

UNIVERZITET CRNE GORE
METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

Andrijana Čulafić, BApp zaštite životne sredine

**UTICAJ PROCESNIH PARAMETARA SAGORIJEVANJA FOSILNIH
GORIVA NA EMISIJU GASOVA SA EFEKTOM STAKLENE BAŠTE**

MASTER RAD

Podgorica, maj 2025. godine

UNIVERZITET CRNE GORE
METALURŠKO-TEHNOLOŠKI FAKULTET

Andrijana Čulafić, BApp zaštite životne sredine

**UTICAJ PROCESNIH PARAMETARA SAGORIJEVANJA FOSILNIH
GORIVA NA EMISIJU GASOVA SA EFEKTOM STAKLENE BAŠTE**

MASTER RAD

Podgorica, maj 2025. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Andrijana Čulafić

Datum i mjesto rođenja: 27. 06. 1999. godine, Nikšić

Institucija: Univerzitet Crne Gore - Podgorica

Osnovne studije: 2021. godine

INFORMACIJE O MASTER RADU:

Naziv studija: Zaštita životne sredine

Naziv rada: **Uticaj procesnih parametara sagorijevanja fosilnih goriva na emisiju gasova
sa efektom staklene bašte**

Fakultet: Metalurško-tehnološki fakultet

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

UDK:

Datum prijave rada: 15. 01. 2024. godine

Datum prihvatanja teme: 23. 02. 2024. godine

Mentor: Prof. dr Žarko Radović, redovni profesor

Komisija za ocjenu rada:

Doc. dr Nebojša Tadić, MTF, predsjednik

Prof. dr Žarko Radović, MTF, mentor

Prof. dr Irena Nikolić, član

Komisija za odbranu rada:

Doc. dr Nebojša Tadić, MTF, predsjednik

Prof. dr Žarko Radović, MTF, mentor

Prof. dr Irena Nikolić, član

Lektor: Autolektura

Datum odbrane:

Univerzitet Crne Gore
Metalurško-tehnološki fakultet

IZJAVA O AUTORSTVU

Kandidat: Andrijana Čulafić

Na osnovu člana 22 Zakona o akademskom integritetu, ja, dolje potpisana

IZJAVLJUJEM

pod punom krivičnom i materijalnom odgovornošću da je master rad pod nazivom: „UTICAJ PROCESNIH PARAMETARA SAGORIJEVANJA FOSILNIH GORIVA NA EMISIJU GASOVA SA EFEKTOM STAKLENE BAŠTE” rezultat sopstvenog istraživačkog rada, da nijesam kršila autorska prava i koristila intelektualnu svojinu drugih lica i da je navedeni rad moje originalno djelo.

U Podgorici,

Potpis studenta

IZVOD

Osnovna hipoteza u okviru ovog rada je da postoji analitička korelacija osnovnih parametara sagorijevanja, hemijskog sastava gorljive smješe, ekonomije goriva i emisije osnovnih komponenata produkata sagorijevanja, koje dominantno utiču na aerozagađenje (CO_2 , NO_x).

Iako su, u principu, poznati trendovi pojedinačnih zavisnosti, pretpostavka je da se, „uparivanjem” više korelacija koje imaju međusobne kontraefekte, može doći do prihvatljivih kombinacija navedenih parametara.

Evidentno je da je u toplotehničkim procesima tehnološki imperativ primjena obogaćenog vazduha za sagorijevanje. Međutim, dilema je u kojoj mjeri i kako ovo utiče na zapreminu NO_x , CO_2 i posredno njihovih koeficijenata emisije, što su ključne stavke sa stanovišta zaštite životne sredine.

Kao polazna osnova proračuna korišćena su po 3 prosječna hemijska sastava čvrstih, tečnih i gasovitih goriva, koji se uobičajeno koriste u industrijskim i energetske postrojenjima.

Na bazi navedenih podataka, stehiometrijskih zavisnosti i empirijskih toplotehničkih izraza definisane se matematičke korelacije: temperature sagorijevanja, zapremine produkata sagorijevanja, jedinične emisije i koeficijenata emisije CO_2 i NO_x u zavisnosti od procesnih parametara kao što su sadržaj kiseonika u obogaćenom vazduhu ($\%\text{O}_2$) i koeficijent viška vazduha (λ). Vrijednosti $\%\text{O}_2$ su mijenjane u intervalu $21 \div 30\%$, a vrijednosti λ u granicama $1,2 \div 1,4$ za čvrsta i $1,02 \div 1,22$, za tečna i gasovita goriva.

Rezultati analitičkog modela su pokazali da povećanje koeficijenta viška vazduha, koji je preduslov za proces sagorijevanja, posebno siromašnih goriva, snižava temperaturu sagorijevanja i povećava zapreminu produkata, što je nepovoljno sa stanovišta ekonomije goriva. Istovremeno, povećanje λ , zbog niže temperature plamena linearno smanjuje emisiju NO_x , što je pozitivno sa aspekta zaštite životne sredine.

Nasuprot tome, ako se koriste obogaćene gorljive smješe, sa povećanim $\%\text{O}_2$, povećava se temperatura sagorijevanja, toplotehnički parametri su povoljniji, ali se time stvaraju uslovi da se intenzivira obrazovanje NO_x oksida, posebno kod goriva sa velikim polaznim $\%\text{N}$.

Upoređujući efekte λ i obogaćenosti vazduha kiseonikom vidljivo je da je uticaj povećanja $\%\text{O}_2$ znatno veći, jer presudno determiniše temperaturu plamena.

Pošto je evidentna određena “suprotstavljenost” zahtjeva za procesnom efikasnošću sagorijevanja i potrebe za minimalnim koeficijentima emisije gasova staklene bašte, mora se tražiti optimalni odnos ekonomije goriva i pokazatelja aerozagađenja.

Ključne riječi: *fosilna goriva, temperatura sagorijevanja, emisija NO_x*

ABSTRACT

The main hypothesis of this paper is that there is an analytical correlation between the fundamental combustion parameters, the chemical composition of the combustible mixture, fuel economy, and the emission of key combustion byproducts, which predominantly influence air pollution (CO_2 , NO_x).

Although the trends of individual dependencies are generally known, the assumption is that by "pairing" multiple correlations with opposing effects, it is possible to achieve acceptable combinations of these variables.

It is evident that in thermotechnical processes, the application of enriched combustion air is a technological imperative. However, the dilemma lies in the extent to which and how this affects the volume of NO_x and CO_2 , as well as, indirectly, their emission coefficients—key factors from an environmental protection perspective.

As a basis for the calculations, three average chemical compositions were used for solid, liquid, and gaseous fuels commonly employed in industrial and energy facilities.

Based on these data, stoichiometric dependencies, and empirical thermotechnical expressions, mathematical correlations were defined for combustion temperature, the volume of combustion products, specific emissions, and emission coefficients of CO_2 and NO_x , depending on process parameters such as the oxygen content ($\%\text{O}_2$) in enriched air and the excess air coefficient (λ). The values of $\%\text{O}_2$ were varied within the range of 21–30%, while the values of λ were adjusted within the limits of 1.2–1.4 for solid fuels and 1.02–1.22 for liquid and gaseous fuels.

The results of the analytical model showed that an increase in the excess air coefficient, which is a prerequisite for the combustion process, especially for lean fuels, lowers the combustion temperature and increases the volume of combustion products, which is unfavorable from a fuel economy perspective. At the same time, an increase in λ , due to the lower flame temperature, linearly reduces NO_x emissions, which is beneficial from an environmental protection standpoint.

Conversely, when enriched combustible mixtures with a higher $\%\text{O}_2$ are used, the combustion temperature increases, leading to more favorable thermotechnical parameters. However, this also creates conditions that intensify NO_x formation, especially in fuels with a high initial nitrogen content.

Comparing the effects of λ and oxygen enrichment of the air, it is evident that the impact of increasing $\%\text{O}_2$ is significantly greater, as it critically determines the flame temperature.

Since there is an inherent "opposition" between the goal of combustion process efficiency and the need to minimize greenhouse gas emission coefficients, an optimal balance between fuel economy and air pollution indicators must be sought.

Keywords: *fossil fuels, combustion temperature, NO_x emission*

SADRŽAJ

UVOD	8
1. PRINCIPI SAGORIJEVANJA FOSILNIH GORIVA	9
1.1 Čvrsta goriva	10
1.2 Mehanizam i kinetika sagorijevanja fosilnih goriva	13
2. UTICAJ SASTAVA GORLJIVIH SMJEŠA NA EMISIJU PRODUKATA SAGORIJEVANJA	17
2.1 Uticaj uslova sagorijevanja na sadržaj CO ₂ u produktima	18
2.2 Emisija azotnih oksida pri sagorijevanju fosilnih goriva	19
2.3 Sagorijevanje kombinovanih gorljivih smješa	21
3. KONCEPT I POSTAVKE ANALITIČKOG MODELA	28
4. REZULTATI I DISKUSIJA	31
4.1 Proračun sagorijevanja fosilnih goriva	31
4.2 Uticaj koeficijenta viška vazduha na parametre sagorijevanja	33
4.3 Uticaj koeficijenta viška vazduha na emisiju gasova sa efektom staklene bašte	35
4.4 Uticaj obogaćivanja vazduha kiseonikom na parametre sagorijevanja	43
4.5 Uticaj obogaćenosti vazduha na emisiju gasova sa efektom staklene baste	45
4.6 Analiza istovremenog uticaja koeficijenta λ i obogaćenosti vazduha	47
ZAKLJUČCI	51
LITERATURA	52
PRILOG	54

UVOD

Korišćenje fosilnih goriva je, još uvijek, dominantan postupak u cilju zadovoljenja energetske potrebe društva. Poznata je činjenica da sagorijevanje ove vrste goriva, u najvećoj mjeri utiče na emisiju gasova koji svojim prisustvom u atmosferi uslovljavaju poremećaj prirodnog efekta „staklene bašte”.

Cilj svakog industrijskog procesa, u kome se koriste fosilna goriva, je intenziviranje njihovog sagorijevanja, koje se postiže promjenom procesnih parametara.

Navedeni tehnološki aspekti su često kontradiktorni zahtjevima zaštite životne sredine, pa je poznavanje njihovih međuzavisnosti preduslov za pronalaženje optimalnih rešenja.

Jedan od ciljeva toplotehničkih proračuna sagorijevanja fosilnih goriva je definisanje procesnih parametara koji utiču na toplotnu razmjenu, smanjenje potrošnje goriva i smanjenje štetnog uticaja otpadnih gasova na okolinu.

Navedeni principi važe generalno, bez obzira da li se koristi čvrsto (ugalj), tečno (mazut) ili gasovito gorivo (prirodni gas). Razlika se ogleda samo u kvantitativnom i kvalitativnom stepenu uticaja pojedinih parametara na zapreminu i sastav produkata sagorijevanja, koji, u konačnom, direktno utiču na aerotagađenje.

Osnovne komponente produkata sagorijevanja fosilnih goriva, koje direktno utiču na poremećaj efekta staklene bašte, su CO_2 i NO_x . Promjenom uslova sagorijevanja, kroz izmjenu koeficijenta viška vazduha (konvencionalni postupak) i formiranje gorljivih smješa obogaćenih kiseonikom (specifični postupci), može se uticati na emisiju ovih gasova.

Cilj ovog rada je definisanje analitičkih međuzavisnosti parametara koji definišu toplotni aspekt sagorijevanja i veličina koje kvantitativno definišu stepen emisije navedenih gasova.

1. PRINCIPI SAGORIJEVANJA FOSILNIH GORIVA

Goriva se definišu kao supstance koje u toku sagorijevanja razvijaju veliku količinu toplotne energije. Fosilna goriva nastaju u prirodnom procesu od fosilnih ostataka biljaka i životinja, dakle od organskih supstanci pod uticajem visokih temperatura i pritiska.

Da bi se neka materija tretirala kao gorivo, mora sa zadovoljava sledeće uslove:

- mora da postoji u odgovarajućim i dovoljnim količinama, a koje su dostupne za korišćenje,
- lako odvođenje produkata sagorijevanja iz zone sagorijevanja,
- da produkti procesa sagorijevanja nisu štetni za životnu sredinu i za toplotne uređaje,
- mogućnost kontrolisanja i upravljanja procesom sagorijevanja.

Ove kriterijume zadovoljavaju organske supstance koje sadrže ugljenik, vodonik i njihova jedinjenja. Ukoliko gorivo ne ispunjava tražene uslove, potrebno ga je preraditi kako bi se korigovao kvalitet. Na taj način se dobijaju vještačka goriva.

Uopšteno, goriva se mogu podijeliti prema porijeklu, i to na:

- prirodna i
- vještačka.

Prema agregatnom stanju dijele se na:

- tečna,
- čvrsta i
- gasovita.

Primjeri za navedenu podjelu goriva su:

- čvrsta prirodna goriva – ugalj, drvo, treset, mrki ugalj, kameni ugalj, antracit, gorljivi škriljci,
- čvrsta vještačka goriva – drveni ugalj, koks, polukoks, briketi,
- tečno prirodno gorivo – nafta,
- tečna vještačka goriva – različiti derivati uglja, derivati nafte (kerozin, benzin, benzol, dizel ulje, mazut, katran),
- gasovito prirodno gorivo – prirodni (zemni) gas,
- gasovita vještačka goriva – koksni gas, visokopećni gas, generatorski gas, vodeni gas.

1.1. Čvrsta goriva

Prirodna čvrsta goriva obuhvataju razne vrste uglja, a nastaju pri procesima taloženja biljnog materijala, nakon djelovanja visokih temperatura i pritiska naslaga, u anaerobnim uslovima. Tada dolazi do procesa ugljenizacije (mineralizacije) organskih jedinjenja, pri čemu se uklanja veća količina isparljivih materija, smanjuje sadržaj kiseonika i vodonika, a ostatak čvrste mase postaje obogaćen ugljenikom.

Na osnovu stepena mineralizacije biljnih ostataka, prirodna čvrsta goriva dijele se na:

- treset,
- lignit (svijetlo-mrki ugalj),
- mrki ugalj,
- kameni ugalj,
- antracit i
- gorljive škriljce.

Treset je, prema zavisnosti hemijskog sastava čvrstog goriva od njegove starosti, najmlađe čvrsto gorivo. Nastaje u prvom stadijumu mineralizacije biljne mase. Sadrži $54\div 65\%$ ugljenika, što je više nego kod drveta, a manje nego kod kamenog uglja i gorljivih škriljaca i $3\div 14\%$ pepela, što zavisi od nalazišta. Možemo razlikovati dvije vrste treseta u odnosu na način dobijanja – sitni i komadasti treset. Neki od osnovnih nedostataka koji se srijeću kod treseta su visok sadržaj vlage i mala mehanička otpornost i gustina.

Mrki ugalj – naziv potiče od boje koja je promijenjiva u rasponu od svijeto do tamno smeđe, tj. mrke boje. Prema stepenu mineralizacije nalazi se između treseta i kamenog uglja. Iako su slični po boji, mrki ugalj se od nizijskog treseta razlikuje jer ne sadrži vidljive ostatke biljnog porijekla. Karakteriše se:

- visokom mikroporoznošću,
- velikom higroskopnošću, pa samim tim i visokom vlažnošću-oko 55%,
- visokim sadržajem isparljivih sastojaka,
- sadržajem pepela $15\div 20\%$, suve mase i sumpora $1\div 5\%$,
- slabom mehaničkom otpornošću i
- malom termičkom stabilnošću.

Sve navedeno rezultira velikom mogućnošću samozapaljivanja, zatim niskom sposobnošću za koksovanje i niskom toplotnom moći. Kao i treset, koristi se kao lokalno gorivo, a dugo se koristio i kao gorivo za gasne generatore.

Kameni ugalj – sledeći stepen mineralizacije dovodi do stvaranja kamenog uglja, koji karakterišu crna boja, visok sadržaj ugljenika, smanjen sadržaj kiseonika i vodonika, visoka čvrstoća, te manja vlažnost u odnosu na mrki ugalj.

Klasifikaciju je moguće izvršiti prema:

- sadržaju ugljenika,
- količini isparljivih sastojaka i
- osobinama koksa koji se od njega dobijaju.

U odnosu na količinu isparljivih sastojaka definiše se i dužina plamena – sa povećanjem sadržaja isparljivih materija, povećava se i dužina plamena.

U zavisnosti od geološke starosti, odnosno stepena ugljenizacije osobine koje karakterišu najmlađe ugljeve su sadržaj ugljenika do 75%, te veći sadržaj vlage ~20% u odnosu na stanje kod najstarijih ugljeva, kod kojih se javlja veći sadržaj ugljenika, do 95%, a niži sadržaj vlage – svega 2÷5%.

Sadržaj pepela se kreće u vrijednostima od 5÷25% (najčešće 5÷12%). Na sadržaj sumpora u kamenom uglju utiče nalazište a posebnu ulogu ima i sadržaj pepela, imajući u vidu da povećanje sadržaja pepela za posljedicu ima povećanje sadržaja sumpora. Njegove vrijednosti se uglavnom kreću od 0,6% do 3% S.

Sposobnost uglja da pri zagrijavanju bez prisustva vazduha, prelazi u porozan i mehanički čvrst proizvod, poznat kao koks, predstavlja proces koksovanja kamenog uglja. Dobijeni koks je značajan kao redukciono sredstvo i kao izvor toplote u nekim metalurškim procesima.

Kako je procenat ugljeva koji imaju sposobnost koksovanja mali, u novije vrijeme se koriste različite metode pripremanja mješavine koksujućih i nekoksujućih ugljeva, koje omogućavaju proizvodnju dobrog koksa, uz istovremeno proširenje skale ugljeva pogodnih za dobijanje metalurškog koksa.

