju se različite reakcije razgradnje od kojih su najznačajnije pucanje molekularnih struktura, prelazak vodika, reakcije supstitucije i međusobno povezivanje molekula. Neke od ovih reakcija i pojava dovode do oslobađanja volatila, dok druge uzrokuju pojavu krutog ostatka.



Slika 10 Devolatilizacija i oksidacija biomase (reakcije)

Općenito, proces devolatilizacije se može podijeliti u tri koraka: procesi koji prethode devolatilizaciji, primarna devolatilizacija i sekundarna devolatilizacija. Tijekom procesa koji prethode pirolizi u temperaturnom rasponu od 373 – 680 K, odvijaju se:

- sušenje
- razbijanje vodikovih veza
- isparivanje i difuzija molekula bez kovalentnih veza

- međupovezivanje molekula (cross-linking) pri nižim temperaturama koje se događa istovremeno kao i pojava CO₂ i H₂O

Tijekom primarne devolatilizacije dolazi do procesa:

- pucanja najslabijih veza i nastajanja fragmenata molekula – koji se oslobađaju kao katran ako malih dimenzija, tako što ispare iz čestica vezanog ugljika
- srednje-temperaturno međupovezivanje molekula (cross-linking)
- razgradnja organskih funkcijskih grupa što dovodi do otpuštanja pretežno CO₂, a u manjoj mjeri CH₄ i H₂O

Na kraju, u procesu sekundarne devolatilizacije se oslobađaju još plinovi manje molekularne mase i dolazi do formiranja aromatske čvrste strukture.

Kod drvna biomase proces devolatilizacije počinje s raspadanjem molekula hemiceluloze u temperaturnom rasponu 225-325⁰C. Nakon toga slijedi celuloza na temperaturama 325-375⁰C i na kraju molekule lignina na 300-500⁰C. Ovi spojevi čine glavninu spojeva koji prolaze kroz proces devolatilizacije. Proizvodi procesa devolatilizacije su pare ugljikovodika, tekućine, katran i voda koji se ubrzo nakon nastajanja u uvjetima visokih temperatura izgaranja raspadaju, te se može reći da su proizvodi devolatilizacije pretežno jednostavni ugljikovodici, ugljik(II)-oksid, ugljik(IV)-oksid, vodik i vodena para. Sastav plinova koji nastaju u procesu devolatilizacije je ovisan o donjoj ogrijevnoj vrijednosti goriva.

Brzina devolatilizacije može se aproksimirati prema Arrheniusu kao kemijska reakcija prvog reda:

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v k_{pir} \quad (2.2.1)$$

Skup kemijskih reakcija se aproksimira jednom reakcijom (single-step) koja je definirana koeficijentima za brzinu odvijanja reakcije:

$$k_{pir} = -k_{0,pir} \cdot e^{\left(-\frac{E_{pir}}{RT_{cest}}\right)} \quad (2.2.2)$$

$$m_v = m_{cest} - m_{uglj} - m_{pepeo} \quad (2.2.3)$$

m_v – masa volatila sadržanih u čestici biomase

k_{pir} – brzina odvijanja kemijske reakcije devolatilizacije prvog reda (single-step reakcija)

E_{pir} – energija aktivacije kemijske reakcije

T_{cest} – srednja temperatura čestice

Prema izrazu (2.2.3) masa plinova koji nastaju devolatilizacijom je jednaka masi suhih čestica umanjenoj za masu vezanog ugljika i pepela. Iz izraza (2.2.2) slijedi da je brzina devolatilizacije neovisna o veličini čestice, sve dok je temperatura čestice konstantna. Za goriva koje imaju veću granulaciju potrebno je uzeti u obzir veličinu čestica i vrijeme

potrebno za zagrijavanje čestica. Na ovaj se način pretpostavlja da je pretvorba iz krutog u plinovito stanje rezultat jedne heterogene reakcije.

U stvarnosti kruta goriva tijekom procesa devolatilizacije sudjeluju u više različitih heterogenih kemijskih reakcija. Neke od tih reakcija su endotermne, a neke egzotermne koje se odvijaju pri različitim brzinama odvijanja kemijskih reakcija. Unatoč tome u zbroju se te reakcije energetski poništavaju pa se toplinska bilanca procesa devolatilizacije smatra jednaka ili približna nuli.

Izgaranje krutog ostatka

Nakon devolatilizacije počinje zadnji stupanj u izgaranju krutih goriva, izgaranje krutog ostatka (eng. char). Kao i već navedeni procesi, izgaranje ugljika otpočinje još u toku devolatilizacije. Nakon devolatilizacije na rešetci ostaju kruti ostatak i pepeo. Kruti ostatak, koji nastaje nakon devolatilizacije drvene biomase, vrlo je porozan te ima površinu unutarnjih pora reda veličine 10.000 m² po gramu. Kako više nema plinova koji izlaze iz pora goriva u ovoj fazi izgaranja, kisik može difuzijom doći u vanjske rubne slojeve čestice goriva. Brzina izgaranja čestice goriva (krutog ostatka) ovisi o brzini heterogene kemijske reakcije ugljika koja se odvija na površini čestice i brzini difuzije kisika u rubni sloj čestice gdje se ta reakcija odvija. Manja od ove dvije brzine je limitirajući i diktira brzinu izgaranja krutog ostatka. Heterogena reakcija na površini uglavnom rezultira s nastajanjem ugljik(II)-oksida (CO). Nakon što napusti rubni sloj CO reagira s kisikom uz nastajanje ugljik(IV)-oksida (CO₂). Brzina navedena kemijske reakcije ovisi o više faktora, koncentraciji kisika, temperaturi plina, veličini čestice krutog ostatka, poroznosti i karakteristikama turbulentnog strujanja plinova (Reynoldsov broj).

Kemijske reakcije oksidacije na površini krutog ostatka su složene pa se za potrebe modeliranja koriste globalne reakcije koje opisuju mehanizme više reakcija u jednoj. Reakcija ugljika u krutom ostatku s kisikom u rubnom sloju, iz koje nastaje ugljik(II)-oksid, može se napisati:



Iz ugljika može nastati i izravno ugljik(IV)-oksid, ali je to uglavnom ipak ugljik(II)-oksid. Površina krutog ostatka reagira i sa vodenom parom i ugljik(IV)-oksidom prema slijedećim reakcijama:



Reakcije redukcije (2.2.5) i (2.2.6) su općenito sporije od reakcije oksidacije i prilikom izgaranja biomase u sloju reakcija (2.2.4) je dominantna. U slučajevima uplinjavanja ili pirolize gdje je kisik u manjim stehiometrijskim omjerima u odnosu na klasično izgaranje reakcije (2.2.5) i (2.2.6) je potrebno uzeti u obzir.

Nastajanje dušikovih oksida u ložištima s izgaranjem krutog goriva (biomase) u sloju

Kod izgaranja krutog goriva (biomase), manji dio dušikovih oksida nastaje oksidacijom dušika, koji u proces izgaranja ulazi zajedno sa zrakom za izgaranje, dok veći dio nastaje iz dušika i dušikovih spojeva sadržanih u krutom gorivu. Termički i promptni NO nastaju oksidacijom dušika prisutnog u zraku za izgaranje, dok veći dio dušikovih oksida nastaje oksidacijom dušika iz goriva.

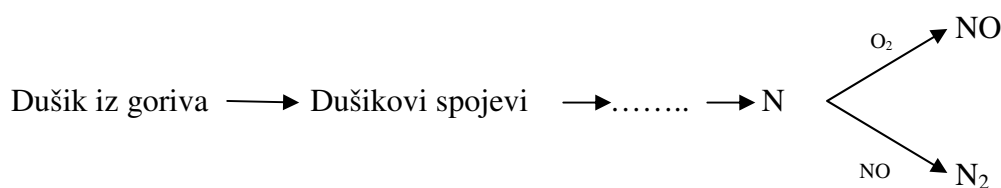
Dušikovi oksidi koji se označavaju s NO_x su dušik(II)-oksid (NO) i dušik(IV)-oksid (NO_2). U procesu izgaranja nastaju kao produkti izgaranja dušikovi oksidi (NO_x). U ložištu glavninu dušikovih oksida (NO_x) čini dušik(II)-oksid (NO), dok je udjel dušik(IV)-oksida (NO_2) najviše do 5 % ukupnog NO_x . NO koji izlazi iz ložišta u atmosferi vrlo brzo oksidira i prelazi u NO_2 .

Dušikovi spojevi koji nastaju u procesu izgaranja krutog goriva sudjeluju u reakcijama u plinskoj fazi i reakcijama između plinske faze i krute faze (homogene i heterogene reakcije).

Nastajanje dušikovih oksida iz dušika sadržanoga u gorivu

Dušik sadržan u gorivu se tijekom devolatilizacije goriva i izgaranja krutog ostatka vrlo brzim reakcijama veže u amonijak NH_3 i cijanovodik HCN. Iz tih dušikovih spojeva nizom reakcija nastaje dušik koji se oksidira i tvori NO ili se reducira s NO i tvori N_2 .

Odnos i omjer nastalih dušikovih spojeva ovisi o više faktora, ali kada se radi o biomasi, prvenstveno o vrsti biomase i udjelu ukupnog dušika u biomasi. Prema istraživanjima (3) nastajanje NO i spojeva koji prethode nastajanju NO iz šest različitih tipova biomase, omjer HCN i NH_3 ovisi o omjeru sadržaja vodika i dušika u biomasi. Posebno je to važno za biomasu s velikim udjelom dušika (>0,5%), gdje se omjeri znatno mijenjaju (5).



Za razliku od tekućih goriva, mehanizam nastajanja dušikovih oksida iz krutih goriva je složeniji jer uključuje i reakcije koje se odvijaju između plinova, ali i između plinova i krute faze. Tako se shema reakcija, prema kojim nastaju dušikovi oksidi iz krutog goriva (biomase), može podijeliti na homogene i heterogene reakcije.

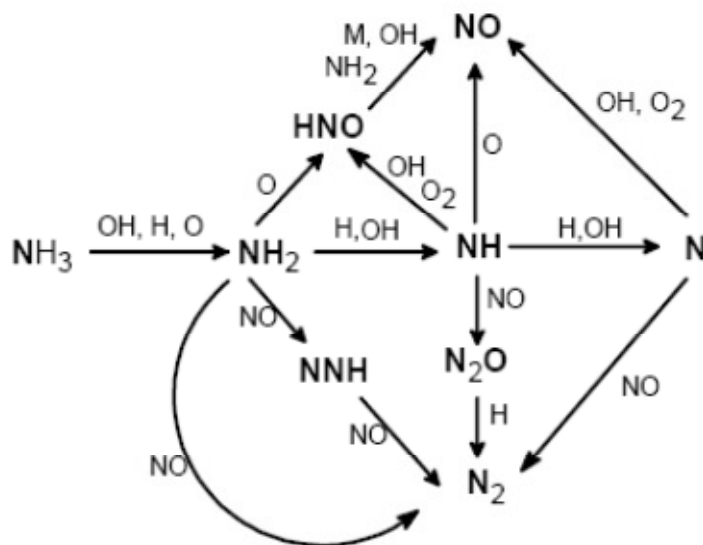
Homogene reakcije

Prema istraživanjima (6) razvijen je opsežni model kemijskih reakcija i brzina kemijskih reakcija kod konverzije dušikovih spojeva. Isti uključuje 234 kemijskih reakcija koje pored dušika uključuju kemijske spojeve s ugljikom, kisikom i vodikom. Veliki broj od ovih reakcija ima već određene koeficijente koji se zasnivaju na mjerenjima. Za elementarne reakcije često ne postoje dostupni podaci o koeficijentima reakcija. Za takve reakcije se koristi teoretska analiza prema teoriji Rice-Ramsperger-Kassel (7) za procjenu koeficijenata potrebnih za određivanje kemijskih reakcija.

Oksidacija amonijaka (NH_3)

NH_3 sudjeluje s najvećim udjelom u dušikovim spojevima koju nastaju u procesu izgaranja biomase kod goriva s velikim udjelom dušika (5) te je proces oksidacije amonijaka vrlo bitan za tvorbu dušikovih oksida. Sveobuhvatni mehanizam oksidacije NH_3 opisuje veliki broj reakcija kemijskih spojeva. Zbog toga je ovdje prikazan pojednostavljeni mehanizam s najvažnijim kemijskim reakcijama. Reakcije, koje dominiraju, ovise o uvjetima pod kojima se odvija izgaranje amonijaka. Primjer puta oksidacije NH_3 je prikazan na Slika 11. Najprije se NH_3 pretvara u NH_2 s oduzimanjem atoma vodika. Katalizator za ovaj proces su najviše OH radikali, te uz uvjete bogate smjese O radikali odnosno siromašne smjese H radikali. Nakon toga nastaju NH_i radikali u reakcijama s pretežno H radikalima. Svaki od NH_i radikala dalje reagira tako da mogu nastati NO ili N_2 .

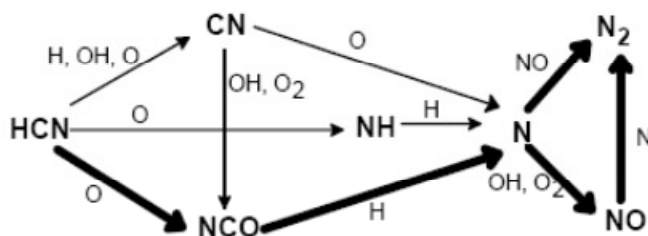
U uvjetima izgaranja na rešetki, pri visokim temperaturama i visokim koncentracijama radikala, atomi vodika se lako odvajaju od NH_i radikala. Tako je dominantni radikal u zonama izgaranja N. Tako je upravo taj radikal i reakcije kojima se isti reducira određuju nastajanje NO ili N_2 . Za goriva s znatnim udjelom dušika međusobne reakcije radikala NH_i rezultiraju nastajanjem N_2 .



Slika 11 Reakcije koje opisuju oksidaciju NH_3 u zoni izgaranja prema (6)

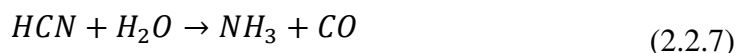
Oksidacija cijanovodika (HCN)

HCN sudjeluje sa znatnim udjelom u dušikovim spojevima koju nastaju u procesu izgaranja biomase kod goriva s velikim udjelom dušika. Proces oksidacije cijanovodika je vrlo bitan za tvorbu dušikovih oksida. Sveobuhvatni mehanizam oksidacije HCN opisuje veliki broj reakcija kemijskih spojeva. Zbog toga je ovdje, kao i za amonijak, prikazan pojednostavljeni mehanizam s najvažnijim kemijskim reakcijama. Reakcije koje dominiraju ovise o uvjetima pod kojima se odvija izgaranje. Primjer puta oksidacije cijanovodika je prikazan na Slika 12. HCN pretežno formira radikal NCO uz prisutnost O radikala. Kemijski spoj NCO putem dvije reakcije, uz prisutnost radikala vodika H, prelazi u N radikal. N radikal se reducira s NO ili oksidira, ovisno o sastavu plinske smjese i uvjetima okoline.



Slika 12 Oksidacija HCN u pri tipičnim uvjetima u plamenu (6)

Mehanizam oksidacija HCN je izuzetno ovisan o sastavu okolnoga plina. Prisutnost ugljik(II)-oksida (CO) znatno pospješuje potrošnju HCN. Pretpostavlja se da CO smanjuje koncentraciju slobodnih OH radikala i povećava koncentraciju O radikala, što dovodi do povećane razgradnje HCN na niskim temperaturama uslijed reakcije NCO i O radikala. Primijećeno je, također, da pri visokim koncentracijama H₂O dolazi do pojave pretvorbe HCN u NH₃.

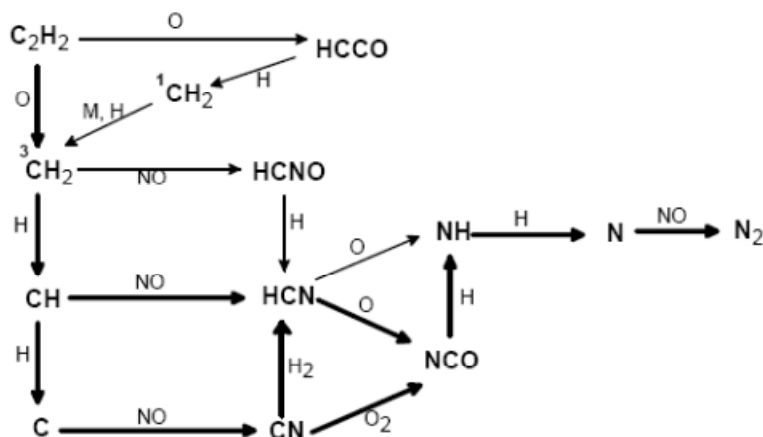


U uvjetima plinske smjese koja je bogata H radikalima, iz NH₃ i HCN nastaju N radikali koji određuju da li će nastati NO ili N₂. Iz tog razloga neki autori tvrde da je sastav dušikovih spojeva, koji prethode nastanku NO, nevažan (8). Ipak treba uzeti u obzir da je nastajanje N radikala ovisno o strukturi dušikovih spojeva koji nastaju devolatilizacijom i izgaranjem krutog ostatka.

Izgaranje dušikovih oksida u uvjetima bogate smjese

U uvjetima izgaranja u bogatoj smjesi i pri visokim temperaturama (>1100 K), NO može reagirati s radikalima ugljikovodika (CH) uz nastajanje HCN i N₂. Na Slika 12 i Slika 13 je

prikazan put reakcija u procesu izgaranja dušikovih oksida. Pri niskim temperaturama, CH_3 i HCCO su najzastupljeniji ugljikovodici u reakcijama s NO , dok se kod visokih temperatura te reakcije odvijaju preko C , CH i CH_2 radikala. Daljnja oksidacija HCN je slična već prethodno opisanoj.

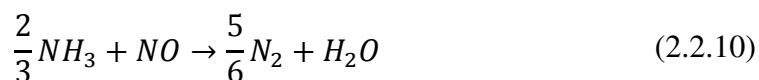
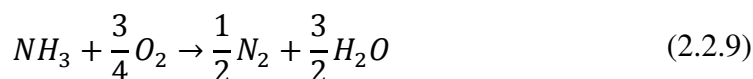
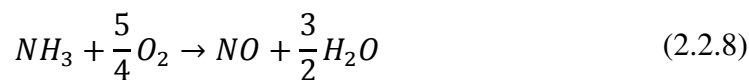


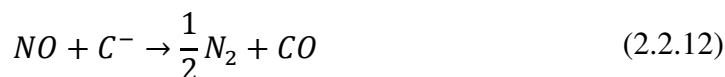
Slika 13 Reakcije radikala CH s NO (6)

Heterogene reakcije

Pod heterogenim reakcijama smatramo reakcije koje se odvijaju između kemijskih spojeva koji se nalaze u različitim agregatnim stanjima, odnosno reakcije plinova i kemijskih tvari u krutinama ili tekućinama.

U sloju biomase, koji izgara na rešetki, velika je dodirna površina između krute faze i zraka odnosno plinova koji ju okružuju. Ta je površina bitna za nastanak dušikovih oksida, pa je pored homogenih reakcija važno promotriti i heterogene reakcije za modeliranje nastajanja dušikovih oksida. Navedena površina djeluje kao katalizator i kao reaktant u procesima nastajanja dušikovih oksida. Opis konverzije dušika iz biomase u sloju biomase na rešetki može se prema (9) prikazati reakcijama:



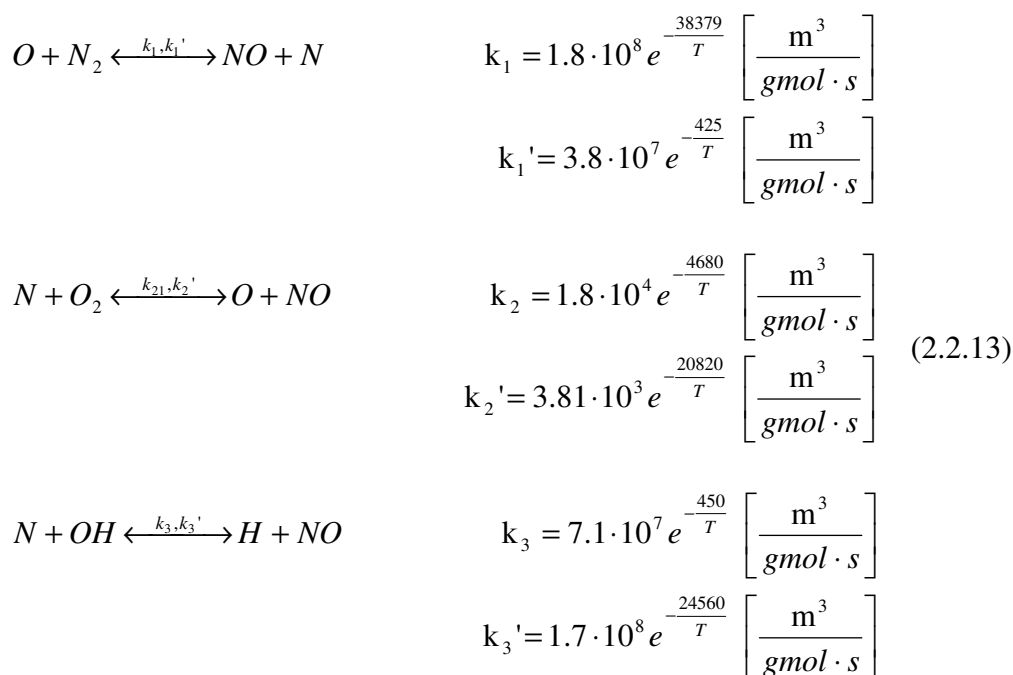


U navedenim heterogenim reakcijama (2.2.8) do (2.2.11) površina krutog ostatka djeluje kao katalizator, dok je u reakciji (2.2.12) površina čestica krutog ostatka reaktant.

Brzine odvijanja reakcija (2.2.8) do (2.2.11), koje se baziraju na izgaranju ugljena, nisu prikladne za izravno opisivanje istih kod izgaranja biomase. Poznato je da se sastav i udjeli minerala u ugljenu i biomase znatno razlikuju, a isti znatno utječu na brzine odvijanja kemijskih reakcija. Prema tome potrebno je korigirati brzine kemijskih reakcija prema (9). Za različite vrste biomase, koji imaju različite udjele minerala i elementarni sastav, brzine kemijskih reakcija ovise o vrsti biomase. Reaktivnost krutog ostatka devolatilizacije također ovisi o uvjetima u kojima se odvija izgaranje, prvenstveno o temperaturi krutog ostatka.

Mehanizam nastajanja termičkog dušik(II)-oksida

Termički dušik(II)-oksid nastaje oksidacijom dušika koji dolazi sa zrakom u proces izgaranja. Mehanizam nastajanja termičkog dušik(II)-oksida (NO) odvija prema sljedećim elementarnim reakcijama prema (10):



Koeficijenti brzine odvijanja reakcije označeni s k_1 , k_2 i k_3 . Raspadanje dušikovih spojeva prema istim reakcijama imaju koeficijente brzine odvijanja reakcije označene s k_1' , k_2' i k_3' .

Ovaj mehanizam tvorbe NO naziva se termički jer je energija aktivacije zbog trostruke veze atoma N_2 vrlo visoka te se reakcija odvija dovoljno brzo samo kod visokih temperatura, što je

vidljivo iz izraza za koeficijente brzine odvijanja reakcije. Prva reakcija u (2.2.13) je najsporija i upravo ta reakcija diktira brzinu tvorbe termičkog NO. Novija istraživanja pokazala su da je utjecaj druge i treće reakcije u (2.2.13) znatan na nastajanje termičkog NO_x, pogotovo u uvjetima smjese blizu stehiometrijskog omjera goriva i zraka.

Iz reakcija prikazanih u (2.2.13) dobivaju se brzine odvijanja reakcija za tvorbu NO:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] - k_1'[NO][N] - k_2'[NO][O] - k_3'[NO][H] \quad (2.2.14)$$

Koncentracija slobodnih atoma dušika je bitna za drugu reakciju u (2.2.13). Prva reakcija ima visoku energiju aktivacije zbog jake trostruke veze molekule N₂. Reakcija, u kojoj se slobodni atomi dušika oksidiraju, ima naprotiv malu energiju aktivacije. Stoga se s dovoljnom točnošću može smatrati da je tako nastali dušik istodobno oksidiran, te je reakcija oksidacije dušika limitirana reakcijom disociranja dušikovog atoma. Takva je pretpostavka valjana za većinu slučajeva osim za izgaranje u uvjetima izrazito bogate smjese. Prema tome, brzina nastajanja slobodnih atoma dušika je vrlo mala i praktički jednaka nuli, pa se može napisati da je:

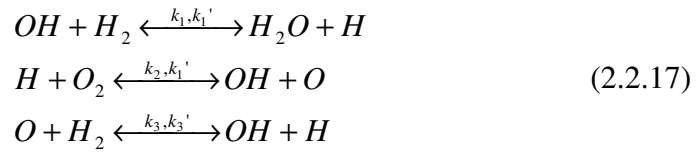
$$\begin{aligned} \frac{d[N]}{dt} &= k_1[O][N_2] - k_1'[NO][N] - k_2[N][O_2] + k_2'[NO][O] \\ &- k_3[N][OH] + k_3'[NO][H] = 0 \end{aligned} \quad (2.2.15)$$

Stoga se može napisati da je:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \frac{\left(1 - \frac{k_1'k_2'[NO]^2}{k_1[N_2]k_2[O_2]}\right)}{\left(1 + \frac{k_1'[NO]}{k_2[O_2] + k_3[OH]}\right)} \quad (2.2.16)$$

U izrazu (2.2.16) pojavljuje se koncentracija radikala kisika O i radikala OH koju je potrebno odrediti. Za koncentraciju radikala kisika također se može pretpostaviti kemijska ravnoteža, što u nekim slučajevima može biti dovoljno točno. Međutim ravnotežna koncentracija je obično manja od stvarne koncentracije, a za neke uvjete i do 10 puta manja od stvarne koncentracije radikala kisika. Stvarna koncentracija može se dobiti iz kemijske kinetike u fronti plamena.

Dobra aproksimacija koncentracije radikala kisika dobiva se primjenom parcijalne kemijske ravnoteže. Koncept parcijalne ravnoteže najbolje se može prikazati na mehanizmu izgaranja vodika. Brzine reakcije tvorbe i raspadanja produkata izgaranja vodika su, za visoke temperature, vrlo visoke pa se za reakcije:



može pretpostaviti parcijalna ravnoteža, gdje se svaki par reaktanata nalazi u stanju kemijske ravnoteže (reakcije tvorbe i raspada produkata imaju istu brzinu), pa slijedi da je:

$$\begin{aligned}
 k_1[OH][H_2] &= k_1'[H_2O][H] \\
 k_2[H][O_2] &= k_2'[OH][O] \\
 k_3[O][H_2] &= k_3'[OH][H]
 \end{aligned}
 \tag{2.2.18}$$

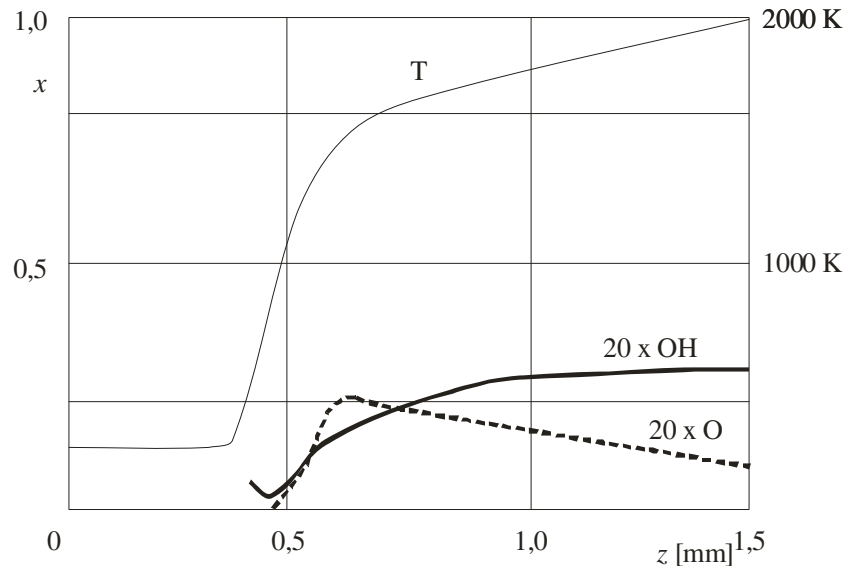
Iz ovog sustava jednadžbi slijedi da je koncentracija radikala kisika uz pretpostavku parcijalne ravnoteže jednaka:

$$[O] = \frac{k_1 k_2 [O_2][H_2]}{k_1' k_2' [H_2O]}
 \tag{2.2.19}$$

Koncentracija radikala [OH] analogno tome je jednaka:

$$[OH] = \left(\frac{k_2 k_3 [O_2][H_2]}{k_2' k_3'} \right)^{1/2}
 \tag{2.2.20}$$

Na sljedećoj slici prikazani su profili molarnih udjela navedenih kemijskih spojeva pri stehiometrijskom izgaranju vodika u zraku:

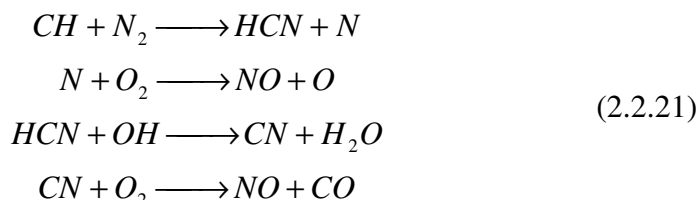


Slika 14 Promjena molarnih udjela radikala O i OH

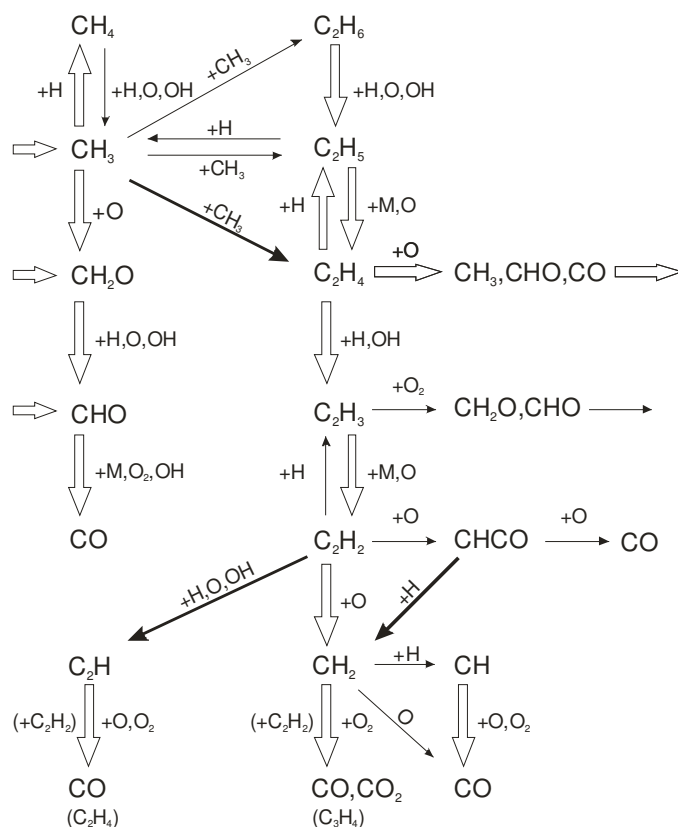
Na sličan način se izvode izrazi za izračun koncentracija radikala kod izgaranja ostalih vrsta goriva.

Mehanizam nastajanja promptnog dušik(II)-oksida

Mehanizam nastajanja promptnog dušik(II)-oksida (NO) je znatno složeniji od nastajanja termičkog NO. Tvorba promptnog NO je povezana s radikalom CH koji nastaje kao prijelazni spoj u fronti plamena. Taj radikal reagira s dušikom iz zraka tvoreći cijanovodičnu kiselinu (HCN) koja dalje odmah reagira tvoreći NO prema (11), sljedećim reakcijama:



Radikalu CH, koji nastaje u složenom mehanizmu oksidacije C₁ i C₂ ugljikovodika, prethodi nastajanje acetilena C₂H₂. Budući da se acetylen akumulira u uvjetima bogate smjese tako i promptni NO nastaje pretežno u plamenu bogate smjese. Na sljedećoj slici prikazan je navedeni mehanizam:

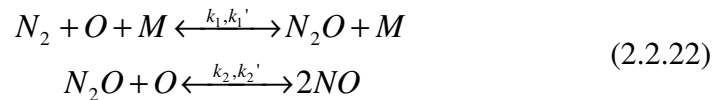


Slika 15 Mehanizam oksidacije C₁ i C₂ ugljikovodika

Energija aktivacije za prvu reakciju u (2.2.21) je 92 kJ/mol u usporedbi s prvom reakcijom iz (2.2.21) koja ima energiju aktivacije 319 kJ/mol za tvorbu termičkog NO, pa se tvorba promptnog NO odvija već i pri nižim temperaturama.

Nastajanje dušikovih oksida iz dušik-peroksida (N₂O)

Nastajanje dušikovih oksida iz dušikovog peroksida odvija se prema dvije elementarne reakcije:



M označava prisutnost treće inertne molekule koja se ne mijenja u toku kemijske reakcije. Kako je u obje reakcije prisutan radikal kisika kao reaktant, reakcija se odvija u uvjetima smjese s velikim udjelom kisika (siromašna smjesa).

Iz reakcija (2.2.22) proizlazi da je brzina formiranja dušik(II)-oksida (NO) iz dušikovog peroksida jednaka:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2(k_2[N_2O][O] - k_2'[NO]^2) \quad (2.2.23)$$

gdje su:

k_1, k_2 – koeficijenti brzine kemijske reakcije nastajanja spojeva

k_1', k_2' – koeficijenti brzine kemijske reakcije razgradnje kemijskih spojeva

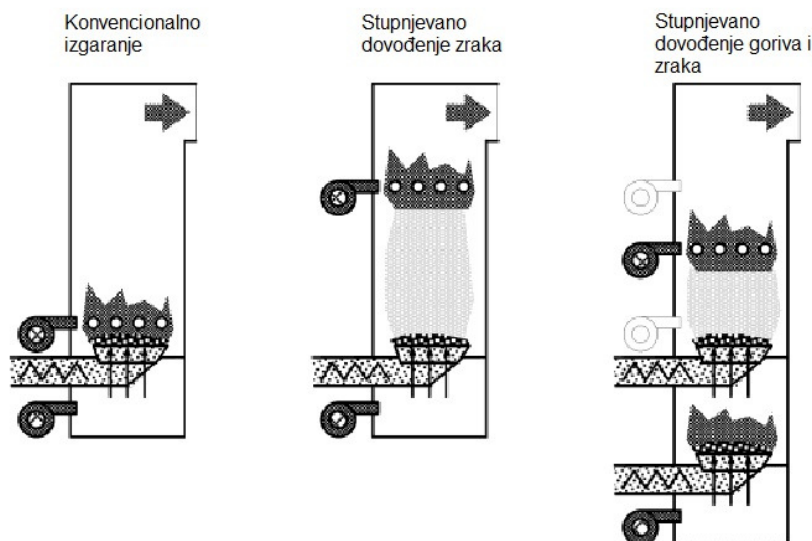
2.4 Napredni sustavi i tehnologije za izgaranje biomase

Sustavi izgaranja biomase sa različitim tehnikama izgaranja i načinima dovođenja zraka za izgaranje i goriva razvijaju se u cilju, prvenstveno, smanjenja emisija štetnih plinova, pogotovo NO_x-a, a i ne manje važne uštede goriva. Postoje tri osnovna načina izgaranja da bi se postigli navedeni ciljevi: stupnjevano dovođenje zraka za izgaranje, stupnjevano dovođenje goriva (dogorijevanje, izgaranje u više stupnjeva) i recirkulacija dimnih plinova sa izlaz iz ložišta. Moderni sustavi izgaranje biomase se baziraju na jednom od navedenih principa ili na više njih.

Stupnjevano dovođenje zraka se izvodi na način da se dio zraka za izgaranje dovodi nakon zone gdje se odvija primarno izgaranje, s ciljem da se ograniči dostupnost kisika u zonama gdje je poznato da je moguće nastajanje dušikovih oksida (NO_x). Ovim se principom dovođenja zraka ostvaruje izgaranje u dva stupnja, primarno izgaranje u uvjetima bogate smjese, i sekundarno izgaranje nizstrujno od zone primarnog izgaranja. Na ovaj se način emisija NO_x-a može smanjiti od 20-50%, bez negativnog utjecaja na iskoristivost generatora pare ili topline.

Drugi način smanjenja emisija NO_x-a je stupnjevano dovođenje goriva. Kod ove tehnike izgaranje se nakon primarne zone izgaranja dovodi sekundarni izvor goriva (ugljikovodika). Tako se postiže izgaranje u tri stupnja gdje se dušikovi oksidi, koji nastaju u primarnoj zoni izgaranja, u uvjetima siromašne smjese, dolaskom u zonu dovođenja dodatnog goriva uništavaju, nakon čega se dovršava izgaranje dovođenjem dodatnog zraka za izgaranje.

Radikali ugljikovodika reagiraju s NO, iz čega nastaje HCN koji na kraju rezultira nastajanjem N₂ u zoni bogate smjese (sekundarnog goriva). Na ovaj se način emisija dušikovih oksida može smanjiti od 50% bez negativnog utjecaja na iskoristivost generatora pare ili topline.



Slika 16 Izvedbe stupnjevanog dovodenja zraka i goriva

Treći navedeni princip je recirkulacija dimnih plinova. Vrući dimni plinovi se dovode iz dimnog kanala i miješaju sa zrakom koji se dovodi za izgaranje u primarnu zonu izgaranja. Tako se postiže dvostruki učinak, rezultirajući zrak za izgaranje se predzagrijava temperature i istodobno se zrak za izgaranje miješa s dimnim plinovima što rezultira nižim udjelom kisika u zraku za primarno izgaranje. Uz znatni udjel recirkulacije, temperature primarnog zraka mogu dostići visoke vrijednosti s vrlo malim udjelom kisika, što utječe na smanjenje emisija NO-x za više od 50%.⁽¹²⁾

Unatoč svim ovim pozitivnim učincima, primjenom ovih tehnika izgaranja, dolazi do problema s drugim parametrima izgaranja, te je stoga potrebno pronaći optimalnu radnu točku za različite kvalitete goriva i uvjete rada ložišta.

3 MATEMATIČKI MODEL

Modeliranje izgaranja krutog goriva provodi se na nekoliko načina, a izbor načina na koji se modeliraju pojave izgaranja najviše ovisi vrsti krutog goriva i veličini čestica goriva. Za tri tipa izgaranja krutih goriva (5), postoje različiti pristupi modeliranju izgaranja.

Kod izgaranja krutog goriva u letu moguće je koristiti modele koji se koriste za izgaranje tekućih goriva. U komercijalnom programu za modeliranje FLUENT koriste se modeli diskretne faze koji putem više podmodela simuliraju utjecaj suspendirane krute faze na plinsku fazu. To se odnosi prvenstveno na prijelaz topline i tvari između faza, kao i količine gibanja.

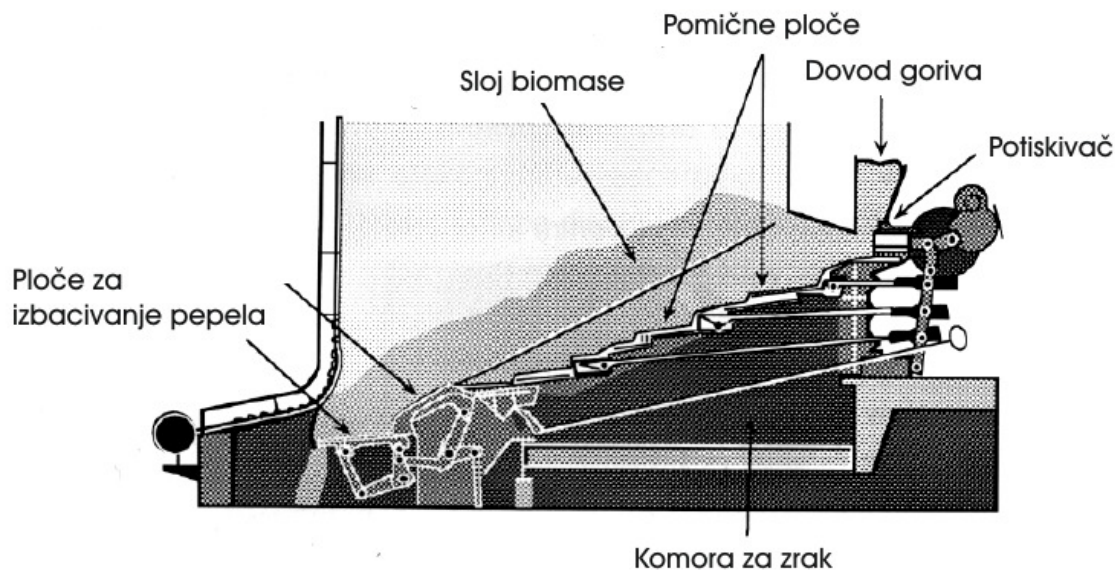
Za ložišta s izgaranjem krutog goriva u nepomičnom i fluidiziranom sloju taj se model diskretne faze ne može primijeniti iz razloga što je isti ograničen udjelom krute faze u plinskoj. Kod izgaranja krutog goriva u nepomičnom sloju udjel krutog goriva u plinskoj fazi je više od 0,55, što onemogućuje primjenu modela diskretne faze. FLUENT ima izrađene modele za simuliranje višefaznog strujanja s većim udjelima krute faze kao na primjer VOF model ili Eulerov model. Ovi modeli omogućuju simuliranje interakcije faza u sloju, ali predstavljaju znatno opterećenje s obzirom na potrebno vrijeme simulacija i nisu prikladni za sve pojave koje su karakteristične za sloj krutog goriva u ložištu.

Iz navedenih razloga, prilikom modeliranja izgaranja u sloju potrebno je pristupiti na drugi način, bilo korištenjem empirijskih podataka dobivenih mjerenjem u ložištima ili izradi modela koji će, po mogućnosti, obuhvatiti sve bitne pojave u sloju krutog goriva u ložištu.

3.1 Modeliranje izgaranja biomase u sloju na rešetki

U postupku modeliranja ložišta s izgaranjem na rešetki potrebno je definirati model sloja biomase na rešetki (eng. fuel bed, fixed-bed, packed-bed), gdje se odvija interakcija između krute faze i plinovite faze koja uključuje više složenih procesa. Kruto gorivo, koje se nalazi na rešetki, zagrijava se zračenjem plinova koji se nalaze iznad toga sloja i iz procesa izgaranja u samom sloju.

Prema empirijskim podacima, kod rasta temperature drvene biomase na rešetki, biomasa otpušta vlagu (koja nije vezana u molekularnu strukturu) na 100 °C, prolazi kroz fazu devolatilizacije na 260 °C, počinje izgarati na temperaturi 316 °C, nakon čega izgara naglo, sve dok se ne potroši kisik dostupan u sloju biomase ili kad se oslobode svi volatili, nakon čega ostaje kruti ostatak. Ugljik, vezan u kruti ostatak, dalje oksidira i pretvara se u CO uz prisutnost CO₂ i H₂O, a u nedostatku slobodnog kisika će oksidirati direktno u CO₂ uz prisutnost CO i H₂



Slika 17 Tipično ložište s zakošenom rešetkom

U heterogenom modelu sloja biomase na rešetki, svi su navedeni procesi mogući istovremeno na jednom segmentu sloja, pogotovo stoga što su susjedne čestice biomase vrlo različite veličine i sastava. Nadalje, može se pojaviti i dodatna poteškoća u činjenici da su kod većih čestica biomase prisutni znatni gradijenti temperature i koncentracija tvari unutar samih čestica.

Za modeliranje ovih procesa najzahtjevniji je pristup metoda Lagrangeovo granularnog strujanja, prema kojoj se računski određuje pomak pojedinih čestica goriva (ili reprezentativnog uzorka čestica), uzimajući u obzir kontakt sa susjednim česticama goriva i rezultirajuće sile. Ovakav „mikroskopski“ pristup modeliranju sloja biomase ima prednost u činjenici da tada nisu potrebni empirijski podaci da se opišu procesi transporta energije i tvari.

Iako se ovaj pristup modeliranju čini izvedivim, za njega je potrebno raspolagati vrlo detaljnim informacijama o sastavu goriva i svojstvima goriva, što najčešće nije slučaj.

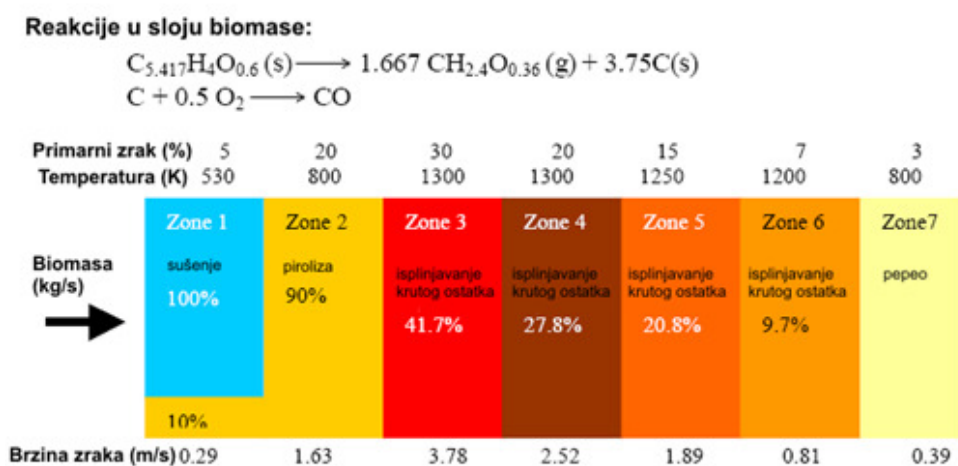
Neki su modeli za modeliranje sloja biomase na rešetki sloj uveli podijele na zone prema mehanizmima fizikalnih i kemijskih procesa koji se tamo odvijaju. Fizikalni procesi su zagrijavanje i sušenje čestica biomase, pomicanje čestica na pomičnoj rešetki i interakcija plinske i krute faze, dok se kemijski procesi uključuju pirolizu i devolatilizaciju čestica biomase te otpuštanje plinske faze iz krutog ostatka i izgaranje.

3.1.1 Empirijski model sloja biomase

Zbog visokog stupnja složenosti ranije navedenih pojava ne postoji detaljni model sloja biomase, odnosno ne postoji teorijski, detaljan i primjenjiv model koji bi egzaktno opisivao pojave koje se odvijaju u sloju biomase u ložištu.

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

To je moguće izvesti ako je poznat elementarni sastav biomase, udio vlage i drugi podaci o karakteristikama biomase kao i podaci dobiveni mjerenjima na pojedinom modelu ložišta. Mjerenjima je potrebno obuhvatiti bilancu tvari i energije koja ulazi odnosno izlazi iz ložišta generatora topline. U nastavku je prikazan model zonalne podjele ložišta sa slojem biomase i pojavama u svakom navedenom sloju kako je navedeno u literaturi (13) i (14).



Slika 18 Zonalni model ložišta s izgaranjem biomase u sloju

Ovakav model temelji na jednostavnim pretpostavkama koje se baziraju na globalnom i lokalnom prijenosu tvari i energije uz korištenje empirijskih podataka o sastavu sloja biomase i temperaturnoj distribuciji biomase dobivenoj mjerenjima na ispitivanom ložištu. Na ovaj se način maseni protoci goriva i primarnog zraka izmjereni na ispitivanom ložištu uključuju u model uz poznatu distribuciju fizikalnih i kemijskih svojstava, kao i sastava plinova koji izlaze iz sloja biomase i koriste se kao ulazni podaci za numeričku simulaciju plinske faze. Ovaj se model u literaturi naziva i model crne kutije (black-box model).

3.1.2 Temperature na površini sloja biomase

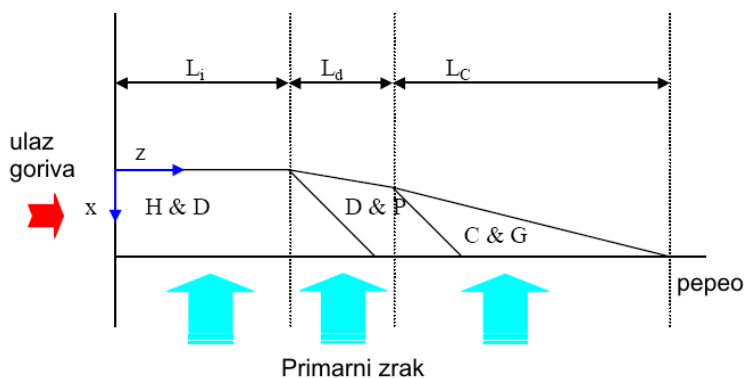
Određivanje temperatura na površini sloja biomase je moguće korištenjem pristupa energetske bilance. Problem, koji se nameće kod ovog pristupa nedostatak je informacija o procesima koji se odvijaju u samom sloju biomase.

Na temelju istraživanja i mjerenja iz literature (15) može se pretpostaviti da su temperature u zoni sušenja od 373 K do 530 K, u zoni pirolize 530 K do 590 K, a u zoni isplinjavanja krutog ostatka 900 K do 1300 K.

Tako je za empirijski model dovoljno poznavati samo sastav goriva, maseni protok goriva, primarnog zraka i podaci o pirolizi goriva (udio volatila i sastav).

3.2 Jednodimenzijски zonalni model izgaranja sloja biomase

Huttunen (16) je razvio pojednostavljeni 1-D model sloja biomase na rešetki, prema kojem se poprečni presjek sloja, gledano uzdužno u smjeru kretanja rešetke, dijeli na tri zone koje odgovaraju procesima koji se tamo pretežito odvijaju. To su zone sušenja, pirolize i isplinjavanja krutog ostatka, kako je prikazano na slici.



Slika 19 Shematski prikaz 1-D modela sloja biomase

Izlazne veličine iz sloja biomase (temperatura, kemijski sastav plinova i količina plinova) se određuju kao funkcija koordinate z (udaljenosti od dovoda goriva u ložište). Zona označena s H&D je zona zagrijavanja i sušenja biomase. Iza te zone je zona označena s D&P gdje se odvijaju procesi devolatilizacije i izgaranja u uvjetima siromašne smjese. Na kraju je zona C&G u kojoj izgara kruti ostatak.

Dužina prve zone L_i se dobiva za udaljenost po osi z od ulaza goriva na kojoj je temperatura goriva jednaka temperaturi izgaranja. Mješavina plinova nastalih devolatilizacijom i primarnog zraka se oslobađa i ulazi u zonu iznad sloja biomase. Dio plinova oksidira unutar sloja biomase uz nastajanje CO_2 i H_2O . Dužina druge zone L_d određuje se izrazom:

$$L_d = \frac{H w_{reš}}{w_{ig}} \quad (3.2.1)$$

H – visina sloja biomase

$w_{reš}$ – brzina kretanja biomase

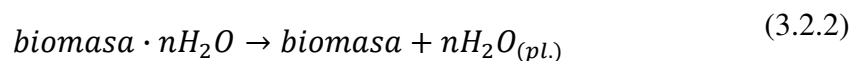
w_{ig} – brzina pomicanja fronte plamena koja se određuje prema (17)

Sastav plinova na izlazu iz sloja biomase

Zbog praktičnih razloga, a u cilju smanjenja potrebnog vremena izračuna numeričkih simulacija koje imaju za cilj optimizaciju ložišta i generatora topline u cjelini, u model su uključena pojednostavljena koja se sastoje u slijedećem:

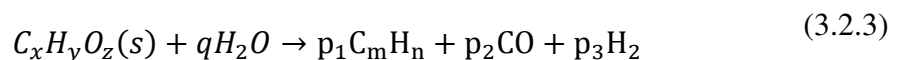
- u modelu se uzimaju u obzir samo homogene reakcije u zoni plinske faze (iznad sloja biomase)
- sloj biomase je podijeljen u tri idealne zone: zona sušenja, zona devolatilizacije i zona izgaranja krutog ostatka
- bilanca svih tvari u globalnom reaktivnom sustavu bazira se na procesima i reakcijama koje se odvijaju u pojedinim zonama, kako slijedi:

Zona sušenja:



n – udjel vlage (vode) sadržan u biomasi

Zona pirolize (devolatilizacije):



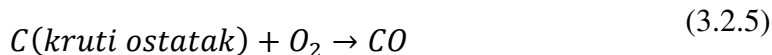
gdje je:

$C_xH_yO_z$ - ekvivalent sastava produkata devolatilizacije biomase
 x, y i z - faktori koji se određuju prema elementarnom sastavu biomase
 C_mH_n - odgovarajuća molekula ugljikovodika koja nastaju devolatilizacijom, a koje čine pretežno CH_4 i $C_1 \sim C_3$ ugljikovodici
 m, n - faktori koji se dobiju iz elementarne analize sastava volatila
 q, p_1, p_2 i p_3 - stehiometrijski koeficijenti u reakciji pirolize koji se određuju iz slijedećih jednažbi:

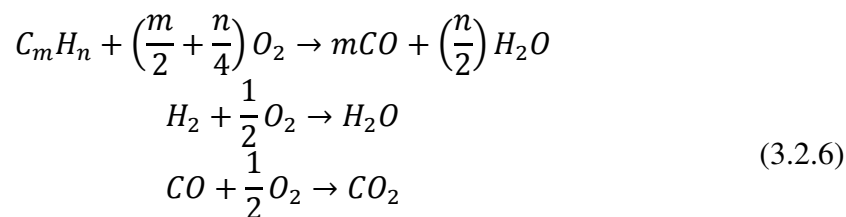
$$\begin{aligned} x &= mp_1 + p_2 \\ y + 2q &\rightarrow np_1 + 2p_3 \\ z + q &\rightarrow p_2 \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

Zona isplinjavanja i izgaranja krutog ostatka:

Reakcije isplinjavanja krutog ostatka (heterogene reakcije) odvijaju se prema jednažbi:



Za izgaranje u plinskoj fazi koriste se reakcije s dva ili tri koraka, kako slijedi:



3.3 Jednodimenzijски nestacionarni model izgaranja biomase u sloju

U ovome radu korišten je matematički model prema istraživanjima (1) i drugih istraživača prema kojima je izrađen matematički model za izgaranje biomase u sloju za modeliranje ložišta s pomičnom horizontalnom rešetkom.

Jednažba očuvanja mase, količine gibanja, prijenos topline i tvari u plinskoj i krutoj fazi za sloj biomase, koji se translacija po pomičnoj rešetki opisane su matematičkim modelima. Jednažbe su riješene računalnim programom korištenjem numeričkih metoda. Matematički model, koji opisuje pojave u sloju biomase u ložištu specifičan je za taj slučaj i uključuje sve relevantne pojave, uz određena pojednostavljenja. Jednodimenzijски model opisuje pojave po visini ložišta, a vremenska komponenta, uz poznatu i zadanu brzinu pomicanje rešetke, daje drugu prostornu komponentu.

Cijeli je sloj biomase u ložištu i sloj plinova iznad njega podijeljen na male volumene, te se za svaki od volumena rješavaju jednažba transporta tvari i topline, jednažba očuvanja kemijskih tvari uz popratne pojave kemijskih reakcija. Sustav jednažbi se rješava iterativno za cijelu domenu računanja. Rezultati izračuna daju podatke o temperaturama, sastavu plinova izgaranja i druga svojstva u sloju biomase i na izlazu plinova iz sloja biomase.

Opis matematičkih modela za simulaciju izgaranja biomase u sloju

Izgaranje biomase u sloju može se, kako je već bilo navedeno, podijeliti na četiri uzastopna procesa: isparavanje vlage iz biomase, oslobađanje volatila uz nastajanje krutog ostatka,

izgaranje ugljikovodika koji čine volatile u plinskoj fazi (homogene reakcije), uplinjavanje i/ili izgaranje krutog ostatka (heterogene reakcije). Matematički modeli, koji opisuju ove procese, prikazani su u nastavku.

Isparivanje vlage

Biomasa se prilikom ulaska u ložište najprije zagrijava putem zračenja koje dolazi od vrućih plinova iznad sloja biomase, koji nastavljaju proces izgaranja i nakon što su napustili sloj biomase i sadrže već određenu količinu toplinske energije. Vлага se u tim početnim stupnjevima oslobađa na dva načina, isparavanjem i ishlapljivanjem u okolni zrak unutar sloja biomase. Prema (18) brzina oslobađanja vlage biomase može se prikazati kao:

$$R_{isp} = S_a h_s (C_{w,s} - C_{w,g}) \text{ ako je } t_s < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$
$$R_{isp} = \frac{Q_{kr}}{H_{isp}} \text{ ako je } t_s = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$
(3.3.1)

gdje su:

S_a – površina čestice biomase

h_s – koeficijent transporta tvari (konvektivni član) [m/s]

$C_{w,s}$ – udjel vlage u krutoj fazi (čestici biomase) [kg/m³]

$C_{w,g}$ – udjel vlage u plinovitoj fazi (zraku) [kg/m³]

dok je:

$$Q_{kr} = S_a \left(h_s' (T_{pl} - T_s) + \epsilon_s \sigma_b (T_{okol}^4 - T_s^4) \right)$$
(3.3.2)

količina topline koja se konvekcijom i zračenjem predaje na biomasu u zoni isparavanja, gdje su:

h_s' – koeficijent prijelaza topline (konvektivni član) [W/ms²]

T_{pl} – temperatura plinova oko čestica

T_s – temperatura površine čestice biomase

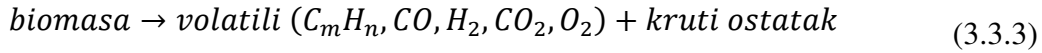
ϵ_s – koeficijent emisivnosti

σ_b – Stefan-Boltzmannova konstanta

Devolatilizacija biomase

Udjel hlapive tvari (volatila) u drvnjoj biomase je znatno veći nego onaj sadržan u krutim gorivima fosilnog porijekla (ugljen). S obzirom na uvjete u kojima se odvija oslobađanje volatila, masa oslobođenih volatila može činiti i do 60% početne mase goriva. Volatili su

smjesa plinova koje čine pretežno ugljikovodici C_mH_n , CO i H_2 , CO_2 i O_2 , kao i drugi elementi u tragovima. Proces oslobađanja volatila se odvija prema shemi:



Do sada su korišteni matematički model koji uključuju mehanizam s jednostavnom reakciju u jednom koraku, dvije usporedne reakcije i model Gaussove distribucije energije aktivacije (19). Za potrebe ovoga rada korišten je model s jednostavnom reakcijom prema (20):

$$R_{dv} = (1 - \emptyset)\rho_s k_v (v_\infty - v) \quad (3.3.4)$$

ρ_s – gustoća čestice biomase

v_∞ - ukupni udjel volatila u biomasi

v - udjel volatila u trenutku t

\emptyset - udjel šupljina u volumenu biomase (void fraction)

dok je brzina devolatilizacije određena s koeficijentom:

$$k_v = A_v e^{-\frac{E_v}{RT_s}} \quad (3.3.5)$$

A_v – predeksponencijalni faktor devolatilizacije

E_v – energija aktivacije u reakciji devolatilizacije

Izgaranje plinova, koji nastaju u procesu oslobađanja volatila, počinje kada se plinovi, koji napuštaju površinu čestice biomase, izmiješaju s okolnim zrakom unutar sloja biomase ili iznad njega. Izgaranje plinova se odvija u šupljinama koji se mogu smatrati kao dugi povezani kanali čija širina je usporediva s promjerima čestica u sloju biomase. Izgaranje ugljikovodika koji nastaju oslobađanjem volatila je ograničena s brzinom reakcije izgaranja, odnosno ovisi o temperaturi ali i o brzini miješanja s zrakom koji prolazi kroz sloj biomase. Učinak procesa miješanja je u istražio je Yang (21), koji je odredio srednju brzinu miješanja kao:

$$R_{mj} = C_{mj}\rho_{pl} \left\{ 150 \frac{D_{pl}(1 - \emptyset)^{2/3}}{l_p^2 \cdot \emptyset} + 1.75 \frac{V_{pl}(1 - \emptyset)^{1/3}}{l_p \cdot \emptyset} \right\} \quad (3.3.6)$$

za kontrolne volumene koji se nalaze unutar sloja biomase, gdje su:

C_{mj} – konstanta brzine miješanja = 0.5

ρ_{pl} – gustoća plinova

D_{pl} – koeficijent disperzije za pojedine kemijske tvari

l_p – dužinska skala turbulencije, kako je opisano u poglavlju 0

V_{pl} – brzina plinova okomito na sloj biomase

\emptyset - udjel šupljina u volumenu biomase (void fraction)

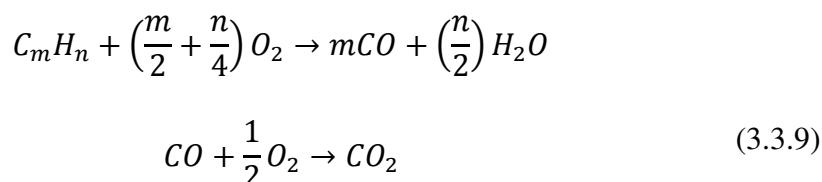
Za volumene neposredno iznad sloja biomase brzina miješanja:

$$R_{mj} = R_{mj,0}(2.8e^{-0.2y''} - 18e^{-2y''}) \quad (3.3.7)$$

gdje je:

$$y'' = \frac{y'}{d_{ch}} \quad (3.3.8)$$

Devolatilizacija daje veliki broj različitih plinova, ali se zbog složenosti mehanizama izgaranja tako velikog broja plinova uvodi pretpostavka da su gorivi plinovi, koji nastaju oslobađanjem volatila, ugljik(II)-oksid (CO) i jedan reprezentativni ugljikovodik (C_mH_n). Tako se reakcije u plinskoj fazi svode na:



Brzine kemijskih reakcija su ovisne o temperaturi i uzete su prema (22) za CO i (23) za C_mH_n .

$$R_{CO} = 1.3 \times 10^{11} C_{CO} C_{H_2O}^{0.5} C_{O_2}^{0.5} \quad (3.3.10)$$

$$R_{C_mH_n} = 59.8 \cdot T_{pl} \cdot P^{0.3} C_{C_mH_n}^{0.5} C_{O_2} \cdot e^{-\frac{1200}{T_{pl}}} \quad (3.3.11)$$

gdje su:

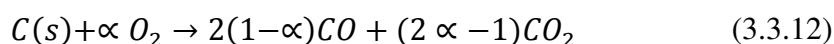
C_i – molarni udjel kemijske tvari i

T_{pl} – temperatura plinova

Stvarna brzina kemijske reakcije koja određuje nastajanje kemijskih tvari je određena kao najmanja od brzina u izrazima (3.3.6), ((3.3.7)), ((3.3.10)) i ((3.3.11)).

Uplinjavanje i izgaranje krutog ostatka nakon oslobađanja volatila

Kruti ostatak nastaje nakon što volatili napuste česticu biomase. Primarni produkti uplinjavanja krutog ostatka su ugljik(II)-oksid i ugljik(IV)-oksid, prema izrazu:



Omjer CO i CO₂ se prema Artheru (24) može izraziti kao:

$$\frac{CO}{CO_2} = 2500e^{\frac{-6420}{T}} \quad (3.3.13)$$

za temperaturni raspon od 730 do 1170 K. Za temperature izvan temperaturnog raspona usvojen je maksimalni odnosno minimalni omjer. Heterogena reakcija izgaranja krutog ostatka, koji se može smatrati kao elementarni ugljik, prema (19) može se izraziti kao:

$$R_{C(s)} = \frac{C_{O_2}}{\left(\frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_d}\right)} \quad (3.3.14)$$

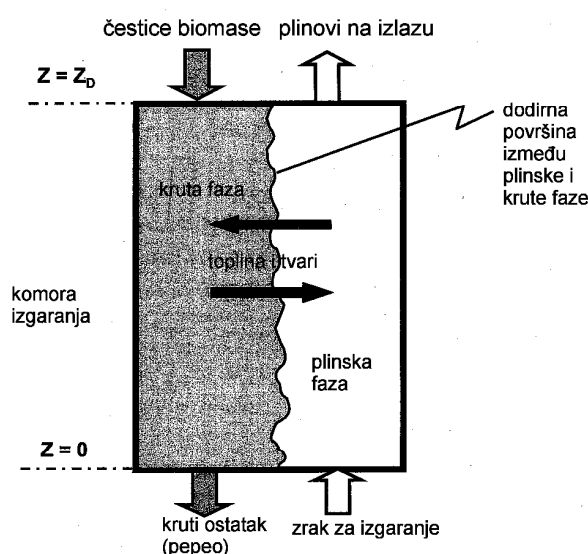
C_{O_2} – molarni udjel kemijske tvari kisika

k_r – koeficijent brzine izgaranja krutog ostatka uslijed kemijskih reakcija

k_d - koeficijent brzine izgaranja krutog ostatka uslijed difuzije

Transportne jednadžbe za plinsku i krutu fazu

Strujanje zraka kroz sloj biomase na rešetki u ložištu, uz pojave devolatilizacije, izgaranja, izmjene topline i tvari između faza je kompleksan proces, te je za modeliranje istog potrebno usvojiti određene pretpostavke. Princip modeliranja sloja biomase u ložištu uzima nekoliko važnih pretpostavki. Istovremeno, na istom prostoru su prisutne dvije faze, kruta faza (krute čestice biomase, krutog ostatka i pepela) i plinovite faze (zrak za izgaranje, produkti devolatilizacije i izgaranja). Postavlja se zasebni model za svaku pojedinu fazu koji uključuje jednadžbe očuvanja mase, količine tvari i kemijskih spojeva, kao i topline. Interakcija između faza se odvija preko zamišljene dodirne površine koju u biti čini zbrojena površina svih čestica u promatranom volumenu. Kako se površina čestica mijenja u zavisnosti od sastava krute faze, ova se površina mijenja po visini promatranog sloja.



Slika 20 Shema sloja biomase na pomičnoj rešetki

Turbulentno strujanje plinova unutar sloja krute tvari je vrlo različito od strujanja u slobodnom prostoru ili kanalima. Pojava velikih turbulentnih vrtloga je praktički nemoguća unutar gustog sloja krute tvari zbog suženja koja su prisutna uslijed uskih i nepravilnih prolaza kroz koje moraju proći plinovi. Ukupna turbulentna skala se smanjuje na manje dimenzije, što u znači da se kinetička energija turbulentnih vrtloga transformira prilikom prolaska kroz gusti sloj krute tvari. Opor prolasku plinova koje predstavljaju čestice krute tvari i rezultirajući pad tlaka su dominantni za distribuciju polja brzina strujanja plinova kroz sloj. Prema Petersu (25) jednadžbe očuvanja topline i tvari moguće je za gusti sloj krute tvari na pomičnoj rešetki postaviti zasebno za svaku fazu. Teorija hidrauličkog promjera se može primijeniti na ovaj slučaj pa je, prema Darcy-u, strujanje u poroznom mediju moguće izraziti prema gradijentu tlaka kroz viskoznost i poroznost kao bitne odrednice poroznih medija.

Jednadžbe očuvanja mase i količine tvari za plinsku fazu

Jednadžbe očuvanja mase i količine gibanja za plinsku fazu unutar gustog sloja krute tvari se mogu izraziti kao:

$$\frac{\partial(\rho_{pl} \cdot \emptyset)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{pl} \cdot V_{pl} \cdot \emptyset)}{\partial x} = S_{sg} \quad (3.3.15)$$

$$\frac{\partial(\rho_{pl} \cdot V_{pl} \cdot \emptyset)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{pl} \cdot V_{pl} \cdot V_0 \cdot \emptyset)}{\partial x} = -\frac{\partial p_{pl}}{\partial x} + F(V_{pl}) \quad (3.3.16)$$

gdje su:

V_{pl} – brzina plinova okomito na sloj biomase

V_0 – brzina pomicanja sloja

\emptyset - udjel šupljina u volumenu biomase (void fraction)

ρ_{pl} - gustoća smjese plinova

S_{sg} – izvorni član jednadžbe očuvanja mase

p_{pl} – tlak smjese plinova

gdje funkcija $F(V_{pl})$ uzima u obzir različite režime protoka fluida:

$$F(V_{pl}) = \begin{cases} -\frac{\mu}{\kappa} V_{pl}, & \text{ako je } Re < 10 \\ -\frac{\mu}{\kappa} V_{pl} - \rho_{pl} C V_{pl} V_{pl}, & \text{ako je } Re \geq 10 \end{cases} \quad (3.3.17)$$

gdje je κ permeabilnost, a K i C su konstante:

$$K = \frac{d_{\xi}^2 \emptyset^3}{150(1 - \emptyset)^2} \quad (3.3.18)$$

$$C = \frac{1.75(1 - \phi)}{d_c \phi^3} \quad (3.3.19)$$

d_c – srednji promjer čestice biomase

Na sličan se način može napisati i jednadžba očuvanja kemijskih tvari:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_{pl} \cdot Y_{i,pl} \cdot \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{pl} \cdot V_{pl} \cdot Y_{i,pl} \cdot \phi)}{\partial x} \\ = -\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{pl} \frac{\partial(\rho_{pl} Y_{i,pl} \phi)}{\partial x} \right) + S_{Y_{i,pl}} \end{aligned} \quad (3.3.20)$$

Izraz D_{pl} je koeficijent disperzije kemijskih tvari na kojega utječe difuzija tvari i turbulentno miješanje. Prema (26) utjecaj difuzije odgovara difuzijskom koeficijentu za brzinu strujanja jednaku nuli. U rasponu laminarnog strujanja, za $Re < 1$, koeficijent disperzije čini samo utjecaj difuzije prema izrazu (3.3.21). Za Reynoldsov broj veći od 5, strujanje se smatra turbulentnim, pa se koeficijent disperzije uzima prema izrazu (3.3.22).

$$D_{pl} = E^0 \quad (3.3.21)$$

$$D_{pl} = E^0 + 0.5d_c |V_{pl}| \quad (3.3.22)$$

E^0 - efektivni koeficijent difuzije

Jednadžbe očuvanja energije za plinsku fazu unutar gustog sloja krute tvari mogu se izraziti kao:

$$\frac{\partial(\rho_{pl} \cdot H_{pl} \cdot \phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{pl} \cdot V_{pl} \cdot H_{pl} \cdot \phi)}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{pl} \frac{\partial T_{pl}}{\partial x} \right) + Q_h \quad (3.3.23)$$

H_{pl} – entalpija plinova

Koeficijent termalne disperzije λ_{pl} se, kao i kod koeficijenta disperzije kemijskih tvari, sastoji od utjecaja difuzije i utjecaja turbulentnog miješanja i može se izraziti u ovisnosti od Reynoldsovog broja prema (26) kao:

$$\lambda_{pl} = \lambda^0, \text{ za } Re < 1 \quad (3.3.24)$$

$$\lambda_{pl} = \lambda^0 + 0.5d_c |V_{pl}| \rho_{pl} C_{p,pl}, \text{ za } Re > 5 \quad (3.3.25)$$

λ^0 - efektivni koeficijent termalne difuzije

Jednadžbe očuvanja za krutu fazu (čestice)

Jednadžbe očuvanja koje opisuju pomicanje čestica u gustom sloju biomase su sličnog oblika kao i one za plinsku fazu i poprimaju oblik:

$$\frac{\partial(\rho_{k\check{c}} \cdot (1 - \emptyset))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{k\check{c}} \cdot V_{k\check{c}} \cdot (1 - \emptyset))}{\partial x} = -S_{sg} \quad (3.3.26)$$

$$V_{k\check{c}} = \frac{dV}{A \cdot dt}$$

$\rho_{k\check{c}}$ -gustoća čestica

Za jednadžbu očuvanja količine gibanja čestica potrebno je poznavati utjecaj pomicanja rešetke na čestice odnosno rezultirajuće pomake čestica. Za potrebe ovog rada usvojeno je da je horizontalni pomak zadan globalnom brzinom pomicanja rešetke, te da je vertikalno pomicanje čestica moguće odrediti pomoću izraza ((3.3.26).

Jednadžba očuvanja kemijskih tvari u krutim česticama je:

$$\frac{\partial(\rho_{k\check{c}} \cdot Y_{i,k\check{c}} \cdot (1 - \emptyset))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{k\check{c}} \cdot V_{k\check{c}} \cdot Y_{i,k\check{c}} \cdot (1 - \emptyset))}{\partial x} = S_{Y_{i,k\check{c}}} \quad (3.3.27)$$

$Y_{i,k\check{c}}$ – maseni udjel tvari i u česticama

Jednadžbe očuvanja energije za krute čestice unutar gustog sloja krute tvari se mogu izraziti kao:

$$\frac{\partial(\rho_{k\check{c}} \cdot H_{k\check{c}} \cdot (1 - \emptyset))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{k\check{c}} \cdot V_{k\check{c}} \cdot H_{k\check{c}} \cdot (1 - \emptyset))}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{k\check{c}} \frac{\partial T_{k\check{c}}}{\partial x} \right) + \frac{\partial q_{zr}}{\partial x} Q_{k\check{c},h} \quad (3.3.28)$$

S izvornim članom $Q_{k\check{c},h}$ su uzete u obzir sve relevantne pojave za očuvanje energije: izmjena topline između plinske faze i čestica te toplina proizvedena heterogenim reakcijama između plinske faze i krute faze.

Toplinsku vodljivost gustog sloja krutih čestica $\lambda_{k\check{c},sl}$ čine toplinska vodljivost samih čestica $\lambda_{k\check{c},0}$ i prijelaz topline uslijed pomicanja čestica $\lambda_{k\check{c},m}$. To se može prikazati slijedećim izrazom:

$$\lambda_{k\check{c},sl} = \lambda_{k\check{c},0} + \lambda_{k\check{c},m} = (1 - \emptyset)\lambda' + \lambda_{k\check{c},m} \quad (3.3.29)$$

Transportni koeficijent za krutu fazu tj. $\mu_{kč}$, D_s i $\lambda_{kč,m}$ za gusti sloj krutih čestica se moraju procijeniti na određeni način. Može se definirati Prandtlov broj i Schmidov broj za krute čestice u sloju, analogijom s plinskom fazom i uz pretpostavku da je:

$$Pr_{kč} = Sc_{kč} = 1 \quad (3.3.30)$$

dobije se da je:

$$\begin{aligned} \mu_{sl,kč} &= \rho_{sl,kč} D_s \\ \lambda_{kč,sl} &= \mu_{sl,kč} C_{p,sl,kč} = \rho_{sl,kč} C_{p,sl,kč} D_s \end{aligned} \quad (3.3.31)$$

$\mu_{sl,kč}$ - viskoznost sloja krutih čestica u nasutom stanju

$\rho_{sl,kč}$ – gustoća sloja krutih čestica u nasutom stanju

$C_{p,sl,kč}$ - specifični toplinski kapacitet sloja krutih čestica u nasutom stanju

D_s se dobiva aproksimacijom iz laboratorijskih mjerenja, a ovisi o fizikalnim svojstvima krutog goriva, vrsti i izvedbi rešetke kao i o radnim uvjetima ložišta.

Prijelaz topline zračenjem unutar sloja čestica na pomičnoj rešetki

Dominantni mehanizam prijelaza topline između čestica goriva na rešetki je prijelaz topline zračenjem. Za to je primijenjen prilagođeni model za modeliranje ovog procesa. Prema modelu toplinskog toka koje su definirali (19), koji najbolje odgovara za slučaj plinova koji izgaraju u ograničenom prostoru, definiran je model s dva toplinska toka:

$$\begin{aligned} \frac{dI^+}{dx} &= -(k_a + k_s)I_x^+ + \frac{1}{2}k_a E_b + \frac{1}{2}k_s(I_x^+ + I_x^-) \\ -\frac{dI^-}{dx} &= -(k_a + k_s)I_x^- + \frac{1}{2}k_a E_b + \frac{1}{2}k_s(I_x^+ + I_x^-) \end{aligned} \quad (3.3.32)$$

Za koeficijent k_s je pretpostavljeno da je jednak nuli, a koeficijent k_a je:

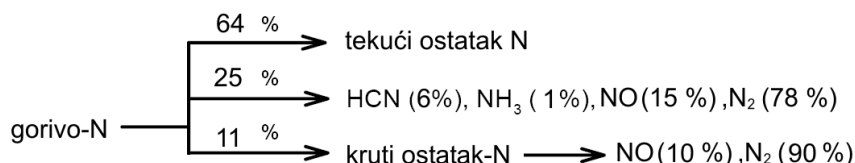
$$k_a = -\frac{1}{d_{kč}} \ln(\emptyset) \quad (3.3.33)$$

Model konverzije dušika vezanog u gorivu

Kod drvene biomase dušik je prisutan u manjem udjelu u odnosu na ostale kemijske spojeve (C/O/H). Konverzija dušika vezanog u gorivu ne utječe na glavne reakcije C/O/H, ali su reakcije konverzije dušika znatno pod utjecajem reakcija izgaranja većinskih kemijskih spojeva u drvnjoj biomasi.

Model za nastajanje dušikovitih spojeva pretpostavlja da se dušik iz goriva (gorivo-N) transformira u: volatili-N, tekući ostatak-N, kruti ostatak-N i NO. U toku procesa devolatilizacije ukupni gorivo-N se transformira u NH₃, HCN i HNCO s brzinama tvorbe proporcionalnim brzini devolatilizacije prema (3.3.28). Tokom izgaranja krutog ostatka gorivo-N se transformira u NO s brzinom koja je proporcionalna oksidaciji elementarnog ugljika u krutom ostatku (3.3.33).

Konverzija gorivo-N može se prikazati kao:



Omjeri za konverziju dušika sadržanog u gorivu su preuzeti od Wintera (5) koji je istraživao konverziju dušika sadržanog u drvnj biomasi i otpadnoj biomasi za goriva iz drvne biomase s različitim udjelima dušika. Navedeni udjeli odgovaraju rezultatima za drvenu biomasu uz udjel dušika od približno 2%.

Dušikovi spojevi, koji su u sastavu volatila koji nastaju u procesu devolatilizacije su pretežno amonijak (NH₃), cijanovodik (HCN), dušik (N₂) i dušik(II)-oksid (NO). U procesu izgaranja krutog ostatka nastaju dušik (N₂) i dušik(II)-oksid (NO).

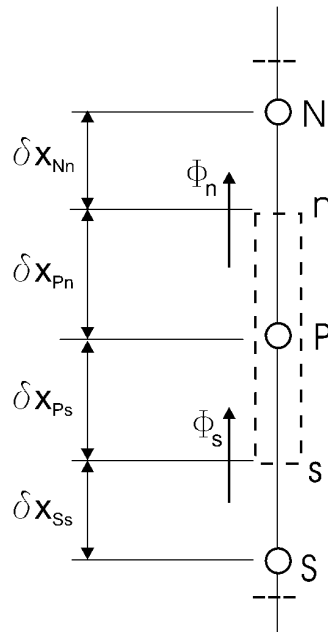
Iz ovakve tvorbe, dušikovi spojevi se dalje u plinskoj fazi modeliraju uz daljnje reakcije kako je navedeno u prikazu modela plinske faze. Nastajanje dušik(II)-oksida termičkim mehanizmom i promptnim mehanizmom prikazano je u poglavlju 3.6.

Rješavanje sustava diferencijalnih jednačbi

Jednačbe očuvanja, koje su do sada navedeno za sve relevantne veličine, mogu se napisati u općenitom obliku:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot V \cdot \Phi)}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + S_{\Phi} \quad (3.3.34)$$

Rješavanju sustava diferencijalnih jednačbi pristupilo se je metodom konačnih volumena. Jednodimenzijaska domena je podijeljena po visini na konačni broj volumena, kako je prikazano na Slika 21.



Slika 21 Diskretizacija domene po visini sloja biomase

δx_{P_i} - udaljenosti između susjednih kontrolnih volumena

Φ_i – smjer konvektivnog člana

U svakoj točki P domene računa se sustav diskretiziranih jednadžbi, za promatrani jednodimenzijnski prostor. Taj pravac odgovara sloju biomase u jednom trenutku dok se kreće po pomičnoj rešetki. S obzirom da je pomicanje znatno sporije od brzine plinova koji struje kroz biomasu na rešetki, sloj biomase se može smatrati kvazistacionarnim, a vremenska komponenta se pretvara u pomak po duljini rešetke.

Jednadžba (3.3.34) je diskretizirana za svaki konačni volumen i riješena SIMPLE algoritmom prema (27), te je za svaki kontrolni volumen izraz (3.3.34, tvoreći tako sustav jednadžbi:

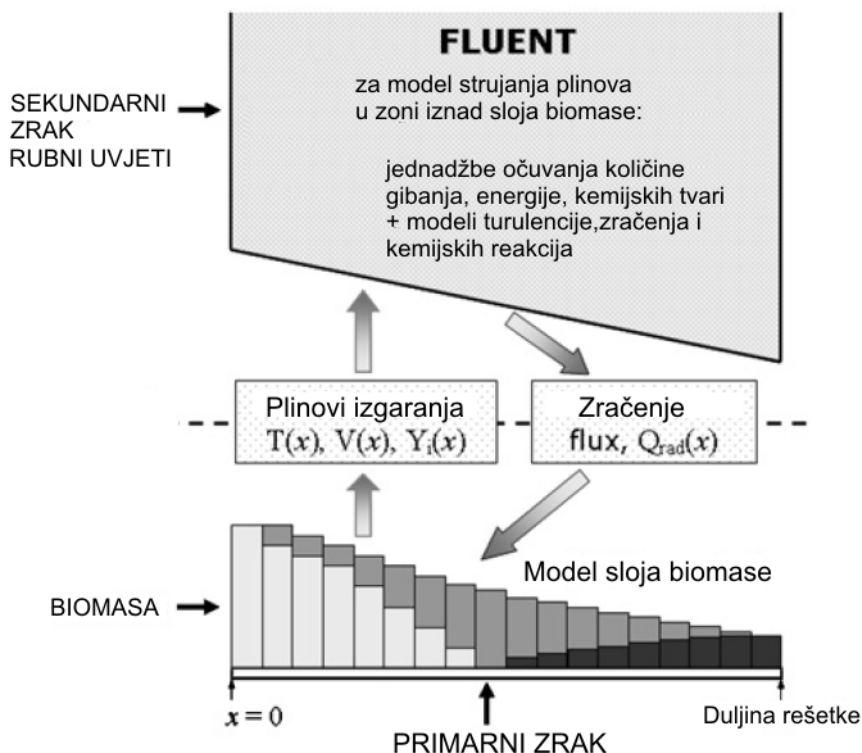
$$a_P \Phi_P + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S = S_\Phi \quad (3.3.35)$$

Jednadžba za prijenos topline zračenjem (3.3.29) je riješena pomoću metode Runge-kutta četvrtog reda.

Rezultati koje daje nestacionarna jednodimenzijnska numerička simulacija izgaranja biomase na rešetki je pomoću zadane brzine pomicanja rešetke transformirana u dvodimenzijnsku simulaciju. Rezultirajuće izlazne brzine plinova, koncentracije plinova (O_2, CO, CO_2, H_2O i NO, HCN, NH_3), temperatura plinova su korištene kao ulazni profil za simulacije strujanja fluida koje uključuju izmjenu topline i tvari, kemijske reakcije, kako je prikazano na Slika 22.

Nakon uspješno izvršenih simulaciju u FLUENT-u, rezultirajuće zračenje plinova na površinu sloja goriva u ložištu je u obliku profila uneseno u numerički model, te je ponovljen izračun svojstva plinova koji izlaze iz sloja biomase.

Nakon najviše četiri ponavljanja ovih koraka postignuta je konvergencija i profili se nisu znatnije mijenjali.



Slika 22 Shematski prikaz postupka numeričkih simulacija

3.4 Matematički model plinske faze

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 uništavanja pojedinih kemijskih spojeva itd. Takav sustav može se u potpunosti opisati navođenjem tlaka, gustoće, temperature, brzine strujanja i koncentracije svakog od pojedinih sastojaka u svakoj točki prostora.

Jednadžba očuvanja mase

Promjena mase u promatranome kontrolnom volumenu, čije se dimenzije ne mijenjaju, može se izraziti sljedećom jednadžbom:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.4.1)$$

Tome se još pribraja protok mase kroz plohe kontrolnog volumena, koji se prikazuje umnoškom gustoće, površine plohe i komponentom brzine koja je u smjeru normale na promatranu plohu.

$$\begin{aligned} & \rho u_x \Delta y \Delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \\ & + \rho u_y \Delta x \Delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z \\ & + \rho u_z \Delta x \Delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (3.4.2)$$

Zbroj članova nakon sređivanja i množenja s $\Delta x \Delta y \Delta z$ daje:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.4.3)$$

ili u sažetijem zapisu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.4.4)$$

gdje je ρ gustoća fluida, t vrijeme, a 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 je član s lijeva u jednadžbi (3.4.4) promjena gustoće u vremenu. Drugi član prikazuje masu dovedenu ili odvedenu strujanjem kroz površine kontrolnog volumena i naziva se konvekcijski član.

Jednadžba očuvanja količine gibanja

Prema drugom Newtonovom zakonu, promjena količine gibanja čestice fluida jednaka je zbroju sila koje djeluju na česticu.

Povećanja količine gibanja po osima x , y , i z , po jedinici volumena, su:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} ; \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} ; \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} \quad (3.4.5)$$

gdje su u_x, u_y i u_z komponente brzina po koordinatnim osima.

Kada uzmemo u obzir komponente sila po koordinatnoj osi x uslijed tlaka i viskoznih napreznja za sve površine kontrolnog volumena zajedno s izrazima (3.4.5) dobivamo izraz:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (3.4.6)$$

gdje su g_i gravitacijska konstanta, σ_{ij} tenzor naprezanja. Tenzor naprezanja uzrokovanih Newtonovim zakonom viskoznosti je:

$$\sigma_{ij} = -pI_{ij} + \tau_{ij} \quad (3.4.7)$$

uz jedinični tenzor I_{ij} , tlak fluida p , τ_{ij} tenzor viskoznih naprezanja kao:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu - \mu_v \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \cdot I_{ij} \quad (3.4.8)$$

gdje su definirani μ_v kao koeficijent volumenske viskoznosti i μ kao koeficijent dinamičke viskoznosti.