Antracit predstavlja poslednji stepen mineralizacije, uz to i najstariji ugalj. Karakteriše se sadržajem ugljenika 95÷97%, visokom gustinom i crnom, blještavom površinom. Antracit je teško zapaljiv (temperature paljenja je $t_p=700\div900^{\circ}\text{C}$) i gori kratkim plamenom, jer ima niži sadržaj isparljivih sastojaka (2c9%). Ima i nižu toplotnu moć (29,3÷34,8 MJ/kg), što je povezano sa niskim sadržajem vodonika (1,2÷3%), u poređenju sa mlađim ugljevima, koji imaju veći sadržaj vodonika (4÷5%), pa samim tim i veću toplotnu moć ~ 36,7 MJ/kg.

Antracit se koristi sa drugim gorivima kao energetska gorivo u kotlovskim uređajima i uređajima za gasifikaciju, dok se ređe može koristiti i kao metalurško gorivo u šahtnim pećima u obojenoj metalurgiji.

Gorljivi škrljci su talog koji nastaje miješanjem komponenti goriva sa većom količinom mineralnih materija (~ 50%). U slojevima su, a boja im zavisi od primjesa i javlja se u varijantama od žuto-zelene do zeleno-sive. S obzirom na visok sadržaj ugljenika (60÷70%), škrljci imaju visoku toplotnu moć (27,6÷33,5 MJ/kg).

Toplotna moć radne mase u odnosu na organsku masu je smanjena zbog visokog sadržaja sumpora i vlage. Sadržaj isparljivih komponenti u radnoj masi, u poređenju sa gorljivom masom, je povećan i iznosi 80÷83%. Škriljci se koriste za dobijanje koksa velike toplotne moći i kao energetske gorivo. Kao proizvodi termičke obrade škriljaca u odsustvu vazduha dobijaju se smola i ulje.

Vještačka čvrsta goriva su derivati čvrstih prirodnih goriva, koji se dobijaju procesom prerade navedenih goriva, tj. zagrijavanjem prirodnih čvrstih goriva do visokih temperatura u odsustvu vazduha. Prilikom obrade drveta dobija se drveni ugalj (ćumur), a pri obradi prirodnog uglja koks i polukoks.

Drveni ugalj ima ograničenu primjenu u industriji, a predstavlja jako redukciono sredstvo kao i zaštitu od oksidacije. Dobija se nepotpunim sagorijevanjem uglja u ugljarnicama i destilacijom drveta u retortama („crveni ćumur“).

Polukoks i koks su vještačka čvrsta goriva i dobijaju se iz prirodnih goriva hemijskim postupcima prerade. Hemijski postupci prerade uglja dovode do hemijskog preobražaja sastavnih komponenti polaznog goriva. Jedna od hemijskih metoda prerade je hidrogenovanje uglja koje ima za cilj povećanje udjela vodonika u gorivu.

Proces se sastoji u vezivanju spolja dovedenog vodonika za nezasićene makromolekule ugljovodonika u uglju, pri 300÷500 °C i na 25÷100 MPa. U tom procesu, osim čvrstog proizvoda obogaćenog ugljenikom, nastaju tečni ugljovodonici, gasovi i mineralne supstance.

Polukoks (švelni koks) se dobija zagrijavanjem mrkog i kamenog uglja na 500÷700°C u odsustvu vazduha. Taj proces se naziva švelovanje, a poznat je i kao niskotemperaturno koksovanje. Kao produkti se javljaju isparljivi sastojci – gas i čvrsti ostatak – polukoks ili švelni koks, sa visokim sadržajem pepela i sumpora.

U procesu niskotemperaturnog koksovanja ili polukoksovanja, osim polukoksa (švelnog koksa) produkti su još: katran i gasovito gorivo. Karakteristike polukoksa zavise od vrste uglja, a bolji kvalitet se postiže preradom kamenog uglja. Polukoks ima manji sadržaj isparljivih materija, vrlo je porozan, veoma reaktivan, lako se pali i sagorijeva brzo, zbog čega je podesan kao redukciono sredstvo na nižim temperaturama. Nema veću primjenu u metalurgiji, a koristi se za proizvodnju generatorskog gasa (energetsko gorivo).

Koks se dobija kao čvrst ostatak pri procesu koksovanja. Karakteriše se svojom poroznošću, mehaničkom čvrstoćom i reaktivnošću. Koks je najvažnije metalurško čvrsto gorivo. Prilikom nepotpunog sagorijevanja koksa javlja se i koksni gas, koji se može koristiti kao kvalitetno gasovito gorivo.

Termoantracit se dobija termičkom obradom, odnosno laganim zagrijavanjem

sitnozrnog antracita u odsustvu vazduha i na visokim temperaturama od 1100°C do 1300°C. Termičkom obradom antracitu se smanjuje sadržaj sumpora, a povećava pozornost i termička postojanost. Termoantracit se koristi u livarstvu i u proizvodnji elektroda.

1.2. Mehanizam i kinetika sagorijevanja fosilnih goriva

Sagorijevanje je složeni fizičko-hemijski proces vezivanja kiseonika sa gorljivim sastojcima goriva, koji je praćen intenzivnim oslobađanjem unutrašnje (hemijske) energije goriva i svjetlosti i nastankom proizvoda reakcije (produkata sagorijevanja). Kao izvor kiseonika služi vazduh, koji sadrži kiseonik u slobodnom stanju.

Gorljive komponente goriva i kiseonik mogu stupiti u hemijsku reakciju samo ako su prethodno izmiješani, tj. ako je ostvaren kontakt između reagujućih komponenata i ako je njihova smješa zagrijana do temperature paljenja. Prema tome, svakoj hemijskoj reakciji prethodi fizički proces pripremanja gorljive smješe, tj. proces pripremanja reaktanata za uzajamno hemijsko djelovanje.

Brzina sagorijevanja određena je brzinom najsporije reakcije u sistemu, koja je, u najvećem broju slučajeva, fizički proces, tj. proces miješanja goriva i vazduha. Ako je ta smješa dobro pripremljena i zagrijana na dovoljno visoku temperaturu, hemijski proces će se odvijati odgovarajućom brzinom.

Proces sagorijevanja, u tehničkom pogledu, može se definisati kao skup egzotermnih reakcija sjedinjavanja gorljivih komponenata goriva sa kiseonikom, koje se odvijaju u temperaturnom intervalu iznad temperature paljenja.

Oksidacija i sagorijevanje goriva su jedan isti hemijski proces, ali je njihovo fizičko porijeklo potpuno različito. Porastom kvantitativne strane procesa oksidacije započinje odvijanje kvalitativno novog procesa, tj. sagorijevanje. Kritični momenat prelaza od mirne reakcije ka burnom sagorijevanju poznat je kao paljenje goriva. Paljenje goriva može se izvesti u prvom redu povišenjem temperature reaktanata, što se može ostvariti po cijeloj masi goriva, vazduha i smješe gorivo-vazduh ili lokalno u bilo kojoj tački zapremine smješe. Nekađ je dovoljna samo pojava iskre da otpočne lančana reakcija i da se gorivo zapali [1].

Minimalna vrijednost temperature reaktanata pri kojoj dolazi do burne reakcije sagorijevanja predstavlja temperaturu paljenja goriva. Paljenje goriva zasniva se i na dovođenju toplote u žarište reakcije. Izvor toplote može biti spoljašnji i unutrašnji. Spoljašnji predstavlja zagrijavanje reaktanata prije njihovog stupanja u hemijsku reakciju, a unutrašnji izvor toplote obuhvata dovođenje toplote reaktantima u toku procesa oksidacije.

Zavisnost količine oslobođene toplote od temperature, ima eksponencijalni karakter.

Istovremeno sa oslobađanjem toplote, pri sagorijevanju smješe dolazi do odvođenja toplote kroz zidove posude u kojoj se odvija proces a zavisnost intenziteta odvođenja toplote ima linearni karakter.

Sagorijevanje ugljene prašine predstavlja složeni, heterogeni proces i sastoji se od sledećih koraka:

- predgrijavanja i sušenja prašinastog goriva,
- termičkog razlaganja goriva koje je praćeno izdvajanjem isparljivih komponenti i stvaranjem koksnog ostatka,
- sagorijevanja isparljivih komponenti i
- sagorijevanja koksnog ostatka.

U zavisnosti od uslova sagorijevanja (prisustvo oksidanta, veličina čestice, temperatura procesa i sl.), ovi koraci se mogu odvijati paralelno ili postupno.

Na temperaturi od 200 °C počinje proces izdvajanja isparljivih sastojaka (H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , C_nH_m i dr.), koji miješanjem sa oksidantom dovode do stvaranja gorljive smješe koja se može zapaliti u određenim temperaturnim uslovima.

Gledano u cjelini, tečna goriva imaju mogućnost sagorijevanja na dva načina:

- sagorijevanje u tečnom stanju – teškoisparljiva goriva, pa se sagorijevanje vrši bez prethodnog isparavanja (mazut i dr.) i
- sagorijevanje goriva koje je prevedeno u gasovito stanje (samo kod lakoisparljivih goriva).

Mazut u industrijskim uslovima sagorijeva u raspršenom obliku, odnosno u vidu kapljica. Gorivo raspršeno do sitnih kapi dospijeva u ložište, zagrijano iznad temperature paljenja, kad počinje isparavanje kapljica. Nastali gorljivi gasovi miješaju se sa strujom vazduha, formirajući gorljivu smješu.

Potreban uslov za početak neke hemijske reakcije je sudar odgovarajućih molekula. U kinetici hemijskih reakcija definiše se red reakcije. Ako je za neku reakciju potreban sudar dva molekula, reakcija je bimolekularna ili drugog reda, a ako je za takav proces potreban istovremeni sudar tri molekula, reakcija je trimolekularna ili trećeg reda.

Reakcije trećeg i višeg reda rijetko se mogu sresti u prirodi, jer je malo vjerovatno da će doći do istovremenog sudara tri i više molekula koji će rezultirati hemijskom reakcijom.

Međutim, ne rezultuje svaki sudar molekula hemijskom reakcijom, već molekuli moraju da imaju svoju energiju aktivacije, odnosno minimalnu količinu energije koju treba da posjeduju aktivni molekuli za početak hemijske reakcije. Prema kinetičkoj teoriji

gasova, broj aktivnih molekula, tj. molekula gasa koji posjeduju energiju jednaku ili veću od energije aktivacije, proporcionalan je temperature sredine.

Prema molekularno-kinetičkoj teoriji, hemijska reakcija je rezultat aktivnih sudara molekula supstanci koje učestvuju u reakciji. Brzina reakcije određena je brojem aktivnih sudara u jedinici vremena. Kod aktivnih sudara (sudari koji proizvode reakciju) suma kinetičke energije aktivnih molekula treba da je jednaka ili veća od energije aktivacije date reakcije.

Ako se pretpostavi da se neki sistem nalazi na energetskom nivou I, a reakcija je prikazana jednačinom:



Za direktnu reakciju – smjer sa lijeva na desno, potrebno je utrošiti energiju za kidanje unutrašnjih veza polaznih supstanci koje učestvuju u reakciji, tj. energiju E_1 , nakon čega sistem sa nivoa I prelazi na nivo II. Prilikom tog prelaska oslobađa se energija E_2 . Toplotni efekat direktne (egzotermne) reakcije je

$$Q = E_1 - E_2. \quad (1.2)$$

Povratni tok reakcije, tj. reakcija sa desna na lijevo (endotermna reakcija) moguć je samo uz potrošnju energije E_2 , pri čemu je $E_2 > E_1$. Nakon toga, sistem prelazi sa nivoa II na viši energetski nivo I, tj. moguća je hemijska reakcija. Količina utrošene energije, u tom slučaju, veća je od količine oslobođene energije, pa je, samim tim, povratna reakcija endotermna. Potrošnja energija u toj reakciji je

$$Q = E_2 - E_1. \quad (1.3)$$

Brzina hemijske reakcije, prema Zakonu o dejstvu masa, proporcionalna je proizvodu koncentracija reaktanata. Za bimolekularnu reakciju tipa $A + B \rightarrow C$, brzina se može izraziti kao:

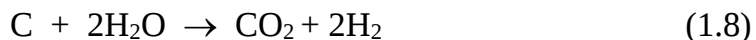
$$w_r = k \cdot C_A \cdot C_B \quad (1.4)$$

gdje je k – koeficijent brzine reakcije ili konstanta reakcije.

Reakcija između ugljenika i kiseonika odvija se u adsorpcionom sloju, na površini čestice uglja. U opštem obliku sagorijevanje ugljenika može se predstaviti sledećim jednačinama:



Istovremeno se odvijaju reakcije CO₂ i H₂O (gasovi nastali u procesu sagorijevanja H₂ i C iz koksa):



Nastali CO reaguje sa kiseonikom:



Prema nekim istraživačima, na površini komada uglja odvija se reakcija prikazana sledećom jednačinom:



Kod porozne mase uglja, proces sagorijevanja je moguć na svim površinama pora, tj. u čitavoj zapremini komada. Na taj način, sagorijevanje ugljenika, kako unutrašnje tako i spoljašnje (površinsko), odvija se u kinetičkoj ili difuzionoj oblasti.

Unutrašnju kinetičku oblast karakterišu reakcije pri niskim temperaturama, kada brzina difuzije oksidanta (fizički proces) znatno premašuje brzinu hemijske reakcije. Sagorijevanje se u tom slučaju odvija po čitavoj zapremini čestice uglja.

Porastom temperature povećava se i brzina reakcije, a poslije određenog vremena, ova brzina premašuje brzinu unutrašnje difuzije. Ta oblast se definiše kao unutrašnja difuziona oblast sagorijevanja. Porastom temperature, brzina hemijske reakcije i dalje raste i brzina difuzije, u poređenju sa njom, postaje beskonačno mala. Kao rezultat toga, unutrašnje zapreminsko sagorijevanje praktično prestaje.

2. UTICAJ SASTAVA GORLJIVIH SMJEŠA NA EMISIJU PRODUKATA SAGORIJEVANJA

Cilj toplotehničkih proračuna je određivanje parametara koji determinišu razmjenu toplote, intenzitet zagrijavanja, potrošnju goriva i sastav produkata sagorijevanja.

Povećanje ekonomije goriva se postiže:

- intenziviranjem toplotne razmjene u random prostoru,
- povećanjem prenosa toplote zračenjem i
- primjenom kvalitetnijih goriva.

Unapređenja u iskorišćenju toplote postižu se:

- povećanjem temperature goriva i vazduha,
- povećanjem sadržaja O_2 u vazduhu i
- primjenom optimalnog viška vazduha.

2.1 Uticaj uslova sagorijevanja na sadržaj CO_2 u produktima

Pri sagorijevanju fosilnih goriva, bez obzira na njegovu vrstu i kvalitet, kao jedna od ključnih komponenti produkata sagorijevanja javlja se CO_2 . Ako se radi o čvrstom gorivu (najčešće ugalj i koks) onda zastupljenost CO_2 zavisi od stepena potpunosti sagorijevanja C.

Ukoliko su obezbijeđeni uslovi da postoji dovoljna količina O_2 (višak vazduha), onda se odvija reakcija potpunog sagorijevanja i kao product se javlja CO_2 . U slučaju sagorijevanja ugljovodonika iz gasovitih goriva, po pravilu nastaje CO_2 .

Međutim, ako se desi “podstehiometrijsko” ili nepotpuno sagorijevanje onda se kao produkti javljaju CO i amorfni ugljenik (čad). Kao drugi razlog ovakvog odvijanja reakcije sagorijevanja može se navesti nehomogenost gorljive smješe (odnos gorivo/vazduh), jer se unutar zone plamena javljaju mikrooblasti sa manjkom kiseonika.

Osim navedenih faktora, važno je napomenuti uticaj projektovanja ložišta i gorionika. Ukoliko su ložišta “poddimensionirana” (previše malo ložište/gorionik), onda plamen “nadstrujava” plamenu cijev, hladi se, usled čega dolazi do nepotpunog sagorijevanja. Sličan efekat se javlja u slučaju “predimensioniranja” ložišta [2,3].

Preveliki relativni udio nepotpunog sagorijevanja uslovljava povećan udio CO i čađi u produktima, što direktno implicira:

- povećanje toksičnosti istih,

- povećanje mogućnosti eksplozije,
- smanjenje ekonomije goriva i toplotne efikasnosti,
- smanjenje stepena korisnog dejstva uređaja usled naslaga čađi.

Strogo posmatrajući sa toplotničkog stanovišta, imperativ je što potpunije sagorijevanje, ali u pogledu stvaranja gasova koji pojačavaju efekat staklene bašte (tro i višeatomni gasovi) to direktno uslovljava njihov povećan udio u ukupnoj emisiji, pri čemu se, prije svega misli na CO₂.

Navedeni principi važe generalno, bez obzira da li se koristi čvrsto (ugalj), tečno (mazut) ili gasovito gorivo (gas). Razlika se ogleda samo u kvantitativnom i kvalitativnom stepenu uticaja pojedinih parametara na zapreminu i sastav produkata sagorijevanja, koji, u konačnom, direktno utiču na aerozagađenje.

2.2 Emisija azotnih oksida pri sagorijevanju fosilnih goriva

Fosilna goriva, u različitoj mjeri u svom sastavu sadrže i azot. Kako je za proces sagorijevanja neophodna gorljiva smjesa (gorivo-vazduh), to je dodatni izvor azota vazduh, bilo da se radi o standardnim uslovima ili o vazduhu obogaćenom kiseonikom.

Bez obzira što, zbog višestrukih valenci azot može formirati različite okside, u predmetnim razmatranjima dominantnu ulogu imaju NO i NO₂, koji terminološki formiraju grupu NO_x oksida.

Većinu obrazovanih NO_x oksida čini NO, koji nastaje po reakciji:



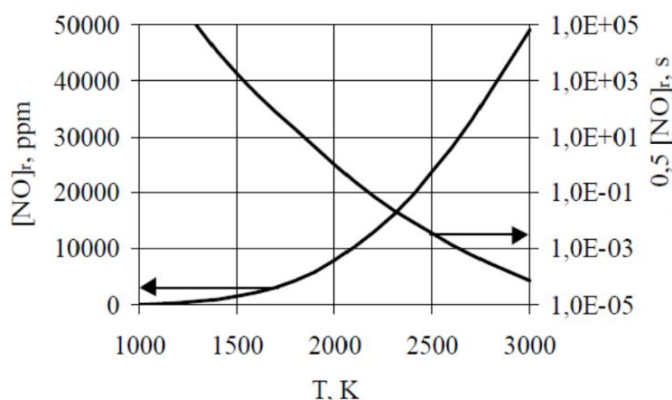
Empirijski podaci pokazuju da ~ 95% N sagorijeva do NO a ~ 5% do NO₂. Formirani azot-(II)-oksid se u zanemarljivoj mjeri može razložiti na polazni azot i kiseonik, ali je, zbog svoje nestabilnosti, dominantna reakcija dopunske oksidacije:



Većina, ovako formiranog NO₂ nastaje u atmosferi, u periodu kada produkti sagorijevanja napuste dimnjak. Tokom sagorijevanja fosilnih goriva moguća su tri mehanizma formiranja NO_x: [4-6]

- formiranje termičkih NO_x, koji nastaju reakcijom azota i kiseonika iz vazduha za sagorijevanje, na relativno visokim temperaturama (> 1250°C),
- formiranje NO_x iz goriva reakcijom već jonizovanog azota, koji se, nesporno, manje ili više, nalazi u gorivima, sa kiseonikom iz vazduha i
- formiranje trenutnog ili “promptnog” NO_x reakcijom oksidacije međuproizvoda nesagorjelih ugljovodonika, na nižim temperaturama i pri većim brzinama prostrujavanja kroz ložište.

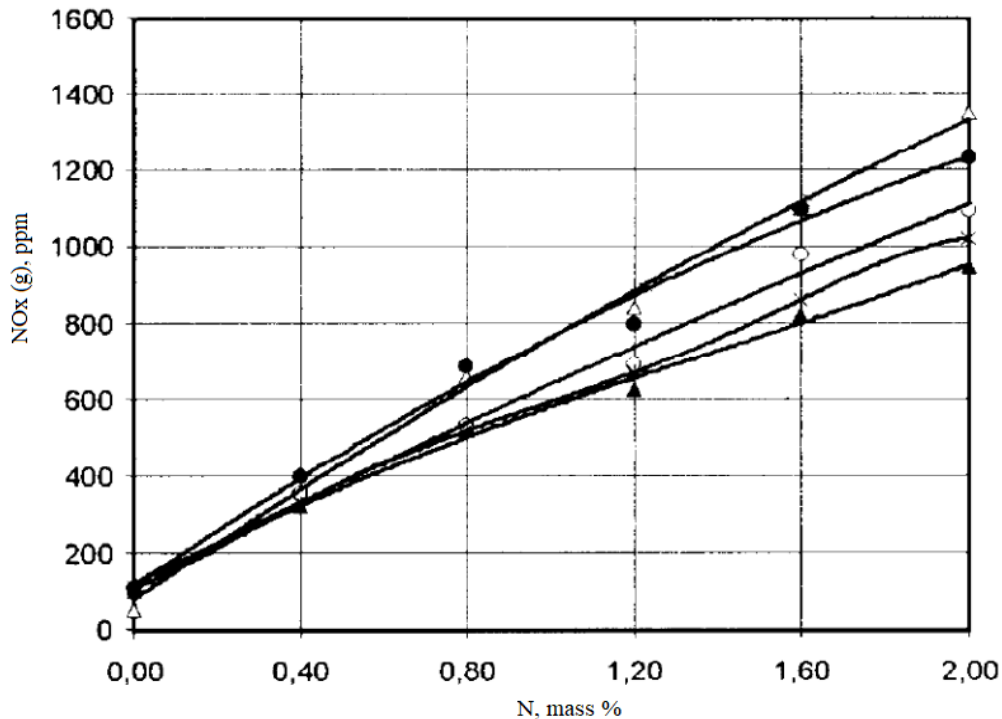
Udio termičkih NO_x u ukupnoj emisiji dominantno zavisi od radne temperature (slika 2.1).



Slika 2.1. Zavisnost brzine nastajanja termičkog NO_x od temperature[19]

Ukoliko je temperatura u zoni sagorijevanja veća, to će udio ovog tipa oksida biti veći. Zavisno od procesnih parametara sagorijevanja čvrstih fosilnih goriva, udio termičkih NO_x je u opsegu 5÷20%.

Udio NO_x iz goriva direktno je zavistan od polaznog sastava korišćenog goriva (slika 2.2), pri čemu treba imati u vidu da ugalj sadrži 1÷3 % N a sirova nafta 0,1÷0,3% N.



Slika 2.2. Zavisnost količine $\text{NO}_x(\text{g})$ od polaznog sadržaja N u gorivu[19]

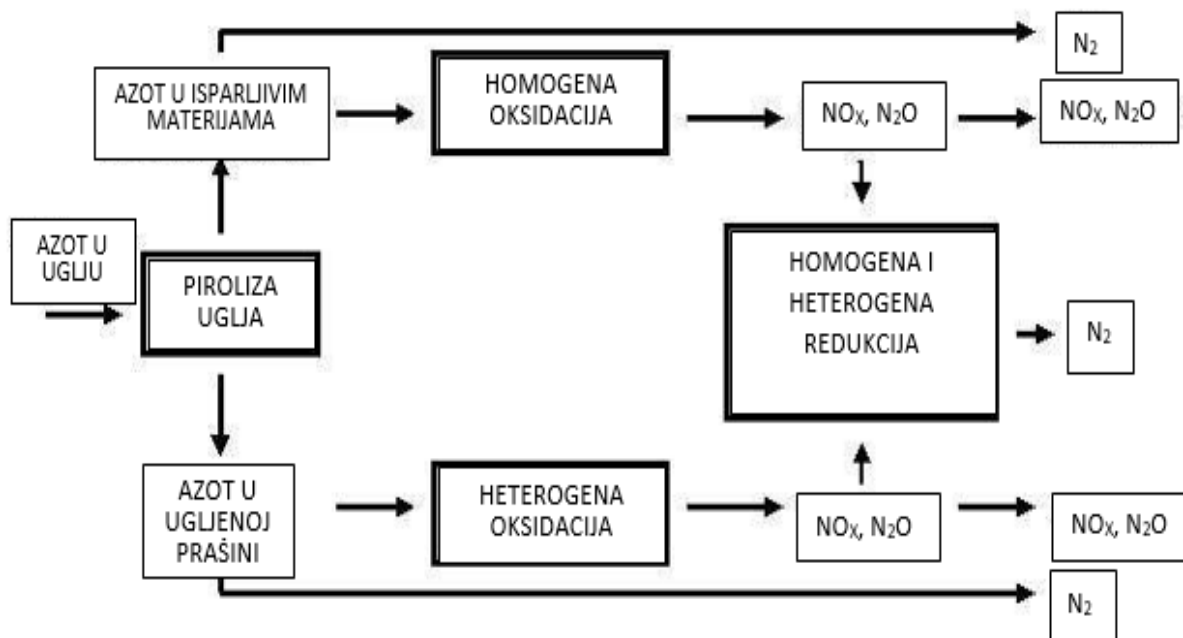
U slučaju navedenih goriva, koja sadrže značajniju količinu N, približno polovina polaznog azota se oksidiše stvarajući $\text{NO}_x(\text{g})$. Brzina obrazovanja ove vrste oksida zavisi od prisustva kiseonika u plamenu i sastava gorljive smjese. Pored nevedenih parametara, važnu ulogu u ovom procesu imaju:

- geometrija plamena,
- konstrukcija uređaja za sagorijevanje,
- vlažnost goriva i vazduha i
- dinamika procesa sagorijevanja.

Sagorijevanje uglja, kao reprezenta čvrstih fosilnih goriva, u principu podrazumijeva 3 faze:

- brzo zagrijavanje kako bi se oslobodile isparljive materije,
- homogeno sagorijevanje isparljivih materija i
- heterogeno sagorijevanje ugljenika.

Emisije azotnih oksida zavise od brzine zagrijavanja i prisustva gore navedenih faza sagorijevanja. U tipičnim uslovima sagorijevanja ugljene prašine oko polovine polaznog azota prolazi kroz pirolizu. Pretvaranje azota u NO_x čini oko 60÷80% ukupnih emisija NO_x [4]. Distribucija azota tokom ovog postupka sagorijevanja šematski je prikazana na slici 2.3.



Slika 2.3. Raspodjela azota tokom sagorijevanja uglja[4]

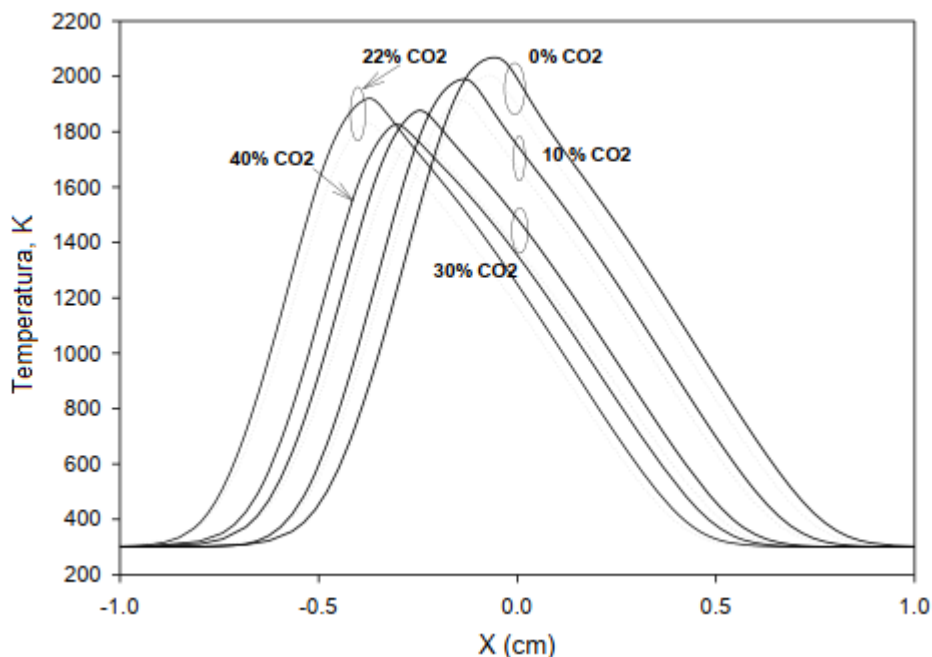
2.3. Sagorijevanje kombinovanih gorljivih smješa

U savremenim istraživanjima, u cilju smanjenja emisije zagađujućih materija, sve više se razmatraju metode primjene tehničkog kiseonika umjesto vazduha u industrijskim procesima sagorijevanja. Kao prednost ovih postupaka navodi se smanjenje zapremine NO_x . Iako je nesporna opravdanost navedenih tehnologija, njihova primjena je još u fazi poluindustrijskih postrojenja [7,8].

Primjenom gasovitih goriva u uslovima sagorijevanja koji omogućavaju vještački povećan sadržaj CO_2 u vazduhu za sagorijevanje, snižava se temperatura plamena a samim tim i emisija NO_x . Međutim, primjena ovakve kombinacije procesnih parametara je upitna sa stanovišta ekonomičnosti i toplotehničkog efekta [9-12].

Osnovna ideja primjene ovih postupaka je da se istraži kvantitativni efekat zamjene N_2 sa CO_2 u ulozi oksidanta pri sagorijevanju gasovitih goriva, pri čemu se sadržaj O_2 drži konstantnim (21%).

Zbog mnogo veće specifične toplote, zamjena azota u vazduhu ugljen-dioksidom značajno snižava temperaturu plamena, što dovodi do mnogo nižih koncentracija NO . Za određenu brzinu širenja plamena, postoji maksimalni procenat CO_2 u oksidantu iznad kojeg dolazi do gašenja plamena. Vrijednost maksimalnog procenta CO_2 u oksidantu opada kako raste stepen širenja ili “rastezanja” plamena (slika 2.4).



Slika 2.4. Uticaj sadržaja CO_2 u gorljivoj smješi na karakteristike plamena [9]

Takođe je dobro poznato da pri visokim i niskim brzinama širenja dolazi do gašenja plamena, što se naziva ekstinkcija istezanja i gašenje. Pokazalo se da postoji maksimalna

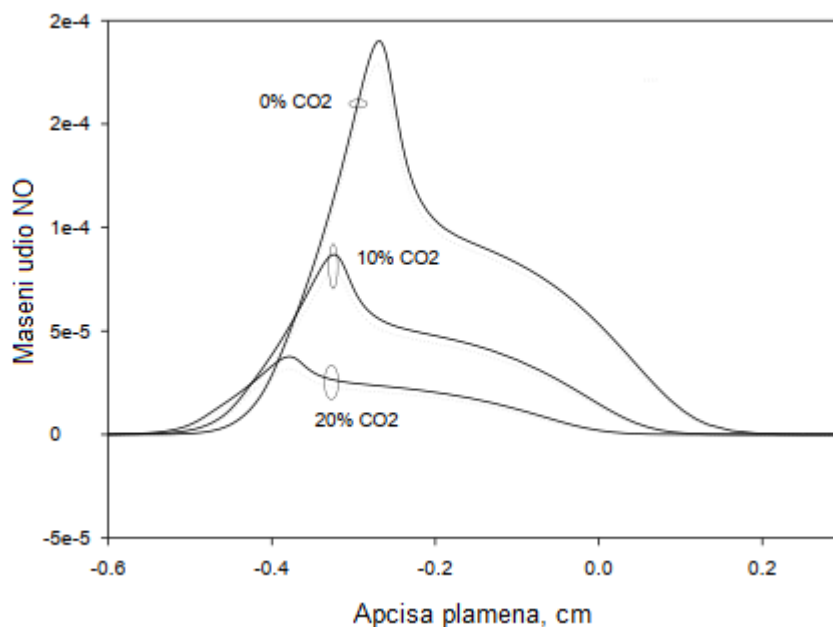
količina CO_2 u oksidantu pri datoj brzini rastezanja iznad koje stabilno sagorijevanje ne može biti uspostavljeno.

Ovaj tip gašenja plamena može se nazvati „termičkim gašenjem“ koje je uzrokovano smanjenjem temperature plamena kroz povećanje toplotnog kapaciteta produkata sagorijevanja.

Temperaturni „pikovi“ plamena opadaju sa povećanjem procenta CO_2 . Ovo smanjenje temperature je direktna posljedica vrijednosti toplotnog kapaciteta ugljen-dioksida. CO_2 koji ima veliki toplotni kapacitet u poređenju sa vazduhom. Što se više CO_2 doda u vazduh, to više CO_2 uzima toplotu. Shodno tome, što se više CO_2 dodaje, to je manji temperaturni maksimum plamena.

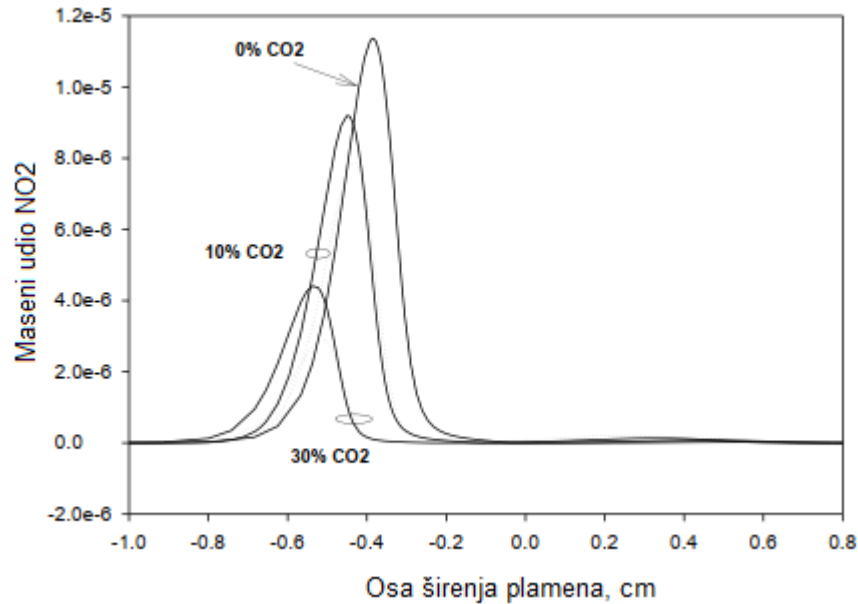
Osim navedenih efekata, dodatak CO_2 utiče i na formiranje azotnih oksida. Količina NO dramatično opada sa povećanjem količine CO_2 (slika 2.5). Ovaj rezultat nije iznenađujući jer je dobro poznato da se CO_2 dodaje u industrijske peći kako bi se smanjilo zagađenje i stvaranje zagađivača kao što je NO pri sagorijevanju.

Količina obrazovanog NO raste sa većom stepenom „rastezanja“, tj. u slučaju širokog plamena, jer je sagorijevanje bolje u uslovima formiranja uskog plamena.