Uvrštavanjem izraza (3.4.7) i (3.4.8) u jednadžbu očuvanja količine gibanja (3.4.6) dobijemo izraz:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu - \mu_v \right) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \cdot I_{ij} \right] + \rho g_i + S_{kap,i} \end{aligned} \quad (3.4.9)$$

što u stvari predstavlja Navier-Stokesovu jednadžbu za nestacionarno strujanje stlačivog newtonskog fluida.

Jednadžba prijenosa tvari

Kod rješavanja modela izgaranja potrebno je definirati i transportnu jednadžbu za pojedine kemijske tvari. Jednadžba očuvanja tvari u kontrolnom volumenu za turbulentno strujanje fluida je:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_k) = - \frac{\partial}{\partial x_i} J_{k,i} + M_k \omega_k \quad (3.4.10)$$

gdje je $J_{k,j}$ difuzijski tok tvari k koji je prema Fickovom zakonu difuzije jednak:

$$J_{k,i} = \left(-\rho\Gamma_k + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_k}{\partial x_i} \quad (3.4.11)$$

U izrazu (3.4.11) Γ_k je koeficijent difuzije kemijske tvari k a Sc_t je turbulentni Schmitov broj koji iznosi:

$$Sc_t = \Gamma_t \rho \quad (3.4.12)$$

gdje je Γ_t koeficijent difuzije uslijed turbulencije prikazan u izrazu (3.4.29).

Izvorni član ω_k definiran je kao promjena koncentracije kemijske tvari k uslijed kemijskih reakcija, što je prikazano u poglavlju 3., i može se izraziti kao:

$$\omega_k = \frac{\partial c_k}{\partial t} = \sum_{j=1}^R (v''_{kj} - v''_{kj}) k_{f,j} \prod_{s=1}^S c_s^{v_{sj}} \left(1 - \frac{1}{K_{C,j}} \prod_{s=1}^S c_s^{(v'_{sj} - v'_{sj})} \right) \quad (3.4.13)$$

Jednadžba očuvanja energije

Jednadžba očuvanja energije može se izraziti pomoću ukupne specifične entalpije u sljedećem obliku:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial H}{\partial x_i} \right) + S_{H,R} \quad (3.4.14)$$

Ovdje su λ koeficijent toplinske vodljivosti, c_p je specifična toplina pri konstantnom tlaku, a $S_{H,R}$ je izvorni član uslijed zračenja. Ukupna specifična entalpija čija je transportna jednadžba napisana u izrazu (3.4.14) se definira kao:

$$H = \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^{N_s} \rho_k \left(\int_{T_{ref}}^T c_{p,k} dT + (\Delta h_f^0)_k \right) = h + \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^{N_s} \rho_k (\Delta h_f^0)_k \quad (3.4.15)$$

U izrazu (3.4.14) je pretpostavljeno da su toplinski tokovi u ložištu takvi da je moguće zanemariti brzine promjene tlaka i prijelaz mehaničke energije u toplinsku. Jednadžba očuvanja energije uključuje i navedene članove te je se može prikazati u obliku:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i E) + \frac{\partial}{\partial x_i} p = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[-q_i - \sum_{k=1}^S h_k J_{k,i} + u_j \tau_{ij} \right] + S_{E,R} + S_{E,k} \quad (3.4.16)$$

Treći član izraza (3.4.16) kojim se uzimaju u obzir promjene tlaka se prilikom izvođenja izraza (3.4.14) izostavlja, kao i treći član s desne strane koji uzima u obzir izmjenu topline uslijed viskozne disipacije.

Gustoća toplinskog toka q_i prema Fourierovom zakonu provođenja iznosi:

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3.4.17)$$

Difuzijski tok sastojka k određen je zakonom difuzije:

$$J_{k,i} = -\Gamma_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} = \rho D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} \quad (3.4.18)$$

gdje je D_k koeficijent difuzije za sastojak k u smjesi.

U jednadžbi (3.4.14) daljnja je pretpostavka da su koeficijent masene difuzije sastojaka i koeficijent temperaturne vodljivosti približno jednaki (33). Uz takvu pretpostavku proizlazi da je:

$$Le = \frac{D_k}{a} = \frac{D_k \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \approx 1 \quad (3.4.19)$$

Tako prvi član s desne strane jednadžbe (3.4.14) uzevši u obzir izraz (3.4.15) za ukupnu specifičnu entalpiju prikazuje prijenos topline kondukcijom i difuzijom sastojaka.

Modeli turbulencije

Procesi izgaranja koji se susreću u industrijskim procesima usko su vezani za turbulentno strujanje. 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 generatora pare i većini drugih ložišta je izrazito turbulentno.

Turbulentno strujanje je po svojoj prirodi nasumično i kaotično, drugim riječima nepredvidivo, te zbog toga isključuje mogućnost da se simulira posve deskriptivno. Turbulentno strujanje karakteriziraju vrtlozi velikog raspona veličina, od velikih koji imaju značajno međudjelovanje s usrednjenim protokom do onih vrlo malih dimenzija. Dužinska skala koja predstavlja dimenzije najmanjih turbulentnih vrtloga naziva se Kolmogorova skala. Sljedeći izraz prikazuje omjer najveće i najmanje turbulentne skale:

$$\frac{l_0}{l_k} \cong \text{Re}_t^{\frac{3}{4}} \quad (3.4.20)$$

dje su l_0 integralna dužinska skala, l_k Kolmogorova dužinska skala a Re_t je turbulentni Reynoldsov broj koji se određuje pomoću integralne dužinske skale i turbulentne kinetičke energije. Za uobičajeno turbulentno strujanje u turbulentni Reynoldsov broj iznosi oko 500, pa je omjer dužinskih skala približno $l_0 / l_k \cong 100$. Iz toga slijedi da je za direktnu numeričku simulaciju potrebna mreža s 1000 čvorova (volumena) samo za jedan smjer prostora, dok bi za trodimenzijski prikaz svih pa i najmanjih turbulentnih vrtloga bilo potrebno 10^9 kontrolnih

volumena. Sljedeći problem predstavlja činjenica da se procesi u turbulentnom sloju događaju vrlo brzo, te je stoga potreban iznimno mali vremenski korak. Zbog svega navedenog slijedi da nije moguće direktno simulirati turbulentno strujanje sa sadašnjom procesorskom snagom računala, osim za neke jednostavne probleme malog Reynoldsovog broja. Zbog navedene prirode turbulentnog strujanja za konstrukciju matematičkog modela koji opisuje veličine kao što su brzina, temperatura, tlak, itd. potrebno je sve te veličine prikazati s usrednjenom i fluktuirajućom komponentom.

Favreovo i Reynoldsovo usrednjavanje

Turbulentni transport tvari, količine gibanja i energije opisuju se jednadžbama (3.4.9), (3.4.10) i (3.4.14) koje je potrebno na odgovarajući način usrednjiti da bi se odredili transportni članovi tih jednadžbi koji nastaju uslijed turbulencija.

Iz tog razloga pristupa se usrednjavanju svojstava strujanja fluida, te pretpostavljamo da je trenutna vrijednost nekog svojstva fluida jednaka $\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t)$; tj. zbroju usrednjene vrijednosti i oscilirajuće komponente. Dva su najčešće korištena načina usrednjavanja transportnih jednadžbi: Reynoldsovo i Favreovo usrednjavanje.

Kod Reynoldsove metode usrednjavanja usrednjava se fizikalna veličina, a kod Favreove metode usrednjava se produkt fizikalne veličine i gustoće.

Kako izgaranje uključuje znatne prelaze topline i varijacije gustoće koje nisu zanemarive u odnosu na gustoću fluida može se zaključiti da je za matematički model izgaranja Favreovo usrednjavanje najpovoljniji model usrednjavanja transportnih jednadžbi.

Brzina fluida usrednjena prema Favreu definira se kao:

$$\tilde{u}_i = \frac{1}{\rho} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int \rho u_i d\tau \quad (3.4.21)$$

Na isti način usrednjavaju se i ostale fizikalne veličine koje se mogu označiti općenito sa ϕ . Prikažemo li jednadžbu (3.4.21) u općem obliku i za vrijeme integracije od T_1 do T_2 dobijemo izraz:

$$\tilde{\phi} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \rho \phi d\tau \quad (3.4.22)$$

$\bar{\rho}$ predstavlja gustoću usrednjenu po Reynoldsu a fizikalna veličina $\tilde{\phi}$ usrednjena je Favreovom metodom.

Veza između fizikalnih veličina usrednjenih prema Reynoldsovoj i Favreovoj metoda je:

$$\bar{\rho} \tilde{\phi} = \bar{\rho} \bar{\phi} + \bar{\rho}' \bar{\phi}' \quad (3.4.23)$$

Kod Favreovog usrednjavanja trenutna se fizikalna veličina ϕ razdvaja na usrednjeni i fluktuirajući dio:

$$\phi = \tilde{\phi} + \phi'' \quad (3.4.24)$$

Ako se prikazuje turbulentni tok u kvazistacionarnom strujanju usrednjena vrijednost ne predstavlja funkciju vremena, te navedeni tok predstavlja vremenski usrednjeni tok u fiksnoj točki u prostoru. Favreovim usrednjavanjem iz jednadžbi očuvanja dobivamo sljedeće izraze:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \tilde{u}_i}) = \overline{S}_m \quad (3.4.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j}) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu - \mu_\nu \right) \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j''} \right] + \overline{\rho g_i} + \overline{S}_{f,i} \quad (3.4.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \tilde{u}_i \tilde{H}}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x_i} - \overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{H}''} \right] + \overline{\rho g_i} + \overline{S}_{H,R} + \overline{S}_{H,kap} \quad (3.4.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \tilde{u}_i \tilde{Y}_k}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu}{\sigma_{Y,k}} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} - \overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{Y}_k''} \right] + \overline{M_k \omega_k} + \overline{S}_{m,k} \quad (3.4.28)$$

Prikazane usrednjene Navier-Stokesove jednadžbe sadrže član oblika $-\overline{\rho \tilde{u}_i'' \varphi''}$ koji predstavlja transport veličine φ turbulentnim strujanjem. Da bi se potpuno odredile gore navedene jednadžbe potrebno je odrediti navedeni član. Prema (34) i (35) taj član se može izraziti kao:

$$-\overline{\rho \tilde{u}_i'' \varphi''} = -\Gamma_t \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x_i} = -\frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x_i} \quad (3.4.29)$$

gdje su Γ_t koeficijent turbulentne difuzije, μ_t je turbulentna viskoznost a σ_t je turbulentni Prandtl-Schmitov broj.

U jednadžbi (3.4.26) član $-\overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j''}$ naziva se još i Reynoldsov tenzor naprezanja i predstavlja naprezanja uslijed turbulentnih fluktuacija. Prema Boussinesqovoj hipotezi

$$-\overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j''} = \mu_t \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + \overline{\rho k} \right) \delta_{ij} \quad (3.4.30)$$

gdje je k usrednjena turbulentna kinetička energija koja se može prikazati i kao:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_k'' u_k''} \quad (3.4.31)$$

Uvrštavanjem u izraz (3.4.26) izraza za Reynoldsova naprezanja prema (3.4.30) i izraza za efektivni tlak \overline{p}_{eff} i efektivnu viskoznost μ_{eff} :

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.4.32)$$

$$\bar{p}_{eff} = \bar{p} + \frac{2}{3} \bar{\rho} k \quad (3.4.33)$$

slijedi da je:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}_{eff}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu_{eff} - \mu_v \right) \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \bar{\rho} g_i + \bar{S}_{f,i} \quad (3.4.34)$$

Po analogiji se prema jednadžbi (3.4.30) modeliraju i ostale usrednjene jednadžbe očuvanja. Jednadžba očuvanja energije definira se uz (3.4.32) i (3.4.27) kao:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{H}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\text{Pr}} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial x_i} \right] + \bar{S}_{H,R} + \bar{S}_{H,kap} \quad (3.4.35)$$

gdje je σ_H turbulentni Prandtlov-Schmitov broj za entalpiju koji je jednak:

$$\sigma_H = \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (3.4.36)$$

Na isti način se dobije jednadžba transporta kemijskih sastojaka uz napomenu da se za velike vrijednosti Reynoldsovog broja $\text{Re}_t = \mu_t / \mu > 100$, a što važi za strujanje u ložištima, molekularna difuzija može zanemariti te se u obzir uzima samo turbulentna difuzija.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{Y,k}} \frac{\partial \tilde{Y}_k}{\partial x_i} \right] + \overline{M_k \omega_k} + \bar{S}_{m,k} \quad (3.4.37)$$

Turbulentni Prandtl-Schmitov broj za kemijski sastojak $\sigma_{Y,k}$ određuje se eksperimentalnim putem.

Za modeliranje turbulencije razvijeni su modeli pomoću kojih je moguće riješiti problem rješavanja i određivanja turbulentne odnosno efektivne viskoznosti.

Razlikuju se sljedeći klasični modeli turbulencije koji rješavaju usrednjene Reynoldsove jednadžbe:

1. Model s nula jednadžbi – model dužine miješanja
2. Model s dvije jednadžbe – k- ϵ model
3. Model Reynoldsovog naprežanja
4. Algebarski model naprežanja

Pored ovih modela postoji i pristup rješavanja putem simulacije velikih vrtloga (large eddy simulation - LES), kojim se rješavaju jednadžbe za usrednjeni tok i velike vrtloge, dok se manji vrtlozi modeliraju.

Pored ovih postoje i drugi modeli za modeliranje turbulencije, a za modeliranje procesa izgaranja najčešća je upotreba k - ε modela i modela izvedenih iz tog modela zbog robusnosti i manje zahtjevnosti za vremenom računanja.

Realistični k - ε model

Realistični k - ε model je izveden iz standardnog k - ε modela i uvodi novu formulaciju turbulentne viskoznosti i promijenjenu jednadžbu transporta turbulentne disipacije. Prednosti koje ima u odnosu na standardni k - ε model su bolje modeliranje tokova koji uključuju vrtloženje i recirkulaciju te granične slojeve s velikim gradijentima tlaka.

Jednadžba transporta turbulentne kinetičke energije k je identična kao i kod standardnog modela dok se jednadžba transporta disipacije turbulentne kinetičke energije izražava jednadžbom:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \bar{\rho} C_1 S \varepsilon - C_2 \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (3.4.38)$$

gdje su:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3.4.39)$$

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad (3.4.40)$$

Koeficijenti iz jednadžbe (3.4.38) imaju konstantne vrijednosti i iznose:

$$C_1 = 1.44 ; C_2 = 1.9 ; \sigma_k = 1 ; \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (3.4.41)$$

Koeficijent turbulentne viskoznosti računa se kao i kod standardnog modela, ali se koeficijent C_μ računa izrazom

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon}} \quad (3.4.42)$$

gdje su:

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.4.43)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k \\ \Omega_{ij} &= \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \end{aligned} \quad (3.4.44)$$

$\bar{\Omega}_{ij}$ je usrednjeni tenzor brzine rotacije s obzirom na koordinatni sustav koji rotira s kutnom brzinom ω_k . Druge konstante iz izraza (3.4.42) iznose:

$$A_0 = 4.04 ; A_s = \sqrt{6} \cos\phi \quad (3.4.45)$$

uz izraze:

$$\phi = \frac{1}{3} \arccos(\sqrt{6}W) \quad (3.4.46)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}} \quad (3.4.47)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (3.4.48)$$

Izraz S_{ij} je tenzor brzine deformacije odnosno:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.4.49)$$

3.5 Model izgaranja u plinskoj fazi (homogene reakcije)

Kako je već navedeno izgaranje kod industrijskih ložišta je uglavnom vezeno za turbulentno strujanje. Tako za rješavanje problema izgaranja potrebno je pored jednadžbi za turbulentno strujanje, tj. transportnih jednadžbi za k i ε , potrebno riješiti i transportne jednadžbe za pojedine kemijske tvari, što uključuje i određivanje reakcija u kojima se oni formiraju ili raspadaju.

Postoji više pristupa i modela za simuliranje strujanja fluida koji uključuje kemijske reakcije. Ovdje su navedena dva pristupa koji su korišteni u numeričkim simulacijama u ovome radu.

Jednadžba transporta tvari

Kod rješavanja modela izgaranja je potrebno je definirati još jednu dodatnu transportnu jednadžbu za transport pojedinih tvari. Jednadžba očuvanja tvari u kontrolnom volumenu kod turbulentnog strujanja je:

$$\frac{\partial(\rho m_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} m_i) = \text{div} \left[\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{C_t}} \right) \cdot \text{div}(m_i) \right] + R_i + S_i \quad (3.5.1)$$

gdje su:

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

$S_{c_t} = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$ - 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 (3.5.1) predstavlja masenu difuziju kod turbulentnog strujanja prikazanu pomoću koeficijenata 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 (3.5.2).

U energetsku jednadžbu (3.4.14) potrebno je uključiti transport entalpije uslijed difuzije tvari u obliku:

$$\operatorname{div} \left(\sum_{i=1}^n \left[-h_i \cdot \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{S_{c_t}} \right) \right] \right) \quad (3.5.3)$$

koji može imati znatan učinak na polje vrijednosti entalpija.

Model konačnih brzina kemijskih reakcija

Ovaj model konačnih brzina reakcija zanemaruje fluktuirajuću komponentu i određuje brzinu reakcija pomoću Arrheniusovog izraza. Kod laminarnog plamena model točno opisuje plamen, ali je neadekvatan za turbulentni plamen zbog izuzetno nelinearnosti Arrheniusova modela kemijske kinetike.

Četvrti član u jednadžbi za transport tvari (3.5.1) prema ovom modelu jednak je:

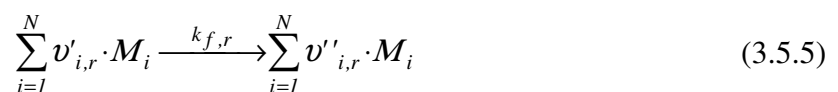
$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_r} R_{i,r} \quad (3.5.4)$$

gdje su:

$M_{w,i}$ - molekularna težina za tvar i

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

Općenito se reakcija r može napisati kao:



gdje su:

- N - broj tvari uključenih u proces izgaranja
 $\nu'_{i,r}$ - stehiometrijski koeficijent za reaktanta i u reakciji r
 $\nu''_{i,r}$ - stehiometrijski koeficijent za produkta i u reakciji r
 M_i - simbol koji označava tvar i
 $k_{f,r}$ - konstanta brzine kemijske reakcije

Reakcije (3.5.5) 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:

$$R_{i,r} = \Gamma(\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}) \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta'_{j,r}} \right) \quad (3.5.6)$$

gdje su:

- N_r - broj tvari u kemijskoj reakciji r
 $C_{j,r}$ - molarna koncentracija pojedinog reaktanta i produkta tvari j u reakciji r
 $\eta'_{j,r}$ - eksponent brzine reakcije za svaki reaktant i produkt tvari j u reakciji r

Konstanta brzine kemijske reakcije r , $k_{f,r}$ je prema Arrheniusovom izrazu:

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_k} e^{-\frac{E_r}{RT}} \quad (3.5.7)$$

gdje su:

- A_r - predeksponencijalni faktor
 β_r - temperaturni eksponent
 E_r - aktivacijska energija u reakciji r
 R - univerzalna plinska konstanta

Model disipacije vrtloga (Eddy Dissipation Model)

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. Gorivo i zrak sporo se miješaju prema zoni u kojoj se odvija reakcija gdje brzo izgore. Za takve slučajeve se kaže da je izgaranje limitirano brzinom miješanja.

Model interakcije turbulencije i kemijskih reakcija zasniva se na radu Magnussena i Hjertagera i naziva se model disipacije vrtloga (eddy dissipation model). Prema tom modelu brzina nastajanja kemijske tvari i uslijed reakcije r , $R_{i,r}$, jednaka je manjoj vrijednosti izraza:

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

$$R_{i,r} = v'_{i,r} \cdot M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{\sum_p m_p}{\sum_j^N v'_{j,r} M_{w,j}} \quad (3.5.8)$$

gdje su:

- m_p - maseni udio kemijske tvar i produkta
- m_r - maseni udio kemijske tvar 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 ($\frac{k}{\varepsilon} > 0$). Takav pristup je ispravan za odvojeno dovođene 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 najtočnije rezultate jer se uzima u obzir Arrheniusova brzina reakcije (3.5.6) i brzine reakcija limitirane miješanjem (3.5.8) te se uzima najmanja od tri brzine kao stvarna brzina reakcije.

Pored modela disipacije vrtloga (eddy dissipation model) postoji i dodatak tom modelu koji uključuje mehanizam kemijskih reakcija u turbulentnom strujanju, koji se naziva koncept disipacije vrtloga (eddy dissipation concept). Model pretpostavlja da se reakcija odvija u malim turbulentnim strukturama (vrtlozima).

Model prijenosa topline zračenjem

Prijenos topline zračenjem je jedan do osnovnih mehanizama prijenosa topline u ložištima generatora pare. Poznato je da se prijelaz topline najvećim dijelom odvija upravo zračenjem te je stoga prijenos topline zračenjem uključen u proračun korištenjem adekvatnog modela. Prijelaz topline zračenjem utječe na vršne temperature plamena, a time i na nastajanje dušikovih oksida kako je opisano u poglavlju 3.6.

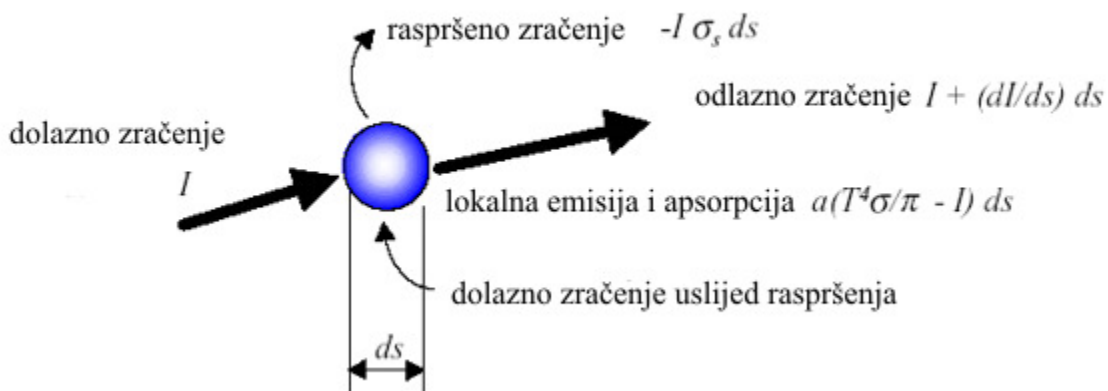
Prijenos topline zračenjem u točki prostora za Kartezijev koordinatni sustav, određen je vektorom \vec{r} u smjeru vektora \vec{s} i definiran je izrazom:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \cdot \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (3.5.9)$$

gdje su:

- I - intenzitet zračenja
- s - duljina puta zračenja
- \vec{s}' - vektor smjera disperziranog zračenja
- T - temperatura u točki
- n - koeficijent loma
- α - koeficijent apsorpcije zračenja
- σ - Stefan-Bolzmannova konstanta $5,672 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$
- σ_s - koeficijent disperzije zračenja
- Ω' - prostorni kut
- Φ - fazna funkcija

Prvi član lijeve strane izraza (3.5.9) je promjena intenziteta zračenja po putu zračenja, drugi član predstavlja umanjeње intenziteta uslijed apsorpcije i disperzije zračenja. Prvi član desne strane izraza je povećanje zračenja uslijed zračenja plinova a drugi član povećanje uslijed dobitaka disperziranog zračenja.



Slika 23 Prijenos topline zračenjem

Izraz $(\alpha + \sigma_s) ds$ je izraz za optičku debljinu ili neprozirnost medija. Koeficijent loma n se može usvojiti da je jednak jedan. Model prijenosa topline mora uključivati prijenos topline na kapljice goriva a modeli koji zadovoljavaju taj uvjet su P1 i model diskretnih ordinata. Kriterij za odabir modela zračenja je optička debljina komore izgaranja αL , gdje je α karakteristični apsorpcijski koeficijent koji je za izgaranje ugljikovodika $\alpha \approx 1$, a L je karakteristična veličina ložišta. Općenito se za $\alpha L \ll 1$, što je slučaj u ovom radu, preporuča

korištenje jednostavnijeg P1 modela, ali je zbog veće točnosti odabran model diskretnih ordinata da se što je moguće točnije odrede najviše temperature u ložištu.

Model diskretnih ordinata

Model diskretnih ordinata diskretizira prostor konačnim brojem prostornih kutova koje određuje vektor \vec{s} . Oktant prostorne sfere označen sa 4π diskretizira se s prostornim kutovima Ω_i . Kutovi Θ i Ψ su polarni i azimutni kut definirani u Kartezijevom koordinatnom sustavu.

Broj jednadžbi je jednak broju vektora smjera \vec{s} koji je određen brojem prostornih kutova. Jednadžbe prijenosa topline glase:

$$\frac{d(I, \vec{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \cdot \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (3.5.10)$$

Model sume utjecaja sivih plinova (Weighted-Sum-of-Gray-Gases)-(WSGGM) je model izračuna koeficijenta emisivnosti koji je kompromis između pojednostavnjenog modela sivih plinova i modela koji uzima u obzir sva područja emisije plinova.

Osnovna pretpostavka ovog modela je da se emisivnost plinova može predstaviti kao:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^{N_{pl}} \alpha_{\varepsilon,i} (1 - \varepsilon^{-\kappa_i p s}) \quad (3.5.11)$$

gdje su:

- $\alpha_{\varepsilon,i}$ - koeficijent emisivnosti i-tog sivog plina (ovisan o temperaturi)
- κ_i - koeficijent apsorpcije i-tog sivog plina
- p - zbroj parcijalnih tlakova svih plinova koji imaju svojstvo apsorpcije zračenja
- s - duljina puta zračenja

Za dijelove spektra gdje su visoke apsorpcije vrijedi izraz ($\sum_{i=1}^N \alpha_{\varepsilon,i} < 1$). Za nulti sivi plin ($i=0$) se usvaja da je proziran s koeficijentom apsorpcije $\alpha_i = 0$. Faktor utjecaja emisivnosti za nulti sivi plin računa se prema (47):

$$\alpha_{\varepsilon,0} = 1 - \sum_{i=1}^{N_{pl}} \alpha_{\varepsilon,i} \quad (3.5.12)$$

Temperaturna ovisnost koeficijenta $\alpha_{\varepsilon,i}$ može se prikazati bilo kojom funkcijom, a u ovom se slučaju aproksimira izrazom:

$$\alpha_{\varepsilon,0} = \sum_{j=1}^J b_{\varepsilon,i,j} T^{j-1} \quad (3.5.13)$$

gdje je $b_{\varepsilon,i,j}$ koeficijent polinoma za aproksimaciju temperaturne ovisnosti. Koeficijenti polinoma $b_{\varepsilon,i,j}$ i κ_i dobivaju se eksperimentalno (48,49,50). Koeficijent apsorpcije zračenja α može se aproksimirati na sličan način, ali se za pojednostavljenje pretpostavlja da je $\varepsilon = \alpha$. Ta je pretpostavka valjana ako se temperatura stijenci znatno razlikuje od temperature plina, što je u slučaju izgaranja točno. Pošto su koeficijenti $b_{\varepsilon,i,j}$ i κ_i funkcije umnoška ps i temperature T i malo se mijenjaju s promjenama ovih dvaju parametara, može se pretpostaviti da su konstantni. Koeficijent su prikazani u (51) i važe za $0.001 \leq p \cdot s \leq 10$ i $600 \leq T \leq 2400$ K. Za više temperature koriste se izrazi iz (52). Ako je $\kappa_i ps \ll 1$ za sve plinove izraz (3.5.11) se pojednostavljuje u:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^{N_{pl}} \alpha_{\varepsilon,i} \kappa_i ps \quad (3.5.14)$$

Ako se izraz (3.5.14) usporedi s modelom za sive plinove s koeficijentom apsorpcije α , dolazi se do zaključka da je promjena intenziteta zračenja na putu s prema modelu sume utjecaja sivih plinova ista kao i za model sivih plinova čiji je koeficijent apsorpcije:

$$\alpha = \sum_{i=0}^{N_{pl}} \alpha_{\varepsilon,i} \kappa_i p \quad (3.5.15)$$

Iz izraza (3.5.15) se vidi da koeficijent apsorpcije nije ovisan o duljini puta zračenja s . Koeficijent se može prikazati i izrazom:

$$\alpha = -\frac{\ln(1-\varepsilon)}{s} \quad (3.5.16)$$

gdje je ε koeficijent emisivnosti modela određen izrazom (3.5.11). Za vrijednosti $s \leq 10^{-4}$ m koeficijent apsorpcije se računa izrazom (3.5.15) a za veće vrijednosti pomoću izraza (3.5.16). Duljina puta zračenja s može se odrediti pomoću karakteristične veličine konačnog volumena ili srednjom duljinom zrake.

3.6 Model nastajanja dušik(II)-oksida

Modeliranje nastajanja dušik(II)-oksida (NO) korišteno u ovom radu uključuje model nastajanja termičkog i promptnog dušik(II)-oksida kao i dušik(II)-oksida koji nastaje iz dušika vezanog u gorivu. U model je uključen i mehanizam potrošnje dušik(II)-oksida uslijed redukcije s radikalima CH_n . Modeliranje nastajanja dušik(II)-oksida rješava se tako da se rješavaju jednadžbe transporta dušik(II)-oksida (NO), a za dušik vezan u gorivu se koristi transportna jednadžba za cijanovodik (HCN) i amonijak (NH_3). Navedene transportne jednadžbe rješavaju se na osnovu dobivenih polja temperatura, kemijskih sastojaka i drugih

svojstva unutar ložišta, odnosno rješavaju se u obliku postprocesora. Točnost predviđene emisije dušik(II)-oksida ovisi o točnom rješenju sustava izgaranja odnosno o dobivenim temperaturama, udjelima smjese i drugim bitnim svojstvima.

Transportne jednadžbe za dušik(II)-oksid

Princip modeliranja dušik(II)-oksida (NO) sastoji se od rješavanja transportnih jednadžbi uzimajući u obzir konvekciju, difuziju, nastajanje i potrošnju dušik(II)-oksida i drugih navedenih kemijskih spojeva relevantnih za nastajanje dušik(II)-oksida. Vrlo je važan utjecaj vremena zadržavanja spojeva pa je upotrijebljen koncept Lagrangeovog koordinatnog sustava koji je uključen u Eulerove transportne jednadžbe kroz konvekcijski član. Transportne jednadžbe koje se rješavaju u postprocesoru su:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_{NO}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{NO}}{\partial x_i} \right) + S_{NO} \quad (3.5.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{HCN}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_{HCN}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{HCN}}{\partial x_i} \right) + S_{HCN} \quad (3.5.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NH_3}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_{NH_3}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{NH_3}}{\partial x_i} \right) + S_{NH_3} \quad (3.5.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{N_2O}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_{N_2O}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D \frac{\partial Y_{N_2O}}{\partial x_i} \right) + S_{N_2O} \quad (3.5.20)$$

gdje su Y_{NO} , Y_{HCN} , Y_{NH_3} , Y_{N_2O} maseni udjeli kemijskih spojeva NO, HCN, NH₃ i N₂O u plinskoj fazi (smjesi). Izvorni članovi S_{NO} , S_{HCN} , S_{NH_3} i S_{N_2O} se određuju prema mehanizmima nastajanja dušik(II)-oksida koji će biti opisani u nastavku.

Modeliranje tvorbe termičkog dušik(II)-oksida

Nastajanje dušik(II)-oksida oksidacijom dušika iz zraka određuje se prema kemijskim reakcijama prema Zeldoviču (32). Reakcije kao i pripadni koeficijenti odvijanja reakcije prikazani su u (2.2.13) dok je brzina nastajanja dušik(II)-oksida određena izrazom (2.2.14) odnosno uz pretpostavku kvazistacionarnosti za [N] izrazom (2.2.16).

Nastajanje termičkog NO je ovisno prvenstveno o temperaturi jer je limitirajuća reakcija Zeldovičevog mehanizma prva reakcija izraza (2.2.13) reakcija s visokom energijom aktivacije, pa je za svakih 90 K više temperature plamena nastajanje termičkog NO dvostruko veće za temperature koje prelaze 2200 K. Brzina nastajanja dušik(II)-oksida također se povećava s većom prisutnosti radikala kisika O, što je također vidljivo iz izraza (2.2.15).

Kako se smanjenje emisije dušik(II)-oksida primarnim mjerama temelji na izgaranju primarne smjese u uvjetima bogatog plamena, tako druga i treća reakcija izraza (2.2.13) dobivaju na značaju, te je potrebno odrediti koncentracije radikala O i OH.

Koncentracija navedenih radikala određena metodom parcijalne ravnoteže može uzrokovati do 25% povećano nastajanje NO u modelu nastajanja termičkog NO.

Za određivanje koncentracije radikala O i OH primijenjen je koncept parcijalne ravnoteže pa je tako reakcija disocijacije i rekombinacije atoma kisika prikazana sa:



gdje je M oznaka za prisutnost inertne molekule (katalizatora) koja omogućuje i pospešuje prikazanu reakciju.

Izraz za dobivanje koncentracije radikala kisika O prikazana je izrazom:

$$[O] = 36.64T^{\frac{1}{2}} [O_2]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{27123}{T}} \quad (3.5.22)$$

gdje je $[O]$ koncentracija radikala kisika u gmol/m^3 koja je u pravilu veća od ravnotežne koncentracije.

Koncentracija radikala OH za treću reakciju Zeldovičevog mehanizma (2.2.13) određuje se po principu parcijalne ravnoteže i prema (53,54) izrazom:

$$[OH] = 2.129 \times 10^2 T^{-0.57} e^{-\frac{4595}{T}} [O]^{\frac{1}{2}} [H_2O]^{\frac{1}{2}} \quad (3.5.23)$$

gdje je $[OH]$ koncentracija radikala kisika u gmol/m^3 .

Izvorni član u transportnoj jednadžbi za dušik(II)-oksid koji nastaje prema Zeldovičevom mehanizmu može se izraziti kao:

$$S_{term,NO} = M_{w,NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (3.5.24)$$

gdje je $M_{w,NO}$ molarna težina dušik(II)-oksida (NO) – kg/gmol , a izraz $\frac{d[NO]}{dt}$ se određuje iz izraza (2.2.14).

Modeliranje tvorbe promptnog dušik(II)-oksida

U poglavlju 2.2 već je navedeno da se promptni NO javlja u fronti plamena već pri niskim temperaturama i u uvjetima bogate smjese. Ovaj je mehanizam nastajanja NO potrebno uzeti u obzir pogotovo kod sustava koji koriste stupnjevano izgaranje za smanjenje emisije NO-a. Izgaranje biomase u uvjetima bogate smjese smanjuje emisija termičkoga NO (uslijed nižih temperatura) i težište se prebacuje na ostale mehanizme nastajanja NO.

Kemijski spojevi koji nastaju isparivanjem raspadom ugljikovodičnih lanaca navode se kao izvor nastajanja promptnog NO, a najveći udjel je spojeva CH i CH₂. CH u reakciji s molekulom dušika tvori cijanovodik i atom dušika prema prvoj reakciji (2.2.13). CH₂ reagira prema sličnoj reakciji:



Produkti ovih reakcija (HCN i NH) prethode nastajanju NO prema sličnom slijedu reakcija prema kojima nastaje NO iz dušika vezanog u gorivu kao što je prikazano na slici 3.7.

Prva reakcija iz (2.2.13) je vodeća reakcija za nastajanje promptnog NO. Prema istraživanjima [39] usporedbama distribucije gustoće vjerojatnosti, mjesta gdje se pojavila najveća koncentracija NO u fronti plamena i mjesta najveće koncentracije CH se podudaraju. To navodi na zaključak da je većina promptnog NO nastala upravo iz reakcija s radikalom CH. Uz pretpostavku da je prva reakcija (3.5.25) vodeća za nastajanje promptnog NO slijedi izraz:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_0 [CH][N_2] \quad (3.5.26)$$

Iz reakcije (3.5.25) se zaključuje da je za modeliranje nastajanja promptnog NO potrebno uključiti kinetiku nastajanja NO s mehanizmima izgaranja ugljikovodika. Kako je izgaranje ugljikovodika proces koji uključuje mnogo koraka što je prikazano na slici 3.6 i izuzetno je složen za izračun potrebno je primijeniti drugačiji pristup.

U modelu koji koristi FLUENT korišten je globalni kinetički parametar kojeg je razvio De Soete [39]. Prema tom istraživanju uspoređene su ukupne eksperimentalno dobivene brzine tvorbe NO s numeričkim integriranjem empirijski dobivenim brzinama reakcija pri kojima su produkti NO i N₂. Dokazano je da se brzina tvorbe promptnog NO može predvidjeti pomoću:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \text{brzina tvorbe promptnog NO}_x - \text{brzina tvorbe promptnog N}_2 \quad (3.5.27)$$

U razvojnoj fazi plamena gdje se tvorba promptnog NO odvija u uvjetima bogate smjese koncentracija radikala kisika je visoka, te svi radikali dušika prelaze u NO i ne vežu se u molekule dušika. Zbog te činjenice brzina tvorbe promptnog NO je približno jednaka ukupnoj brzini tvorbe NO:

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{prompt} [O_2]^a [N_2][GORIVO] e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (3.5.28)$$

Energija aktivacije za izraz (3.5.28) je $E_a = 251151 \text{ J/gmol}$, a za plamen C₂H₄ vrijedi:

$$k_{prompt} = 1.2 \times 10^7 \left(\frac{RT}{p} \right)^{a+1} \quad (3.5.29)$$

gdje su a red reakcije kisika, p tlak sustava, a R je univerzalna plinska konstanta. Brzina tvorbe promptnog NO je prvog reda u odnosu na koncentracije molekula dušika i goriva ali red ovisnosti reakcije o koncentraciji kisika je ovisan o uvjetima izgaranja. Taj se red određuje prema De Soeteu (55) iz molarne koncentracije kisika u fronti plamena:

$$a = \begin{cases} 1.0, & X_{O_2} \leq 4.1 \times 10^{-3} \\ -3.95 - 0.9 \ln X_{O_2}, & 4.1 \times 10^{-3} \leq X_{O_2} \leq 1.11 \times 10^{-2} \\ -0.35 - 0.1 \ln X_{O_2}, & 1.11 \times 10^{-2} \leq X_{O_2} \leq 0.03 \\ 0, & X_{O_2} \geq 0.03 \end{cases} \quad (3.5.30)$$

Izraz (3.5.28) ispitivan je s eksperimentalnim podacima za druge vrste goriva i udjele smjese te je zaključeno da model odstupa od eksperimentalnih rezultata za uvjete bogate smjese i za više goriva s većim brojem atoma ugljika. Za korekciju tog odstupanja De Soeteov model je modificiran te je uveden korektivni faktor f koji uključuje utjecaj vrste goriva te omjer zraka i goriva za alifatske ugljikovodike. Tako modificirani izraz (3.5.28) glasi:

$$\frac{d[NO]}{dt} = f k'_{prompt} [O_2]^a [N_2] [GORIVO] e^{\frac{-E'_a}{RT}} \quad (3.5.31)$$

U izrazu (3.5.31) su:

$$f = 4.75 + 0.0819 \cdot n + 23.2\phi + 32\phi^2 - 12.2\phi^3 \quad (3.5.32)$$

$$k'_{pr} = 6.4 \times 10^6 \left(\frac{RT}{p} \right)^{a+1} \quad (3.5.33)$$

$$E'_a = 303474.125 \text{ J/gmol} \quad (3.5.34)$$

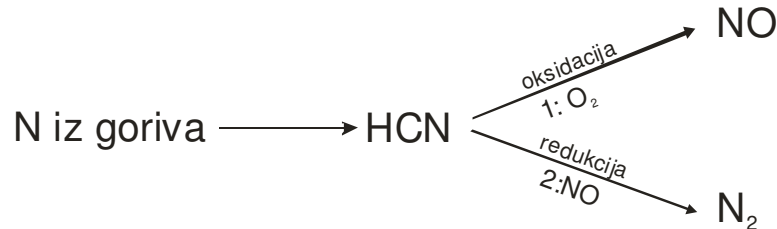
gdje su n broj atoma ugljika po molekuli goriva, a ϕ je ekvivalentni omjer prema (28). Korektivni faktor f je važeći za alifatske alkane (C_nH_{2n+2}) i za ekvivalentne omjere od 0.6 do 1.6. Za vrijednosti izvan ovog područja koristi se gornja ili donja granična vrijednost. Ekvivalentni omjer ϕ ne odnosi se na lokalni ekvivalentni omjer u nekoj točki prostora nego na ukupni ekvivalentni omjer plamena

Modeliranje tvorbe dušik(II)-oksida iz dušika vezanog u gorivu

Dušik vezan u drvnjoj biomasi nalazi se većinom u obliku proteina. Kako je udjel proteina u tipičnoj drvnjoj biomasi malen, udjel dušika i drvnjoj biomasi je također malen. Situacija se znatno mijenja ako se radi o otpadnim drvnim proizvodima kod kojih se dušik nalazi vezan u drugim oblicima i mehanizam nastajanja dušikovih spojeva je znatno drugačiji. Spojevi koji prethode nastanku dušik(II)-oksida su radikali HCN, NH_3 , N, CN i NH_3 kao i kod tekućih i plinovitih goriva koji sadrže dušik.

Prema istraživanjima (3) i (29) HCN nastaje u relativno najvećem udjelu i manji dio u obliku NH_3 , u odnosu na ostale radikale pri raspadu spojeva koji sadrže dušik vezan u ovoj vrsti krutog goriva. Model nastajanja NO iz goriva rješava se pomoću transportnih jednadžbi (3.5.17) do (3.5.19) gdje se primjenjuju izvorni članovi za S_{HCN} , S_{NH_3} , S_{NO} , koji se određuju ovisno o odabranom mehanizmu nastajanja međuspojeva.

Ako se uzme da je međuprodukt koji sudjeluje u tvorbi NO iz goriva samo HCN slijedi da je:



Slika 24 Pojednostavnjeni mehanizam nastanka NO iz goriva uz HCN kao međuprodukt

Izvorni članovi transportnih jednadžbi za HCN i NO mogu se napisati kao:

$$S_{\text{HCN}} = S_{pl,\text{HCN}} + S_{\text{HCN}-1} + S_{\text{HCN}-2} \quad (3.5.35)$$

$$S_{\text{NO}} = S_{\text{NO}-1} + S_{\text{NO}-2} \quad (3.5.36)$$

Potrošnja HCN prema reakcijama prikazanim na Slika 25 odvija se prema (55) uz:

$$\mathfrak{R}_1 = A_1 X_{\text{HCN}} X_{\text{O}_2}^a e^{\frac{-E_1}{RT}} \quad (3.5.37)$$

$$\mathfrak{R}_2 = A_2 X_{\text{HCN}} X_{\text{NO}} e^{\frac{-E_2}{RT}} \quad (3.5.38)$$

gdje su:

- \mathfrak{R}_1 - brzine konverzije HCN u NO
- \mathfrak{R}_2 - brzine konverzije HCN u N_2
- T - trenutna temperatura
- X - molarni udjeli kemijskih sastojaka
- A_1 - konstanta koja iznosi $1.0 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$
- A_2 - konstanta koja iznosi $3.0 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$
- E_1 - energija aktivacije koja iznosi 280451.95 J/gmol
- E_2 - energija aktivacije koja iznosi 251151 J/gmol

Red ovisnosti reakcije o koncentraciji kisika, određuje se prema istom principu za promptni NO prema izrazu (3.5.30).