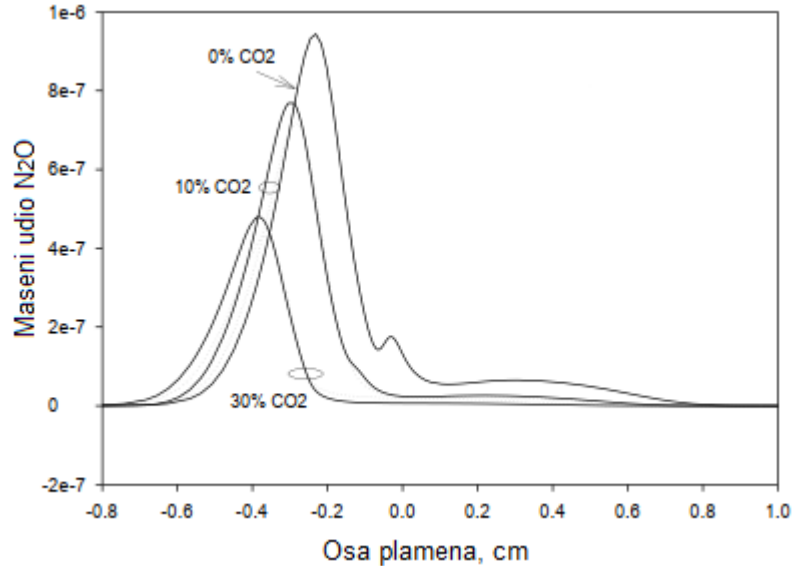
Slika 2.5. Uticaj sadržaja CO_2 u gorljivoj smješi na formiranje NO [9]

Uticaj CO_2 na formiranje NO_2 pokazuju da je formiranje NO_2 manje ako je sadržaj CO_2 veći (slika 2.6), što je logično zbog načina formiranja NO_2 reakcijom između NO i H_2O u oblastima niskih temperatura plamena.



Slika 2.6. Uticaj sadržaja CO_2 u gorljivoj smješi na formiranje NO_2 [9]

Slične zavisnosti se mogu izvesti i za ostale okside azota, a posebno treba obratiti pažnju na gasove koji utiču na mogućnost zračenja, tj. značajnijeg uticaja na poremećaj efekta staklene bašte, kao što je N_2O (slika 2.7).



Slika 2.7. Uticaj sadržaja CO_2 u gorljivoj smješi na formiranje N_2O [9]

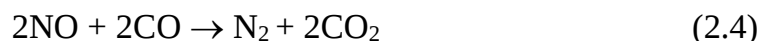
Jedna od novijih metoda, koja je u početnoj fazi praktične primjene je da se osim „oxy-fuel” sagorijevanja, umjesto vazduha primjenjuje kombinacija tehničkog kiseonika i povratnog CO_2 . Potencijalni cilj ove metode je istovremeno sniženje emisije CO i NO_x [13-15].

Promjenom sadržaja povratnog CO₂ u smješi O₂/CO₂ može se uticati na temperaturu sagorijevanja a na taj način, posredno, na emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Navedene smješe se često koriste pri sagorijevanju ugljene prašine, pri čemu je utvrđeno da porast sadržaja CO₂ u smješi dovodi do smanjenja emisije CO i NO_x.

Objašnjenje ovakvog trenda se nalazi u reakciji gasifikacije C:

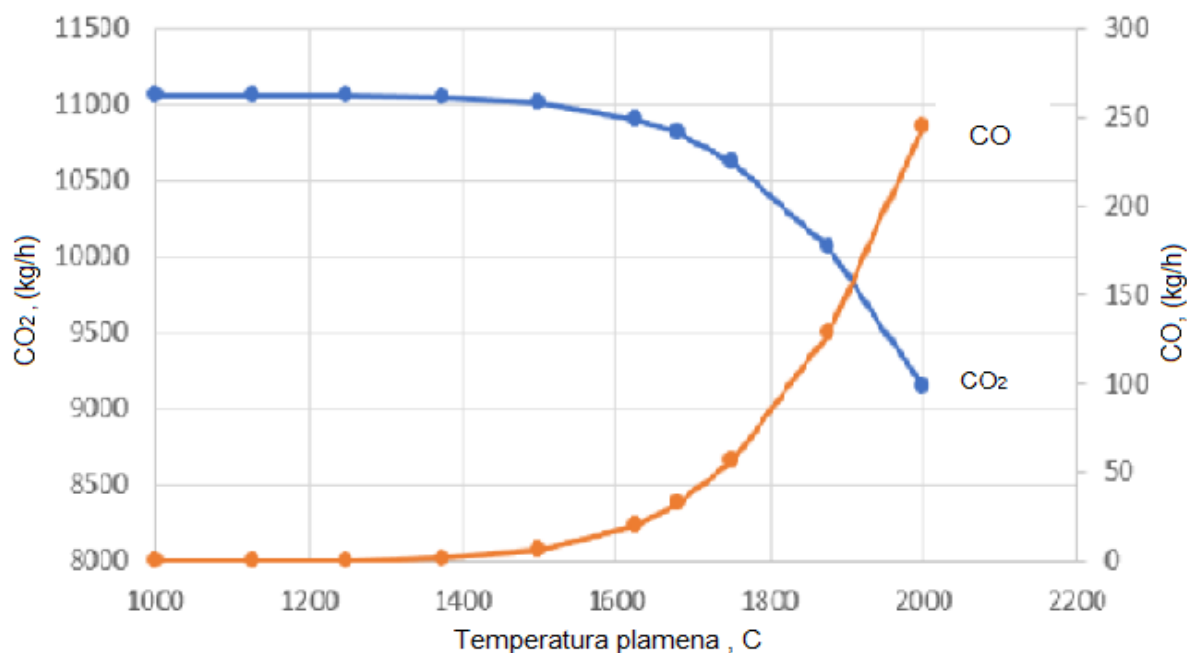


Formirani CO je jak reducent koji redukuje NO_x do elementarnog N₂, pri čemu sam prelazi u CO₂.

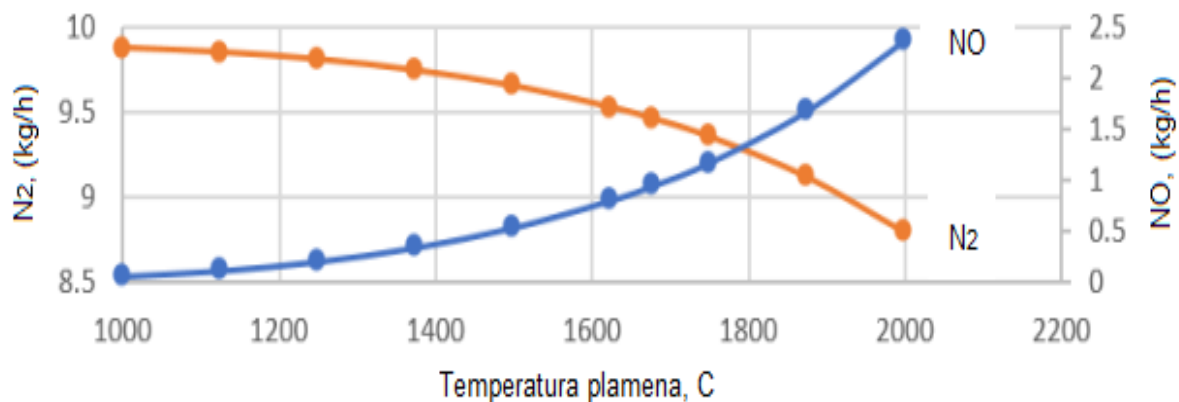


Sve navedene reakcije dovode do sniženja temperature plamena, koja eksplicitno utiče na sastav produkata sagorijevanja, pri čemu treba napomenuti da se na radnim temperaturama sagorijevanja sadržaj SO_x praktično ne mijenja (slike 2.8-2.10).

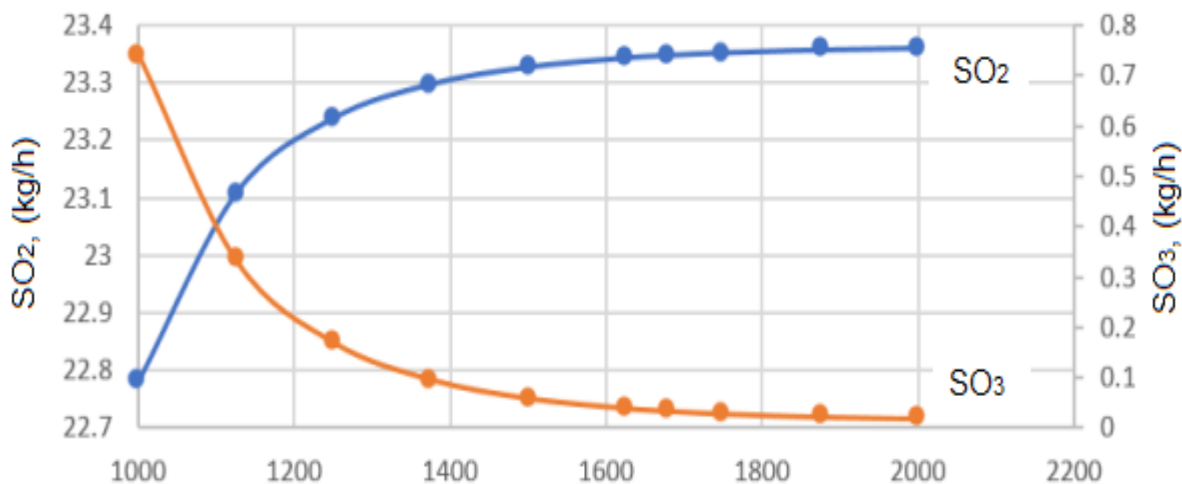
Ako se upoređuje korišćenje vazduha i smješe O₂/CO₂, kao izvora kiseonika neophodnog za sagorijevanje, u mnogim segmentima prednost ima smješa O₂/CO₂.



Slika 2.8. Uticaj temperature sagorijevanja na formiranje CO i CO₂ [13]



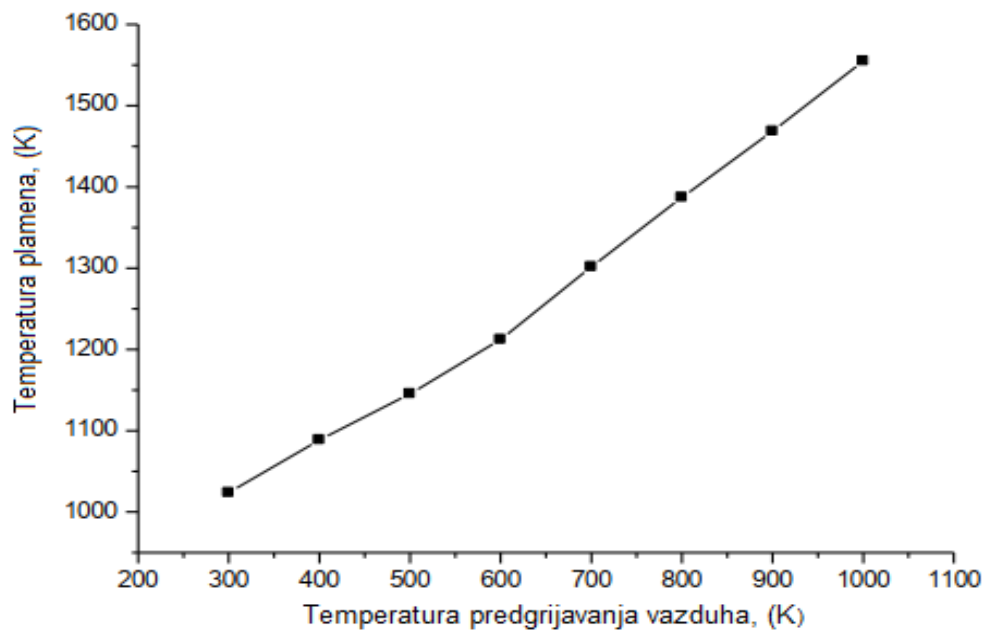
Slika 2.9. Uticaj temperature sagorijevanja na formiranje NO i N₂ [13]



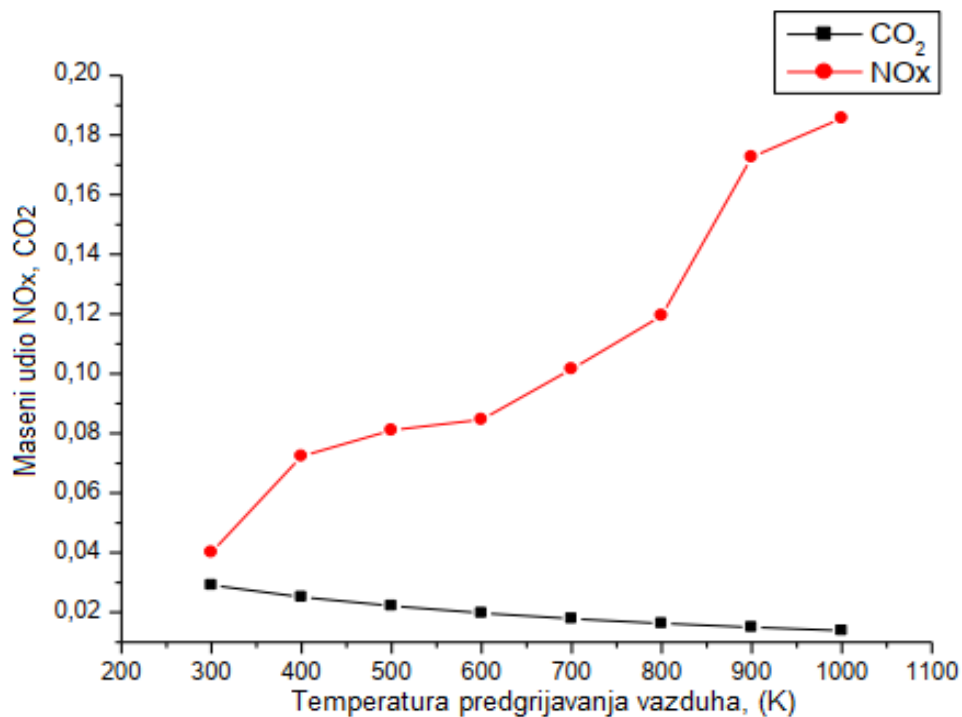
Slika 2.10. Uticaj temperature sagorijevanja na formiranje SO₂ i SO₃ [13]

Predgrijavanje vazduha koji se koristi za sagorijevanje, bez obzira o kojoj se vrsti goriva radi, je jedna od konvencionalnih metoda kojom se može uticati na procesne parametre i emisiju gasova, posebno NO_x.

Osnovni uticaj predgrijavanja vazduha se ogleda kroz promjenu dinamike sagorijevanja i toplotnog toka u zoni plamena [16-17]. Primjena predgrijanog vazduha, prvenstveno ima za cilj intenziviranje procesa sagorijevanja, povišenje temperature sagorijevanja, poboljšanje toplotnih pokazatelja, ali istovremeno negativno utiče na emisiju NO_x (slike 2.11-2.12).



Slika 2.11. Uticaj predgrijavanja vazduha na temperaturu plamena [16]



Slika 2.12. Uticaj predgrijavanja vazduha na emisiju CO_2 i NO_x [16]

3. KONCEPT I POSTAVKE ANALITIČKOG MODELA

Procesi sagorijevanja fosilnih goriva su visokotemperaturni, tako da je kontinuirano praćenje svih procesnih parametara, u realnim uslovima praktično otežano. Zbog toga se navedena razmatranja, u izvjesnoj mjeri, zasnivaju na teorijskim i empirijskim saznanjima.

Imajući u vidu da su reakcije sagorijevanja fosilnih goriva dominantno heterogene i zavisne od velikog broja parametara, teško je, u okviru analitičkog modeliranja definisati i uzeti u obzir uticaj svih uticajnih veličina, posebno u radnim uslovima.

Zbog toga su analizirane samo komponente produkata sagorijevanja koje su ključne sa aspekta zaštite životne sredine i toplotehničke varijable koje su značajne sa stanovišta ekonomičnosti procesa.

Osnovna hipoteza u okviru ovog rada je da postoji analitička korelacija osnovnih parametara sagorijevanja, hemijskog sastava gorljive smješe, ekonomije goriva i emisije osnovnih komponenata produkata sagorijevanja, koje dominantno utiču na aerozagađenje (CO_2 , NO_x).

Iako su, u principu, poznati trendovi pojedinačnih zavisnosti, pretpostavka je da se, „uparivanjem” više korelacija koje imaju međusobne kontraefekte, može doći do prihvatljivih kombinacija navedenih veličina.

Evidentno je da je u toplotehničkim procesima tehnološki imperativ primjena obogaćenog i predgrijanog vazduha za sagorijevanje. Međutim, dilema je u kojoj mjeri i kako ovo utiče na zapreminu NO_x , CO_2 i posredno vrijednost CO_2 ekvivalenta, što su ključne stavke sa stanovišta zaštite životne sredine.