Molarne koncentracije iz (3.5.37) i (3.5.38) određuju se iz masenih koncentracija prema izrazu:

$$X_i = Y_i \frac{M_{w,smj}}{M_{w,i}} = \frac{Y_i}{M_{w,i}} \left(\frac{\rho RT}{p} \right) \quad (3.5.39)$$

gdje su:

$M_{w,smj}$ - molna masa smjese plinova

$M_{w,i}$ - molna masa sastojka

Izvorni članovi u transportnim jednadžbama određeni u (3.5.35) iznose:

$$S_{HCN-1} = -\mathfrak{R}_1 \frac{M_{w,HCN} \cdot p}{RT} \quad (3.5.40)$$

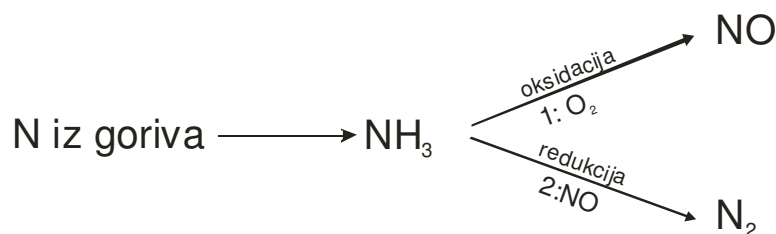
$$S_{HCN-2} = -\mathfrak{R}_2 \frac{M_{w,HCN} \cdot p}{RT} \quad (3.5.41)$$

Tvorba NO se odvija prema prvoj reakciji prikazanoj na Slika 25 dok se u drugoj reakciji NO troši. Izvorni članovi u transportnoj jednadžbi za NO koji uključuju te reakcije su:

$$S_{NO-1} = -S_{HCN-1} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,HCN}} = \mathfrak{R}_1 \frac{M_{w,NO} \cdot p}{RT} \quad (3.5.42)$$

$$S_{NO-2} = S_{HCN-2} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,HCN}} = -\mathfrak{R}_2 \frac{M_{w,NO} \cdot p}{RT} \quad (3.5.43)$$

U slučaju da je kao međuprodukt koji sudjeluje u tvorbi NO iz goriva amonijak reakcija se odvija:



Slika 25 Pojednostavnjeni mehanizam nastanka NO iz goriva uz NH_3 kao međuprodukt

Izvorni članovi transportnih jednadžbi za NH_3 i NO mogu se napisati kao:

$$S_{\text{NH}_3} = S_{pl, \text{NH}_3} + S_{\text{NH}_3-1} + S_{\text{NH}_3-2} \quad (3.5.44)$$

$$S_{\text{NO}} = S_{\text{NO}-1} + S_{\text{NO}-2} \quad (3.5.45)$$

Potrošnja NH_3 prema reakcijama prikazanim na slici 26 odvija se prema (55) uz brzine pretvorbe:

$$\mathfrak{R}_1 = A_1 X_{\text{NH}_3} X_{\text{O}_2}^a e^{\frac{-E_1}{RT}} \quad (3.5.46)$$

$$\mathfrak{R}_2 = A_2 X_{\text{NH}_3} X_{\text{NO}} e^{\frac{-E_2}{RT}} \quad (3.5.47)$$

gdje su:

- \mathfrak{R}_1 - brzine konverzije NH_3 u NO
- \mathfrak{R}_2 - brzine konverzije NH_3 u N_2
- T - trenutna temperatura
- X - molarni udjeli kemijskih sastojaka
- A_1 - konstanta koja iznosi $4.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
- A_2 - konstanta koja iznosi $1.8 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
- E_1 - energija aktivacije koja iznosi 133947.2 J/gmol
- E_2 - energija aktivacije koja iznosi 113017.95 J/gmol

Red ovisnosti reakcije o koncentraciji kisika, određuje se prema istom principu za promptni NO prema izrazu (3.5.30). Izvorni članovi u transportnim jednadžbama određeni u (3.5.44) iznose:

$$S_{\text{NH}_3-1} = -\mathfrak{R}_1 \frac{M_{w, \text{NH}_3} \cdot p}{RT} \quad (3.5.48)$$

$$S_{\text{NH}_3-2} = -\mathfrak{R}_2 \frac{M_{w, \text{NH}_3} \cdot p}{RT} \quad (3.5.49)$$

Tvorba NO se odvija prema prvoj reakciji prikazanoj na slici 26 dok se u drugoj reakciji NO troši. Izvorni članovi u transportnoj jednadžbi za NO koji uključuju te reakcije su:

$$S_{\text{NO}-1} = -S_{\text{NH}_3-1} \frac{M_{w, \text{NO}}}{M_{w, \text{NH}_3}} = \mathfrak{R}_1 \frac{M_{w, \text{NO}} \cdot p}{RT} \quad (3.5.50)$$

$$S_{NO-2} = S_{NH_3-2} \frac{M_{w,NO}}{M_{w,NH_3}} = -\mathfrak{R}_2 \frac{M_{w,NO} \cdot P}{RT} \quad (3.5.51)$$

Model reduciranja (disocijacije) dušik(II)-oksida

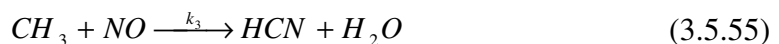
Kod uređaja koji koriste primarne mjere za redukciju emisija NO potrebno je uključiti i model za određivanje mehanizma redukcije NO u reakcijama sa radikalima CH. U taj su mehanizam uključeni parametri izgaranja i strujanja dimnih plinova kao što su omjer goriva i zraka, temperatura, koncentracija sastojaka, vrijeme zadržavanja u zoni reakcije i polje brzina. Globalni modeli reduciranja (destrukcije) NO u zoni disocijacije NO za sustave stupnjevanog izgaranja postali su dostupni sredinom 90-tih godina i prikazani su u nastavku ovog poglavlja. Razlikuju se dva pristupa određivanju reduciranja NO u zoni disocijacije.

Pristup trenutnog mehanizma

Trenutni mehanizam disocijacije NO je definiran reakcijom gdje NO reagira s molekulama ugljikovodika prema općenitom izrazu:



Za tri radikala FLUENT modelira reakcije koje se odvijaju u temperaturnom opsegu od $1600 \leq T \leq 2100$ K. Izvan tog temperaturnog opsega reakcije reduciranja NO se ne određuju. Navedene reakcije su:



Konstante brzine odvijanja ovih reakcija su:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1 \times 10^8 \\ k_2 &= 1.4 \times 10^6 e^{\frac{-550}{T}} \\ k_3 &= 2 \times 10^5 \end{aligned} \quad (3.5.56)$$

Brzina redukcije (destrukcije) dušik(II)-oksida uslijed mehanizma disocijacije iznosi:

$$\frac{d[NO]}{dt} = -k_1[CH][NO] - k_2[CH_2][NO] - k_3[CH_3][NO] \quad (3.5.57)$$

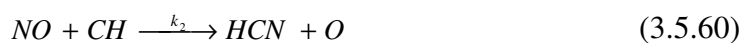
Izvorni član u jednadžbi transporta dušik(II)-oksida iznosi:

$$S_{reduc,NO} = -M_{w,NO} \frac{d[NO]}{dt} \quad (3.5.58)$$

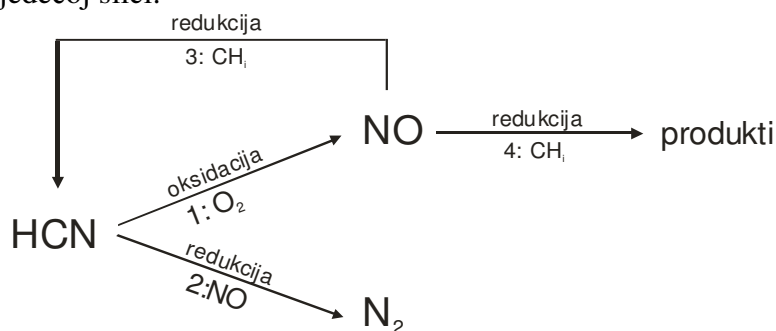
Pristup parcijalne ravnoteže

Pristup parcijalne ravnoteže zasniva se na modelu opisanom u (59) i (60). Taj model uključuje reakcije koje su opisane u De Soeteovom (55) globalom modelu, odnosno dijelu tog modela koji opisuje mehanizme tvorbe i raspada NO u zoni disocijacije NO u kojoj su uvjeti bogate smjese i znatne koncentracije CH radikala.

U zoni bogate smjese oksidacija HCN radikala, a time i koncentracija NO koji nastaje iz HCN, se smanjuje uslijed reakcije redukcije radikala HCN s NO uz tvorbu molekule dušika. Taj je put reakcije prikazan na slici 25 kao druga reakcija. Koncentracija NO smanjuje se također uslijed reakcije s CH radikalima u zoni disocijacije. Reakcije koje opisuju disocijacije NO su:



Navedene se reakcije mogu prikazati dopunjavanjem slike 25 s reakcijama [3] i [4] prikazanim na sljedećoj slici.



Slika 26 De Soeteov globalni model mehanizama redukcije NO

U redukciji dušik(II)-oksida (NO) sudjeluje CH radikal koji može biti CH₃, CH₂, CH ili metan CH₄. Za odabir jednog od ovih radikala koristi se omjer ugljika i vodika prisutnih u gorivu (C/H omjer).

Reakcije [3] i [4] prikazane na slici 26 rezultiraju tvorbom HCN radikala i drugih dušikovih spojeva. Uz pretpostavku da je CH_i na slici 26 metan (CH_4), reakcije [3] i [4] imaju brzine odvijanja:

$$\mathfrak{R}_4 = (k_a \chi_1 + k_b \chi_1^2) [CH_4] [NO] \quad (3.5.62)$$

$$\mathfrak{R}_5 = k_c \chi_1^3 \chi_2 [CH_4] [NO] \quad (3.5.63)$$

gdje su:

$$\chi_1 = \frac{[H]}{[H_2]} \text{ i } \chi_2 = \frac{[OH]}{[H_2O]} \quad (3.5.64)$$

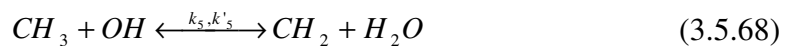
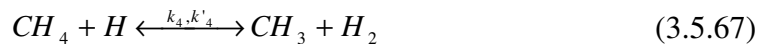
Izvorni članovi u transportnim jednačicama za HCN i NO koji uključuju reakcije redukcije u zoni disocijacije su:

$$\frac{d[HCN]}{dt} = 4 \times 10^{-4} \cdot \mathfrak{R}_4 \quad (3.5.65)$$

$$\frac{d[NO]}{dt} = -4 \times 10^{-4} (\mathfrak{R}_4 + \mathfrak{R}_5) \quad (3.5.66)$$

Konstanta 4×10^{-4} je uključena u izraze (3.5.65) i (3.5.66) da bi se smanjile brzine tvorbe i raspada HCN i NO zbog toga što je koncentracija CH radikala određena iz kemijske ravnoteže veća od koncentracije prema parcijalnoj ravnoteži pa je stoga mjerenjima utvrđena navedena konstanta koja je pogodna za većinu slučajeva.

Za određivanje konstanti k_a , k_b i k_c te faktora χ_1 i χ_2 potrebno je usvojiti određene pretpostavke. Tako se kod izgaranja ugljikovodika u difuzijskom plamenu pretpostavlja da se sljedeće reakcije nalaze u parcijalnoj ravnoteži:



Iz te se pretpostavke mogu odrediti konstante brzine odvijanja reakcija (3.5.59), (3.5.60) i (3.5.61) kako slijedi:

$$k_a = k_1 \frac{k_4 k_5}{k'_4 k'_5} \quad (3.5.71)$$

$$k_b = k_2 \frac{k_4 k_5 k_6}{k'_4 k'_5 k'_6} \quad (3.5.72)$$

$$k_c = k_3 \frac{k_4 k_5 k_6 k_7}{k'_4 k'_5 k'_6 k'_7} \quad (3.5.73)$$

gdje su k_1 , k_2 i k_3 te konstante iz reakcija (3.5.59), (3.5.60) i (3.5.61), a k_4 do k_7 i k'_4 do k'_7 konstante iz reakcija (3.5.67), (3.5.68), (3.5.69) i (3.5.70).

Faktor χ_1 se pretpostavlja da je jednak jedan jer se istraživanjima pokazalo da su koncentracije radikala H i molekula vodika u zoni iza fronte plamena u približno istim koncentracijama. Koncentracija OH radikala se u ovom modelu određuje parcijalne ravnoteže reakcije:



Iz uvjeta parcijalne ravnoteže slijedi da je faktor χ_2 :

$$\chi_2 = \frac{k'_8}{k_8} \quad (3.5.75)$$

U izrazu (3.5.65) konstante imaju vrijednost:

$$k_8 = 1.02 \times 10^5 T^{1.60} e^{\frac{-13802}{RT}} \quad \text{i} \quad k'_8 = 4.52 \times 10^5 T^{1.60} e^{\frac{-80815}{RT}} \quad [\text{m}^3 / \text{gmol} \cdot \text{s}] \quad (3.5.76)$$

Konstante iz izraza (3.5.59), (3.5.60) i (3.5.61) određuju se prema Arrheniusovom izrazu uz dodatak temperaturnog koeficijenta b :

$$k = AT^b e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (3.5.77)$$

U sljedećoj tablici prikazane su konstante korištene za određivanje konstanti brzina odvijanja reakcija za pojedine radikale CH_i (3.5.59), (3.5.60) i (3.5.61) iz (62).

Konstanta reakcije		Radikal CH_i za mehanizam redukcije			
		CH_4	CH_3	CH_2	CH
k_a	A	5.30×10^9	0.37×10^9	0.23×10^7	0.0
	b	-1.54	-1.54	-1.54	0.0
	E_a	27977	27977	27977	0.0
k_b	A	3.31×10^{13}	0.23×10^{13}	0.14×10^{11}	0.63×10^8
	b	-3.33	-3.33	-3.33	-3.33
	E_a	15090	15090	15090	15090
k_c	A	3.06×10^{11}	0.21×10^{11}	0.13×10^9	0.58×10^6
	b	-2.64	-2.64	-2.64	-2.64
	E_a	77077	77077	77077	77077

4 REZULTATI

Za validaciju matematičkog modela provedena su opsežna mjerenja i ispitivanja na analiziranom ložištu odnosno generatoru topline. Svi faktori koji omogućuju određivanje konkretnih parametara pod kojima se odvijaju procesi izgaranja u ložištu su obuhvaćeni i prikazani u nastavku. Prikazana je metodologija mjerenja i rezultati mjerenja, kao i prikaz mjerenih veličina. Iz tih su veličina izračunati osnovni parametri izgaranja za postavljanje matematičkog modela i numeričku simulaciju procesa koji se odvijaju u ložištu i generatoru topline.

4.1 Ispitivani generator topline

Sustavi za loženje biomase s odvojenom ložištem

Glavni je prednost ovih sustava ta da mogu poslužiti kao nadogradnja postojećih generatora topline ili generatora pare tako da se ugrađuju na mjesto na kojem je prije bio ugrađen uljni plamenik.

Ovi generatori topline imaju pretežno sustave za dobavu goriva putem pužnih prijenosnika i hidrauličkih cilindara za pomicanje pomične rešetke. Dobavna količina goriva (drvne biomase) se regulira prema potrebnom učinku generatora topline. Dobava zraka za izgaranje je putem ventilatora koju upuhuju zrak u ložište. Nove izvedbe ložišta imaju primarni, sekundarni zrak kao i recirkulaciju dimnih plinova. Potpala je automatski - putem vrućeg zraka ili elektrootporno.

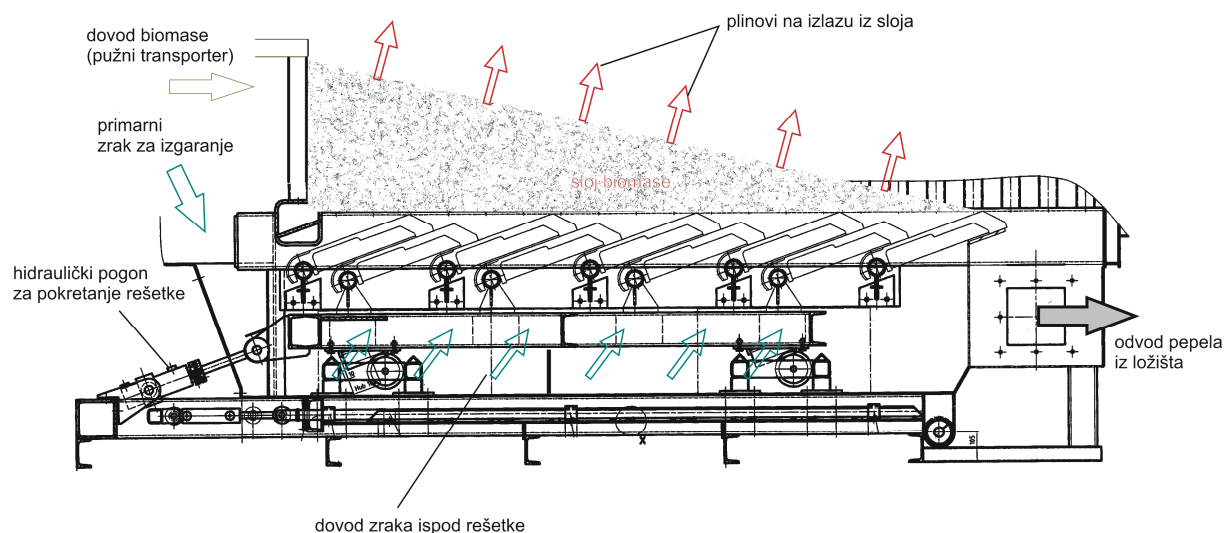
Dimni plinovi koji nisu potpuno izgorjeli u ložištu, vode se u generator topline gdje se dovršava proces izgaranja i predaje se glavnina toplinske energije na toplinski medij.



Slika 27 Postrojenje sa zasebnim ložištem i generatorom topline

U ovom se radu analizira specifični tip ložišta koji konstrukcijski robustan i omogućuje korištenje i manje kvalitetnih goriva uključujući i razne otpadne drvene biomase. Ložište je

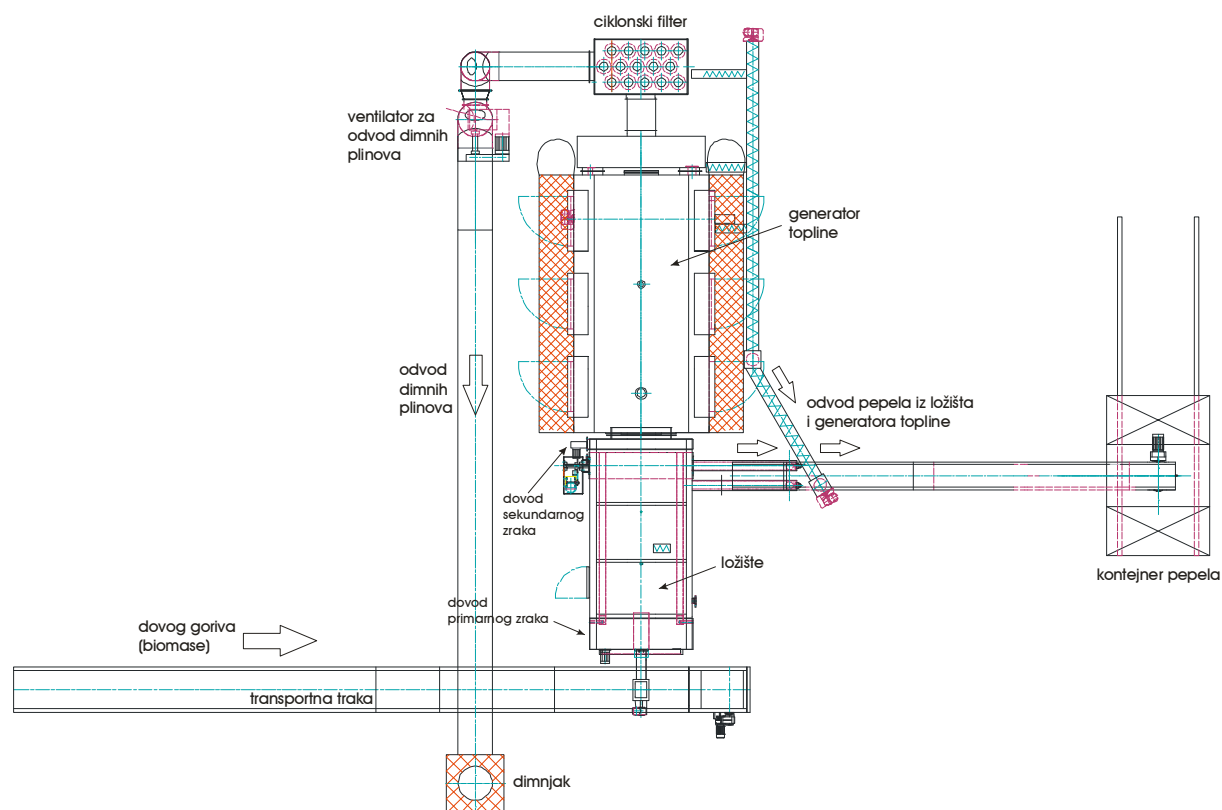
podijeljeno u dva dijela: ložište i generator topline. U ložištu se odvija sušenje, devolatilizacija krutog goriva i jednim dijelom izgaranje volatila i krutog dijela goriva na pomičnoj rešetki. Sve se to odvija izdvojenom, vodom hlađenom ložištem. Na slici dolje prikazana je horizontalna pomična rešetka i sloj biomase na rešetki:



Slika 28 Presjek horizontalne rešetke i sloja biomase

Izgaranje se odvija na horizontalnoj pomičnoj rešetki s hidrauličkim pogonom. Rešetka ima konstantnu brzinu pomicanja koja ovisi o brzini dovoda biomase na rešetku. Na taj se način održava konstantna visina sloja biomase na ulazu u ložište.

Iz ložišta se dimni plinovi vode u drugi dio – generator topline, gdje se odvija drugi dio izgaranja, pri čemu se predaje veći dio topline na vodu u generatoru topline.



Slika 29 Tlocrt ispitivanog postrojenja

Posebim kanalom moguće je dovođenje dimnih plinova recirkulacije iz dimnovodnoga kanala natrag u ložište, pomoću zasebnog ventilatora reguliranoga pomoću frekventnog pretvarača i nadziranoga iz središnjeg regulacijskog sustava.



Slika 30 Povrat dimnih plinova u zonu izgaranja - recirkulacija

Analizirani uređaj smješten je u tvornici namještaja, a kao gorivo koristi drvenu sječku koja se dobiva iz otpadnih nus-proizvoda koji nastaju tijekom proizvodnje namještaja.



Slika 31 Drvni otpad iz procesa proizvodnje namještaja

Otpadna drvena biomasa suši se u posebnim boksovima, nakon čega se, kada se postigne određeni stupanj vlage, transportira do „hakera“ gdje se usitnjava na željenu granulaciju.

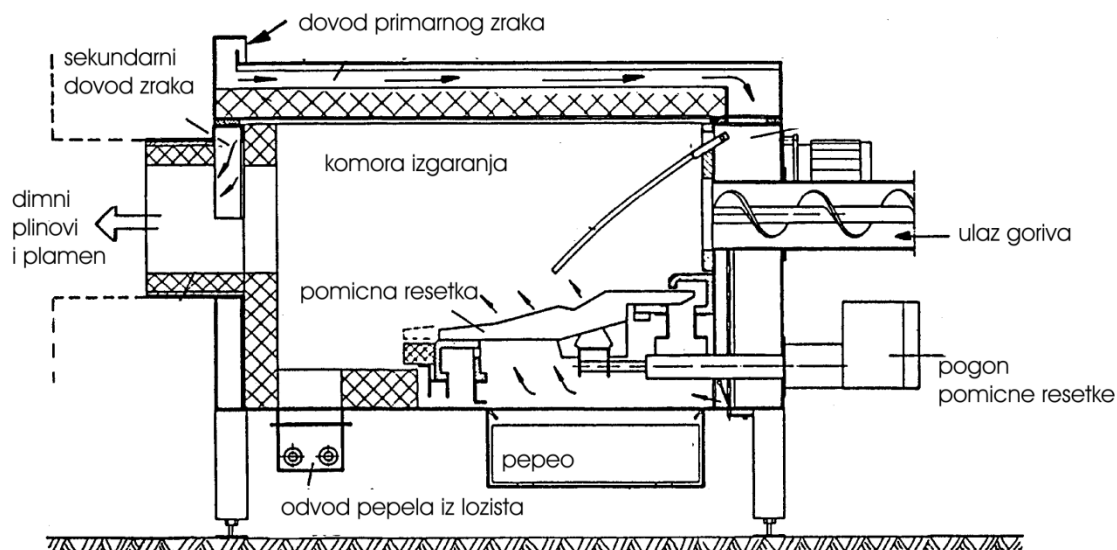


Slika 32 Uzorak biomase nakon usitnjavanja

4.2 Eksperimentalna mjerenja na ložištu

Kako bi se dobilo što više korisnih podataka o radu generatora topline pod različitim pogonskim uvjetima, mjerenja su obavljena u četiri karakteristična režima rada, prilagođeno pogonskim mogućnostima rada. Mjerenja su obavljena za četiri različita učina generatora topline s pripadnim temperaturama ložišta. Način upravljanja definiran je tako da se toplinski

učin generatora topline regulira s temperaturom u ložištu. Temperatura ložišta mjeri se s termo-elementom postavljenim na sredinu ložišta i koristi se za upravljanje sustava dovoda goriva u ložište i mehanizma pomičnih rešetaka na dnu ložišta. Pojednostavljeni prikaz ložišta se prikazan je na slici:

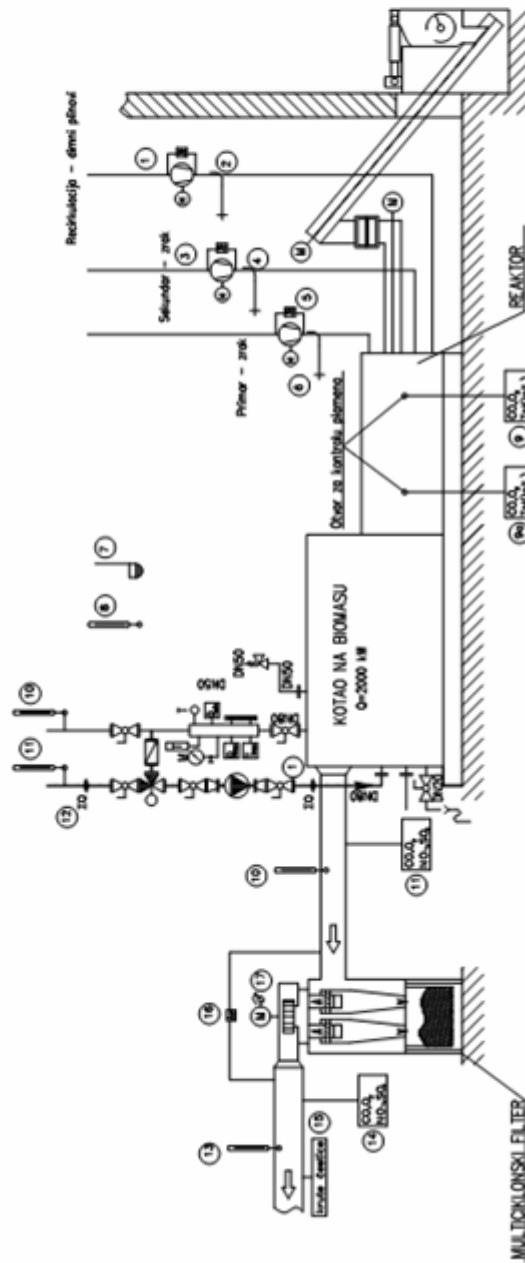


Slika 33 Prikaz komore izgaranja (ložišta)

Za određivanje procesa, koji se odvijaju unutar generatora topline, potrebno je poznavati količine zraka odnosno dimnih plinova koje ulaze ili izlaze iz generatora topline, kao i njihov sastav te svojstva.

LEGENDA:

- ZRAK ZA IZGRARANJE – primar**
 1. Porast tlaka na ventilatoru
 2. Prosječna brzina u kanalu
- ZRAK ZA IZGRARANJE – sekundar**
 3. Porast tlaka na ventilatoru
 4. Prosječna brzina u kanalu
- DIMNI PLINOVİ recirkulacija**
 5. Porast tlaka na ventilatoru
 6. Prosječna brzina u kanalu
- OKOLINA**
 7. Barometarski tlak okoline
 8. Temperatura okoline
- DIMNI PLINOVİ – ložište**
 9. Sadržaj kisika, CO i temperatura
- DIMNI PLINOVİ – izlaz iz kotla**
 10. Temperatura dim. plinova
 11. Sastav dimnih plinova u dimnjaku
 12. Sadržaj krutih čestica u dimnim plinovima
- DIMNI PLINOVİ – multicyklon**
 13. Temperatura dim. plinova
 14. Sastav dimnih plinova u dimnjaku
 15. Sadržaj krutih čestica u dimnim plinovima
- Porast tlaka na ventilatoru**
 16. Porast tlaka na ventilatoru
 17. Jakost el. struje na ventilatoru
- TOPLA VODA**
 18. Protok vode prema potrošačima
 19. Temperatura polaza
 20. Temperatura povrata
 21. Protok vode – kotlovski krug



Slika 34 Plan ispitivanja - mjerna mjesta

Mjereni su protoci zraka na dovodima primarnog i sekundarnog zraka, protok tople vode na izlazu iz generatora topline i protok izlaznih dimnih plinova na izlazu iz generatora topline i ciklonskog filtera za uklanjanje krutih čestica. Sastav dimnih plinova i temperatura mjereni su u ložištu na dvije lokacije; na izlazu iz generatora topline i na izlazu iz ciklonskog filtra krutih čestica. Gravimetrijska analiza sadržaja krutih čestica je obavljena na izlazu iz filtra krutih čestica zbog mjernih mogućnosti instrumenta. Mjerenje sadržaja krutih čestica prije filtra bi omogućilo određivanje učinkovitosti ciklonskog filtra, no to nije bio predmet istraživanja, a dobiveni rezultati su omogućili da se utvrdi trend promjene emisije krutih čestica za različita pogonska stanja.

Tijek ispitivanja

Ispitivanje je provedeno u trajanju tri dana. Jedan ciklus mjerenja za pojedino opterećenje trajao je 3 sata. Iz prosječnih izmjerenih vrijednosti u toku mjerenja odredit će se vodeći parametri za analizu.

U toku jednog ciklusa podešen je određeni toplinski učin generatora topline, pretičak zraka da se postigne približno stacionarno stanje.

Za vrijeme ispitivanja u nekoliko navrata će se uzeti uzorak goriva (drvne sječke) – koji će biti naknadno analizirani s obzirom na sastav, fizikalna svojstva, ogrijevnu vrijednost, udjel vlage i sadržaj pepela.

Predviđeno je da se mjerenja obavljaju za četiri različita radna opterećenja generatora topline.

Tabela 1 Mjerenja i opterećenja

Oznaka	1	2	3	4
Opterećenje generatora topline [%]	100	75	50	30
Dobava biomase [kg/h]	500	350	290	210

Za provođenja mjerenja zabilježeni su podaci o radu uređaja na koje se ne može utjecati, a važni su za način rada i parametre izgaranja. To se odnosi na brzinu dovođenja svježeg goriva i brzinu pomicanja rešetke. Brzina pomicanja rešetke je zabilježena putem brojenja pomaka u toku jednog sata, a naknadno je provjerena računski. Brzina pomicanja rešetke varira s opterećenjem odnosno s količinom dovedenog goriva tako da se održava konstantna visina biomase na ulazu u ložište – čemu odgovara adekvatna brzina pomicanja rešetke.

Mjerenjem brzine i temperature zraka na ulazu u ložište na strani primarnog i sekundarnog zraka određen je volumni protok odnosno maseni protok zraka za izgaranje. Količina goriva, koja ulazi u ložište, određena je praćenjem rada dozirnog puža za doziranje goriva.

Analizom sastava dimnih plinova na izlazu iz ložišta određene su bitne osobine za izgaranje kao što su: pretičak zraka (ukupni), temperatura dimnih plinova, udjeli dušikovih oksida i ugljik(II)-oksida, za svaki pojedini ispitivani slučaj.

Toplinski učin, koji se iz generatora topline i ložišta predaje putem ogrijevnog medija (tople vode) određen je mjerenjima protoka vode i temperatura u polazu i povratu, ultrazvučnim mjeracem protoka.

Na temelju rezultata mjerenja moguće je odrediti iskoristivost ložišta direktnim i indirektnim putem za sve slučajeve. Rezultati mjerenja će se koristiti za validaciju numeričkog modela i provjeru točnosti izračuna veličina.

4.3 Mjerene veličine

Toplinski učin

Toplinski učin generatora topline proporcionalan je temperaturi u ložištu. Dovod primarnog zraka se vrlo malo mijenja za različite toplinske učine, a regulacija izgaranja se izvodi promjenom sekundarnog zraka u zoni na izlazu iz ložišta. Dovod sekundarnog zraka je reguliran s ventilatorom s frekventnim upravljanjem s kojim upravlja upravljačka jedinica koja na bazi izmjerenog pretička zraka, na izlazu iz generatora topline, regulira optimalno dodavanje zraka.

Da bi se odredila količina topline, koja se predaje iz generatora topline, obavljena su mjerenja koja omogućuju da se odredi toplinski učin generatora topline.



Slika 35 Mjerenje protoka na polaznoj cijevi generatora topline

Temperatura ložišta je očitana s regulacijskog uređaja generatora toplina, dok je mjerenje toplinskog učina generatora topline obavljeno s ultrazvučnim mjeracem protoka postavljenim na polazni vod generatora topline. Temperatura polaznog i povratnog voda mjere se sondama uronjenim u cijevi. Za sva pogonska stanja prema Tabela 1 su određene veličine koje su prikazane prema shemi mjernih mjesta prikazanih na Slika 34.

Tabela 2 Pogonska stanja - eksperimentalna mjerenja

Oznaka		1	2	3	4
Temperatura ložišta	[°C]	700	650	600	500
Topla voda - potrošnja					
Protok vode prema potrošačima	[l/s]	27,15	20,54	16,03	15,1
Temperatura polazne vode	[°C]	91	89	89	83
Temperatura povratne vode	[°C]	75	75	74	72
Toplinski učin	[kW]	1.815,20	1.201,61	1.004,75	694,07

Zrak za izgaranje

Mjerenje protoka zraka za izgaranje je obavljeno na više dostupnih mjesta. Mjerenje protoka je provedeno putem mjerenja brzine strujanja zraka u kanalima za dovod primarnog zraka i sekundarnog zraka za izgaranje. Brzina zraka je određena pomoću Pitot-Prandlove cijevi, na temelju razlike statičkog i dinamičkog tlaka. Mjerenje tlakova je obavljeno preciznim digitalnom manometrom.

Brzina je mjerena u više točaka, a primijenjeno je mrežno mjerenje u 12 točaka (4x3) po presjeku kanala. Brzina uz poprečni presjek kanala omogućuje izračun volumnog protoka primarnog i sekundarnog zraka.

Za izračune numeričkog modela je potrebno poznavati maseni protok zraka, pa je iz temperature zraka za izgaranje određen protok zraka za normalno stanje te maseni protok zraka.

Rezultati mjerenja količine primarnog zraka za izgaranje:

Tabela 3 Protok primarnog zraka za izgaranje

Oznaka					prosjeak [m/s]	brzina [m/s]	površina [m ²]	protok [m ³ /s]	[m ³ /h]	m ³ /min	m _N ³ /min
Oznaka	1										
	5.2	5	5.2	4.8	5.05						
	4.8	5.8	5.6	3	4.8	5.23	0.06	0.314	1130.4	18.840	16.975
	4.3	6	6.4	6.7	5.85						
Oznaka	2										
	5.6	5.8	5.9	4.7	5.5						
	4.2	5.2	5.6	2.6	4.4	5.21	0.06	0.3125	1125	18.750	16.894
	5.2	5.9	5.5	6.3	5.725						
Oznaka	3										
	6	5.8	3.8	3.8	4.85						
	5.5	5.6	5.1	3.4	4.9	5.32	0.06	0.319	1148.4	19.140	17.245
	5.9	5.7	7	6.2	6.2						
Oznaka	4										
	6.5	6.4	6	6.2	6.275						
	5.8	4.5	5.3	3	4.65	5.24	0.06	0.3145	1132.2	18.870	17.002
	4	4.8	6	4.4	4.8						

Na isti način mjereno je protok sekundarnog zraka za izgaranje:

Tabela 4 Protok sekundarnog zraka

Oznaka		1		2		3		4	
		A	B	A	B	A	B	A	B
Otvor									
Površina	[m ²]	0.0544	0.0281	0.0544	0.0281	0.0544	0.0281	0.0544	0.0281
Protok	[m ³ /s]	0.5349	0.8515	0.6082	0.2086	0.4711	0.3594	0.5208	0.5741
Ukupni protok	[m ³ /s]	1.3864		0.8168		0.8306		1.0949	
[A+B]	[m ³ /h]	4990.9794		2940.4479		2990.0187		3941.7822	
	[m ³ /min]	83.1830		49.0075		49.8336		65.6964	
	[m _N ³ /min]	74.9470		44.1552		44.8996		59.1918	
	kg/s	0.6916		0.7865		0.6092		0.6735	

Sastav i temperatura dimnih plinova

Uređaj korišten za mjerenje je Testo, tip 350XL. Opremljen je mjernim ćelijama za mjerenje koncentracije plinova: CO, NO, NO₂, SO₂ [ppm] i O₂ [%], a izračunom na osnovi vrste tj. sastava korištenog goriva, prikazuje koncentraciju CO₂ [%] te gubitke u dimnim plinovima. Uzorak dimnog plina se uzima iz dimnog kanala putem grijane sonde te se grijanom cijevi vodi do samog uređaja na način da se temperatura plina u cijevi ne spusti na manje od 15 K iznad temperature rosišta. Na taj se način očuvaju koncentracije plinova SO₂ i NO₂, koji bi se inače isprali kondenzacijom vlage u negrijanoj cijevi. Rezultati mjerenja su pohranjeni na memoriju uređaja i nakon mjerenja analizirani kako bi se utvrdila srednja vrijednost obavljenih mjerenja za sva karakteristična stanja. Sadržaj kisika, CO i temperatura plinova u ložištu mjereno je kroz otvor za kontrolu plamena. Kako je sadržaj CO daleko iznad mjernog područja uređaja (0-4000 ppm), korištena je metoda mjerenja razrijeđene koncentracije. Uzorak plina uzet iz ložišta miješa se s zrakom u točnom i poznatom omjeru, te se tako može mjeriti i 20 puta veće mjerno područje.



Slika 36 Analizator dimnih plinova Testo 350XL



Slika 37 Sustav za izokinetičko uzorkovanje čestica u plinovima SICK SCH-501

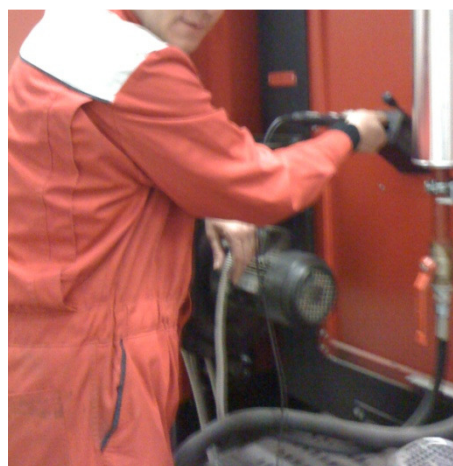
Za određivanje sadržaja krutih čestica u dimnim plinovima korišten je uređaj SICK GRAVIMAT SHC-501, sa višekanalnom sondom, prema metodi EN 13824. Prema toj metodi

je propisano da se mjerenje obavlja u izokinetičkim uvjetima uzimanja uzorka, kako bi se dobio reprezentativni uzorak. Određivanje sadržaja krutih čestica u plinu određuje se vaganjem uzorka filter-papira prije i nakon mjerenja, uz poznatu količinu plinova koja je izvučena pumpom iz dimnog kanala.

Koncentracije prikazane u ovoj tablici su iskazane masenom koncentracijom navedenih tvari u suhim dimnim plinovima pri normalnom stanju (temperaturi 273 K i tlaku 101,3 kPa).



Slika 38 Otvor za mjerenje temperature u ložištu



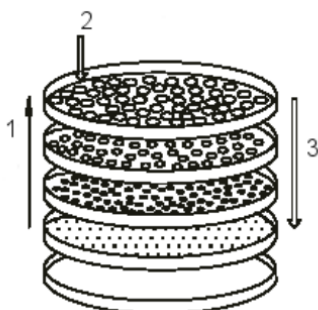
Slika 39 Mjerenje temperature i sastava plinova u ložištu

Tabela 5 Rezultati određivanja sastava i temperature dimnih plinova

Oznaka		1		2		3		4	
Ložište - dimni plinovi	otvor	1	2	1	2	1	2	1	2
Temperatura u ložištu	[°C]	950	600	820	675	850	620	626	470
Srednja temperatura u ložištu	[°C]	775		747,5		735		548	
Sadržaj O ₂	[%]	0,03	17,72	0,06	6,2	0,04	8,05	0,02	17,8
Sadržaj CO	[ppm]	40706	1197	40276	1356	42214	1154	49251	407
Izlaz iz KOTLA - dimni plinovi									
Temperatura dimnih plinova	[°C]	182		188		170		151	
O ₂	[%]	9,43		10,21		11,56		14,27	
CO	[ppm]	15		19		30		219	
NO _x	[ppm]	356		426,2		208		91,6	
SO ₂	[ppm]	12		0		18		0	
Izlaz iz CIKLONA - dimni plinovi									
Temperatura dimnih plinova	[°C]	172		177		161		144	
O ₂	[%]	10,98		11,48		11,51		14,66	
CO	[ppm]	22		24		22		223	
NO _x	[ppm]	282		359		253		80	
SO ₂	[ppm]	12		1		16		0	
Sadržaj krutih čestica	[mg/m _n ³]	182,61		179,01		120,18		132,76	
Stanje okoline									
Barometarski tlak okoline	[mbar]	980		981		980		981	
Temperatura okolnog zraka	[°C]	27		27		27		27	

4.4 Analiza krutog goriva (biomase)

Kako bi se izradio matematički model ložišta, koje koristi drvenu biomasu koja izgara u sloju (eng. fixed bed), potrebno je odrediti fizikalna i kemijska svojstva biomase. Fizikalna svojstva, koja su bitna za opisivanje ovih procesa su: gustoća biomase, nasipna težina, dimenzije i oblik čestica. Prilikom određivanja svakog od ovih pojedinih svojstava postoje propisani postupci – norme i/ili tehničke specifikacije. Za određivanje nasipne gustoće se koristi EN 15103:2009 (Čvrsta goriva – Metode određivanje nasipne gustoće). Mjerenje se obavlja jednostavnom metodom s kalibriranim cilindričnim spremnicima i vaganjem nasipane količine biomase u njima. Dimenzije i oblik čestica (granulometrija) se određuje putem nekoliko metoda (ovisno o granulaciji goriva). Za mjerenje uzorka drvene biomase, koji se koristi u ispitivanom ložištu, korištena je metoda EN 15149-1:2010. Za određivanje granulometrije koristi se osciliranje drvene biomase preko kalibriranih otvora različitih promjera.



(1-porast promjera, 2-dodavanje uzorka, 3-protok drvene biomase)

Slika 40 Oscilator s otvorima

Uzorak biomase je heterogen i u sebi sadrži vrlo različite čestice biomase po obliku i veličini.



Slika 41 Uzorak goriva s naznakom veličine



Slika 42 Krupnije čestice goriva

Određene čestice su veće od 100 mm, a uzorku se može naći i piljevina, odnosno drvena biomase promjera manjeg od 1 mm.

Rezultati ispitivanja granulometrije za uzorke biomase uzete za vrijeme mjerenja i ispitivanja na gorivu koje koristi postrojenje su:

Tabela 6 Granulometrijska analiza goriva (biomase)

Ploča s otvorima br.	Raspon	Masa u uzorku br.1	Masa u uzorku br.2	Masa u uzorku br.3	Ukupna masa uzoraka 1-3	Postotni udjel (maseno) - wi
	[mm]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]
Veći uzorci	>100	133,8	558,6	465,9	1158,3	5,40%
1. (63 mm)	63-100	1405,4	1768,8	1802,2	4976,4	23,20%
2. (45 mm)	45-63	2074,6	2606,6	2504,5	7185,8	33,50%
3. (16 mm)	16-45	1405,4	2420,4	1054,1	4879,9	22,75%
4. (8 mm)	8-16	736,2	1396,4	291,3	2423,9	11,30%
5. (3,15 mm)	3,15-8	133,8	93,1	395,1	622,1	2,90%
Dno posude (manje od 3,15 mm)	<3,15	33,5	93,1	77,2	203,8	0,95%
Ukupna masa		6692,4	9309,3	5448,3	21450,0	100,00%

Gustoća biomase	714	kg/m ³
C_p	3106,06	J/kg K
k	0,198	W/m K
Nasipna gustoća	321,3	kg/m ³
Void factor (ϵ)	0,55	-
srednji promjer (d_{sr})	50,88435	mm

Specifični toplinski kapacitet biomase C_p i koeficijent provođenja topline k uzeti su iz izvora (30). Nasipna težina je dobivena prema prethodno opisanoj metodi. Faktor šupljikavosti (eng. void factor) je dobiven kao omjer nasipne i stvarne gustoće biomase.

Kemijska svojstva goriva

Kemijska analiza biomase provedena je u centralnom kemijsko-tehnološkom laboratoriju HEP-a, laboratoriju koji se bavi analizom krutih goriva prvenstveno za potrebe matične tvrtke i drugih korisnika. Dostavljen je uzorak od približno 300 g i zatražene su elementarna analiza i analiza udjela hlapive tvari, pepela i vezanog ugljika (eng. proximate analysis). Pored toga, obavljena je i analiza ogrijevne vrijednosti i udjela vlage u uzorku.

Elementarna analiza je pokazala da je udjel dušika (2,6%_{mas.}) viši nego kod sječke koja se dobiva iz sirovog drva (gdje su udjeli dušika do 1%_{mas.}). Takav je rezultat očekivan s obzirom da je porijeklo sirovine za proizvodnju ove drvene sječke otpadni komadi iz proizvodnje namještaja. Udjel pepela je također viši, dok je sadržaj vlage (ispod 10%) niži od očekivanog.

Uzrok tome je određeni vremenski razmak između uzimanja uzorka i ispitivanja. Udjel vlage se smanjio uslijed sušenja uzorka biomase na sobnoj temperaturi u tom vremenskom razlogu.



HEP-PROIZVODNJA d.o.o.
ODJEL ZA KEMIJSKU TEHNOLOGIJU
CENTRALNI KEMIJSKO-TEHNOLOŠKI LABORATORIJ
ZAGREB, Zagorska ul. 1
Tel/fax 01/ 3093-939

LABORATORIJSKI IZVJEŠTAJ br. 10/ 2011

Datum: 02.03.2011.

PODACI O UZORKU:

UZORAK:	DRVNA BIOMASA
NARUČITELJ ISPITIVANJA:	TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA, mr.sc. V. Dragičević
KOLIČINA UZORKA:	300 g
DATUM DOSTAVE UZORKA U CKTL:	22.02.2011.
PERIOD ISPITIVANJA:	23.-28.02.2011.

REZULTATI ANALIZE UGLJENA:

ZNAČAJKE KVALITETE	Jedinice	ISPITNE METODE	REZULTAT suh na zraku	REZULTAT dostavno
Gruba vlaga	mas. %	ASTM D 3302	—	6,44
Rezidualna vlaga	mas. %	ASTM D 3302	3,60	3,37
Ukupna vlaga	mas. %	ASTM D 3302	—	9,81
Pepeo	mas. %	ISO 1171	2,85	2,67
Hlapive tvari	mas. %	ISO 562	75,35	70,49
C-fix	mas. %	račun	18,20	17,03
Sadržaj C	mas. %	ASTM D 5373	47,22	44,18
Sadržaj H	mas. %	ASTM D 5373	6,23	5,83
Sadržaj N	mas. %	ASTM D 5373	2,78	2,60
Sadržaj O	Mas. %	račun	37,32	34,91
Ogrijevna vrijed. gornja	MJ/kg	ISO 1928	18,52	17,32
Ogrijevna vrijed. donja	MJ/kg	ISO 1928	17,07	15,81

NAPOMENA: Ispitni rezultati odnose se samo na ispitivane uzorke.

Autor izvještaja:
mr.sc. Marija Trkmić, dipl. ing.

Trkmić

Rukovoditelj odjela za kem.tehnologiju:
Dubravka Kerhač Kmetić, dipl.ing.

Kerhač

Ispitni izvještaji ili njegovi dijelovi se ne smiju preslikavati, osim u cijelosti, uz odobrenje tehničkog voditelja laboratorija.

1/1

Slika 43 Preslika izvještaja o ispitivanju uzorka krutog goriva (biomase)

4.5 Izračun iskoristivosti generatora topline

Da bi se utvrdila, odnosno provjerila iskoristivost generatora topline, provedena su odgovarajuća termotehnička ispitivanja, odnosno mjerenja pogonskih veličina koje su potrebne za proračun prema direktnoj i indirektnoj metodi.

Svako od ispitivanja provedeno je za više radnih točaka odnosno pri različitim opterećenjima kako bi se dobiveni rezultati mogli analizirati i prikazati u obliku trendova te poslužiti za dobivanje vrijednosti iskoristivosti pri različitom opterećenju generatora pare.

U tu svrhu, odabrana su četiri opterećenja pri kojima su se provela ispitivanja i koja iznose približno 30%, 60%, 80% i 100% nominalnog opterećenja generatora topline. Preduvjet za kvalitetne rezultate je konstantno opterećenje generatora pare tijekom barem dva sata, kako bi svi radni parametri dostigli stabilne vrijednosti.

Iskoristivost generatora topline određuje se prema dvije metode: direktnoj i indirektnoj metodi. Svaki od postupaka izračunavanja iskoristivosti generatora pare prilagođen je specifičnoj izvedbi promatranoga generatora topline na biomasu.

Indirektna metoda

Iskoristivost generatora pare prema indirektnoj metodi proizlazi iz jednadžbe bilance energije koja je definirana sljedećim izrazom:

$$\eta_{GP(\%)} = 100 - \sum g = 100 - (g_1 + g_2 + g_3) + g_4 \quad (4.5.1)$$

gdje je:

- g_1 – gubitak iskoristivosti uslijed kemijske nepotpunosti izgaranja
- g_2 – gubitak iskoristivosti zbog odvođenja topline konvekcijom i zračenjem s vanjskih površina generatora pare
- g_3 – gubitak iskoristivosti zbog osjetne topline izlaznih dimnih plinova
- g_4 – ostali gubici

Gubitak iskoristivosti uslijed kemijske nepotpunosti izgaranja

Gubitak iskoristivosti uslijed kemijske nepotpunosti izgaranja izračunava se prema izrazu:

$$g_1 = \frac{12645V_{CO(\%)}}{q_{GH}} V_{pl,s} \quad (\%) \quad (4.5.2)$$

gdje je:

- $V_{CO(\%)}$ – količina CO u izlaznim suhim dimnim plinovima, (%vol)
- $V_{pl,s}$ – količina suhих dimnih plinova, (m_n^3/kg_g), (14)

$$V_{pl,s} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2,g} + V_{N_2,\tau} + V_{O_2,pl}$$

$$V_{pl,s} = 1,85m_C + 0,7m_S + 0,8m_N + 0,79\lambda V_{z,\min} + 0,21(\lambda - 1)V_{z,\min} \quad (\text{m}_n^3/\text{kg}_g) \quad (4.5.3)$$

- $q_{GH} = H_d$ (kJ/kg_g)
- H_d – donja toplinska vrijednost goriva, (kJ/kg_g)

Gubitak iskoristivosti zbog odvođenja topline konvekcijom i zračenjem s vanjskih površina generatora pare

- g_2 , određuje se temeljem empirijskih podataka, ovisno o kapacitetu i opterećenju generatora pare.

Gubitak iskoristivosti zbog osjetne topline izlaznih dimnih plinova

Gubitak iskoristivosti zbog osjetne topline izlaznih dimnih plinova izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$g_3 = \frac{V_{pl} C_{pl} (t_{pl} - t_o)}{q_{GH}} 100 \quad (\%) \quad (4.5.4)$$

gdje je:

- V_{pl} – količina izlaznih dimnih plinova, (m_n³/kg_g)

$$\begin{aligned} V_{pl} &= V_{pl,s} + V_{H_2O} \\ V_{pl,s} &= V_{pl,s} + 1,24(9m_H + m_w) \quad (\text{m}_n^3/\text{kg}_g) \end{aligned} \quad (4.5.5)$$

- C_{pl} – srednja spec. topline izlaznih dimnih plinova, (kJ/m_n³K)
- t_{pl} – izlazna temperatura dimnih plinova, (°C)

Ostali gubici (g_4), koji su karakteristični za kruta goriva nisu posebno razmatrani. S obzirom da su ti gubici manji u odnosu na ostale navedene i da su približno jednaki kod mjerenih stanja, procijenjeno je da nemaju bitni utjecaj na zaključke.

Tabela 7 Izračun iskoristivosti - indirektna metoda

Elementarna analiza goriva:				
	(bez vlage)		(ukupno)	
c	48.98%		44.18%	[% _{mas.}]
h	6.46%		5.83%	[% _{mas.}]
o	38.71%		34.91%	[% _{mas.}]
n	2.88%		2.60%	[% _{mas.}]
pepeo	2.96%		2.67%	[% _{mas.}]
w (vlaga)	-		9.81%	[% _{mas.}]
suma	100.00%		100.00%	[% _{mas.}]
Donja ogrijevna vrijednost (H_d):			15810	[kJ/kg _{goriva}]
Analiza dimnih plinova na izlazu:				
Oznaka	1	2	3	4
O ₂	9.43	10.21	11.56	14.27 [% _{vol.}]
CO	15	19	30	219 [ppm _{vol.}]
lambda (λ)	1.815	1.946	2.225	3.120 [-]
T _{plinova}	182	180	170	151 [°C]
T _{okoline}	20	20	20	20 [°C]
Izračun sastava dimnih plinova:				
Oznaka	1	2	3	4
V _{z,min}	4.325	4.325	4.325	4.325 [m _n ³ /kg _g]
V _{CO2}	0.826	0.826	0.826	0.826 [m _n ³ /kg _g]
V _{H2O}	0.772	0.772	0.772	0.772 [m _n ³ /kg _g]
V _{O2}	0.740	0.859	1.112	1.926 [m _n ³ /kg _g]
V _{N2}	6.202	6.650	7.601	10.662 [m _n ³ /kg _g]
Volumni udjeli				
R _{CO2}	9.67%	9.07%	8.01%	5.82% [% _{vol.}]
R _{H2O}	9.04%	8.48%	7.49%	5.44% [% _{vol.}]
R _{O2}	8.67%	9.44%	10.79%	13.58% [% _{vol.}]
R _{N2}	72.62%	73.01%	73.71%	75.16% [% _{vol.}]
Srednje specifične topline				
C _{p,CO2}	1.788	1.788	1.780	1.763 [kJ/m _n ³ K]
C _{p,H2O}	1.522	1.522	1.520	1.516 [kJ/m _n ³ K]
C _{p,O2}	1.368	1.368	1.368	1.370 [kJ/m _n ³ K]
C _{p,N2}	1.303	1.303	1.303	1.302 [kJ/m _n ³ K]
C _{p,plin}	1.376	1.463	1.647	2.242 [kJ/m _n ³ K]
Volumen plin				
Volumen plinova izgaranja:	8.541	9.108	10.312	14.186 [m _n ³ /kg _g]
Izračun gubitaka u dimnim plinovima:				
(indirektna metoda):				
Oznaka	1	2	3	4
Volumen zraka za izgaranje:	7.850	8.418	9.622	13.496 [m _n ³ /kg _g]
Gubici osjetne topline	12.04%	13.49%	16.12%	26.36% [%]
Gubici nepotpunog izgaranja	0.08%	0.12%	0.24%	3.33% [%]
Iskoristivost	87.88%	86.40%	83.65%	70.31% [%]

Napomena : gubici topline nisu uzeti u obzir kod izračuna iskoristivosti indirektnom metodom

Direktna metoda

Iskoristivost generatora pare prema direktnoj metodi proizlazi iz sljedećeg omjera između efektivno iskorištene i ukupno utrošene toplinske energije:

$$\eta_{GP(\%)} = \frac{Q_{iz} - Q_{ul}}{Q_{GH}} 100 \quad (4.5.6)$$

gdje je:

- Q_{iz} - toplina izlaznoga radnog fluida
- Q_{ul} - toplina ulaznoga radnog fluida
- Q_{GH} - kemijska energija goriva

Toplina izlaznoga radnog fluida

Toplina izlaznoga radnog fluida sastoji se od topline izlazne tople vode prema potrošačima ili toplinskom spremniku, a izračunava se prema izrazu:

$$Q_{iz} = W_{pol} \cdot c_{pol} \cdot t_{pol} \quad (\text{kJ/s}) \quad (4.5.7)$$

gdje je:

- W_{pol} – količina izlazne tople vode (kg/s)
- c_{pol} – specifična toplina izlazne tople polazne vode (kJ/kgK)
- t_{pol} – temperatura izlazne tople polazne vode ($^{\circ}\text{C}$)

Toplina ulaznoga radnog fluida

Toplina ulaznoga radnog fluida dobiva se prema izrazu:

$$Q_{ul} = W_{pov} \cdot c_{pov} \cdot t_{pov} \quad (\text{kJ/s}) \quad (4.5.8)$$

gdje je:

- $W_{pov} = W_{pol}$ – količina ulazne tople vode (kg/s)
- c_{pov} – specifična toplina izlazne tople povratne vode (kJ/kgK)
- t_{pov} – temperatura izlazne tople povratne vode ($^{\circ}\text{C}$)

Kemijska energija goriva

Kemijska energija goriva izračunava se prema jednadžbi:

$$Q_{GH} = BH_d \quad (\text{MJ/h}) \quad (4.5.9)$$

gdje je:

- B – potrošnja goriva, (kg/h)
- H_d – donja toplinska vrijednost goriva, (kJ/kg)

Tabela 8 Izračun iskoristivosti - direktna metoda

Izračun gubitaka i iskoristivosti (direktna metoda)					
Oznaka	1	2	3	4	
Temperatura ložišta:	700	650	600	500	[°C]
Protok vode:	27,15	20,54	16,03	15,1	[l/s]
Temp. polazne vode:	91	89	89	83	[°C]
Temp. povratne vode:	75	75	74	72	[°C]
Toplinski učin:	1815,195	1201,606	1004,751	694,06978	[kW]
Maseni protok goriva:	503,3	335,4	284,5	225	[kg/h]
	13,98%	9,32%	7,90%	6,25%	[kg/s]
Toplina iz goriva:	2210,326	1472,965	1249,429	988,125	[kW]
Iskoristivost	82,12%	81,58%	80,42%	70,24%	[-]

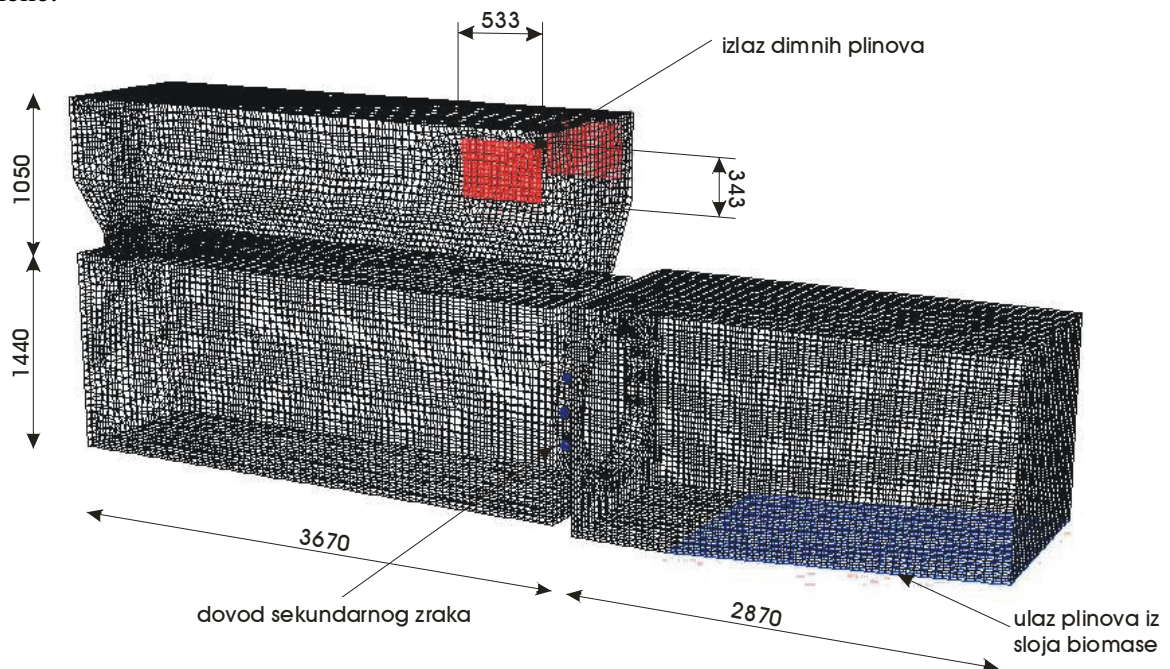
Razlika između rezultata izračuna iskoristivosti direktnom i indirektnom metodom proizlazi iz činjenice da ostali gubici nisu uzeti u obzir, kao i zbog gubitaka zračenjem u okolinu koji nisu određeni mjerenjem. Pri većim opterećenjima je razlika između direktne i indirektno metode veća, što potvrđuje da su gubici zračenjem veći za veća opterećenja i temperature u ložištu.

5 REZULTATI SIMULACIJE I VALIDACIJA MODELA

U nastavku su prikazani rezultati numeričkih simulacija na modelu ložišta i generatora topline. Kako je model podijeljen u dva dijela zasebno su prikazani rezultati jednodimenzijskog modela sloja biomase od rezultata dobivenih simulacijama plinovite faze (Fluent). Rezultati simulacije jednodimenzijskog numeričkog modela sloja biomase su prikazani u ovisnosti o udaljenosti od mjesta ulaska biomase na rešetku, po duljini ložišta. Prikazane vrijednosti su prosječne vrijednosti na izlazu iz sloja biomase, odnosno na visini 50-100 mm od najviše točke sloja biomase. Numerički model plinske faze obuhvaća prostor iznad sloja biomase, uvod sekundarnog zraka, sve do izlaza iz drugog prolaza dimnih plinova. Prikazane veličine su prosječne vrijednosti na izlazu iz numeričke domene (izlaz iz ložišta i ulaz u dimovodne cijevi). Prijelaz topline zračenjem i konvekcijom na stijenke u ložištu i generatoru topline je uzet u obzir za sve površine hladene vodom.

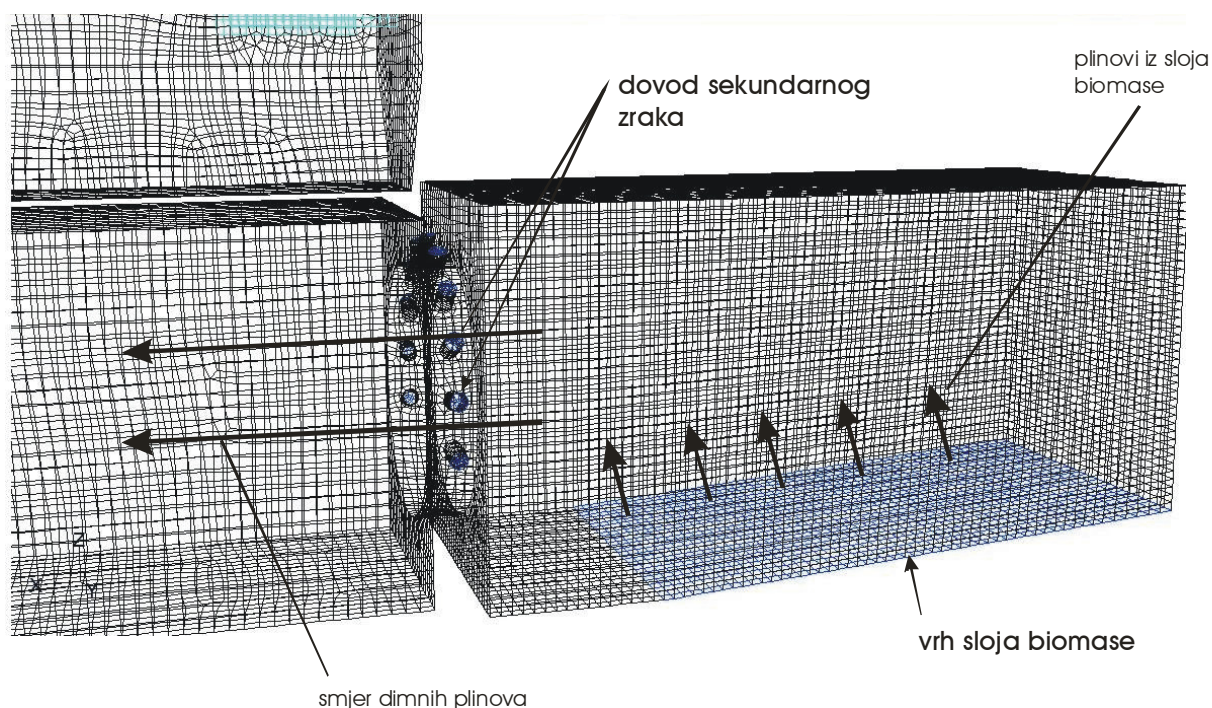
5.1 Prikaz prikaz modela i diskretizacije domene

Za numeričku simulaciju izgaranja u plinskoj fazi i nastajanja dušik(II)-oksida u ložištu korišten je programski paket FLUENT koji koristi metodu konačnih volumena za izračun fizikalnih veličina u pojedinim diskretnim volumenima prostora. Prostor ložišta je diskretiziran s približno 380.000 konačnih volumena. Mreža, koja određuje konačne volumene definirana je tetraedrima i heksaedrima, te je mješovitog tipa. Za generiranje mreže korišten je programski paket GAMBIT. Simulacije su izvršene na četverojezgrenu računalo Sun Microsystems. Primijenjeno je distribuirano računanje gdje je domena podijeljena na četiri jednaka dijela. Procesori računaju pripadni dio domene te na kraju iteracije izmjenjuju dobivene vrijednosti u kontrolnim volumenima koji se nalaze na granici koja dijeli dva dijela domene.



Slika 44 Prikaz modela generatora topline s mrežom kontrolnih volumena

Kod izrade diskretizacije prostora, kao granice do kojih se vrši izračun, određeni su ulazna površina u kojoj ulaze plinovi koji izlaze iz sloja biomase, ulaz sekundarnog zraka, te presjek u kroz koji dimni plinovi izlaze iz ložišta. Ostali dijelovi ložišta i generatora topline su zanemareni zbog pojednostavljenja modela kao bi se smanjenjio broj kontrolnih volumena. Na taj se način izračun numeričke simulacije se odvijao u razumnom vremenu s obzirom na raspoloživu procesorsku snagu računala. Na sljedećoj slici prikazan je detalj modela ložišta s pripadnim kontrolnim volumenima. Dovod sekundarnog zraka je zadan kao rubni uvjet na mjestu na kojem se uvodi kroz koncentrično postavljene cijevi. Na slici dolje je prikazan model ložišta.



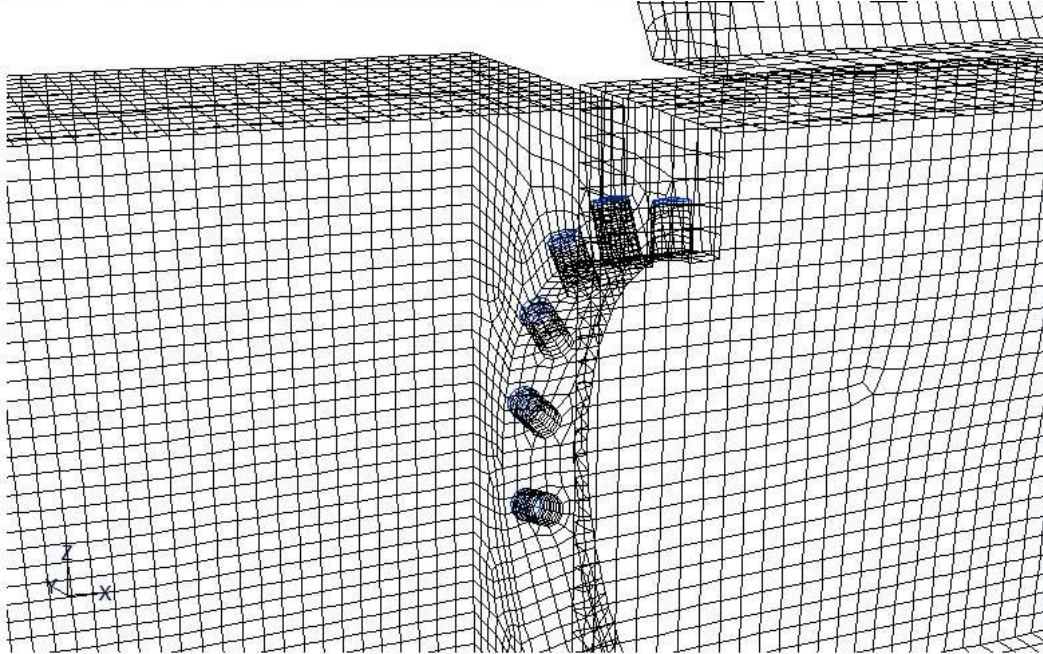
Slika 45 Detalj diskretizacije prostora ložišta

Prilikom simulacije, odnosno izračuna jednadžbi očuvanja, korištena je uzstrujna diskretizacija prvog reda uz diskretizaciju polja tlaka i združivanje polja brzine i tlaka korištenjem sheme SIMPLEC koja je pogodna za rješavanje ove vrste strujanja. Zbog velikog raspona temperatura u području zone izgaranja potrebna je gusta mreža konačnih volumena uz korištenje navedene sheme združivanja tlaka i brzine. Pri izradi modela, i pogotovo pri numeričkim simulacijama izgaranja u ložištu generatora pare, najveći problem predstavljala je simulacija izgaranja uz zahtijevani pretičak zraka.

Na ulazu u domenu (Fluent) definiran je profil brzina, temperatura i sastava plinova koji izlaze iz sloja biomase. Ulazna količina plinova, maseni protok, ovisi o gustoći plinova koja ovisi o temperaturi plinova. Temperatura plinova ovisi o rješenju numeričke simulacije pa je stoga prilikom rješavanja jednadžbi pristupilo postupnom rješavanju problema.

Najprije je riješeno polje strujanja zraka bez kemijskih reakcija. Nakon odedenog broja iteracija (800-100) uključen je model kemijskih reakcija. Prvo dobiveno rješenje je rezultiralo

određenim sastavom dimnih plinova s pretičkom koji je bio veći ili manji od željenog iz razloga što je količina plinova koji ulaze iz sloja biomase bila različita od početne. Nakon izračuna ponovno je definirana potrebna količina zraka u sekundaru za postizanje željenog pretička, te je nakon toga provedena ponovna simulacija.

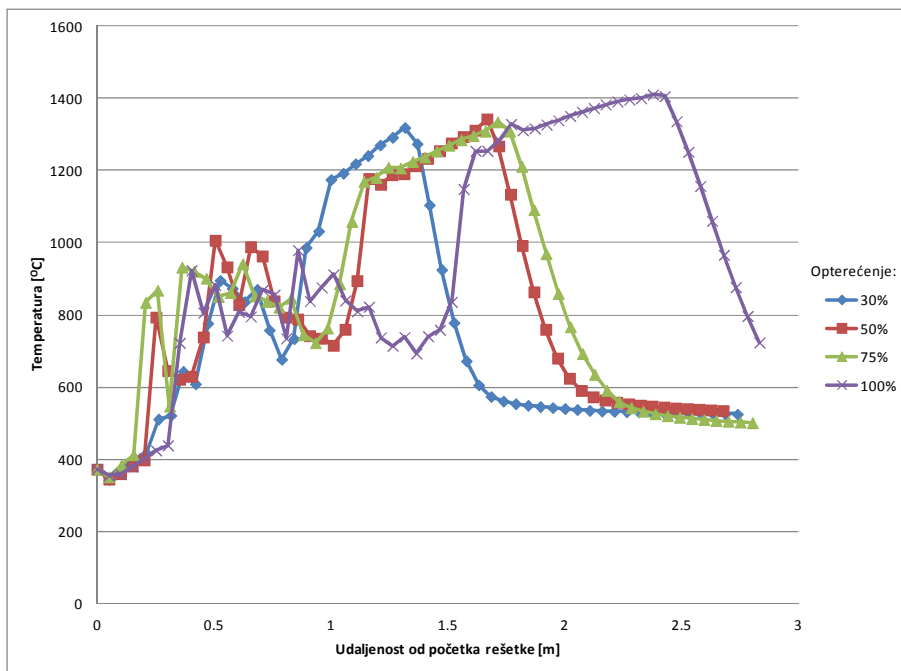


Slika 46 Detalj uvoda sekundarnog zraka

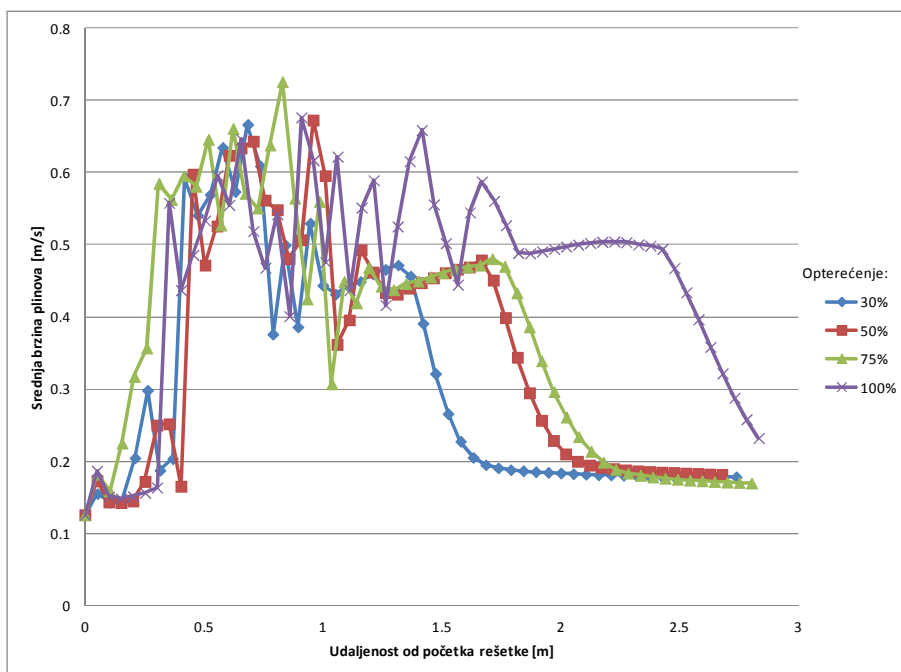
Model za određivanje koncentracije NO pokazao se izuzetno stabilnim. Tijekom izrade rada pokazalo se da je ispravno dobiveno rješenje modela izgaranja, odnosno rezultirajućih polja temperatura i koncentracija kemijskih tvari, dovoljan preduvjet da model tvorbe spojeva vezanih za nastajanje dušik(II)-oksida uspješno konvergira uz zadovoljavajuću točnost dobivenih rezultata numeričke simulacije u usporedbi s izmjerenim eksperimentalnim vrijednostima.

5.2 Rezultati simulacije modela sloja biomase

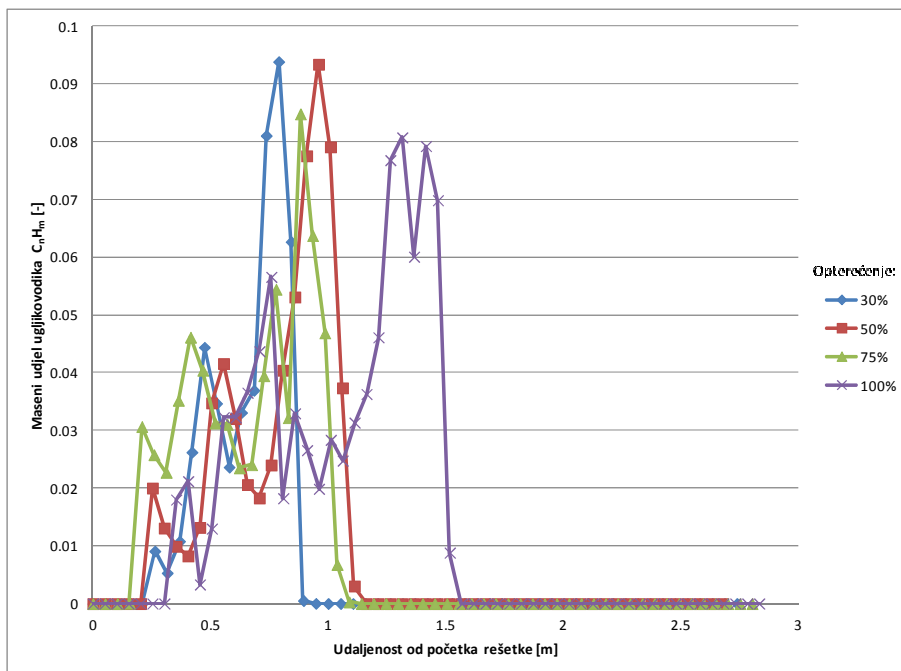
Dobivene veličine na izlazu iz sloja biomase su prikazane u dijagramima za četiri opterećenja generatora topline, s time da je na apscisi pozicija na rešetki po duljini rešetke, dok je na ordinati prikazana veličina (temperatura i brzina plina koji izlazi, koncentracije kemijskih tvari u plinovima).



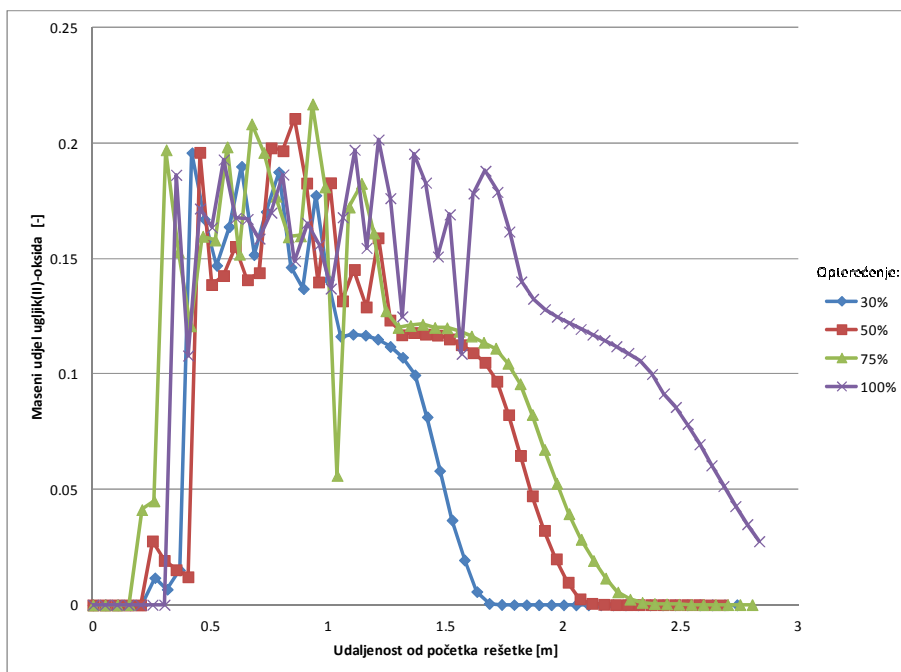
Slika 47 Srednja temperatura plinova na izlazu iz sloja biomase



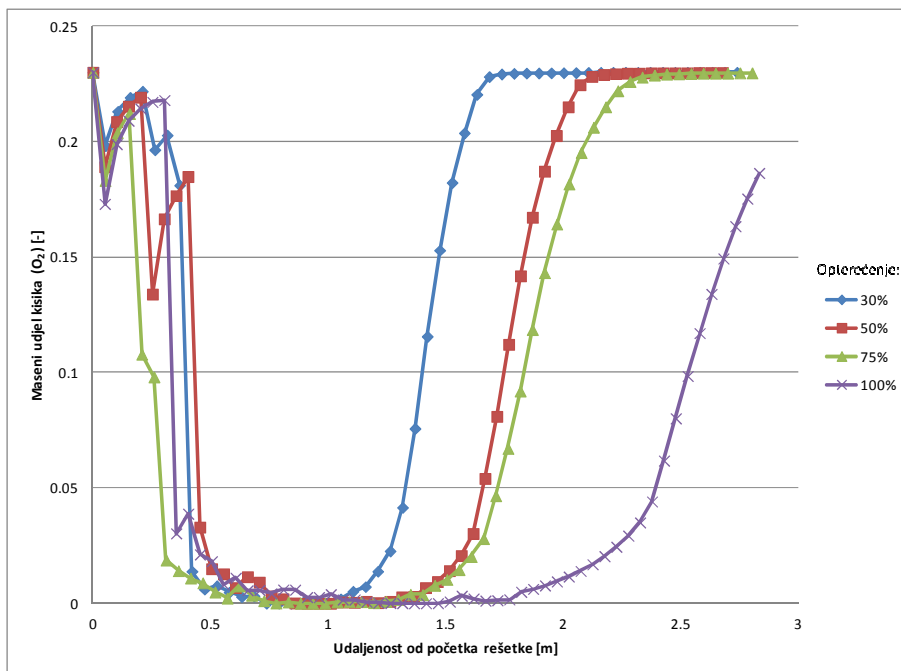
Slika 48 Srednja brzina plinova na izlazu iz sloja biomase



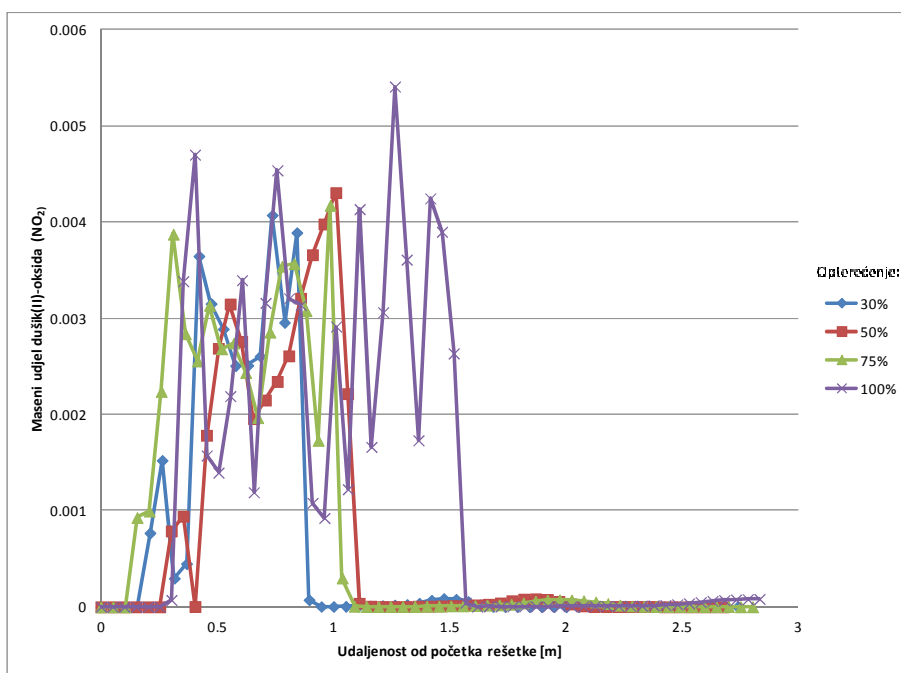
Slika 49 Maseni udjel ugljikovodika C_nH_m