Na osnovu teorijskih i empirijskih saznanja biće razvijen analitički model koji će definisati funkcionalnu zavisnost za temperaturu sagorijevanja (t_s):

$$t_s = f(\lambda, v(\text{O}_2)) \quad (3.1)$$

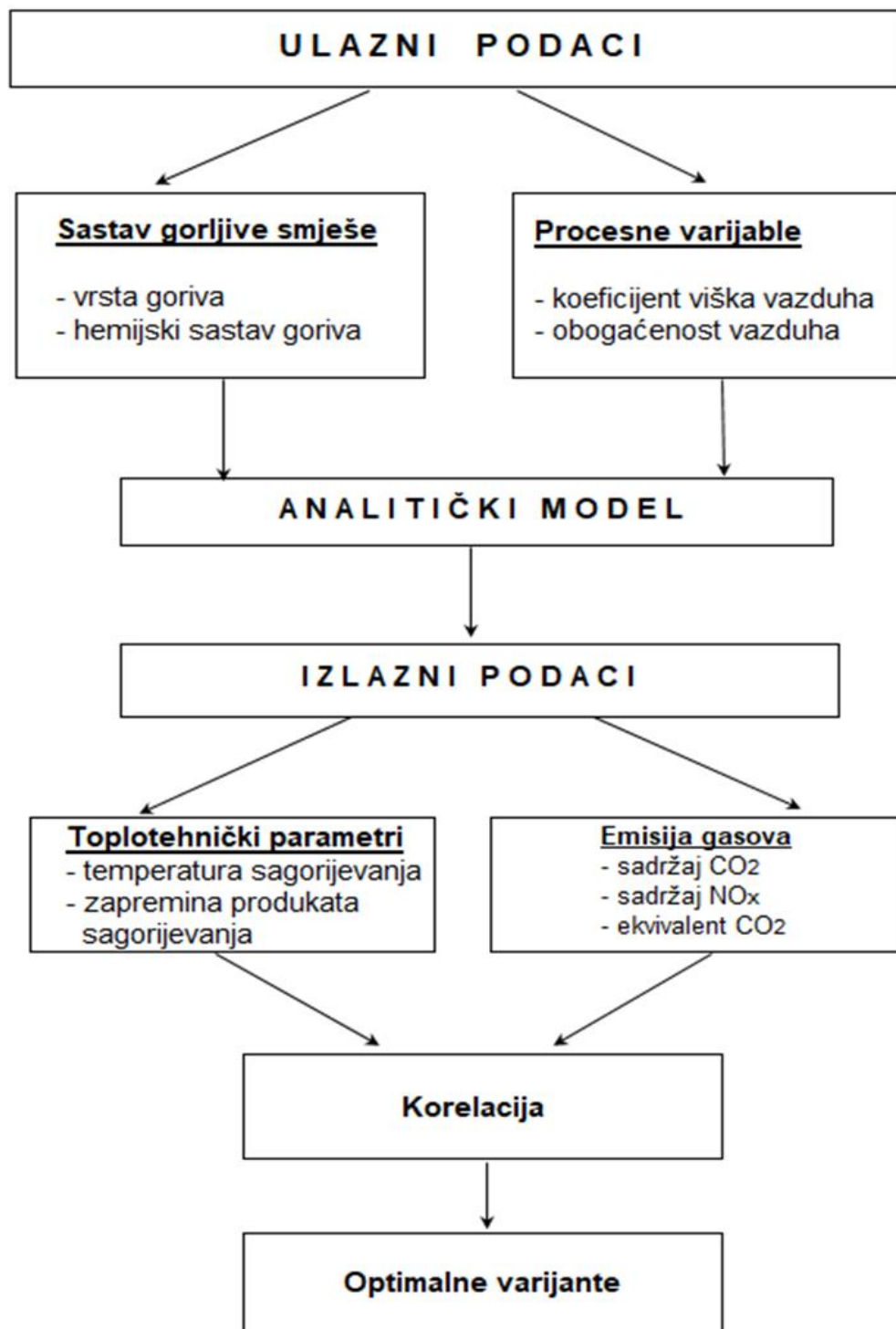
gdje je: λ – koeficijent viška vazduha

$v(\text{O}_2)$ – sadržaj kiseonika u obogaćenom vazduhu

Po sličnom principu će se izračunati teorijska specifična emisija NO_x i CO_2 po jedinici sagorelog goriva:

$$r(\text{CO}_2), r(\text{NO}_x) = f(\lambda, v(\text{O}_2)) \quad (3.2)$$

Šematski prikaz navedenih proračuna dat je na slici 3.1.



Slika 3.1. Šema analitičkih proračuna

Na bazi empirijskih saznanja o uticaju temperature na oblik azot-oksida u kome će se on formirati, definišaće se funkcionalne jednačine:

$$v(\text{NO}_x) = f(t_s) \quad (3.3)$$

$$v(\text{N}_2\text{O}) = f(t_s) \quad (3.4)$$

Sve navedene zavisnosti će se upoređivati za sve tri vrste goriva (S,L,G).

Jedan dio analitičkog modela će se odnositi na međuzavisnost:

$$\text{CO}_2(e) = f((\lambda, v(\text{O}_2))) \quad (3.5)$$

gdje je: $\text{CO}_2(e)$ – CO_2 ekvivalent.

Imajući u vidu kontradiktorne uticaje intenziviranja toplotehničkih parametara i formiranje gasova koji pojačavaju efekat staklene bašte definišaće se optimalna zona vrijednosti promjenljivih veličina, koja bi u najvećoj mogućoj mjeri zadovoljila oba navedena aspekta.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. Proračun sagorijevanja fosilnih goriva

Stvarna zapremina produkata sagorijevanja čvrstih i tečnih goriva računa se po izrazu:

$$V_{ps} = 0,01(1,867C + 0,7S + 0,8N + 11,2H + 1,244W) + 3,762O_t + (\lambda - 1) L_t; \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg} \quad (4.1)$$

gdje je: L_t - teorijska zapremina vazduha koja se izračunava kao:

$$L_t = 4,762/100 (1,867 C + 5,6 H - 0,7 O), \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg} \quad (4.2)$$

Teorijska zapremina kiseonika neophodnog za sagorijevanje računa se kao:

$$O_t = 0,01(1,867 C + 5,6 H - 0,7 O), \text{ m}^3_{(n)}/\text{kg} \quad (4.3)$$

Zapremina produkata sagorijevanja gasovitih goriva se, u slučajevima kada se N_2 ne ponaša potpuno inertno, računa po izrazu:

$$V_{ps} = \Sigma CO_2 + \Sigma H_2O + \Sigma NO_x + \Sigma O_2 + \Sigma N_2 \quad (4.4)$$

Vrlo važan uticaj na produkte sagorijevanja ima temperatura sagorijevanja, koja se, u slučaju bez predgrijavanja vazduha, računa po izrazu:

$$t_s = Q_g / V_{ps} \cdot c_p \quad (4.5)$$

gdje je: Q_g – toplotna moć goriva, (J/m^3)

V_{ps} – zapremina produkata sagorijevanja, (m^3/kg ; m^3/m^3)

c_p - specifična toplota produkata sagorijevanja ($J/m^3, ^\circ C$).

Koristeći empirijske podatke o raspodjeli N_2 pri formiranju NO_x , definisana je zapremina dijela obrazovanih NO_x oksida pri sagorijevanju navedenih goriva:

$$V_{(NO_x)g} = ((0,95 \cdot 2 V(N_2) + 0,05 \cdot V(N_2)) = 1,95 \cdot V(N_2), \text{ m}^3/\text{kg} \quad (4.6)$$

Iako u momentu formiranja NO dominira, nakon izlaska gasova iz dimnjaka NO se dopunski oksidiše do NO_2 , tako da se realno, formirani NO_x , može tretirati kao gas koji zrači (3 i više atomni), te se u cjelosti, može smatrati gasom sa efektom staklene bašte.

Konačna zapremina NO_x se može definisati preko proizvoda dvije promjenljive empirijske zavisnosti:

$$V_{(NO_x)} = k_{1(Ng)} \cdot k_{2(ts)} \quad (4.7)$$

gdje je: – $k_{1(Ng)}$ – empirijski izraz koji definiše uticaj polaznog sadržaja N u gorivu,
 – $k_{2(ts)}$ – empirijski izraz koji definiše uticaj temperature sagorijevanja na
 formiranje termičkog NO_x .

Kao polazna osnova za navedene proračune uzeti su različiti sastavi čvrstih, tečnih i gasovitih goriva, koji su prikazani u tabelama 4.1-4.3.

Tabela 4.1. Hemijski sastav analiziranih čvrstih goriva

Oznaka	C	H	O	N	S	W	A
S1	70	5,5	4,2	1,5	4,8	3	11
S2	75	4,2	3	2,1	4,2	2,5	9
S3	79	2,5	2,5	2,5	3	2,5	8

Tabela 4.2. Hemijski sastav analiziranih tečnih goriva

Oznaka	C	H	O	N	S	W	A
L1	81	14,1	0,3	0,15	1,8	1,5	1,6
L2	87	7,5	0,2	1	1	3	0,3
L3	89	7,65	0,25	2	0,6	0,1	0,4

Tabela 4.3. Hemijski sastav analiziranih gasovitih goriva

Oznaka	CH ₄	H ₂	CO	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	O ₂	H ₂ O	N ₂
G1	84	-	-	0,5	0,7	-	-	8,2	8,6
G2	10,2	27,4	15,4	1,5	-	4	2,4	1,6	33,5
G3	24,4	4,2	3,8	12,5	4,1	1,2	1,1	0,8	47,9

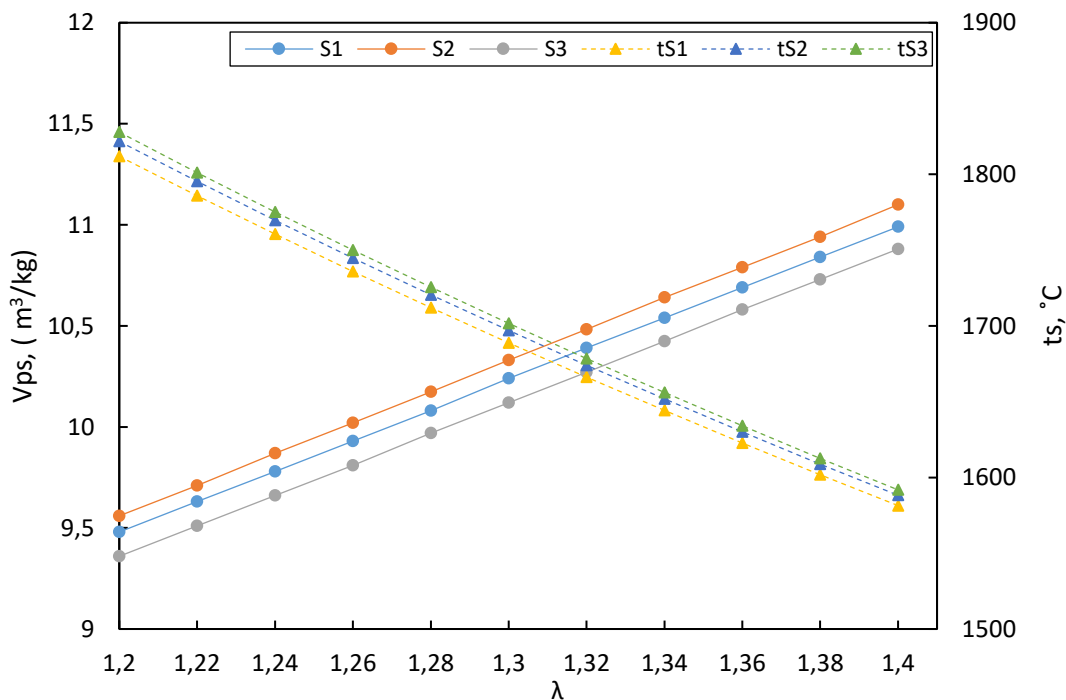
4.2. Uticaj koeficijenta viška vazduha na parametre sagorijevanja

Vrijednosti koeficijenta viška vazduha (λ), za svaku vrstu analiziranog goriva su odabrane iz opsega koji odgovaraju realnim praktičnim uslovima sagorijevanja istih u industrijskim agregatima (tabela 4.4).

Tabela 4.4. Toplotna moć i primarni uslovi sagorijevanja analiziranih goriva

	S1	S2	S3	L1	L2	L3	G1	G2	G3
λ	1,2-1,4	1,2-1,4	1,2-1,4	1,02-1,22	1,02-1,22	1,02-1,22	1,02-1,22	1,02-1,22	1,02-1,22
Qd	29,41 (MJ/kg)	29,91 (MJ/kg)	29,12 (MJ/kg)	42,1 (MJ/kg)	37,2 (MJ/kg)	38,1 (MJ/kg)	30,99 (MJ/m ³)	9,47 (MJ/m ³)	19,85 (MJ/m ³)

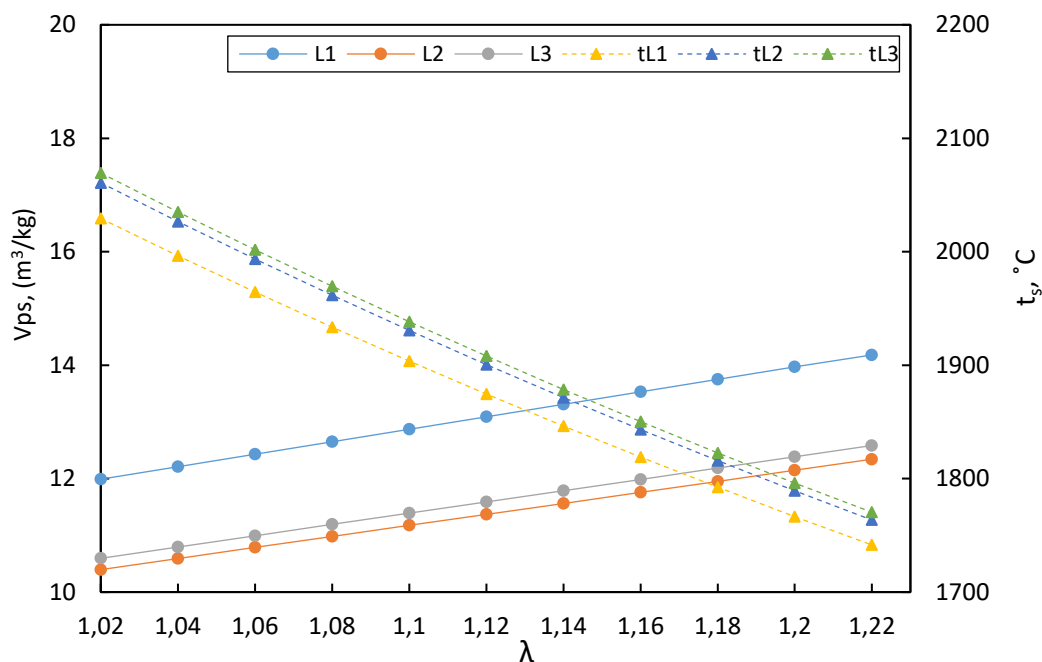
Imajući u vidu da zapremina produkata sagorijevanja i njihov toplotni efekat, uslovljen prvenstveno temperaturom sagorijevanja, znatno utiču na emisiju gasova sa efektom staklene bašte, analitički je određena njihova zavisnost od primarnih uslova sagorijevanja, reflektovani kroz koeficijent viška vazduha (slike 4.1-4.3).



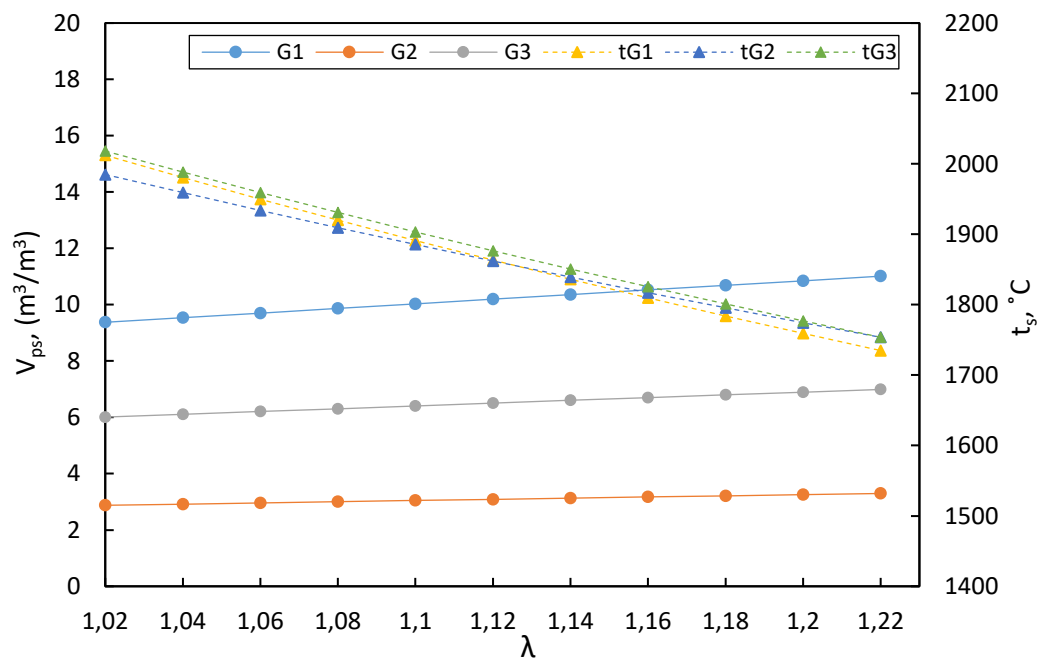
Slika 4.1. Uticaj λ na zapreminu i temperaturu produkata sagorijevanja čvrstih goriva

U toplotehničkoj praksi je poznato da je višak vazduha neophodan za početak i tok reakcija sagorijevanja goriva i to je posebno izraženo pri upotrebi siromašnijih fosilnih goriva.

Zbog prirode samog procesa sagorijevanja, vrijednosti koeficijenta viška vazduha (λ) su veće pri sagorijevanju čvrstih nego tečnih i gasovitih goriva.



Slika 4.2. Uticaj λ na zapreminu i temperaturu produkata sagorijevanja tečnih goriva



Slika 4.3. Uticaj λ na zapreminu i temperaturu produkata sagorijevanja gasovitih goriva

Analizom rezultata proračuna jasno se uočavaju dva suprotstavljena trenda uticaja povećanja koeficijenta viška vazduha. Porast vrijednosti λ uzrokuje linearni porast

zapremine produkata sagorijevanja (dimnih gasova) i pad temperature sagorijevanja kod svih vrsta goriva.

Razlika se ogleda u apsolutnim vrijednostima tih veličina, što je posledica različitog hemijskog sastava, donje toplotne moći goriva, kao i vrijednosti samog koeficijenta λ .

Uočljivo je da su u slučaju gasovitih goriva (slika 4.3) razlike u vrijednostima V_{ps} izraženije nego kod čvrstih i tečnih goriva, što je posledica velikih razlika u sadržaju gorljivih komponenti i toplotnoj moći analiziranih goriva: (G1- prirodni gas velike toplotne moći, G2 i G3 – “siromašne” gasne smješe).

Ako se ove zavisnosti posmatraju iz ugla toplotne efikasnosti procesa sagorijevanja, onda je jasno da svako sniženje temperature sagorijevanja umanjuje toplotni efekat, što nije poželjno.

Sa druge strane, ako se primarno posmatra, sa aspekta zaštite životne sredine, svako povećanje V_{ps} u principu dovodi do povećane emisije gasovitih polutanata, osim ako ona nije dominantno uslovljena temperaturom sagorijevanja.

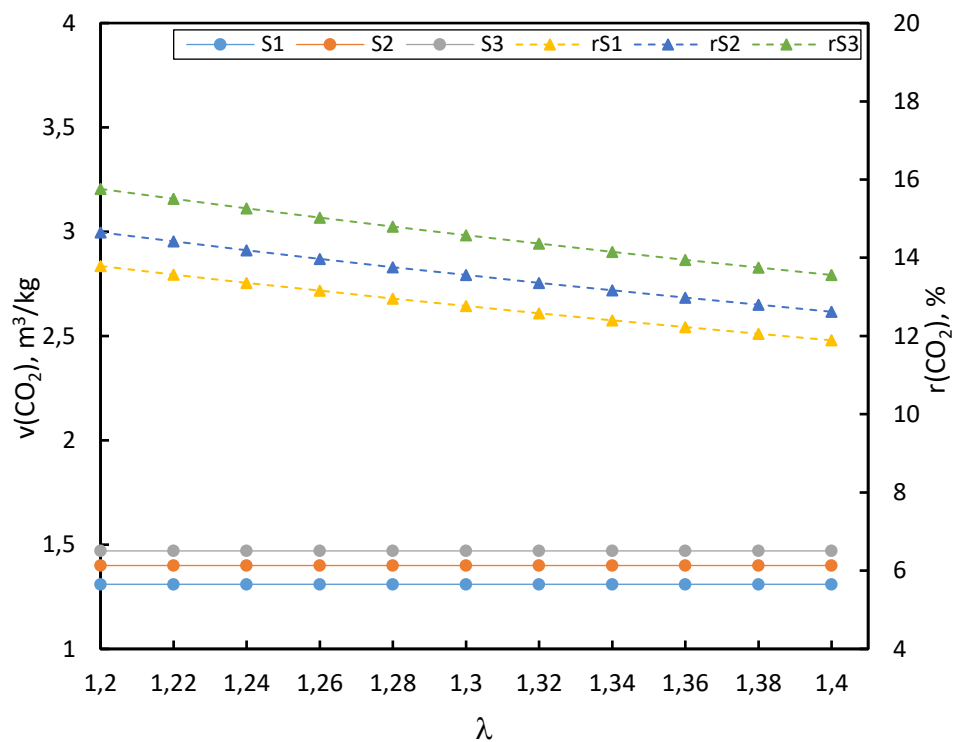
Oba navedena, na prvi pogled, negativna efekta su u stvari “mjera kompromisa” sa neophodnim procesnim parametrima, za koje je neophodan određeni višak vazduha.

4.3. Uticaj koeficijenta viška vazduha na emisiju gasova sa efektom staklene bašte

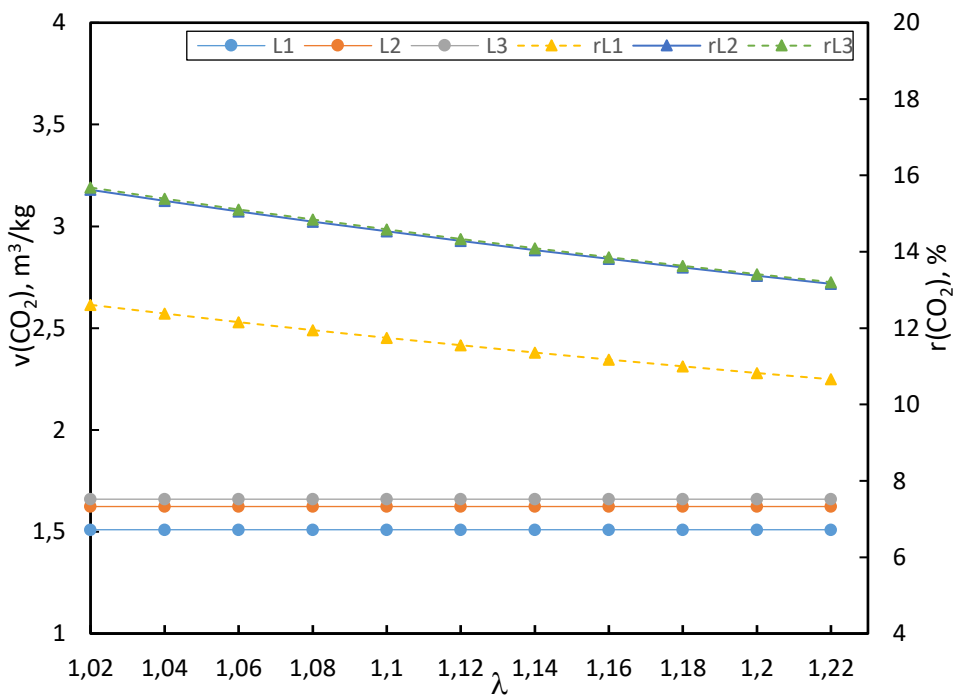
Kao ključne gasovite komponente sa efektom staklene baste analitički su proračunate emisije CO_2 i NO_x . Pod izrazom NO_x se podrazumijeva suma NO i NO_2 , pri čemu je fokus dat na formiranje “termičkih” NO_x , imajući u vidu radne temperature u zoni sagorijevanja i njihova zavisnost od koeficijenta viška vazduha. Koristeći empirijske podatke [6, 18] definisana je zavisnost (4.7), koja daje korelaciju NO_x i temperature sagorijevanja, a indirektno i λ .

U slučaju emisije CO_2 , korišćeni su klasični stehiometrijski proračuni, s obzirom na to da je koeficijent viška vazduha dovoljan da obezbijedi neophodnu zapreminu (“višak”) kiseonika, tako da se, u konačnom, može aproksimirati da sav C sagorijeva do CO_2 .

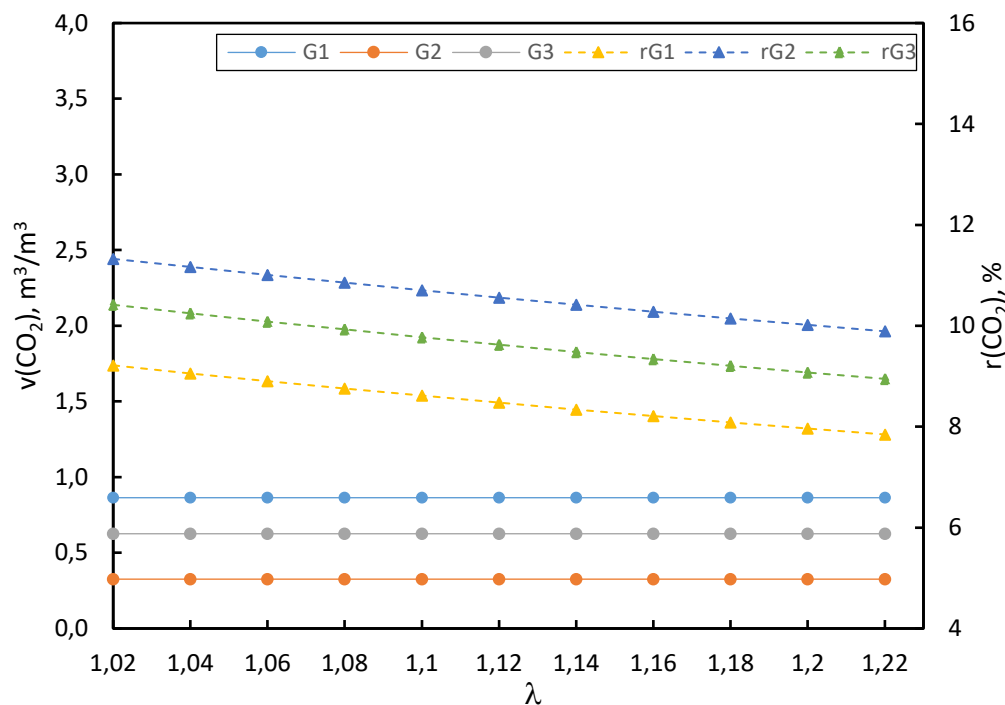
Na slikama 4.4-4.6 date su zavisnosti emisije CO_2 po jedinici mase (čvrstih i tečnih) i zapremine (gasovitih) goriva, kao i relativni procentualni udio CO_2 u ukupnoj zapremini gasovitih produkata.



Slika. 4.4. Uticaj λ na zapreminsku emisiju i % udio CO_2 pri sagorijevanju čvrstih goriva



Slika. 4.5. Uticaj λ na zapreminsku emisiju i % udio CO_2 pri sagorijevanju tečnih goriva



Slika. 4.6. Uticaj λ na zapreminsku emisiju i % udio CO_2 pri sagorijevanju gasovitih goriva

Analizom dobijenih rezultata uočava se da, kod svih goriva, pojedinačna apsolutna vrijednost emisije CO_2 ostaje nepromijenjena, bez obzira na povećanje koeficijenta viška vazduha.

Ovo se objašnjava činjenicom da vrijednost $v(\text{CO}_2)$ zavisi isključivo od hemijskog sastava goriva, tj. polaznog sadržaja C, kao glavne gorljive komponente. Višak vazduha, koji predstavlja tehnološki preduslov za nesmetano odvijanje sagorijevanja, ne učestvuje u samoj reakciji, zato i ne uzrokuje povećanje emisije CO_2 .

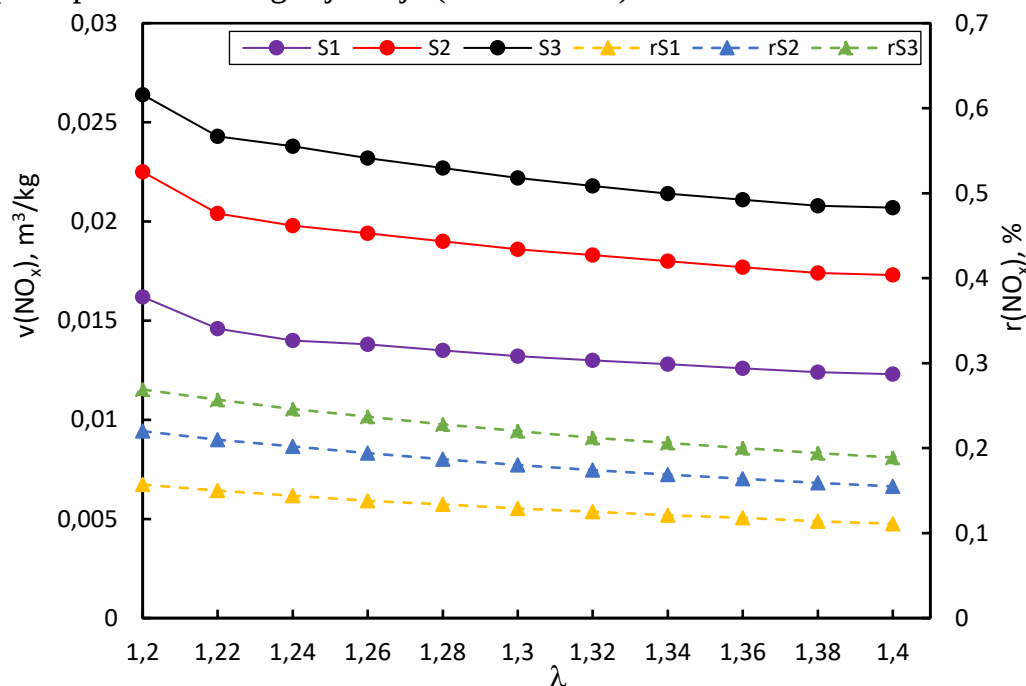
Zapremina CO_2 , koja se oslobodi po jedinici mjere sagorelog goriva je nešto veća kod analiziranih tečnih goriva u odnosu na čvrsta i gasovita goriva, ali i to treba posmatrati uslovno, tj. kao posledicu polaznog sastava.

Međutim, ako se posmatra relativni udio $r(\text{CO}_2)$ u produktima sagorijevanja, koji je relevantniji uporedni parametar, s obzirom na različito agregatno stanje goriva, vidi se da ova vrijednost u svim slučajevima opada sa porastom koeficijenta λ . Ovakav trend je uzrokovan povećanjem zapremine produkata sagorijevanja u odnosu na koju se relativni udio CO_2 računa.

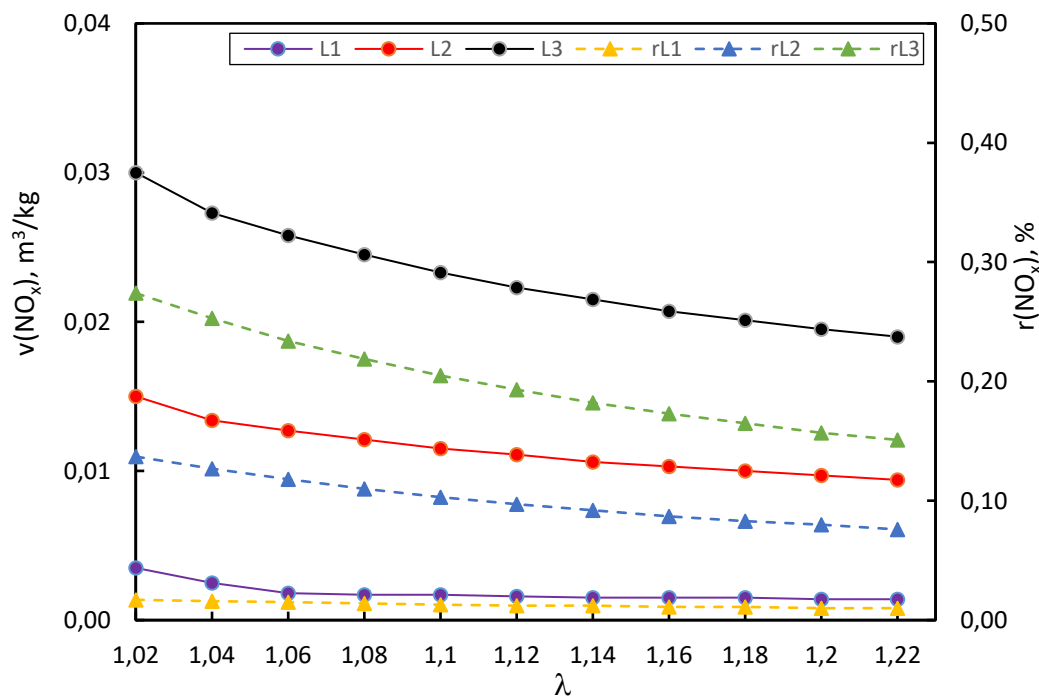
Evidentno je da $r(\text{CO}_2)$ u slučaju gasovitih goriva ima znatno manje vrijednosti u odnosu na tečna i čvrsta goriva. Ovo je posebno bitno jer bi, na prvi pogled, niže vrijednosti λ kod gasovitih goriva ($1,02 \div 1,22$) u odnosu na čvrsta ($1,2 \div 1,4$) trebalo da uzrokuju veći relativni udio CO_2 . Navedena kolizija pokazuje da su efekti sagorijevanja gasovitih

goriva dovoljno dominantni u odnosu na čvrsta, da mogu, u konačnom, anulirati i ovakve negativne trendove.

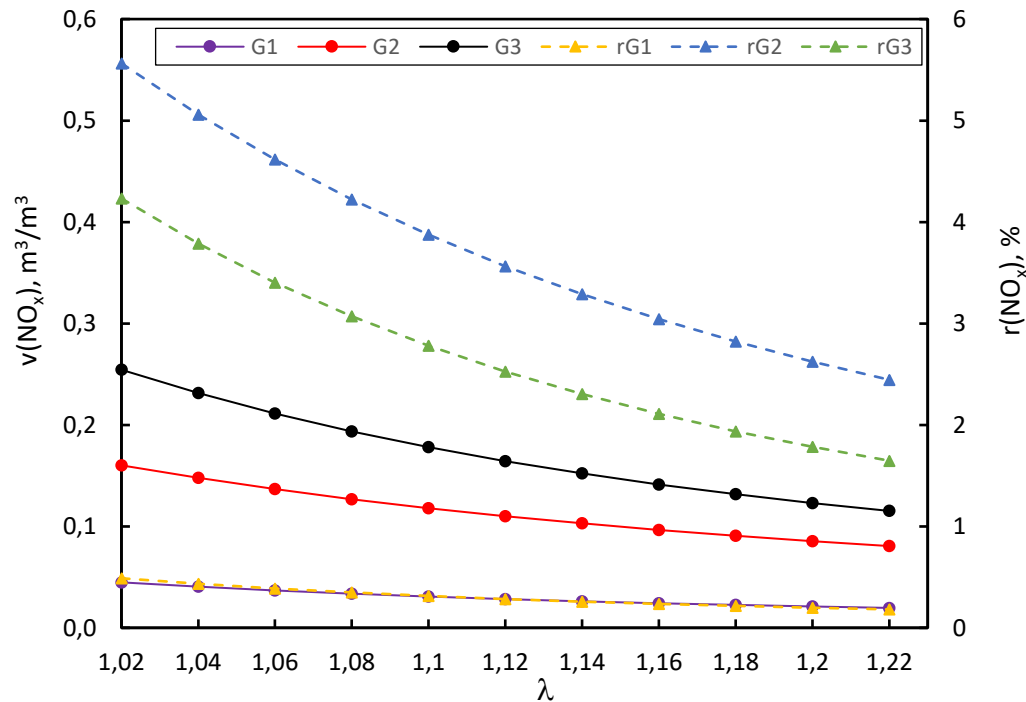
Shodno razmatranim mehanizmima nastanka NO_x oksida pri sagorijevanju različitih vrsta goriva, definisane je uticaj koeficijenta λ na emisiju i zapreminski udio ovih oksida u ukupnim produktima sagorijevanja (slike 4.7-4.9).