Slika 50 Maseni udjel ugljik(II)-oksida

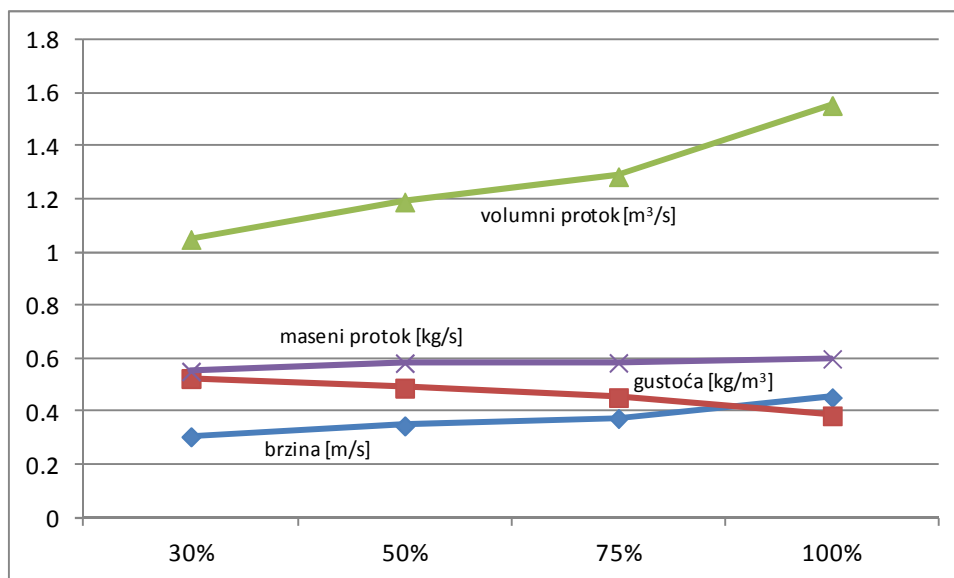


Slika 51 Udjel kisika u plinovima koji izlaze iz sloja biomase

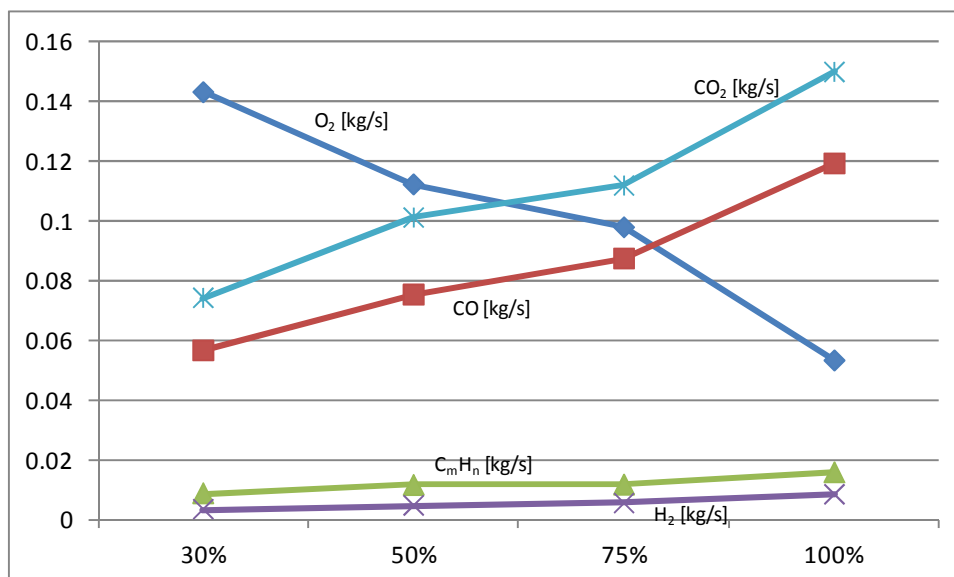


Slika 52 Udjel dušik(II)-oksida u plinovima koji izlaze iz sloja biomase

Prosječne vrijednosti fizikalnih veličina i maseni protoci plinova na izlazu iz sloja biomase su prikazane na slijedeća dva dijagrama u ovisnosti o opterećenju:



Slika 53 Prosječne vrijednosti fizikalnih veličina za pojedina pogonska stanja

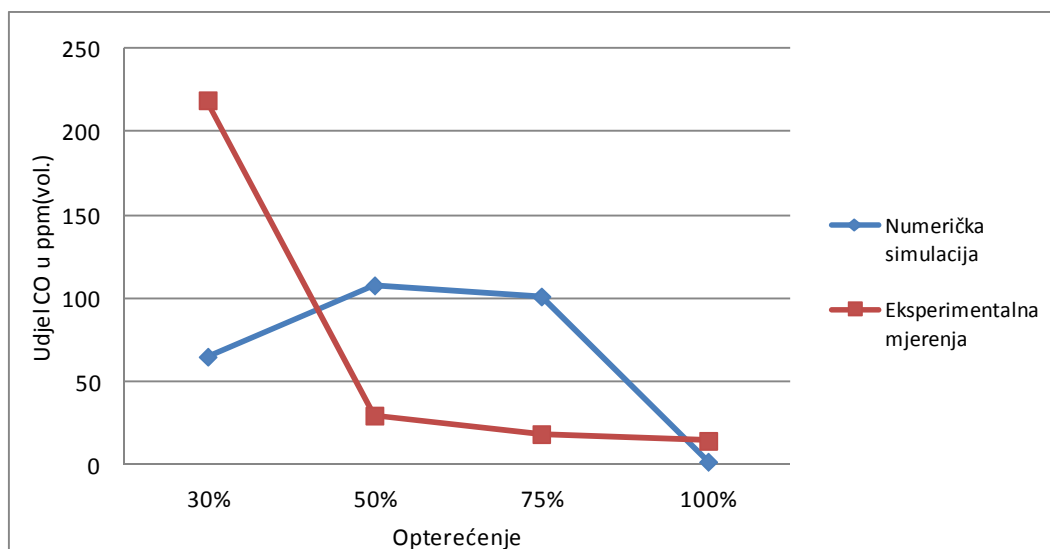


Slika 54 Prosječni maseni protoci plinova na izlazu iz sloja biomase

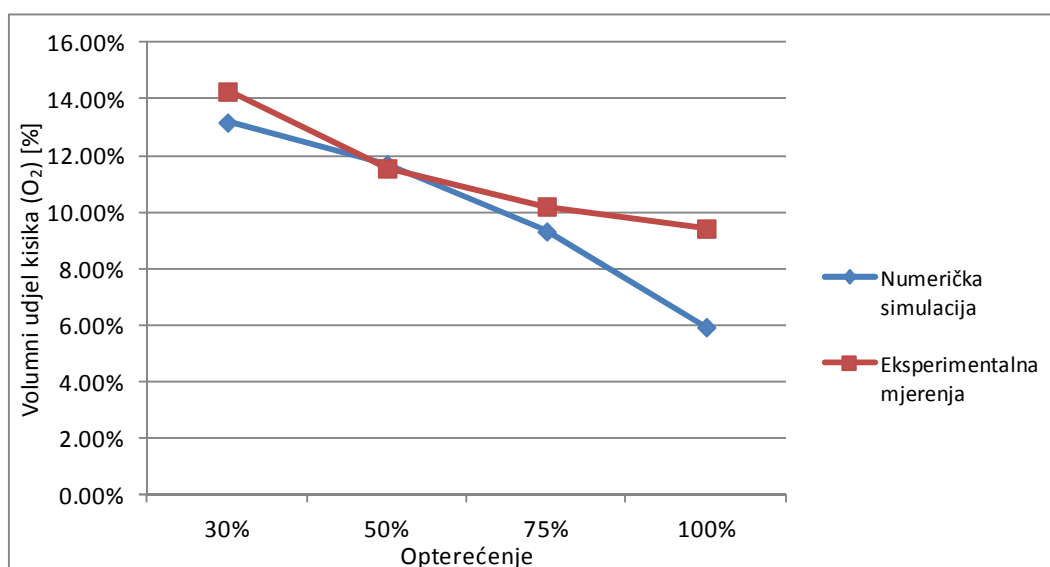
Ove vrijednosti su korištene kao rubni uvjeti za simulacije plinske faze za što je korišten komercijalni software FLUENT. U nastavku su prikazani rezultati simulacije u FLUENT-u. Prikazane vrijednosti su prosječne vrijednosti fizikalnih veličina i koncentracija kemijskih tvari na izlazu iz računalne domene FLUENT-a.

5.3 Rezultati simulacije modela plinske faze i usporedba s izmjerenim vrijednostima

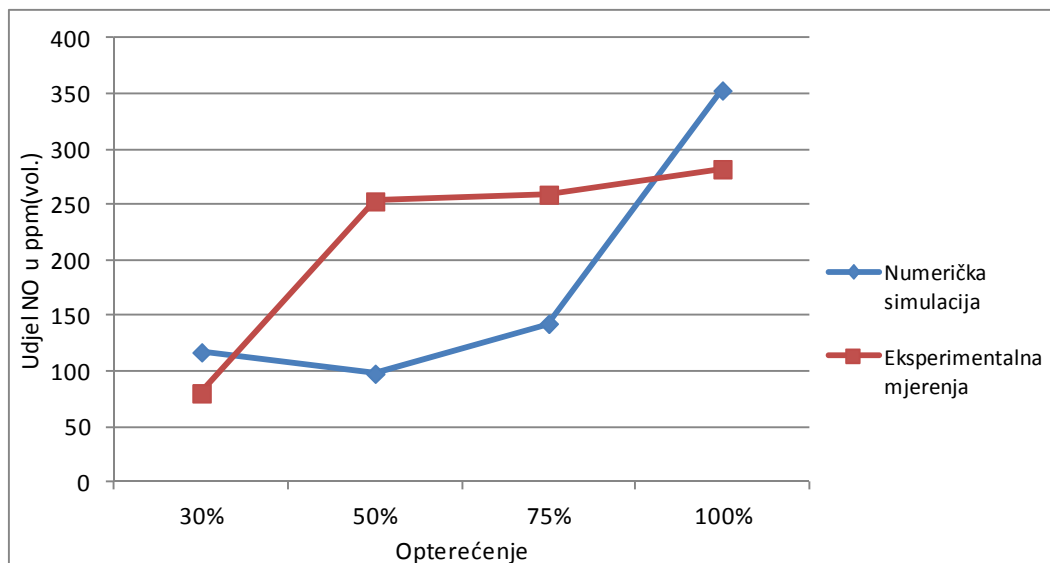
Dobivene veličine na izlazu generatora topline, odnosno računalne domene su prikazane u dijagramima za četiri opterećenja generatora topline, s time da je na ordinati opterećenje, dok je na ordinati prikazana veličina (temperatura i brzina plina koji izlazi, koncentracije kemijskih tvari u plinovima). Plavom bojom su označeni rezultati numeričke simulacije, dok su crvenom bojom označene izmjerene vrijednosti na izlazu iz generatora topline.



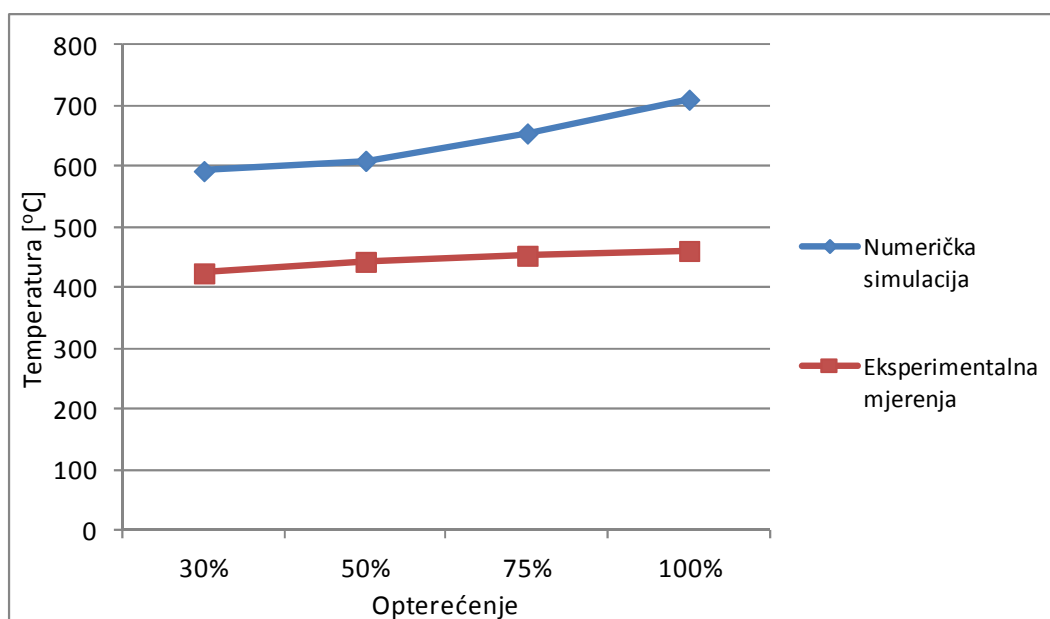
Slika 55 Koncentracija ugljik(II)-oksida u [ppm_(vol.)]



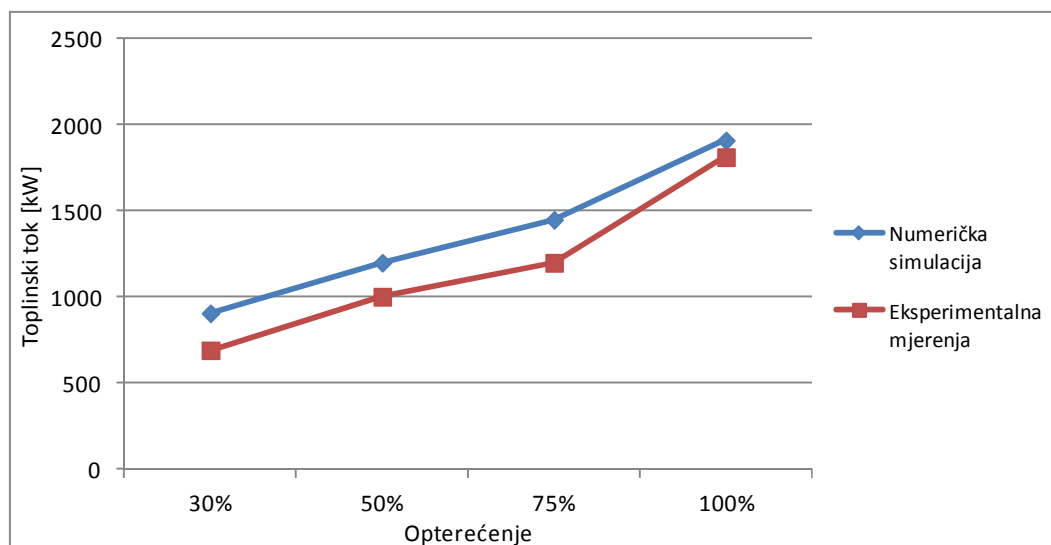
Slika 56 Koncentracija kisika na izlazu iz ložišta [%]



Slika 57 Koncentracija dušik(II)-oksida na izlazu iz generatora topline [ppm_(vol.)]



Slika 58 Temperatura na izlazu iz računalne domene numeričke simulacije i temperatura dimnih plinova izmjerena na izlazu iz generatora topline [°C]



Slika 59 Toplinski tok na stijenke ložišta i generatora topline [kW]

Temperatura dimnih plinova je mjerena na izlazu iz generatora topline, prije ulaza u ciklonski filter. Kako računalna domena završava na kraju drugog prolaza dimnih plinova, prije ulaza u dimne cijevi, jasno je da mora biti viša od izmjerene. Preostala se toplina izmjenjuje u dimnim cijevima putem konvekcije. Razlika temperature na izlazu iz drugog prolaza (računske) i temperature dimnih plinova na izlazu iz generatora topline je viša za veća niža opterećenja generatora topline. Iz tog razloga je i primjetno da je kod većeg opterećenja generator topline ima bolju iskoristivost.

Može se zaključiti je da za zadane rubne uvjete, koji odgovaraju izmjerenim veličinama za ispitivanja, numerički model točno prikazuje trendove te da su rezultati simulacija u skladu s izmjerenim podacima dobivenim prilikom mjerenja na eksperimentalnom postrojenju.

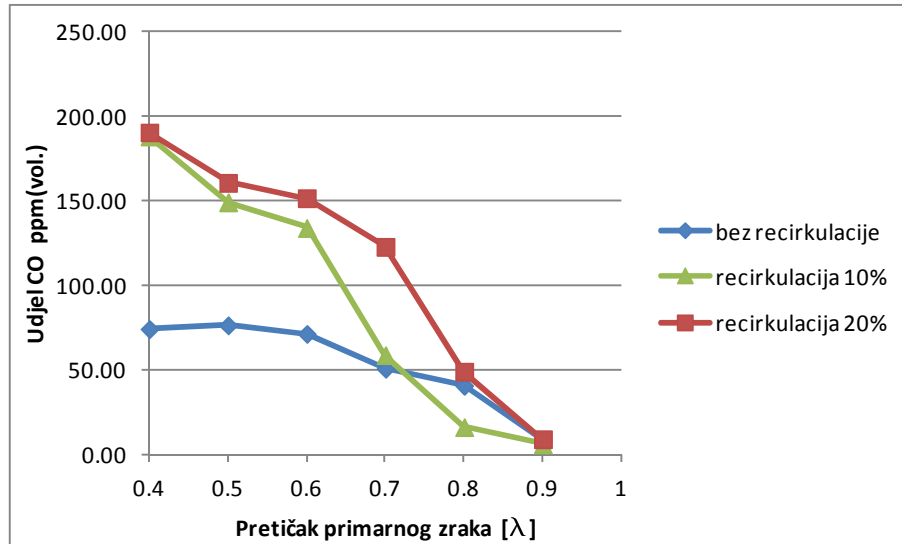
5.4 Utjecaj količine primarnog zraka i recirkulacije dimnih plinova

Kao utjecajni parametar za optimizaciju ložišta promatran je utjecaj količine primarnog zraka za izgaranje na relevantne parametre izgaranja u ložištu i dimnim plinovima na izlazu iz ložišta. Ložište i izgaranje u ložištu se odvija u podstehiometrijskim uvjetima, uz pretičak zraka od 0,4 do 1,0.

Numerička simulacija je provedena za različite pretičke zraka za tri različita opterećenja generatora topline. Parametri koji su bilježeni i praćeni su udjel ugljik(II)-oksida (CO) i dušik(II)-oksida (NO) na izlazu iz računalne domene. Kako bi se pratio učinak ovih mjera na iskoristivost generatora topline istovremeno je bilježen i prijeloz topline na stijenke generatora topline konvekcijom i zračenjem.

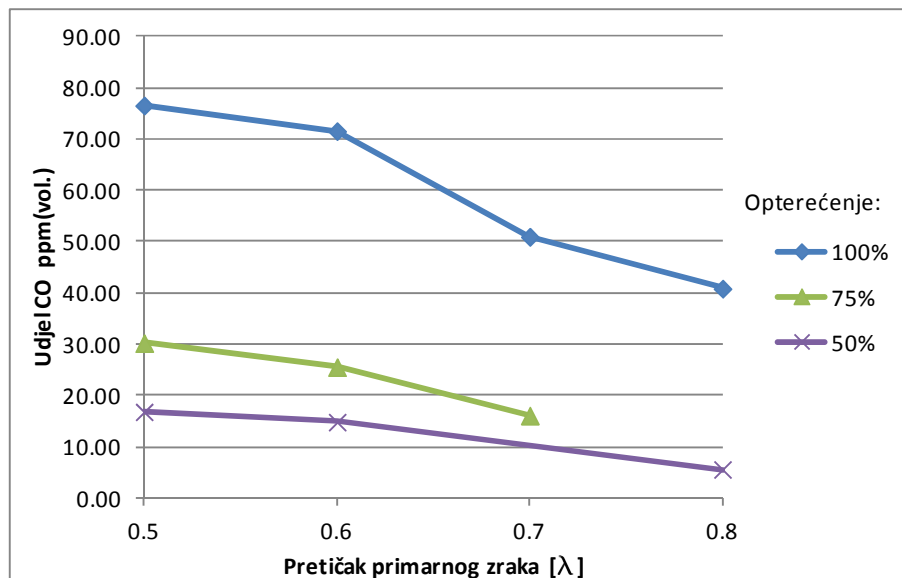
Količina zraka, koja se dovodi na izlazu iz ložišta podešena je tako da je ukupni pretičak zraka približno isti za sve slučajeve za koje su provedene simulacije. Ovim se postupkom oponaša stvarni rad generatora topline koji je opremljen „lambda“ sondom koja prati koncentraciju kisika u dimnim plinovima na izlazu iz generatora topline i djeluje na ventilator dobave sekundarnog zraka.

Utjecaj pretička zraka u komori izgaranja je prikazan za različite udjele recirkulacije dimnih plinova u primarnom zraku. Udjel označava količinu dimnih plinova koji se vraćaju iz dimnog kanala i miješaju s primarnim zrakom koji se dovodi ispod rešetke na kojoj izgara gorivo.



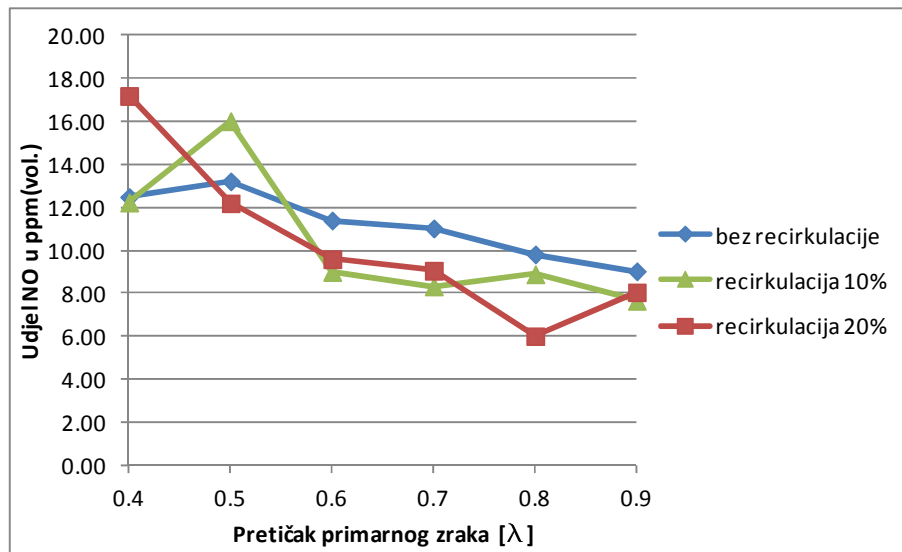
Slika 60 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima na izlazu iz generatora topline [ppm_{vol.}] kao funkcija primarnog pretička zraka

Na Slika 60 prikazan je udjel ugljik(II)-oksida u ovisnosti o pretičku zraka u zoni primarnog izgaranja, za slučaj kada je izgaranje bez recirkulacije i s recirkulacijom dimnih plinova kod maksimalnog opterećenja.



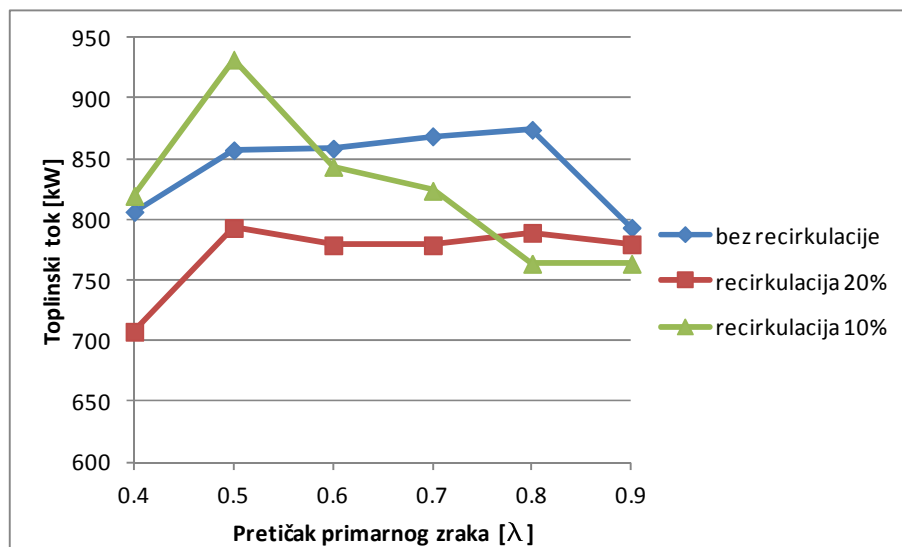
Slika 61 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppm_{vol.}] kao funkcija primarnog pretička zraka za različita opterećenja

Utjecaj količine zraka za primarno izgaranje na emisije dušik(II)-oksida je prikazan na slici dolje.



Slika 62 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppm] kao funkcija primarnog pretička zraka i recirkulacije dimnih plinova

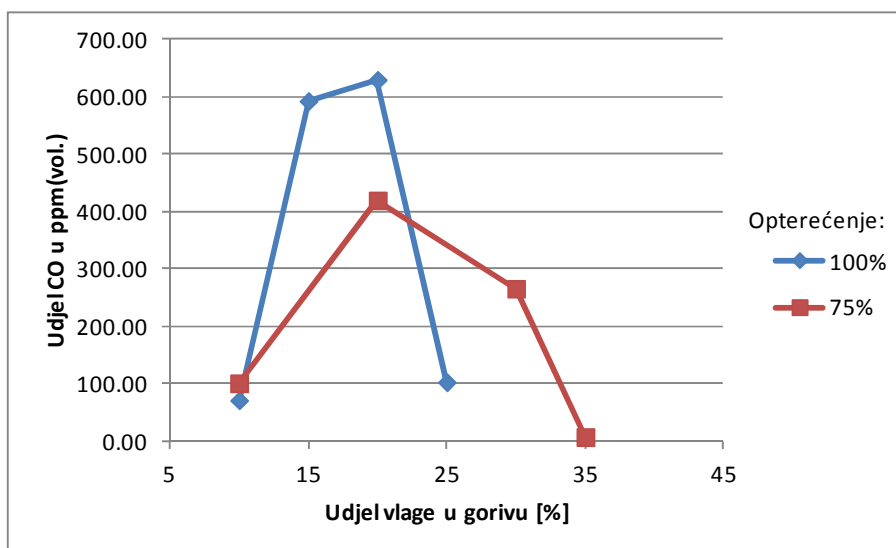
Prijelaz topline na stijenke generatora pare za isto opterećenje (količinu dovedena goriva), a uz različite primarne pretičke zraka se mijenja i prikazano je na slici dolje.



Slika 63 Prijelaz topline na stijenke generatora topline [kW]

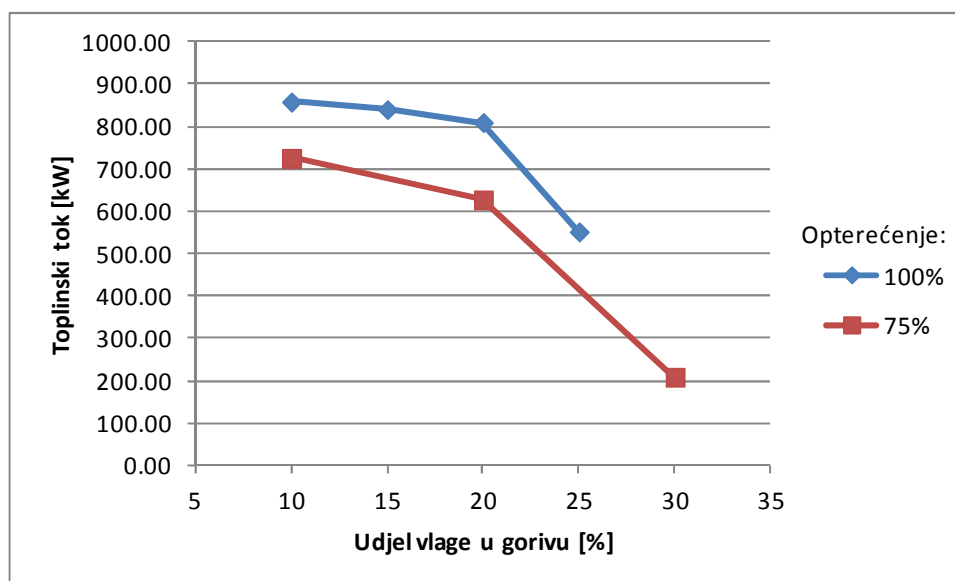
5.5 Utjecaj vlage u gorivu

Promatran je utjecaj vlage sadržane u gorivu na emisije dušik(II)-oksida i ugljik(II)-oksida. Utjecaj vlage je promatran na način da je elementarni sastav goriva koji ne uključuje vlagu zadržan isti kao i onaj određeni u toku ispitivanja. Simulacije su provedene tako da je zadan različiti udjel vlage u biomasi za različita opterećenja generatora topline.



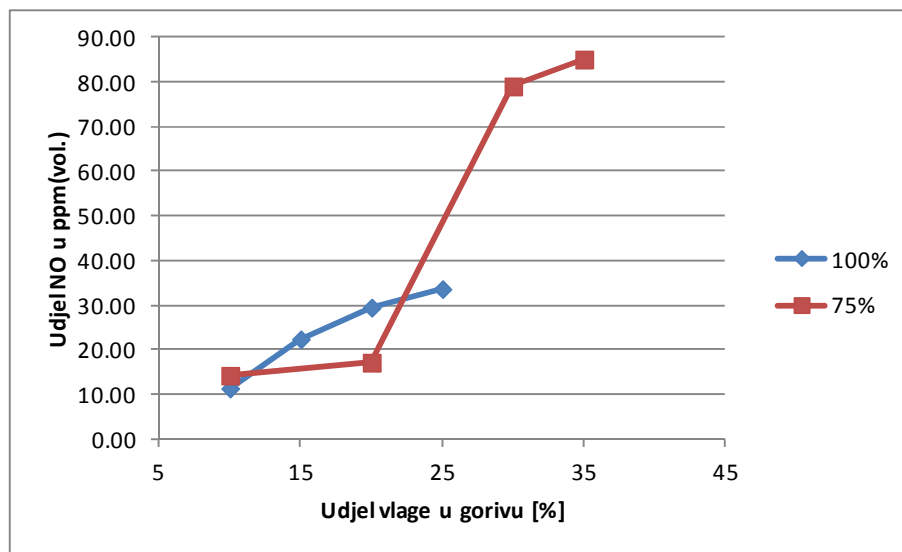
Slika 64 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppm] kao funkcija vlage u gorivu i opterećenja generatora topline

Također, promatran je učinak promjene vlage u gorivu na emisije dušik(II)-oksida i ugljik(II)-oksida, kao i rezultirajući toplinski tok na toplu vodu u generatoru topline. Tako je moguće vidjeti koje je utjecaj vlažnosti goriva na iskoristivost generatora topline.



Slika 65 Prijelaz topline kao funkcija vlage u gorivu i opterećenja generatora topline [kW]

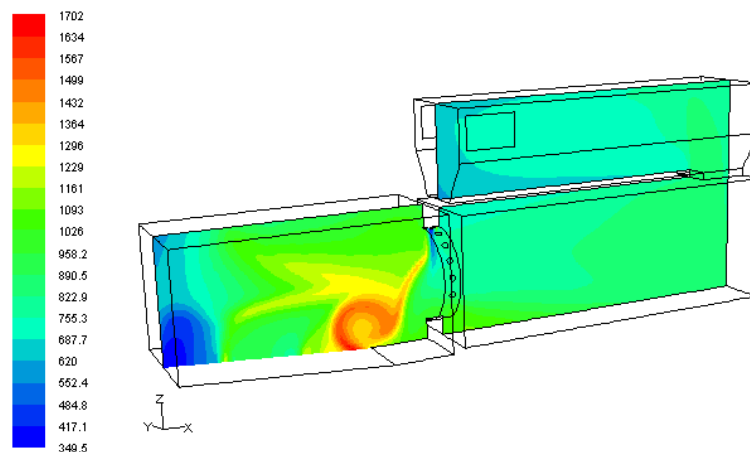
Promatrane su emisije dušik(II)-oksida na izlazu iz ložišta, odnosno računalne domene za različite udjele vlage u biomasi.



Slika 66 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppm] kao funkcija vlage u gorivu i opterećenja generatora topline

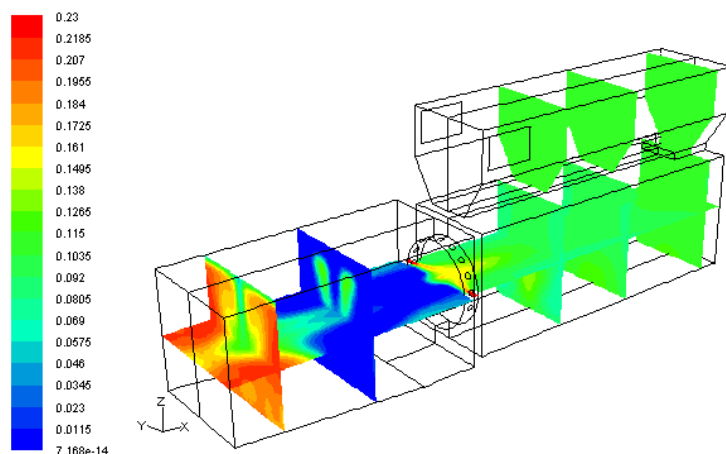
5.6 Profili temperatura i kemijskih tvari u ložištu i generatoru topline

U nastavku su prikazani presjeci iz rezultata računalnih simulacija u FLUENT-u. Prikazano je polje temperatura u uzdužnom presjeku kroz ložište i generator topline. Prikaz se odnosi na pogonsko stanje: 100% opterećenje, primarni pretičak zraka 0.8



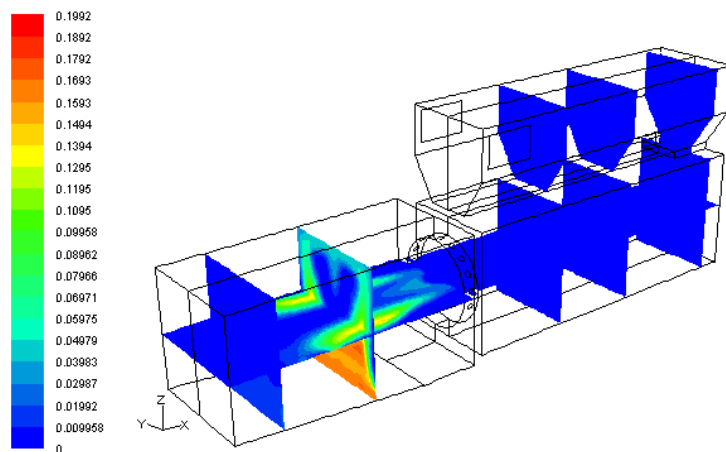
Slika 67 Temperatura dimnih plinova [°C]

Na gornjoj slici se vide temperaturna polja u ložištu. Iznad zona na kraju pomične rešetke formira se zona visokih temperatura iznad zone gdje izgara kruti ostatak nakon devolatilizacije.



Slika 68 Udjel kisika (O_2) u dimnim plinovima

S obzirom na udjel kisika u dimnim plinovima ložište je podijeljeno u dvije zone. U zoni isparivanja i devolatilizacije biomase udjel kisika je viši, dok je iznad zone izgaranja krutog ostatka sav je kisik praktički potrošen i u toj se zoni pojavljuje visok udjel ugljik(II)-oksida, što je vidljivo na slici dolje.



Slika 69 Udjel ugljik(II)-oksida (CO) u dimnim plinovima

5.7 Komentar rezultata

U ovom su radu analizirane mogućnosti optimizacije ložišta na biomasu. Za eksperimentalnu analizu odabran generator topline u izvedbi s izdvojenim ložištem, s mogućnošću recirkulacije dimnih plinova u ložište u cilju smanjenja emisije dušikovih oksida. Pored emisije dušikovih oksida, u proces optimizacije uključeni su također emisije ugljik(II)-oksida (CO) i iskoristivost generatora topline.

Kako bi analizirali utjecajne parametare na emisiju dušikovih oksida, emisiju ugljik(II)-oksida (CO) i iskoristivost generatora topline, izrađen je matematički model ložišta i generatora topline koji uključuje prostor ložišta kao i prostor uvođenja sekundarnog zraka za izgaranje. Za potrebe numeričke analize izgaranja biomase u sloju korišten je jednodimenzijski model sloja biomase na rešetki. Modelom su obuhvaćene sve utjecajne pojave te su kao rezultat dobiveni profili s izlaznim brzinama, koncentracijama kemijskih tvari i drugim relevantnim veličinama. Ti profili su korišteni kao ulazni parametri za simulacije u FLUENT-u. Programski paket FLUENT omogućuje numeričku simulaciju reaktivnog sustava sa svim potrebnim modelima u plinovitoj fazi. Ti su modeli: model turbulencije, model izgaranja, model prijenosa topline zračenjem i konvekcijom te model tvorbe dušik(II)-oksida.

Turbulentno je strujanje modelirano s realističnim $k-\varepsilon$ modelom turbulencije koji je pogodan za modeliranje strujanja s izrazitim vrtloženjem koje nastaje u zoni iza dovoda sekundarnog zraka za izgaranje.

Izmjena topline zračenjem u ložištu modelirana je korištenjem modela diskretnih ordinata. Taj model obuhvaća prijenos topline zračenjem između plinova nastalih izgaranjem i ekranskih cijevi ložišta.

Prilikom numeričkih simulacija najviše vremena je posvećeno interakciji dvaju modela (jednodimenzijski model sloja biomase i model plinske faze). Numerička simulacija je izvedena u fazama, na način da su postupno uključivani modeli za izmjenu topline konvekcijom, modeli diskretne faze, modeli izgaranja i na kraju model izmjene topline zračenjem. Za dobivanje prihvatljivog rješenja bilo je potrebno do 15000 iteracija.

Ložište generatora topline koncipirano je na način da je iznad rešetke na kojoj izgara gorivo osiguran dovoljan prostor da se u uvjetima bogate smjese u njemu nalaze produkti isplinjavanja biomase (pretežno CO). Na izlazu iz ložišta je suženje kroz koje se putem sapnica aksijalno dovodi zrak za dovršenje izgaranja, tzv. sekundarni zrak. Količina sekundarnog zraka regulira se mjerenjem udjela kisika u dimnim plinovima na izlazu iz generatora topline, na temelju čega se regulira brzina vrtnje ventilatora dobave sekundarnog zraka za izgaranje.

Za izgaranje ugljik(II)-oksida i složenih ugljikovodika koji izlaze iz sloja biomase korišteni su pojednostavljeni modeli u dvije reakcije (two-step mechanism). Karakteristični ugljikovodik je određen prema sastavu biomase kao $C_{3,33236} H_{8,53611}$. Za fizikalna i kemijska svojstva usvojena su svojstva C_3H_8 .

Korišteni su modeli tvorbe dušikovih oksida, odnosno točnije dušik(II)-oksida (NO) te spojeva koji su vezani uz nastajanje NO. Analiziran je utjecaj svih poznatih mehanizama

tvorbe dušik(II)-oksida odnosno termički, promptni mehanizam, mehanizam tvorbe NO iz dušika sadržanog u gorivu te modeli koji opisuju disocijaciju NO (*re-burn*).

Parametri, čiji je utjecaj na nastajanje dušik(II)-oksida i ugljik(II)-oksida analiziran, jesu: opterećenje generatora pare, koeficijent pretička zraka za izgaranje u primarnoj zoni i ukupni pretičak za cijelo ložište. Eksperimentalno su određene emisije ugljik(II)-oksida i dušik(II)-oksida, kao i iskoristivost iz generatora topline za različite koeficijente pretička zraka i opterećenja, te su kod istih uvjeta izvršene numeričke simulacije na modelu generatora pare. Utjecaj udjela dušika u gorivu nije bilo moguće mjeriti jer su eksperimentalna mjerenja izvršena s gorivom istog sastava.

Rezultati istraživanja utjecajnih parametara na emisije dušik(II)-oksida iz ložišta pokazali su znatni utjecaj opterećenja generatora pare i koeficijenta pretička zraka na emisije dušik(II)-oksida. Eksperimentalna mjerenja pokazala su da je s porastom opterećenja generatora pare zabilježen porast razine emisija dušik(II)-oksida. Rezultati numeričke simulacije na Slika 57 za isti slučaj pokazuju također ovisnost emisija dušik(II)-oksida o opterećenju generatora topline u odnosu na eksperimentalna mjerenja.

Kod promjene koeficijenta pretička zraka u zoni primarnog izgaranja, pri konstantnom opterećenju generatora pare, zabilježen je pad emisija dušik(II)-oksida s porastom koeficijenta pretička zraka u primarnoj zoni, uz isti ukupni pretičak zraka (Slika 62). Razlog tome je smanjenje temperature u zoni primarnog izgaranja u ložištu čime se usporavaju procesi nastanka dušik(II)-oksida. Emisije ugljik(II)-oksida (Slika 61) su s povećanjem primarnog pretička zraka bile manje. Količina topline predana na stijenke generatora pare je optimalna u rasponu primarnog pretička zraka od 0,6 – 0,8.

Recirkulacija dimnih plinova i miješanje s primarnim zrakom za izgaranje ima višestruke učinke. Primijećeno je da je za isti pretičak zraka emisija ugljik(II)-oksida bila veća ako se primjenjuje recirkulacija dimnih plinova. Emisija dušik(II)-oksida je osjetno kada se primjenjuje veća recirkulacija dimnih plinova. Recirkulacija dimnih plinova ima za posljedicu smanjeni prijelaz topline na stijenke generatora topline i time manju iskoristivost generatora topline (Slika 63).

Utjecaj vlage u gorivu je promatran za dva različita opterećenja generatora topline. Za slučajeve s istim primarnim pretičkom zraka i istim ukupnim pretičkom zraka vidi se da je vlaga u gorivu utječe na smanjenje iskoristivosti kroz manji prijelaz topline na stijenke generatora topline (Slika 65). Emisija ugljik(II)-oksida (Slika 64) raste i naglo pada s porastom udjela vlage, dok emisije dušik(II)-oksida (Slika 66) pokazuju porast s udjelom vlage u gorivu.

6 ZAKLJUČAK

U ovom se radu analizira rad generatora topline loženog s drvnom sječkom koja se dobiva iz otpada koji nastaje u proizvodnji namještaja. Ovaj je generator pare odabran iz razloga što je spaljivanje otpada iz proizvodnje namještaja zahtjevno zbog relativno visokog udjela dušika u drvnjnoj biomasi – gorivu.

Kod optimizacije ložišta bitan je primarni koeficijent pretička zraka u zoni ložišta. Za isti ukupni pretičak i opterećenje generatora topline optimalni pretičak zraka je između 0,6 i 0,8. U tom rasponu dobiva se najbolja iskoristivost izgaranja i najbolji prijelaz topline. Kako su emisije dušik(II)-oksida i ugljik(II)-oksida niže s povećanjem primarnog pretička zraka, primarni pretičak od 0,8 se pokazuje kao optimalan.

Uvođenjem recirkulacije plinova izgaranja, uz zadržavanje istih parametara izgaranja (isti pretičak), smanjuje se iskoristivost generatora topline i povećava emisija ugljik(II)-oksida. Povećanje emisije ugljik(II)-oksida uzrokuje smanjenu iskoristivost izgaranja ili potrebu za povećanjem ukupnog pretička zraka, što opet smanjuje iskoristivost izgaranja.

Recirkulacijom dimnih plinova smanjuje se emisija dušikovih oksida, pa se nameće zaključak da je uvođenje recirkulacije dimnih plinova u zrak za izgaranje neophodno samo kod goriva s znatnim udjelom dušika u gorivu, što je i bio slučaj s analiziranim postrojenjem.

Kako se recirkulacijom dimnih plinova snižava temperatura izgaranja i temperatura biomase na rešetki, za slučaj kada se koristi biomasa s temperaturama tališta pepela oko 800°C (slamnati peleti, žitarice ili otpadni materijal s raznim primjesama) primjenom recirkulacije dimnih plinova može se riješiti i taj problem.

U pogonu, koji je analiziran, također je primijećena pojava taljevine pepela, koja ima za posljedicu zastoje u sustavu odvodnje pepela. Dovođenjem recirkulacije dimnih plinova se rješavaju problemi s pepelom i emisijama dušikovih oksida, dok se ukupna iskoristivost generatora topline smanjuje.

Vlaga sadržana u gorivu utječe prvenstveno na iskoristivost generatora topline. S porastom udjela vlage padaju iskoristivost i količina topline koja se perdaje na toplu vodu u generatoru topline. S obzirom da je potrebna veća toplina za isparivanje vlage iz goriva, ova je činjenica očekivana. Osim toga, potrebno je duže vrijeme za konverziju gorivih tvari iz goriva u plinovito stanje, s čime raste i udio neizgorelih gorivih tvari u pepelu.