Slika. 4.7. Uticaj λ na zapreminsku emisiju i % udio NO_x pri sagorijevanju čvrstih goriva



Slika. 4.8. Uticaj λ na zapreminsku emisiju i % udio NO_x pri sagorijevanju tečnih goriva



Slika. 4.9. Uticaj λ na zapreminsku emisiju i % udio NO_x pri sagorijevanju gasovitih goriva

Kao granične vrijednosti u analitičkom modelu korišćeni su podaci da max 40% N iz čvrstih i tečnih, odnosno max. 5 % iz gasovitih goriva prelazi u NO_x . Osim toga, u skladu sa empirijskim podacima [6,18], uzeto je da max. 20% ukupne zapremine NO_x čini termički NO_x .

Za sve tipove analiziranih goriva uočavaju se slične zavisnosti. Povećanjem koeficijenta viška vazduha λ specifična zapremina NO_x po jedinici mjere goriva opada i to po blago eksponencijalnoj zavisnosti.

Ovakav trend se može objasniti indirektnim uticajem λ , tj. činjenicom da rast ovog parametra dovodi do sniženja temperature plamena, a niža t_s , saglasno empirijskoj relaciji (4.7), eksponencijalno snižava dio azota, koji, na $t > 1300$ °C reaguje sa kiseonikom iz vazduha, obrazujući “termički” NO_x .

Za razliku od navedenih korelacija, relativni udio $r(\text{NO}_x)$ u produktima sagorijevanja čvrstih i tečnih goriva, opada sa porastom λ , po znatno blažoj, približno linearnoj zakonitosti.

Iako povećanje λ ima dvostruki, obrnuto-proporcionalni uticaj na $r(\text{NO}_x)$, kroz sniženje temperature sagorijevanja i povećanje zapremine produkata sagorijevanja, ipak je udio azota u ovim gorivima a samim tim i NO_x u produktima sagorijevanja veoma mali, što uslovljava linearni a ne izraženiji eksponencijalni pad.

Nasuprot tome, kod gasovitih goriva (slika 4.9), polazni sadržaj N_2 je znatno veći (posebno u G2 i G3), zbog čega dolazi do izražaja navedeno dvostruko dejstvo λ , tako da su zavisnosti $r(NO_x)=f(\lambda)$ izraženije od $v(NO_x)=f(\lambda)$.

Generalno posmatrajući, vidljivo je da u ovim višestrukim korelacijama, zapremina obrazovanog NO_x dominantno zavisi od polaznog sadržaja azota u gorivu, i u nešto manjem obimu od koeficijenta viška vazduha, tj. temperature sagorijevanja.

Da bi različita goriva bila uporediva u pogledu emisije gasova staklene bašte često se upotrebljavaju koeficijenti emisije:

$$K(CO_2) = k_1 * gC/Qd, \text{ [kg/GJ]} \quad (4.8)$$

gdje je: - k_1 - stehiometrijski koeficijent,
 - gC - udio C u gorivu,
 - Qd - donja toplotna moć goriva.

Za proračun emisije NO_x koristi se izraz:

$$K(NO_x) = k_2 * g(NO_x)/Qd, \text{ [g/GJ]} \quad (4.9)$$

gdje je: - k_2 - stehiometrijski koeficijent,
 - $g(NO_x)$ - udio N u gorivu, preračunat na NO_x
 - Qd - donja toplotna moć goriva.

Koristeći navedene relacije definisan je uticaj viška vazduha na ove koeficijente. Pošto emisija CO_2 zavisi isključivo od polaznog sadržaja C u gorivu, $K(CO_2)$ je konstantna veličina za određeni sastav goriva, i ne zavisi od λ (tabela 4.5).

Tabela 4.5. Koeficijenti emisije CO_2 za analizirana goriva

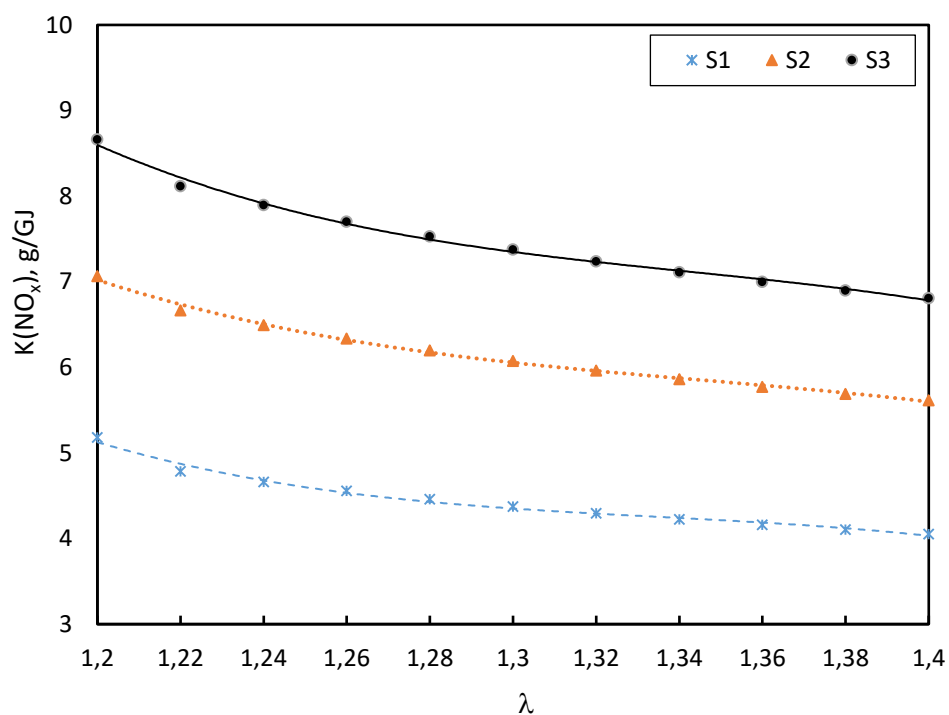
*	S1	S2	S3	L1	L2	L3	G1	G2	G3
$K(CO_2)$, [kg/GJ]	84,4	92,3	98,8	70,6	85,8	85,9	54,8	59,3	60,8

Iz prezentiranih podataka se uočava da je koeficijent emisije CO_2 znatno manji kod gasovitih nego kod čvrstih i tečnih goriva.

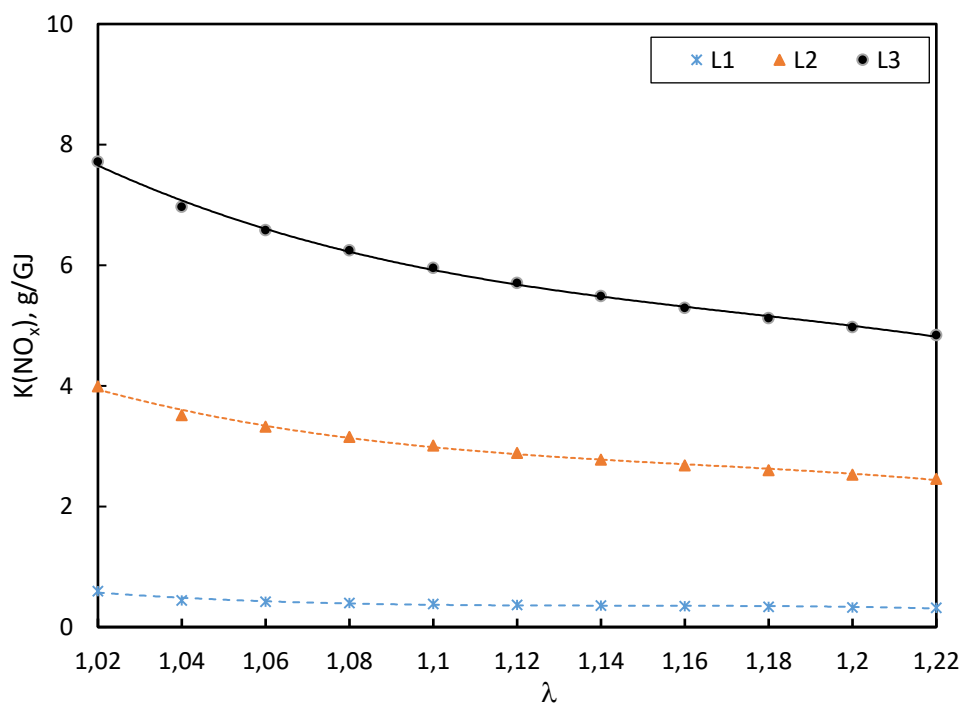
Ovo se prvenstveno može objasniti polaznim hemijskim sastavom goriva, jer kod gasovitih goriva, osim C, koji je u čvrstim i tečnim gorivima izrazito dominantna gorljiva komponenta, postoji i znatna količina vodonika, bilo da je elementaran (H_2) ili u vidu ugljovodonika C_nH_m .

Usled toga, u produktima sagorijevanja, osim CO_2 obrazuje se i velika količina H_2O , što u relativnom umanjuje $K(CO_2)$. Osim toga, sama priroda sagorijevanja gasovitih goriva doprinosi manjim vrijednostima $K(CO_2)$.

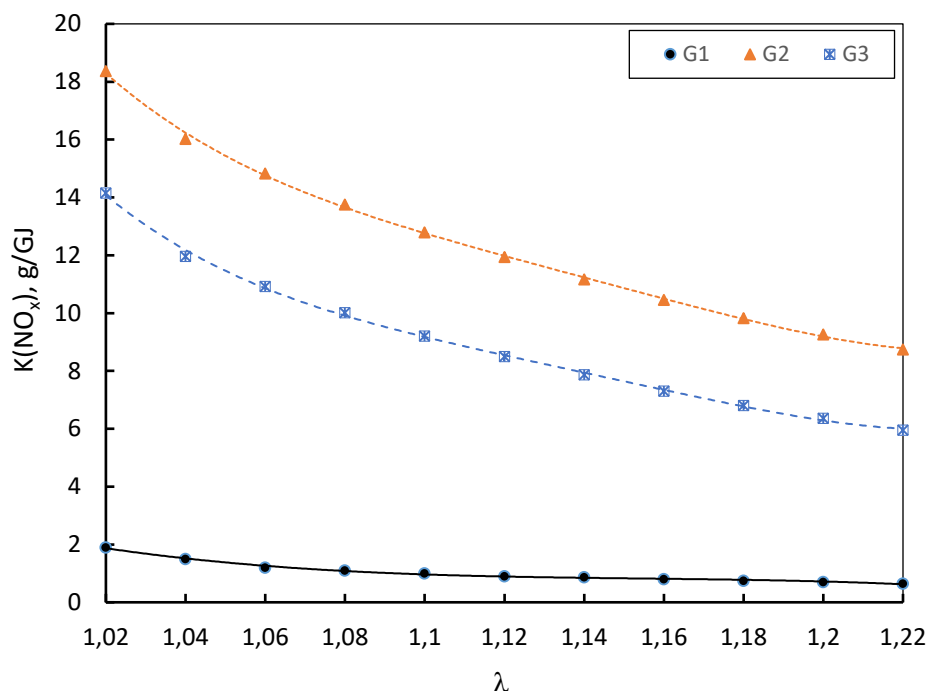
Za razliku od CO_2 , koeficijent emisije NO_x evidentno zavisi od temperature plamena a samim tim, indirektno, i od koeficijenta λ (slike 4.10-4.12).



Slika. 4.10. Uticaj λ na $K(\text{NO}_x)$ pri sagorijevanju čvrstih goriva



Slika. 4.11. Uticaj λ na $K(\text{NO}_x)$ pri sagorijevanju tečnih goriva



Slika. 4.12. Uticaj λ na $K(\text{NO}_x)$ pri sagorijevanju gasovitih goriva

U svim analiziranim slučajevima (za sve vrste goriva) uočava se da koeficijent emisije NO_x opada sa povećanjem koeficijenta λ , po blago eksponencijalnoj zavisnosti, što je posledica snižavanja temperature sagorijevanja.

Interesantno je da u slučajevima čvrstih i tečnih goriva (slike 4.10 i 4.11) apsolutne vrijednosti $K(\text{NO}_x)$ dominantno zavise od hemijskog sastava goriva, tj. polaznog sadržaja azota u gorivu. Saglasno tome, goriva sa najvećim polaznim sadržajem N (S3 i L3) imaju najveće vrijednosti $K(\text{NO}_x)$, jer goriva iste klase imaju približne vrijednosti Q_d .

Nasuprot tome, kod gasovitih goriva, G3 ima veći % azota, ali manju vrijednost $K(\text{NO}_x)$ od G2, što se može objasniti znatno većom toplotnom moći. U slučaju G1 postoje oba pozitivna faktora (nizak % N i visoka Q_d), koji uslovljavaju nižu emisiju NO_x , tako da je kod njega vrijednost $K(\text{NO}_x)$ znatno manja.

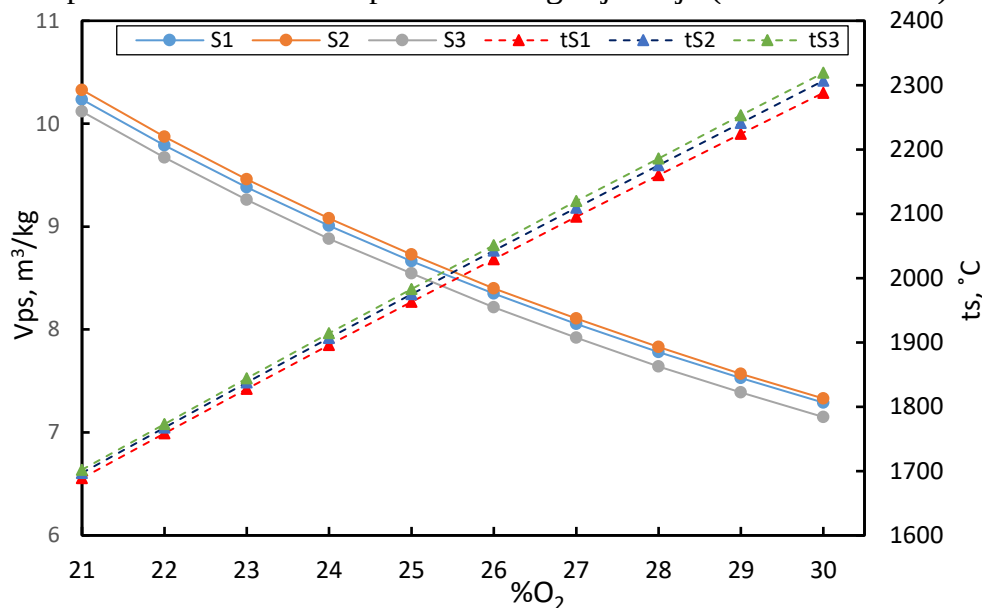
Iako bi, na prvi pogled, “siromašna goriva”, zbog niže temperature sagorijevanja, trebalo da imaju manji potencijal za stvaranje “termičkog” NO_x , dominantnu ulogu ima njihova niska toplotna moć, koja uslovljava visoke vrijednosti koeficijenta emisije.

Upravo korišćenje ovakvih goriva tehnološki iziskuje povećanje koeficijenta viška vazduha, što snižava toplotne parametre sagorijevanja, ali, kao što je navedeno, pozitivno utiče na sniženje emisije NO_x .