Emisije dušik(II)-oksida pogotovo za niža i srednja opterećenja, znatno je viša za veće udjele vlage. Emisija ugljik(II)-oksida može se kompenzirati povećanjem ukupnog pretička, što opet dovodi do smanjenja iskoristivosti.

Jedan od načina za rješenje ovog problema je sušenje biomase prije dovođenja u ložište. To se može izvesti korištenjem otpadne topline iz procesa, ako je takva toplina dostupna. Ovo je rješenje najpovoljnije, iako zahtjeva određena ulaganja u proces sušenja. Sušenje biomase je isplativo samo u slučaju da je iz nekog izvora dostupan zrak za sušenje biomase. Sušenje biomase prirodnim putem nije isplativo jer je biološka degradacija suhe tvari u biomasi (1-2% maseno/mjesečno) veća od koristi koja se dobije smanjenjem udjela vlage.

Drugo je rješenje dovođenje recikulacije dimnih plinova, ali uz ograničene učinke na smanjenje emisije dušikovih oksida, dok mogući nepovoljni učinci na iskoristivost dovode u pitanje ovu metodu kontrole emisije dušikovih oksida.

Povećanje iskoristivosti generatora topline moguće je sa smanjenjem ukupnog pretička zraka, uz istovremeno potpuno izgaranje dimnih plinova koji nastaju iz sloja biomase. To se može postići korištenjem osjetnika udjela ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima, na temelju čega se upravlja s ventilatorima dobave primarnog i sekundarnog zraka. Također se konstrukcijom ložišta i dovoda zraka za izgaranje mogu osigurati optimalni uvjeti za izgaranje.

Manji udjel kisika u dimnim plinovima znači i nižu temperaturu (točku) rosišta dimnih plinova. Na taj se način otvara prostor za dodatno povećanje iskoristivosti generatora topline, korištenjem topline kondenzacije dimnih plinova.

LITERATURA

1. Yang, Y., i dr. 2005, *Study on the transient process of waste fuel incineration in a full-scale moving bed furnace*. Combustion Science and Technology, str. 127-150.
2. Liu, H., Gibbs, B. *Modeling NH₃ and HCN emissions from biomass circulating fluidized bed gasifiers*. 2003, Fuel, str. 1591-1604.
3. Winter, F., Wartha, C., Hofbauer, H. *NO and N₂O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat*. 1999, Bioresource Technology, str. 39-49.
4. Nussbaumer, T. *Energie. Energie aus biomasse*. 2001, Svez. 2888-389.
5. *NO and N₂O formation during the combustion of wood, straw, malt waste and peat*. Winter F., Wartha C., Hofbauer H. 1999, Bioresource Technology, str. 39-49.
6. *Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion*. Miller, J.A. and Bowman, C.T. 1989, Progress in Energy and Combustion Science, str. 287-338.
7. Dean, A. and Bozzelli, J. Gas phase combustion chemistry (chapter 2). *Combustion chemistry of nitrogen*. 2000.
8. *Fuel nitrogen conversion in solid fuel*. Glarborg, P., Jensen, A.D., and Johnsson, J.E. 2003, Progress in Energy and Combustion Science, str. 1-25.
9. *Formation and reduction of nitric oxide in fixed-bed combustion of straw*. Zhou, H., Jensen, A.D., Glarborg, P., and Kavaliauskas, A. 2006, Fuel, str. 705-716.
10. Turns, S.R. *An introduction to combustion*. s.l. : McGraw-Hill, 1996.
11. *International 13th symposium on combustion*. Fenimore, C.P. s.l. : The Combustion Institute, 1971.
12. *The science and technology of combustion in highly preheated air*. Katskuki, M. s.l. : The Combustion Institute, 1998. In 27th Symp.(Int'l) on Combustion.
13. Smoot, L.D., Pratt, D.T. *Pulverized-coal Combustion and Gasification*. s.l. : Plenum Press, 1979.
14. *CFD Modeling and Optimizing of a New Ecotube Air System for Clean combustion of Coal in a Grate Fired Boiler*. Dong W., Vaclavinek J., Blasiak W. s.l. : Journal of the Institute of Energy, 1999.
15. Dos Santos, A.M. *MSW incineration: Mathematical modeling*. Stocholm : Royal Institute of Sweden, 1992.
16. *Analysis of Grate Firing of Wood with Numerical Flow Simulation*. Huttunen, M., Saastamoinen, J. i dr. 2004, IFRF Combustion Journal, str. 200401.
17. *Propagation of the ignition front in beds of wood particles*. Saastamoinen, J.J., Taipale, R. s.l. : Combustion and Flame, 2000, Svez. 123.
18. *Mathematical modelling of the Waste Incinerator Burning Bed*. Goh, Y.R. i dr. 1998, Journal of the Institute Of Energy.
19. Smoot, L.D., Pratt, D.T. *Pulverized-coal Combustion and Gasification*. s.l. : Plenum Press, 1979.
20. *Kinetics of thermal decomposition of pulverised coal particles*. Bazdoich, S., Hawksley, P. 1970, Ind Eng Chemical Process Development, str. 521-30.
21. *Mathematical modelling of MSW incineration on a traveling bed*. Yang, Y.B. et al. 2002, Waste manage, str. 369-380.
22. *Kinetics of carbon monoxide oxidation in postflame gases*. Howard, J.B., William, G.C., Fine, D.H. s.l. : The Combustion institute, 1973. 14th Symposium (International) on Combustion. str. 975-986.

23. Siminski, V.J., Wright, F.J., Edelman, R.B., Economos, C. *Research on methods of improving the combustion characteristics of liquid hydrocarbon fuels*. s.l. : Air Force Aeropropulsion Laboratory,, 1972.
24. *Reactions between carbon and oxygen*. Arther, J.A. s.l. : Faraday Society 47, 1951, Faraday society, str. 164-178.
25. *A detailed model for devolatilization and combustion of waste material in packed beds*. Peters, B. Lisbon : an., 1995. Proceedings of the Third European Conference on Industrial Furnaces and Boilers. str. 18-21.
26. Wakao N, Kaguei S. *Heat and mass transfer in packed beds*. London : Gordon & Breach, 1982.
27. Patankar, S.V.,. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. s.l. : Hemisphere, 1980.
28. Inc., FLUENT. *FLUENT 6.2 User's Guide*. 2005.
29. *Comparison of gasification and pyrolysis of thermal pre-treated wood board waste*. Girods, P., Anthony Dufour, Yann Rogaume, Caroline Rogaume, Andre´ Zoulalian. 2009, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, str. 171-183.
30. BIOBIB - A Database for biofuels. [Mrežno] TU Wien, 2011. www.vt.tuwien.ac.at/biobib/biobib.html.
31. Lawn, C.J., Principles of combustion engineering for boilers, Academic Press, London, 1987.
32. Zeldovich, J.B., Oxidation of nitrogen in combustion and explosion, Academic des Sciences de' URSS, vol 51, no.3, 217-220, 1946.
33. Fenimore, C.P., International 13th symposium on combustion, 373, The Combustion Institute, 1971.
32. Houser, P.J., Hull, M., Alway, R., Biftu, T., Internal journal of chemical kinetics 12, 577, 1980.
33. Warnatz, J., Mass, U., Dibble, R.W., Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation, Springer Verlag, 1996.
34. Launder, B.E., Spalding, D.B., Mathematical models of turbulence, Academic Press, London, 1972.
35. Jones, W.P., Whitelaw, J.H., Calculation methods for reacting turbulent flows: A review, Combustion and Flame 48, 1-26, 1982.
36. Ranz, W.E., Marshall Jr., W.R., Evaporation from Drops Part I., Chemical Engineering Progress 48,141-146, 1952.
37. Ranz, W.E., Marshall Jr., W.R., Evaporation from Drops Part II., Chemical Engineering Progress 48,173-180,1952.
38. Perry, R.H., Gree, D.W., Maloney, I.O., Perry's chemical engineers' handbook, McGraw Hill, New York, 1984.
39. Ganapathy, V., Industrial boilers and heat recovery steam generators, Marcel Dekker Inc., 2003.
40. Baukal, C.E., Heat transfer in industrial combustion, CRC Press, 2000.
41. Frassoldati, A., Frigerio, S., Colombo, E., Inzoli, F., Faravelli, T., Determination of NOx emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure, Chemical Engineering Science 60, 2851-2869, 2005.
42. Saario, A., Rebola, A., Coelho, P.J., Costa, M., Oksanen, A., Heavy fuel oil combustion in a cylindrical laboratory furnace: measurments and modeling, Fuel 84, 359-369, 2005.
43. Shihadeh, A.L., Toqan, M.A., Beer, J.M., Lewis, P.F., Teare, J.D., Jimenez, J.L., Barta, L., Low NOx emission from aerodynamically staged oil-air turbulent diffusion flames, Trans. of ASME FACT-18, Combustion modelling, scaling and air toxins, 1994.

44. Falcitelli, M., Pasini, S., Tognotti, L., Modelling practical combustion systems and predicting NO_x emissions with an integrated CFD based approach, *Computers and Chemical Engineering* 26,1171–1183, 2004.
45. Borman, G.L., Ragland, K.W., *Combustion Engineering*, McGraw-Hill, 1998.
46. Schneider, D. R., Istraživanje mogućnosti redukcije SO₃ pri izgaranju teškog loživog ulja, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučiliste u Zagrebu, Zagreb, 2002.
47. Smith, T.F. Shen, Z.F. *Evaluation of coefficients for the weighted sum of gray gases model*, *Journal of Heat Transfer* 115, 1002-1012. 1993.
48. Coppalle, A., Vervisch, P., *Total emissivities of high-temperature flames*, *Combustion and Flame* 49, 101-108, 1983.
49. Denison, M.K., Webb, B.W., *A spectral line-based weighted-sum-of-gray-gases model for arbitrary RTE solvers*, *Journal of Heat Transfer* 115,1002-1012, 1993.
50. Yilmaz, A., Paresh, D., *Individual burner air flow measurement and CFD modeling expedites low NO_x burner optimization and boiler commissioning*, Electric Power Conference, Houston, 2003.
51. Zhao, Q.W., Chan, C.K., Zhao, H.F., *Simulation of aerodynamics and combustion in open swirl flow*, Department of Applied Mathematics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 1999.
52. Coppalle, A., Vervisch, P., *The Total emissivities of high-temperature flames*, *Combust. Flame* 49,101-108, 1983.
53. Baulch, D. L. et al, *Evaluated kinetic data for combustion modelling*, *J. Physical and Chemical Reference Data*, 21, 1992.
54. Westbrook, C., Dryer, F., *Chemical kinetic modelling of hydrocarbon combustion*, *Prog. Energy Combustion Science*, 1984.
55. De Soete, G. G., Overall reaction rates of NO and N₂ formation from fuel nitrogen, In 15th Symp. on Combustion,1093-1102. The Combustion Institute, 1975.
56. Warnatz, J., NO_x formation in high temperature processes, University of Stuttgart, 2001.
57. Dragičević, V., *Utjecaj sastava goriva na emisije dušikovih oksida (NO_x) iz ložišta na tekuća goriva*, Međunarodni kongres Energija i okoliš XVIII, 221-222, Opatija, 2002.
58. Dragičević, V., Mrakovčić, T., Matković, N., *Mjerenje emisije štetnih sastojaka iz stacionarnih izvora*, Zbornik međunarodnog znanstveno-stručnog skupa Energetska i procesna postrojenja, 31, Dubrovnik, 2002.
59. Kandamby, N., Lazopoulos, G., Lockwood, F. C., Perera, A.,Vigevano, L., *Mathematical modeling of NO_x emission reduction by the use of reburn technology in utility boilers*, ASME Int. joint power generation conference and exhibition, Houston, Texas, 1996.
60. Perera, A.,Antifora, A., Sala, M.,Vigevano, L., *NO_x emissions in combustion systems of coal fired furnaces with a reducing environment: predictions and measurements*, Fourth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Lisbon, Portugal, 1997.
61. Prelec, Z., Milošević, Š., *Environmental aspects od cogeneration plants*, Međunarodni kongres Energija i okoliš XVII, 221-222, Opatija, 2000.
62. Leung, K. M., Lindsted, R. P., *Detailed kinetic modeling of C1-C3 alkane diffusion flames*, *Combustion and Flame* 102,129-160, 1995.

POPIS OZNAKA I SIMBOLA

a	- Koeficijent polinoma interpolacije [-]
a	- Koeficijent temperaturne vodljivosti [m^2/s]
A	- Površina [m^2]
A_i	- Predeksponencijalni faktor [1/s]
a_e	- Faktor utjecaja emisivnosti [-]
b_e	- Temperaturni koeficijent polinoma [-]
c	- Omjer atomarnih brojeva [-]
c	- Koncentracija tvari [mol/m^3]
C	- Koeficijent modela turbulencije [-]
C	- Integracijska konstanta [-]
C_D	- Koeficijent otpora strujanju [-]
c_p	- Specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku [J/kg K]
D	- Koeficijent difuzije [m^2/s]
d	- Promjer [m]
D_H	- Hidraulički promjer [m]
E	- Energija [J]
E	- Emisija [W/m^3]
E_a	- Energija aktivacije [J/mol]
f	- Udjel smjese [-]
f	- Faktor raspršenja [-]
F_D	- Koeficijent sile otpora strujanju [1/s]
G	- Gibbsova slobodna energija [J]
G_k	- Produkcija turbulentne kinetičke energije [$\text{J}/\text{m}^3 \text{ s}$]
h	- Specifična entalpija [J/kg]
H	- Ukupna specifična entalpija [J/kg]
H_d	- Donja ogrjevna moć [J/kg]
H_g	- Gornja ogrjevna moć [J/kg]
I	- Intenzitet zračenja [W/m^2]
J	- Difuzijski tok [$\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$]
K	- Konstanta ravnoteže definirana preko parcijalnih tlakova [$(\text{N}/\text{m}^2)^{\Delta n}$]
K	- Broj komponenata smjese [-]
k	- Turbulentna kinetička energija [J/kg]
L	- Rad [J]
L	- Duljina [m]
m	- Masa [kg]
\dot{m}	- Maseni protok [kg/s]
M	- Molarna masa [mol/kg]
n	- Količina tvari [mol]
n	- Koeficijent loma [-]
N	- Atomarni broj [-]
N	- Broj segmenata podjele [-]
N_f	- Broj ploha konačnog volumena [-]
N_I	- Broj sivih plinova [-]
N_S	- Ukupan broj sastojaka u smjesi plinova [-]
p	- Tlak [Pa]
p_i	- Parcijalni tlak [Pa]

p_z	- Tlak zasićenja [Pa]
\dot{q}	- Specifični toplinski tok [$J/m^2 s$]
Q	- Toplina [J]
\dot{Q}	- Toplinski tok [J/s]
r	- Latentna toplina [J/kg]
r	- Polumjer [m]
r	- Uniformno distribuiran slučajni broj
s	- Specifična entropija [J/kg K]
s	- Duljina puta [m]
\vec{s}	- Vektor smjera zračenja [-]
S	- Broj sastojaka smjese [-]
S	- Izvorni član jednadžbe očuvanja
$S_{i,j}$	- Tenzor brzine deformacije [1/s]
T	- Temperatura [K]
t	- Vrijeme [s]
T_f	- Temperatura kapljice goriva [K]
u, U	- Brzina [m/s]
V	- Volumen [m^3]
X	- Molarni udjel [mol/mol]
x	- koordinata pravokutnog koordinatnog sustava [m]
Y	- Maseni udjel [kg/kg]
Z	- Maseni udjel elementa u smjesi [-]
α	- Parametar β -funkcije [-]
α	- Koeficijent apsorpcije [1/m]
α	- Koeficijent prijelaza topline konvekcijom [W/m^2K]
α_i	- Koeficijent apsorpcije i-tog sivog plina [s^2/kg]
α_e	- Faktor utjecaja emisivnosti [-]
β	- Parametar β -funkcije [-]
Γ	- Difuzivnost [kg/ms]
δ	- Debljina graničnog sloja [m]
ε	- Emisivnost [-]
ε	- Turbulentna disipacija [m^2/s^3]
ξ	- Normalno distribuiran slučajni broj [-]
η	- Faktor iskoristivosti [-]
κ	- Katmanova konstanta [-]
λ	- Koeficijent toplinske vodljivosti [W/mK]
λ	- Koeficijent pretička zraka [-]
μ	- Dinamička viskoznost [Pa s]
μ	- Kemijski potencijal [J/mol ²]
ν	- Kinematska viskoznost [m^2/s]
ν	- Stehiometrijski koeficijent [-]
Π	- Coleov parametar [-]
ρ	- Gustoća [kg/m^3]
σ_{ij}	- Tenzor naprezanja [N/m ²]
σ_{kap}	- Ekvivalentni faktor raspršenja kapljice [1/m]
σ_s	- Koeficijent raspršenja zračenja [1/m]

τ	- Tangencijalno naprezanje [N/m ²]
τ_c	- Vrijeme prolaska kapljice kroz vrtlog [s]
τ_e	- Vrijeme trajanja turbulentnog vrtloga [s]
τ_i	- Vrijeme zakašnjenja paljenja [s]
τ_{ij}	- Tensor viskoznih naprezanja [N/m ²]
τ_{kap}	- Vrijeme relaksacije kapljice [s]
τ_L	- Lagrangeovo vrijeme integracije [s]
Φ	- Azimutni kut [rad]
Φ	- Ekvivalentni omjer zraka i goriva [-]
Φ, φ	- Skalar [-]
Φ	- Fazna funkcija [-]
Ω	- Prostorni kut [srad]
ω	- Prostorni kut [srad]
Ω_{ij}	- Tensor brzine deformacije [1/s]

Donji indeksi

0	- Početno stanje
∞	- Kontinuirana faza
<i>bp</i>	- Točka ključanja
<i>eff</i>	- Efektivno
<i>el</i>	- Kemijski element
<i>f</i>	- Formacija
<i>f</i>	- Para diskretne faze
<i>f</i>	- Ploha konačnog volumena
<i>f</i>	- Sila
<i>g</i>	- Gorivo
<i>H</i>	- Entalpija
<i>i</i>	- Indeks
<i>isp</i>	- Isparivanje
<i>iz</i>	- Izlazno stanje
<i>j</i>	- Indeks
<i>k</i>	- Indeks
<i>kap</i>	- Kapljica
<i>L</i>	- Duljina
<i>m</i>	- Masa
<i>M</i>	- Molarni udjel
<i>max</i>	- Maksimalno
<i>min</i>	- Minimalno
<i>oks</i>	- Oksidant
<i>P</i>	- Promatrani konačni volumen
<i>p</i>	- Vodena para
<i>R</i>	- Zračenje
<i>ref</i>	- Referentno stanje

<i>s</i>	- Površina
<i>sim</i>	- Simetrija
<i>t</i>	- Turbulencija
<i>uk</i>	- Ukupno
<i>ul</i>	- Ulazno stanje
<i>z</i>	- Zrak

Gornji indeksi

0	- Standardno stanje
<i>b</i>	- Izgoreno
<i>m</i>	- Srednja vrijednost
<i>u</i>	- Neizgoreno

Bezdimenzijske značajke

<i>Le</i>	- Lewisov broj
<i>Nu</i>	- Nusseltov broj
<i>Pe</i>	- Pecleov broj
<i>Pr</i>	- Prandtlov broj
<i>Re</i>	- Reynoldsov broj
<i>Sc</i>	- Schmidtov broj
σ_t	- Turbulentni Prandtl-Schmidtov broj

Konstante

<i>g</i>	- Ubrzanje sile gravitacije [m/s^2]
$I_{i,j}$	- Jedinični tenzor [-]
N_L	- Avogadrov broj [-]
<i>R</i>	- Opća plinska konstanta [J/mol K]
σ	- Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W/m}^2 \text{K}^4$]

POPIS SLIKA

Slika 1 Prikaz kružnog prijenosa CO ₂ u atmosferi.....	4
Slika 2 Razlika između emisija CO ₂ kod izgaranja biomase i nafte	5
Slika 3 Podjela ložišta za biomasu prema vrsti i brzini strujanja (4)	11
Slika 4 Ložište s dovodom goriva odozdo	12
Slika 5 Ložište s pomičnom rešetkom.....	12
Slika 6 Shematski prikaz procesa u ložištu	13
Slika 7 Prikaz procesa kod izgaranja biomase u sloju na rešetki	14
Slika 8 Udio vlage ($\rho H_2O_{tek.}$) u ovisnosti o vremenu sušenja porozne čestice biomase	14
Slika 9 Brzina sušenja porozne čestice biomase $d(\rho H_2O_{tek.})/dt$ u ovisnosti o vremenu	14
Slika 10 Devolatilizacija i oksidacija biomase (reakcije)	16
Slika 11 Reakcije koje opisuju oksidaciju NH ₃ u zoni izgaranja prema (6).....	20
Slika 12 Oksidacija HCN u pri tipičnim uvjetima u plamenu (6)	21
Slika 13 Reakcije radikala CH s NO (6)	22
Slika 14 Promjena molarnih udjela radikala O i OH	25
Slika 15 Mehanizam oksidacije C ₁ i C ₂ ugljikovodika	26
Slika 16 Izvedbe stupnjevanog dovođenja zraka i goriva	28
Slika 17 Tipično ložište s zakošenom rešetkom.....	30
Slika 18 Zonalni model ložišta s izgaranjem biomase u sloju	31
Slika 19 Shematski prikaz 1-D modela sloja biomase	32
Slika 20 Shema sloja biomase na pomičnoj rešetki	38
Slika 21 Diskretizacija domene po visini sloja biomase	44
Slika 22 Shematski prikaz postupka numeričkih simulacija.....	45
Slika 23 Prijenos topline zračenjem	58
Slika 24 Pojednostavnjeni mehanizam nastanka NO iz goriva uz HCN kao međuprodukt	65
Slika 25 Pojednostavnjeni mehanizam nastanka NO iz goriva uz NH ₃ kao međuprodukt.....	66
Slika 26 De Soeteov globalni model mehanizama redukcije NO	69
Slika 28 Postrojenje sa zasebnim ložištem i generatorom topline	72
Slika 29 Presjek horizontalne rešetke i sloja biomase.....	73
Slika 30 Tlocrt ispitivanog postrojenja	74
Slika 31 Povrat dimnih plinova u zonu izgaranja - recirkulacija	74
Slika 32 Drvni otpad iz procesa proizvodnje namještaja	75
Slika 33 Uzorak biomase nakon usitnjavanja	75
Slika 34 Prikaz komore izgaranja (ložišta)	76
Slika 35 Plan ispitivanja - mjerna mjesta	77
Slika 36 Mjerenje protoka na polaznoj cijevi generatora topline.....	79
Slika 37 Analizator dimnih plinova Testo 350XL	81
Slika 38 Sustav za izokinetičko uzorkovanje čestica u plinovima SICK SCH-501.....	81
Slika 39 Otvor za mjerenje temperature u ložištu	82
Slika 40 Mjerenje temperature i sastava plinova u ložištu.....	82
Slika 41 Oscilator s otvorima	83
Slika 42 Uzorak goriva s naznakom veličine	83
Slika 43 Krupnije čestice goriva	83
Slika 44 Preslika izvještaja o ispitivanju uzorka krutog goriva (biomase)	85
Slika 45 Prikaz modela generatora topline s mrežom kontrolnih volumena.....	91
Slika 46 Detalj diskretizacije prostora ložišta	92

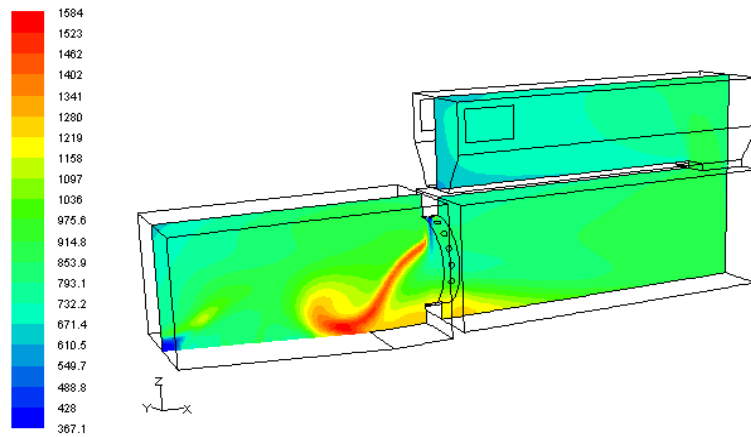
Slika 47 Detalj uvoda sekundarnog zraka	93
Slika 48 Srednja temperatura plinova na izlazu iz sloja biomase	94
Slika 49 Srednja brzina plinova na izlazu iz sloja biomase	94
Slika 50 Maseni udjel ugljikovodika C_nH_m	95
Slika 51 Maseni udjel ugljik(II)-oksida	95
Slika 52 Udjel kisika u plinovima koji izlaze iz sloja biomase.....	96
Slika 53 Udjel dušik(II)-oksida u plinovima koji izlaze iz sloja biomase	96
Slika 54 Proječne vrijednosti fizikalnih veličina za pojedina pogonska stanja.....	97
Slika 55 Prosječni maseni protoci plinova na izlazu iz sloja biomase	97
Slika 56 Koncentracija ugljik(II)-oksida u [ppm _(vol.)]	98
Slika 57 Koncentracija kisika na izlazu iz ložišta [%]	98
Slika 58 Koncentracija dušik(II)-oksida na izlazu iz generatora topline [ppm _(vol.)].....	99
Slika 59 Temperatura na izlazu iz računalne domene numeričke simulacije i temperatura dimnih plinova izmjerena na izlazu iz generatora topline [OC]	99
Slika 60 Toplinski tok na stijenke ložišta i generatora topline [kW].....	100
Slika 61 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima na izlazu iz generatora topline [ppmvol.] kao funkcija primarnog pretička zraka.....	101
Slika 62 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppmvol.] kao funkcija primarnog pretička zraka za različita opterećenja	101
Slika 63 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppm] kao funkcija primarnog pretička zraka i recirkulacije dimnih plinova.....	102
Slika 64 Prijelaz topline na stijenke generatora topline [kW].....	102
Slika 65 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppm] kao funkcija vlage u gorivu i opterećenja generatora topline	103
Slika 66 Prijelaz topline kao funkcija vlage u gorivu i opterećenja generatora topline [kW].....	103
Slika 67 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [ppm] kao funkcija vlage u gorivu i opterećenja generatora topline	104
Slika 68 Temperatura dimnih plinova [°C]	104
Slika 69 Udjel kisika (O ₂) u dimnim plinovima.....	105
Slika 70 Udjel ugljik(II)-oksida (CO) u dimnim plinovima	105

POPIS TABELA

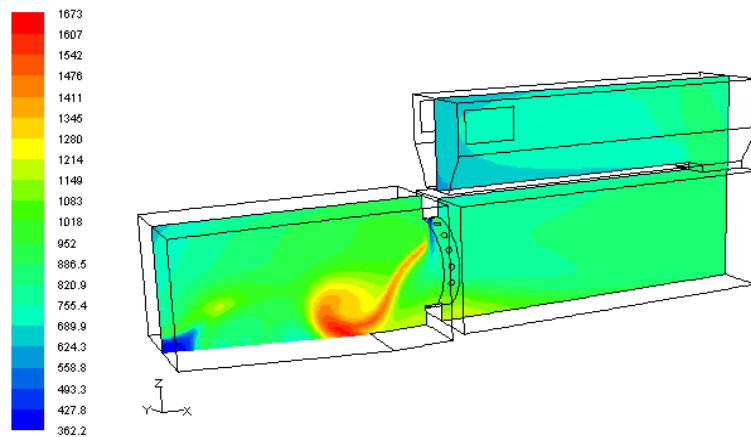
Tabela 1 Mjerenja i opterećenja	78
Tabela 2 Pogonska stanja - eksperimentalna mjerenja.....	80
Tabela 3 Protok primarnog zraka za izgaranje	80
Tabela 4 Protok sekundarnog zraka	81
Tabela 5 Rezultati određivanja sastava i temperature dimnih plinova.....	82
Tabela 6 Granulometrijska analiza goriva (biomase)	84
Tabela 7 Izračun iskoristivosti - indirektna metoda	88
Tabela 8 Izračun iskoristivosti - direktna metoda	90

POPIS PRILOGA

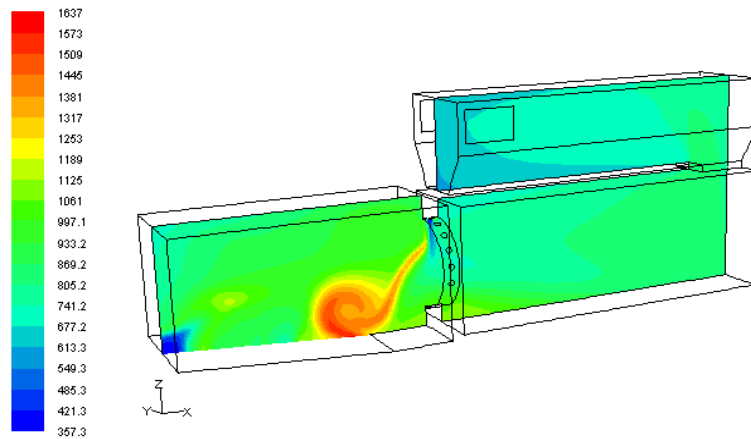
Prilog 1 Temperatura u ložištu i generatoru topline [°C] – utjecaj primarnog pretička.....	122
Prilog 2 Temperatura u ložištu i generatoru topline [°C] – utjecaj primarnog pretička.....	123
Prilog 3 Udjel kisika u dimnim plinovima [%] – utjecaj primarnog pretička.....	124
Prilog 4 Udjel kisika u dimnim plinovima [%] – utjecaj primarnog pretička.....	125
Prilog 5 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [%]– utjecaj primarnog pretička.....	126
Prilog 6 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [%] – utjecaj primarnog pretička.....	127
Prilog 7 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [%]– utjecaj primarnog pretička.....	128
Prilog 8 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [%]– utjecaj primarnog pretička.....	129
Prilog 9 Temperatura u ložištu i generatoru topline [°C] – utjecaj recirkulacije	130
Prilog 10 Udjel kisika u dimnim plinovima [%]– utjecaj recirkulacije	131
Prilog 11 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [%] – utjecaj recirkulacije	132
Prilog 12 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [%] – utjecaj recirkulacije	133
Prilog 13 Brzina i temperatura plinova na izlazu iz sloja biomase po udaljenosti od dovoda biomase – utjecaj primarnog pretičaka zraka.....	134
Prilog 14 Sastav plinova na izlazu iz sloja biomase po udaljenosti od dovoda biomase - utjecaj primarnog pretičaka zraka.....	135
Prilog 15 Sadržaj NO u plinovima iznad sloja biomase po udaljenosti od dovoda biomase - utjecaj primarnog pretičaka zraka	136



(a)



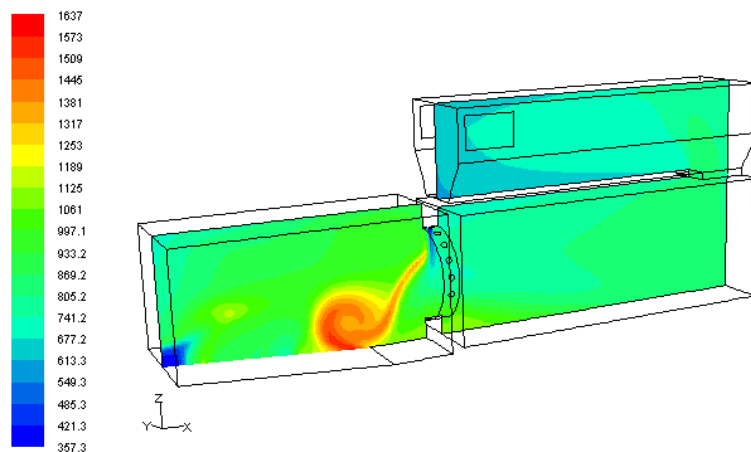
(b)



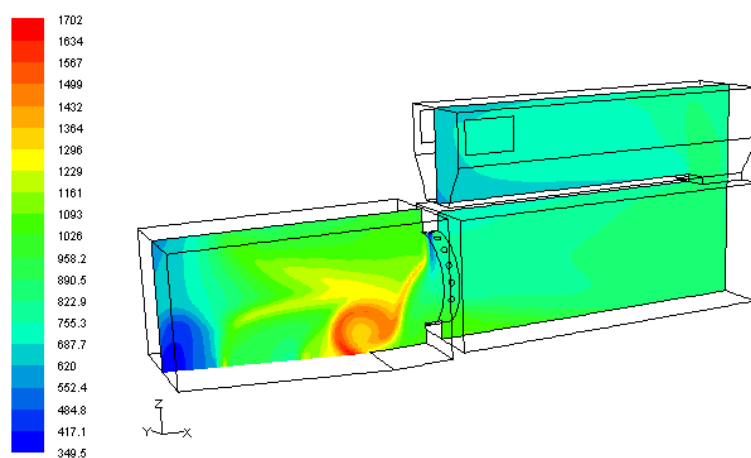
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.4, b-0.5, c-0.6

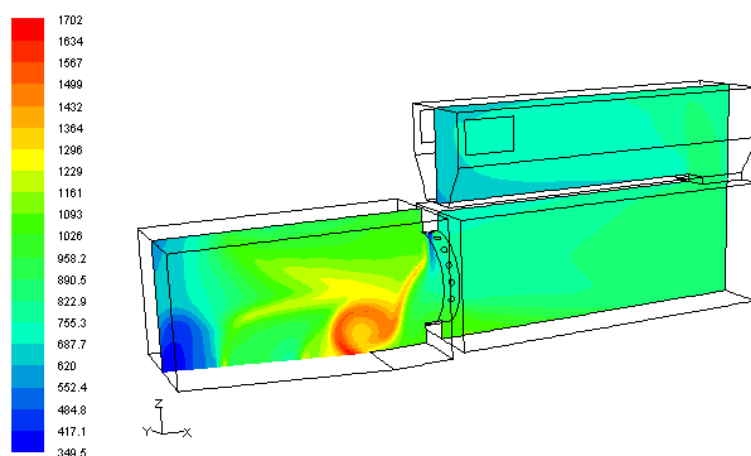
Prilog 1 Temperatura u ložištu i generatoru topline [°C] – utjecaj primarnog pretička



(a)



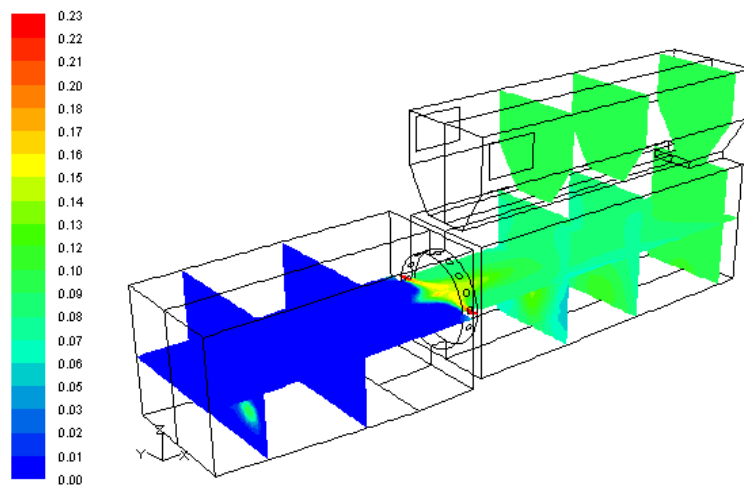
(b)



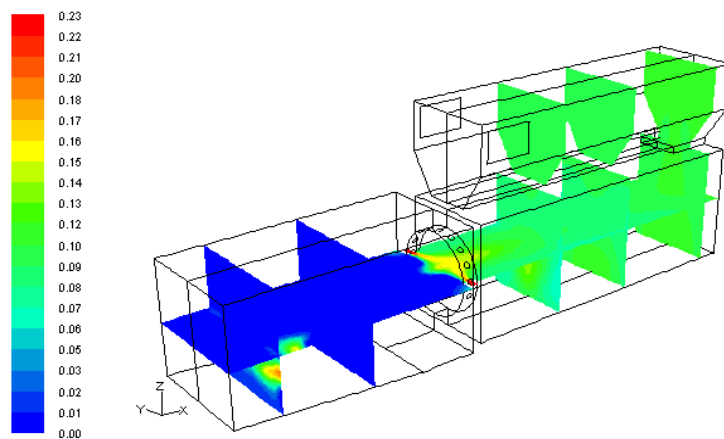
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.7, b-0.8, c-0.9

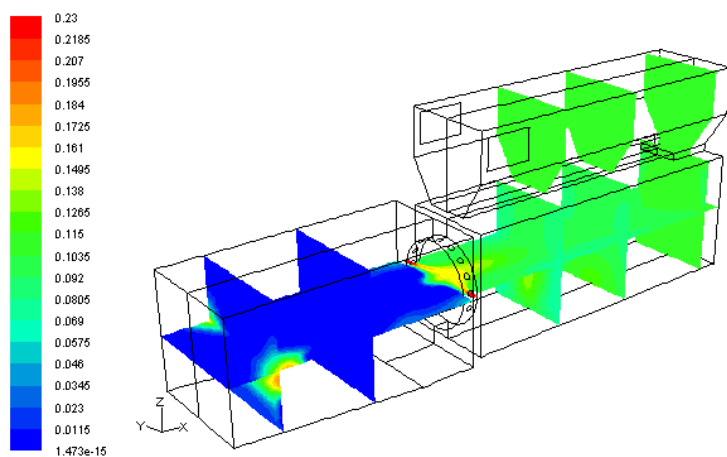
Prilog 2 Temperatura u ložištu i generatoru topline [°C] – utjecaj primarnog pretička



(a)



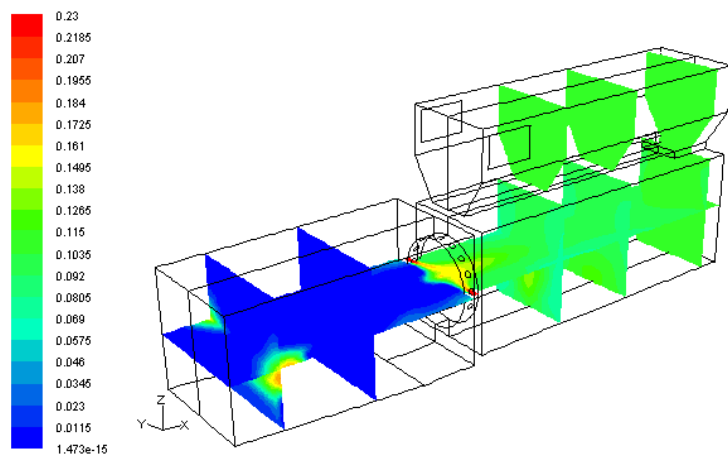
(b)



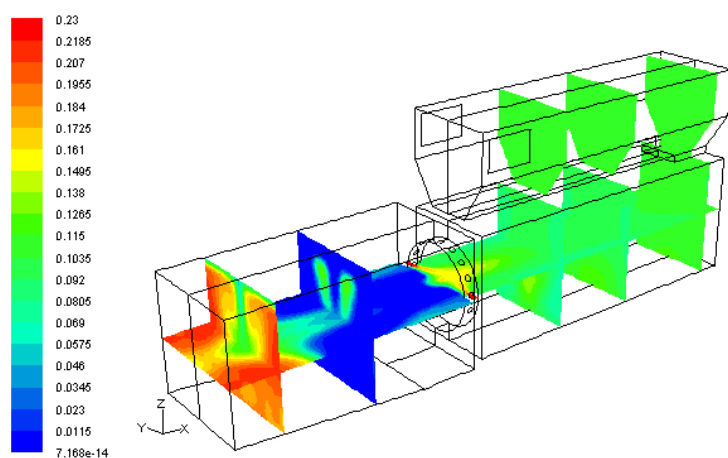
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.4, b-0.5, c-0.6

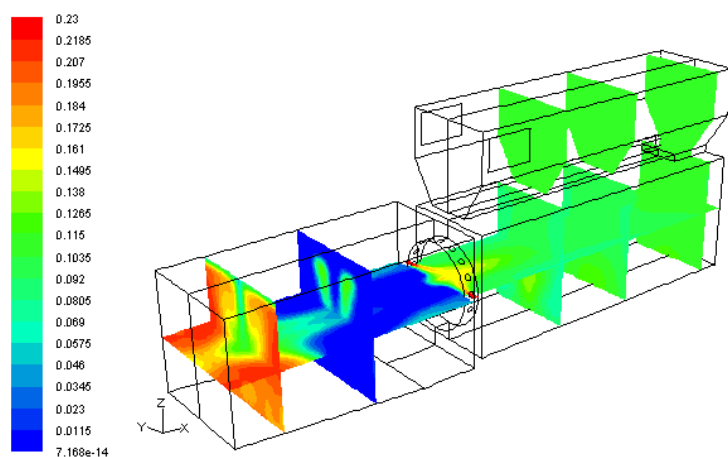
Prilog 3 Udjel kisika u dimnim plinovima [%] – utjecaj primarnog pretička



(a)



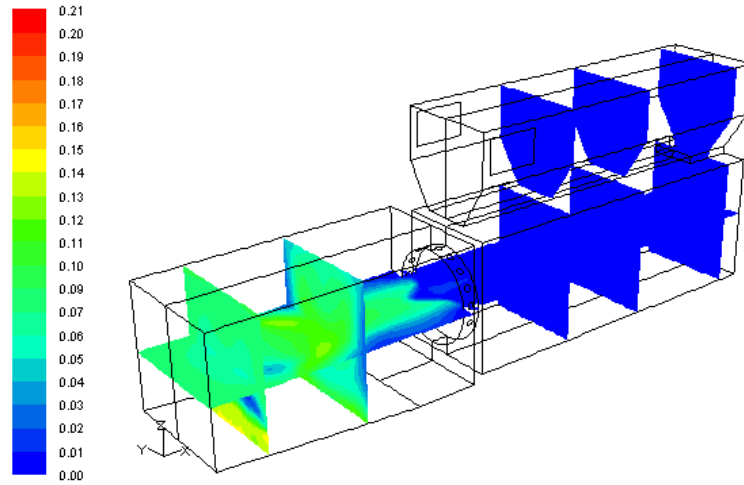
(b)



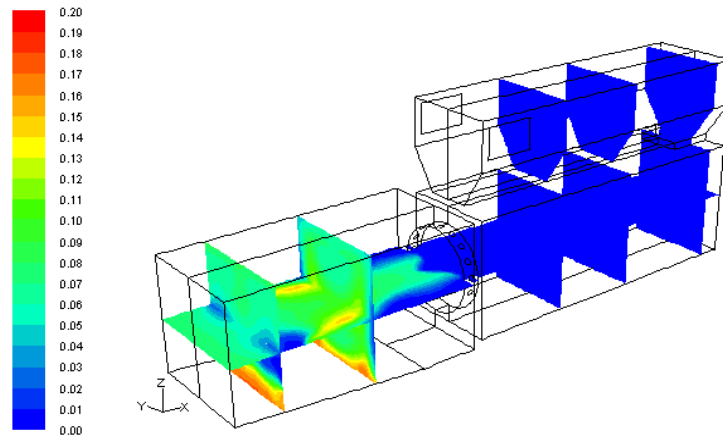
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.7, b-0.8, c-0.9

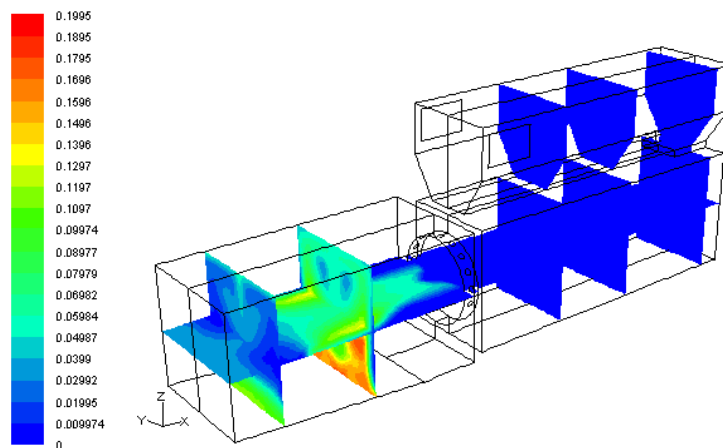
Prilog 4 Udjel kisika u dimnim plinovima [%] – utjecaj primarnog pretička



(a)



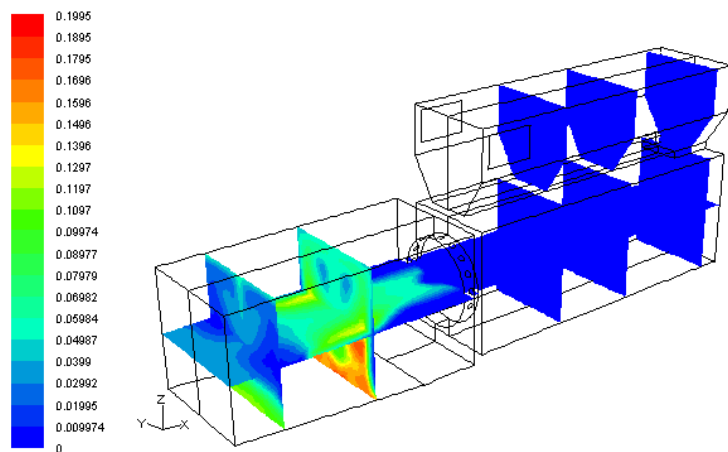
(b)



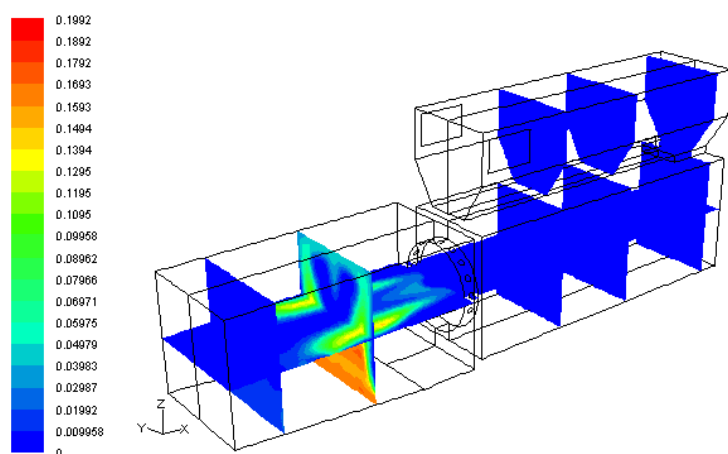
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.4, b-0.5, c-0.6

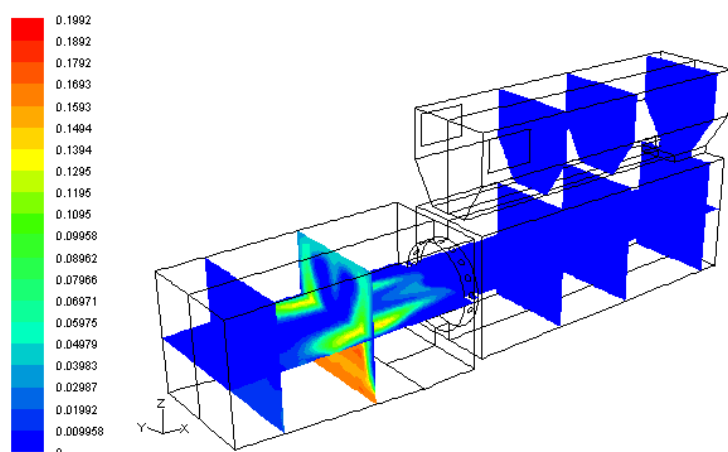
Prilog 5 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [%]– utjecaj primarnog pretička



(a)



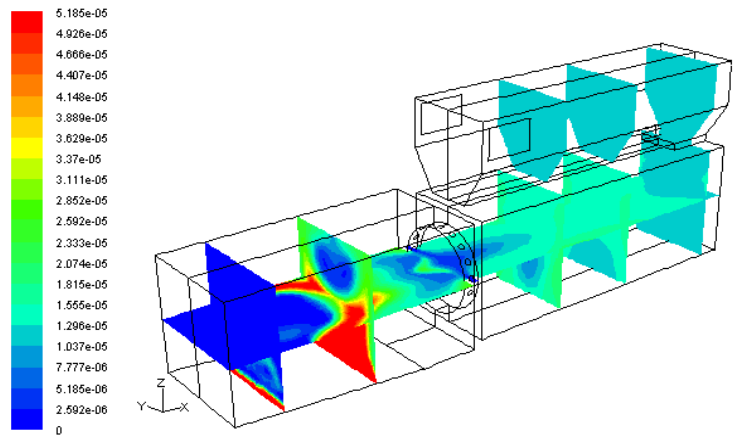
(b)



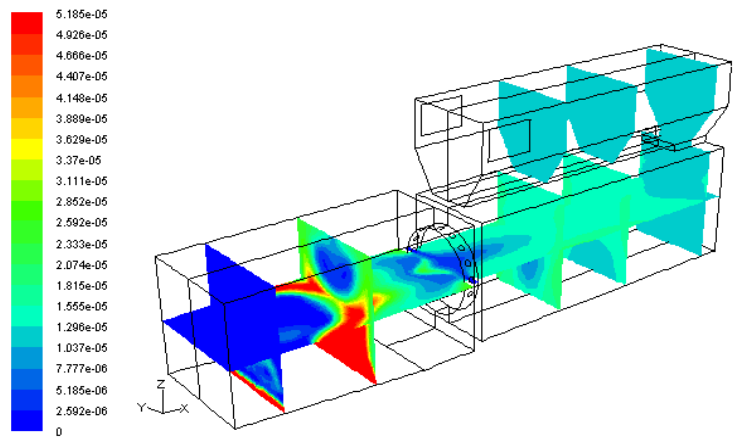
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.7, b-0.8, c-0.9

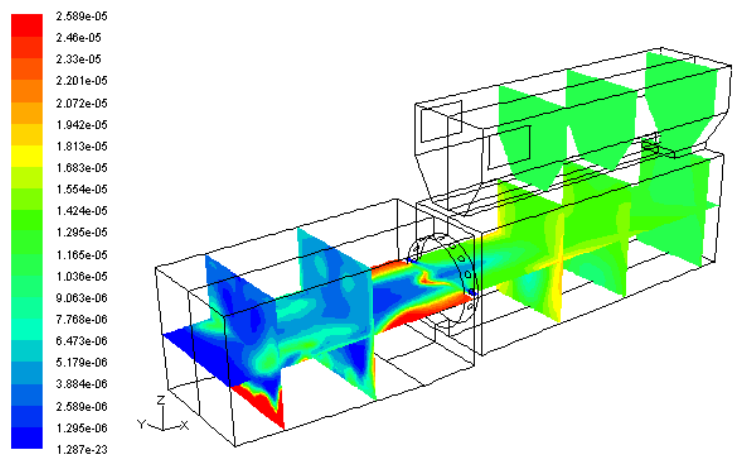
Prilog 6 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [%] – utjecaj primarnog pretička



(a)



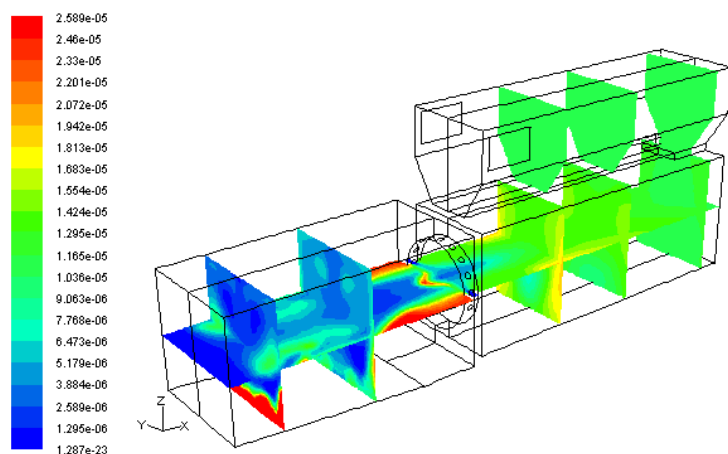
(b)



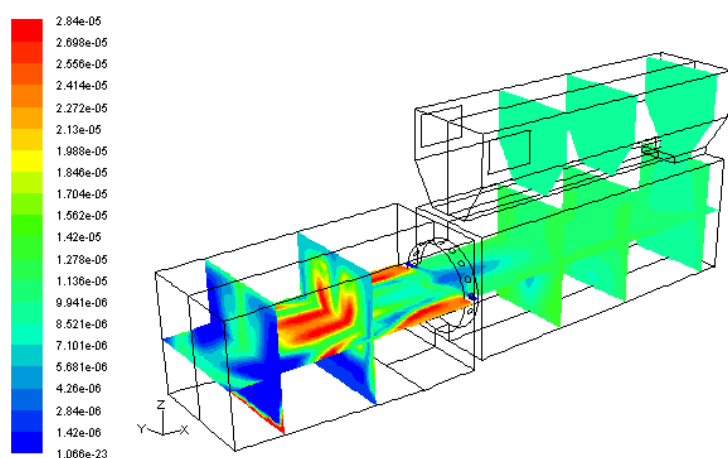
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.4, b-0.5, c-0.6

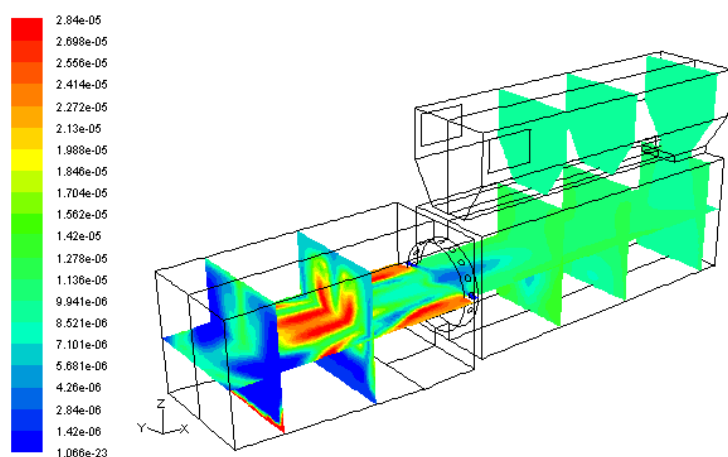
Prilog 7 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [%]– utjecaj primarnog pretička



(a)



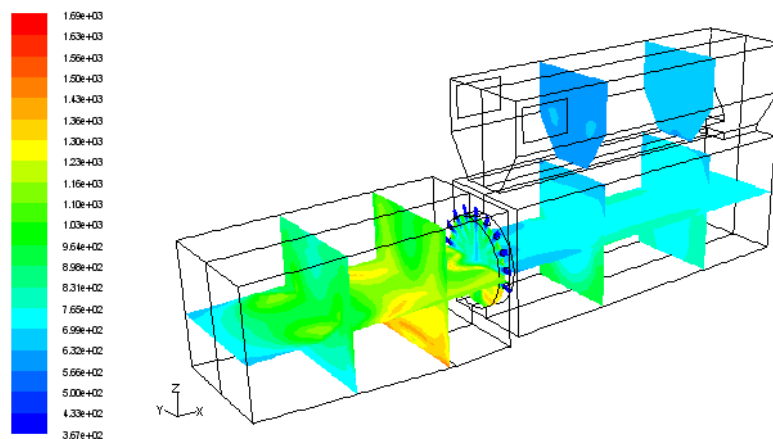
(b)



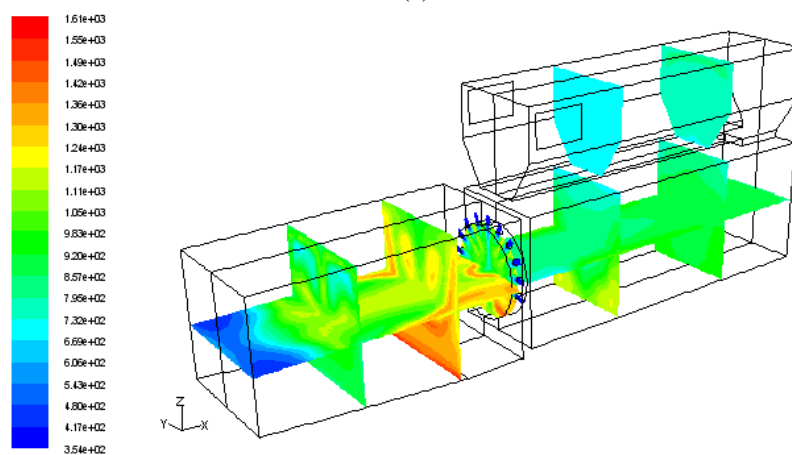
(c)

Primarni pretičak zraka : a-0.7, b-0.8, c-0.9

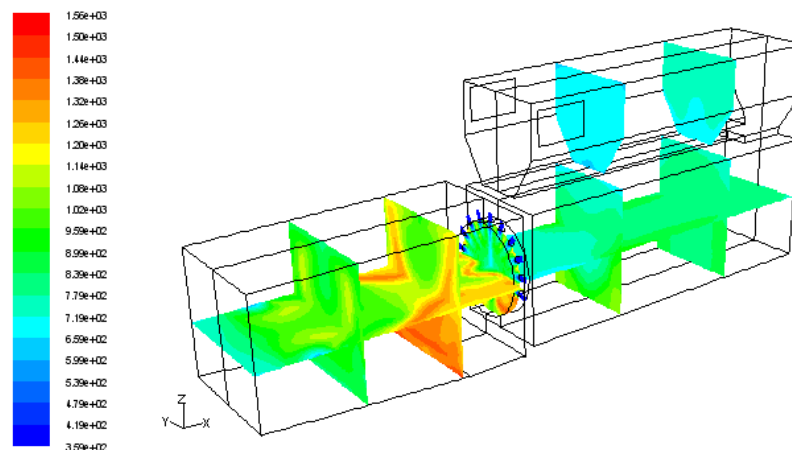
Prilog 8 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [%]– utjecaj primarnog pretička



(a)



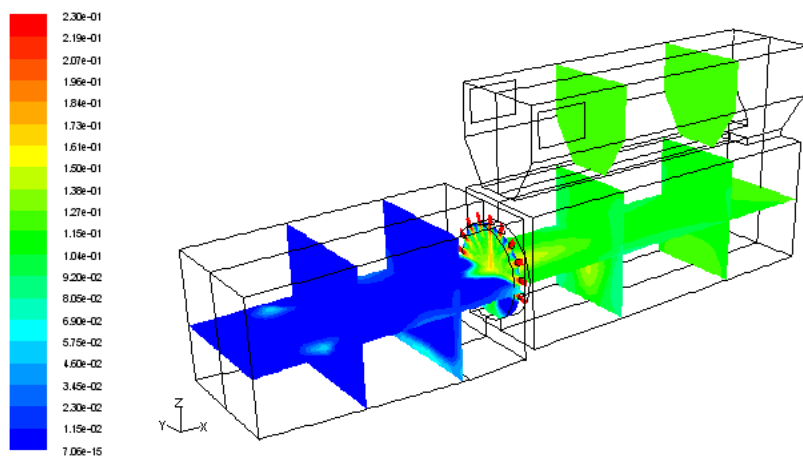
(b)



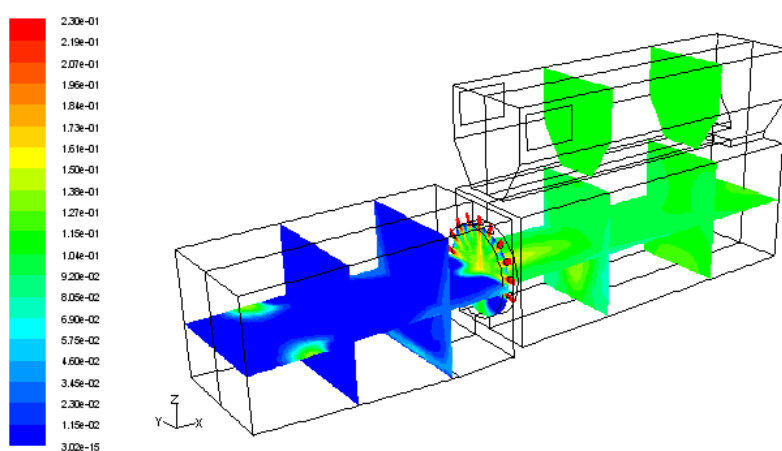
(c)

Recirkulacija dimnih plinova : a-0%, b-10%, c-20%

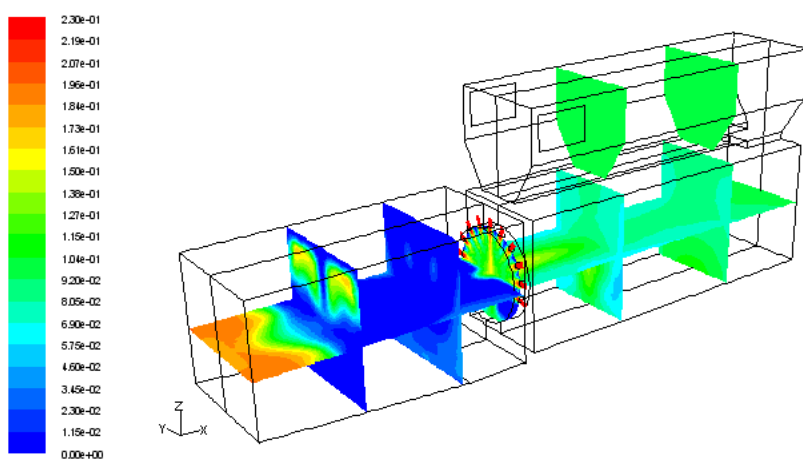
Prilog 9 Temperatura u ložištu i generatoru topline [°C] – utjecaj recirkulacije



(a)



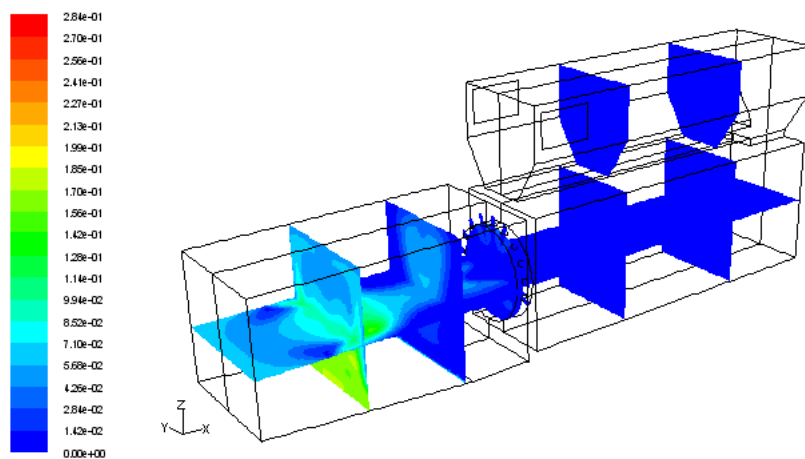
(b)



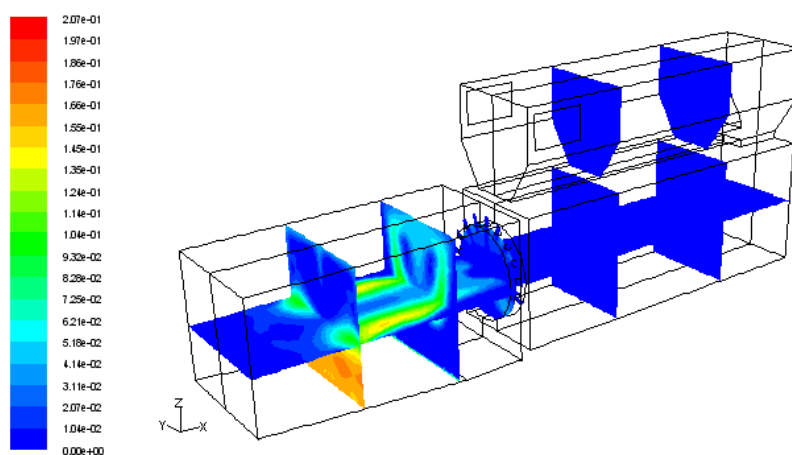
(c)

Recirkulacija dimnih plinova : a-0%, b-10%, c-20%

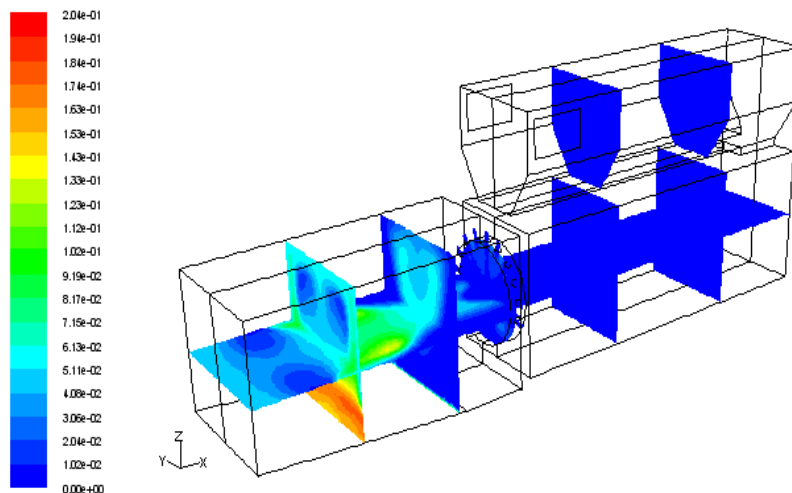
Prilog 10 Udjel kisika u dimnim plinovima [%]– utjecaj recirkulacije



(a)



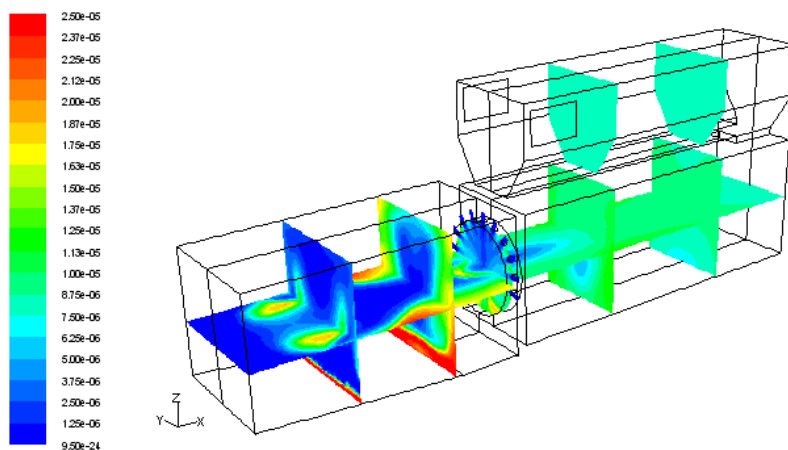
(b)



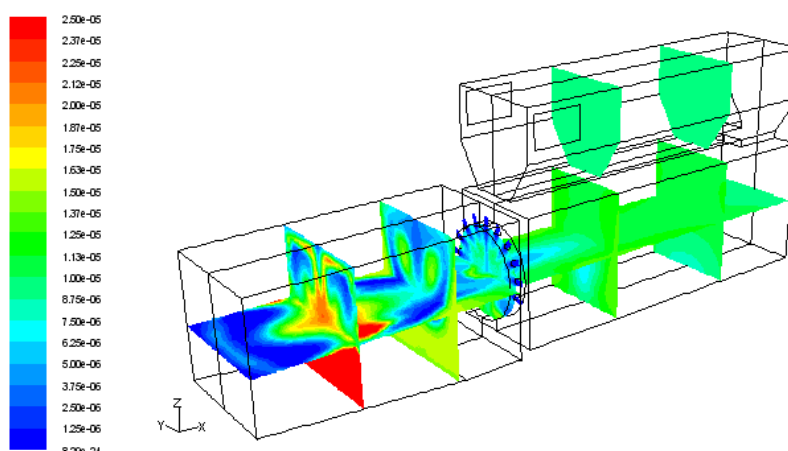
(c)

Recirkulacija dimnih plinova : a-0%, b-10%, c-20%

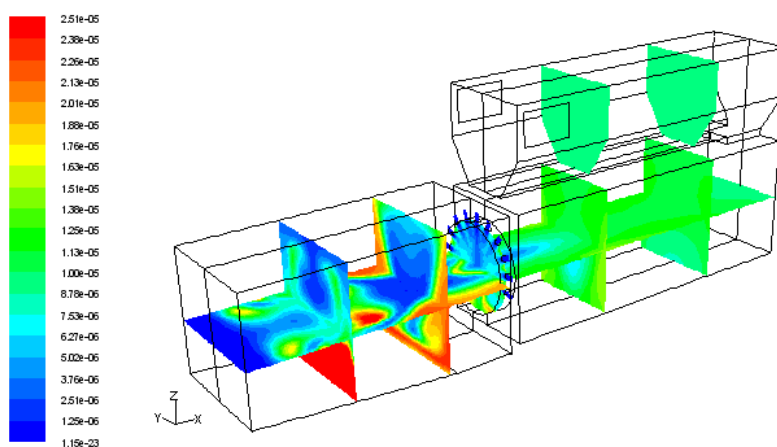
Prilog 11 Udjel ugljik(II)-oksida u dimnim plinovima [%] – utjecaj recirkulacije



(a)



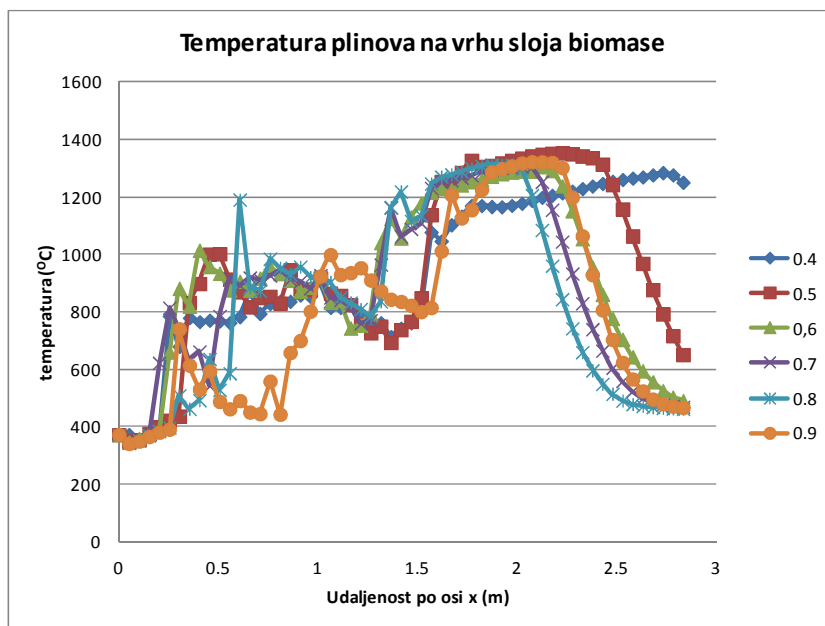
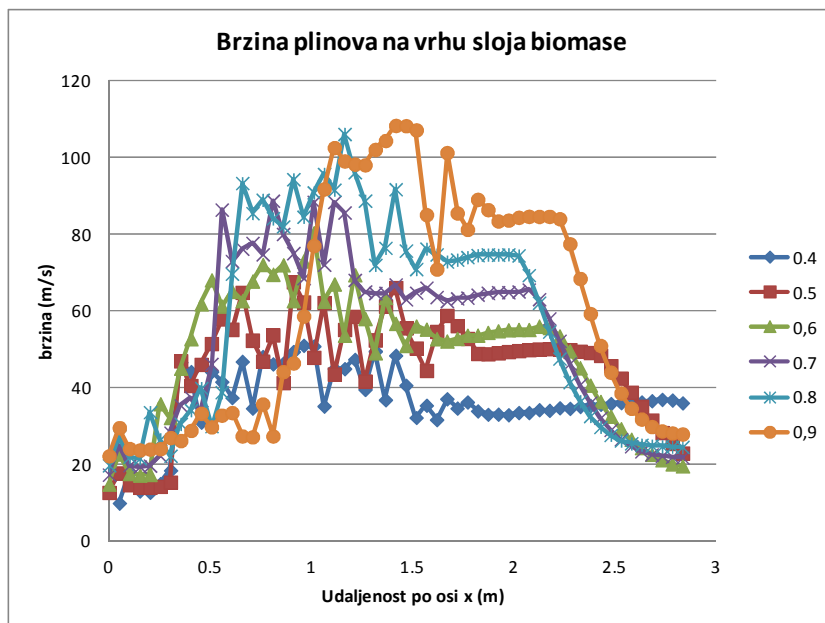
(b)



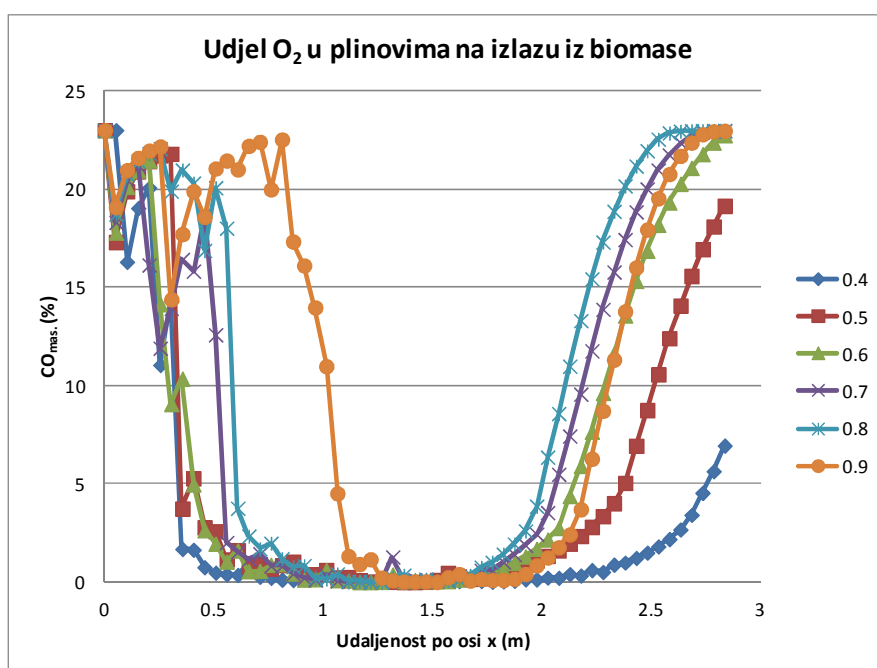
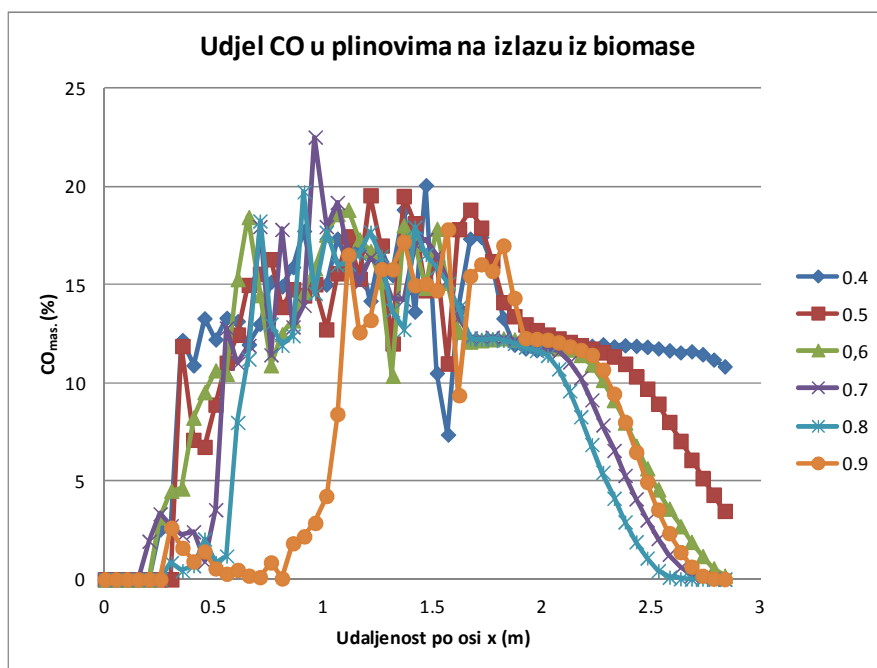
(c)

Recirkulacija dimnih plinova : a-0%, b-10%, c-20%

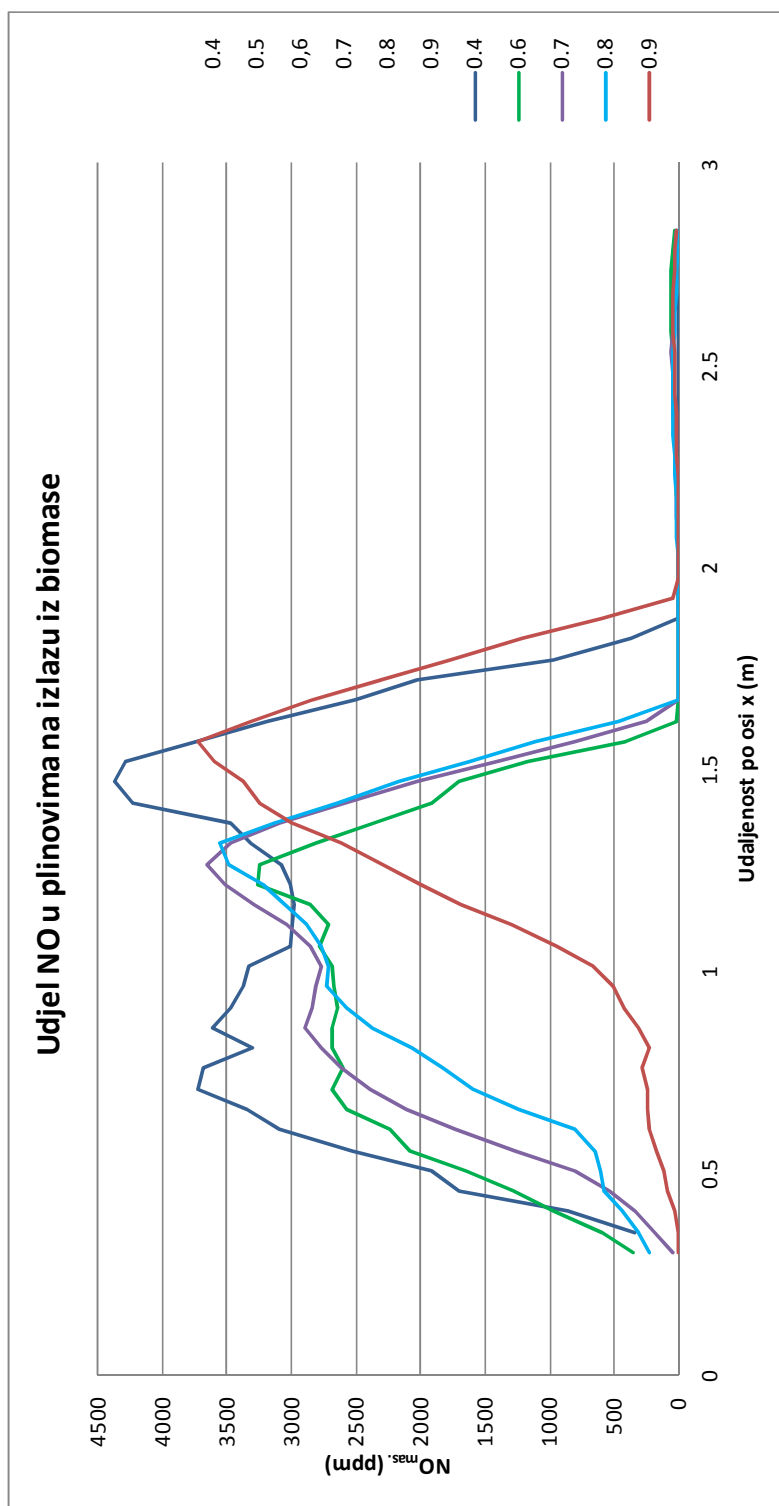
Prilog 12 Udjel dušik(II)-oksida u dimnim plinovima [%] – utjecaj recirkulacije



Prilog 13 Brzina i temperatura plinova na izlazu iz sloja biomase po udaljenosti od dovoda biomase – utjecaj primarnog pretičaka zraka



Prilog 14 Sastav plinova na izlazu iz sloja biomase po udaljenosti od dovoda biomase - utjecaj primarnog pretičaka zraka



Prilog 15 Sadržaj NO u plinovima iznad sloja biomase po udaljenosti od dovoda biomase - utjecaj primarnog pretičaka zraka

ŽIVOTOPIS

Obrazovanje

Viktor Dragičević rođen je 26. kolovoza 1976. u Rijeci. Nakon završene osnovne škole, upisuje Prvu Hrvatsku Sušačku gimnaziju u Rijeci, prirodoslovno matematički smjer, gdje je i maturirao s vrlo dobrim uspjehom. Na republičkom natjecanju iz informatike za osnovne i srednje škole u Varaždinu 1989. osvojio je treće mjesto u konkurenciji osnovnih škola. Nakon završene srednje škole upisuje Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci. Diplomirao je 2001. izradom diplomskoga rada pod naslovom *Određivanje temperaturnih polja kod stacionarnog provođenja topline* pod mentorstvom red. prof. dr. sc. Bernarda Frankovića. Iste se godine upisuje poslijediplomski studij na Tehničkom fakultetu u Rijeci, smjer Termoenergetika. U rujnu 2001. zapošljava se na Tehničkom fakultetu kao znanstveni novak. Stupanj magistra znanosti stekao je u travnju 2006. godine obranom magistarskog rada pod naslovom *Analiza utjecajnih parametara na emisiju dušikovih oksida u ložištu*, pod mentorstvom red. prof. dr. sc. Zmagoslava Preleca. U radu analiziran je utjecaj različitih pogonskih i ostalih utjecajnih parametara na nastajanje dušikovih oksida u ložištima korištenjem numeričke i eksperimentalne metode.

Nastavni rad

U svojstvu asistenta sudjeluje u nastavi na sveučilišnom preddiplomskom i dodiplomskom studiju strojarstva i stručnom studiju strojarstva, na kolegijima *Energetski i procesni uređaji*, *Energetski sustavi*, *Termoenergetska postrojenja* i *Inženjerstvo zaštite okoliša*.

Znanstveno-istraživački rad

Obnaša funkciju voditelja Laboratorija iz industrijsku energetiku i zaštitu okoliša u sklopu Zavoda za termodinamiku i energetiku na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci. Laboratorij kojem je na čelu opremljen je za mjerenje emisija štetnih tvari iz stacionarnih izvora iz područja zaštite zraka. Posjeduje *Uvjerenje o osposobljenosti za ustrojavanje laboratorija prema HRN EN ISO/IEC 17025 normi*, izdano od odbora za izobrazbu Hrvatske akreditacijske agencije (HAA), te je uključen u rad ocjeniteljskih tijela HAA kao stručni ocjenitelj laboratorija za područje mjerenja emisija u zrak.

Objavio je jedan rad u znanstvenom časopisu, sedam radova na međunarodnim znanstvenim i znanstveno-stručnim skupovima u svojstvu autora ili koautora, te jedan rad u stručnom časopisu.

Međunarodna suradnja i projekti

Aktivni je sudionik i jedan od trenera-osnivača *Centra za čistiju proizvodnju* pri Sveučilištu u Rijeci, koji djeluje u sklopu *TEMPUS* projekta, a započinje sa radom tijekom listopada 2007. godine. U sklopu priprema za rad u *Centru za čistiju proizvodnju* sudjelovao je u seminarima i radionicama koje su održane u Rijeci, Irskoj u CIT (Cork Institute of Technology) i Njemačkoj u International InWEnt Centre u Feldafingu (sa partnerima iz Centric Austria).

Sudjelovao je kao suradnik u međunarodnom projektu *REGENER (Reducing Greenhouse Emissions by Networking of Enterprises and Researchers)* – projektu za implementaciju obnovljivih izvora energije u industrijskim pogonima i turizmu, zajedno sa partnerima iz TU Graz i Sveučilišta u Rouse, Bugarska koji je okončan u ožujku 2009, u sklopu kojeg je izradio studiju pod naslovom *Market analysis on renewable energy* za Republiku Hrvatsku. Uključen je u nastavak istog projekta u sklopu ASO međunarodne zaklade.

Stručni rad

Državni stručni ispit za obavljanje poslova graditeljstva za inženjere strojarstva položio je u rujnu 2006. Upisan je u Imenik ovlaštenih inženjera strojarstva za stručne smjerove: *grijanja, ventilacije, klimatizacije, rashladne tehnike, pripreme i obrade vode*, pod brojem 1495.

Sudjelovao je u izradi brojnih stručnih projekata: *Studija utvrđivanja performansi novih plamenika u TE Rijeka, Projekt prototipa brodskog spaljivača otpada – 3.MAJ TIBO, Studija – pinch analiza izmjene topline u petrokemijskom postrojenju – MOL - Budimpešta, Ispitivanje učinkovitosti aditiva za gorivo u TE-TO Osijek, TE-TO Sisak i TE Rijeka.*

Voditelj je stručnog projekta za primjenu obnovljivih izvora energije : *Idejno rješenje - elaborat – rekonstrukcija kotlovnice OŠ Petar Zrinski – Čabar za korištenje drvne biomase kao goriva, siječanj 2009.*

Autor je studije *Rekonstrukcija kotlovnica za korištenje drvne biomase kao goriva na području Gorskog Kotara* i projekata *rekonstrukcije kotlovnica u OŠ Delnice i OŠ Mrkopalj.*

Kao voditelj mjerenja i izvoditelj terenskih mjerenja iz Laboratorija za industrijsku energetiku i zaštitu okoliša tijekom 2008. i 2009. godine vodio je i sudjelovao u izvođenju *poslova mjerenja emisija* za naručitelje: *INA – Rafinerija nafte Rijeka, INA Rafinerija nafte Sisak, HEP – TE Urinj i HEP – TE Plomin i Energo – Rijeka.*

Aktivno se služi engleskim i talijanskim jezikom, a poznaje i njemački jezik. Oženjen je i otac je dvoje djece.