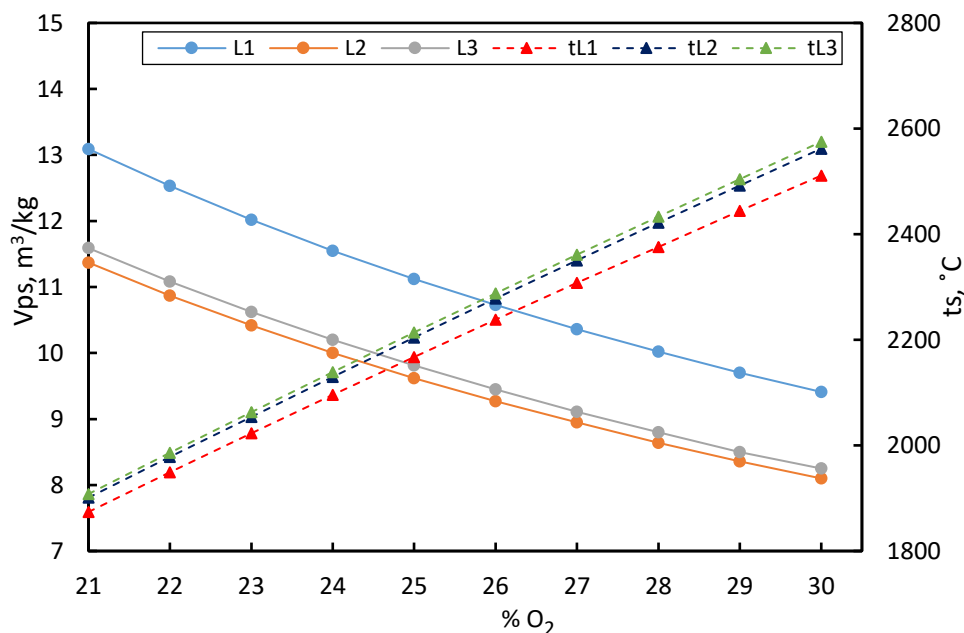
4.4. Uticaj obogaćivanja vazduha kiseonikom na parametre sagorijevanja

Jedan od načina postizanja bolje ekonomije goriva, i toplotnih pokazatelja sagorijevanja je korišćenje vazduha obogaćenog kiseonikom ili, kao radikalnija metoda, korišćenje “oxy-fuel” smješa, gdje se osim kiseonika može koristiti i “povratni” CO₂.

Kao posledica intenziviranja procesa sagorijevanja dolazi do promjene temperature plamena i zapremine obrazovanih produkata sagorijevanja (slike 4.13- 4.15).

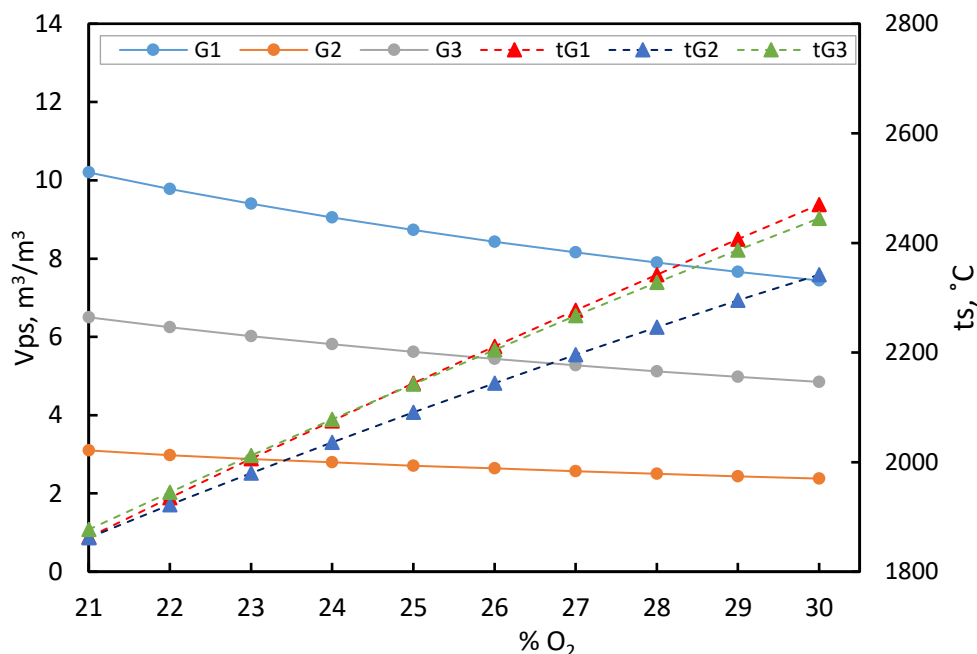


Slika 4.13. Uticaj % O₂ u vazduhu na zapreminu produkata i temperaturu sagorijevanja čvrstih goriva ($\lambda = 1,3$)



Slika 4.14. Uticaj % O₂ u vazduhu na zapreminu produkata i temperaturu sagorijevanja tečnih goriva ($\lambda = 1,12$)

Kao tipski, reprezentativni primjeri međuzavisnosti navedenih parametara, prezentirani su grafici koji se odnose na srednju vrijednost koeficijenta λ , iz analiziranog opsega za sve vrste goriva (1,3 za čvrsta i 1,12 za tečna i gasovita).



Slika 4.15. Uticaj % O₂ u vazduhu na zapreminu produkata i temperaturu sagorijevanja gasovitih goriva ($\lambda = 1,12$)

Grafički prikazi izvedenih proračuna pokazuju da, kod svih vrsta goriva, sa obogaćivanjem vazduha za sagorijevanje, tj. povećanjem % kiseonika u njemu, zapremina produkata sagorijevanja opada, a temperatura plamena raste.

Apsolutne vrijednosti V_{ps} i t_s , za pojedine sastave goriva, najmanje se razlikuju kod čvrstih a najviše kod gasovitih goriva. Osim toga linije promjene temperature sagorijevanja tG1 i tG3 se sijeku za 25%O₂, što ukazuje na različit intenzitet njenog rasta. Ovo se javlja kao posledica velikih razlika u hemijskom sastavu i donjoj toplotnoj moći analiziranih gasovitih goriva.

Uzimajući u obzir rezultate proračuna iz poglavlja 4.2. može se zaključiti da koeficijent viška vazduha i obogaćivanje vazduha kiseonikom imaju suprotan efekat na temperature sagorijevanja i zapreminu produkata sagorijevanja, što indirektno utiče na emisiju NOx.

U ovakvim slučajevima je neophodno naći tehnološki “kompromis”, tj. optimalnu varijantu koja će, za određenu vrstu i sastav goriva, dati najpovoljnije uslove sagorijevanja, naravno uzimajući u obzir smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu. Navedene korelacije se mogu definisati za bilo koji koeficijent viška vazduha, a numerički rezultati analitičkog modela su dati u Prilogu.

4.5. Uticaj obogaćenosti vazduha na emisiju gasova sa efektom staklene bašte

U okviru ovog rada analitički je analiziran uticaj obogaćivanja gorljive smješe kiseonikom na emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Proračun je urađen za sadržaje kiseonika u granicama 21-30%, za sve analizirane vrste goriva.

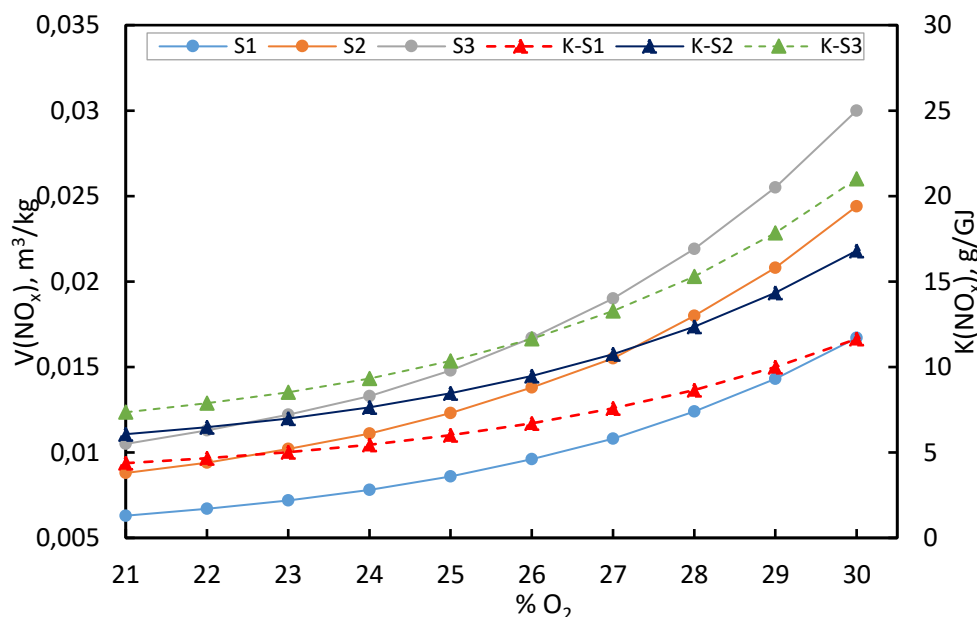
Slično prethodnim objašnjenjima o uticaju koeficijenta viška vazduha i u ovom slučaju je jasno pokazano da emisija CO_2 zavisi isključivo od polaznog sadržaja C i stehiometrijskih korelacija, a ne od stepena obogaćenosti vazduha. Vrijednosti izračunate zapreminske emisije i koeficijenta emisije CO_2 , po jedinici sagorelog goriva prikazane su u tabeli 4.6.

Tabela 4.6. Zapreminska emisija i koeficijenti emisije CO_2 za analizirana goriva

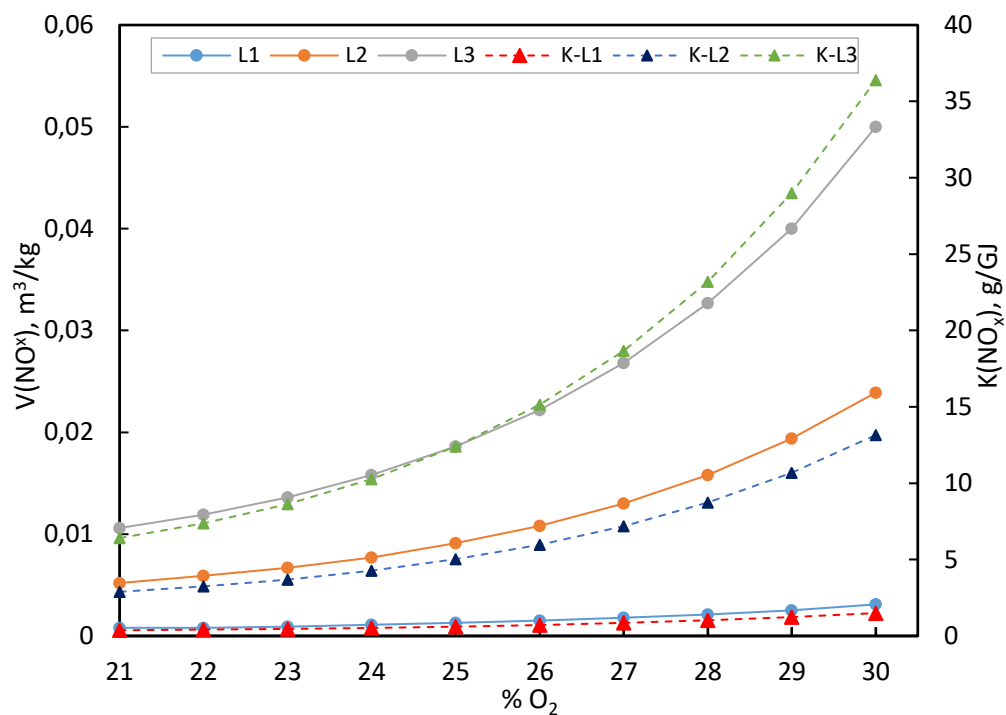
*	S1	S2	S3	L1	L2	L3	G1	G2	G3
$V(\text{CO}_2)$, m^3/kg , m^3/m^3	1,31	1,4	1,47	1,51	1,62	1,66	0,86	0,33	0,63
$K(\text{CO}_2)$, [kg/GJ]	84,4	92,3	98,8	70,6	85,8	85,9	54,8	59,3	60,8

Niža zapreminska emisija CO_2 kod gasovitih goriva može se objasniti nižim udjelom C u ukupnoj masi goriva, što za posledicu ima niže vrijednosti Qd. Iako niža Qd nije povoljna sa toplotehničkog stanovišta, posmatrajući $K(\text{CO}_2)$, kao važan referentni parametar uticaja na životnu sredinu, uočava se da su njegove vrijednosti znatno niže kod gasovitih nego kod čvrstih i tečnih goriva.

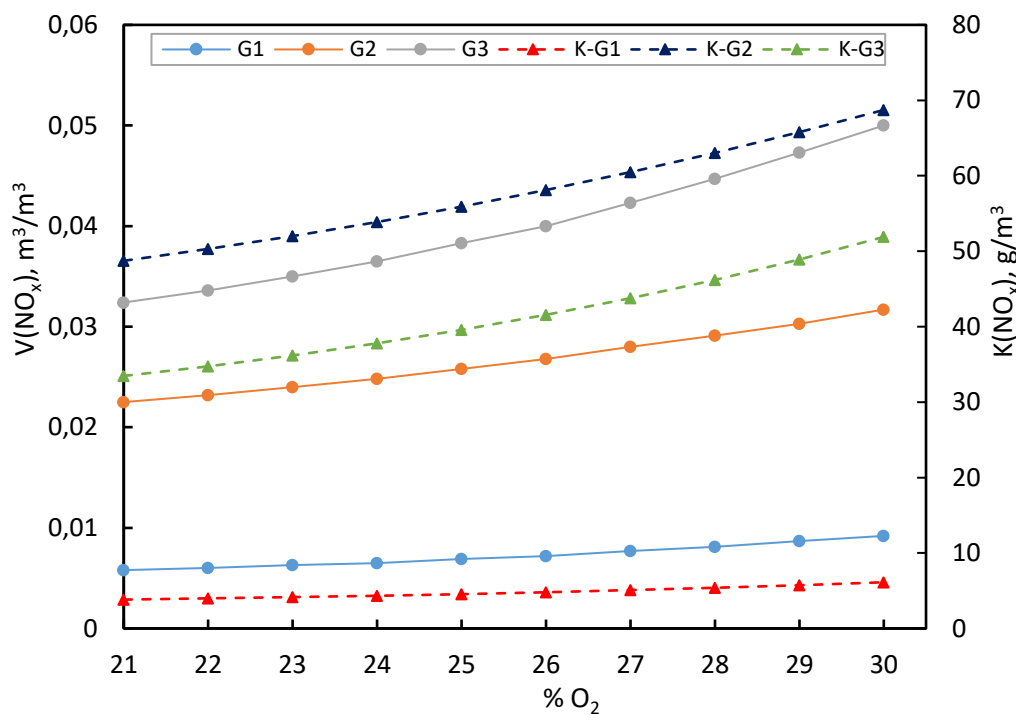
Uticaj sadržaja O_2 u obogaćenom vazduhu na zapreminsku emisiju NO_x i koeficijent emisije $K(\text{NO}_x)$ prikazan je na slikama 4.16 - 4.18.



Slika 4.16. Uticaj % O_2 na zapreminsku emisiju i koeficijent emisije NO_x kod čvrstih goriva ($\lambda=1,3$)



Slika 4.17. Uticaj $\% O_2$ na zapreminsku emisiju i koeficijent emisije NO_x kod tečnih goriva ($\lambda=1,12$)



Slika 4.18. Uticaj $\% O_2$ na zapreminsku emisiju i koeficijent emisije NO_x kod gasovitih goriva ($\lambda=1,12$)

Analitički proračuni su rađeni za sve vrste goriva, i sve vrijednosti koeficijenta viška vazduha, ali su prikazane samo grafičke zavisnosti za srednje vrijednosti λ (1,2 kod čvrstih i 1,12 kod tečnih i gasovitih goriva). Numerički rezultati za ostale vrijednosti λ , dati su u Prilogu.

Kod svih analiziranih goriva uočava se da emisija NO_x raste sa obogaćivanjem vazduha, tj. porastom % O_2 , manje ili više po približno eksponencijalnom zakonu.

Uticaj % O_2 u vazduhu je dvojak. S jedne strane, sa povećanjem % O_2 opada % N_2 u vazduhu i time se umanjuje jedan od raspoloživih “izvora” nastanka NO_x . Međutim, sa druge strane, povećanjem sadržaja O_2 , znatno se povećava temperatura sagorijevanja, što je osnovni preduslov za formiranje “termičkog” NO_x . Očigledno je da je drugi uticaj dominantan, tako da, u konačnom, obogaćivanje vazduha kiseonikom dovodi do povećanja emisije NO_x .

Ako se upoređuju vrijednosti $K(\text{NO}_x)$ za različite hemijske sastave pojedinih vrsta goriva, vidi se da su razlike izraženije kod gasovitih i tečnih goriva nego kod čvrstih, posebno za veće % O_2 , tj. u zoni viših temperatura sagorijevanja. Ovo se direktno može objasniti razlikama u polaznom sadržaju azota u pojedinim gorivima, jer su one najizraženije kod gasovitih goriva.

Međutim, ako se analiziraju relativne promjene: $K(\text{NO}_x) = f(\% \text{O}_2)$, vidljivo je da su one najmanje kod gasovitih goriva, što se, vjerovatno, može dovesti u vezu sa činjenicom da, zbog velikog polaznog sadržaja N_2 u gorivu, dominira taj “izvor” NO_x , u odnosu na onaj iz vazduha. Osim toga priroda formiranja gorljive smješe gas-vazduh, odnosno intenzitet njihovog miješanja smanjuje mogućnost obrazovanja “džepova” smješe bogate azotom, što je neophodno za prekomjerno nastajanje termičkog NO_x .

Karakteristično je da prikazane korelacije kod gasovitih goriva (slika 4.18) ne prate princip da veći polazni sadržaj N_2 dovodi do većeg $K(\text{NO}_x)$, jer najveću vrijednost koeficijenta emisije ima G2 a najmanju G1. Pošto je $K(\text{NO}_x)$ direktno proporcionalan polaznom % N_2 a obrnuto proporcionalan toplotnoj moći goriva (Q_d), evidentno je da potpuna sinergija ova dva faktora postoji kod G1 (nizak % N_2 i visoka Q_d). U slučaju G2 i pored relativno velikog sadržaja azota, toplotna moć goriva je izrazito niska, tako da zbirno dominira uticaj Q_d , uzrokujući visoke vrijednosti $K(\text{NO}_x)$.

4.6. Analiza istovremenog uticaja koeficijenta λ i obogaćenosti vazduha

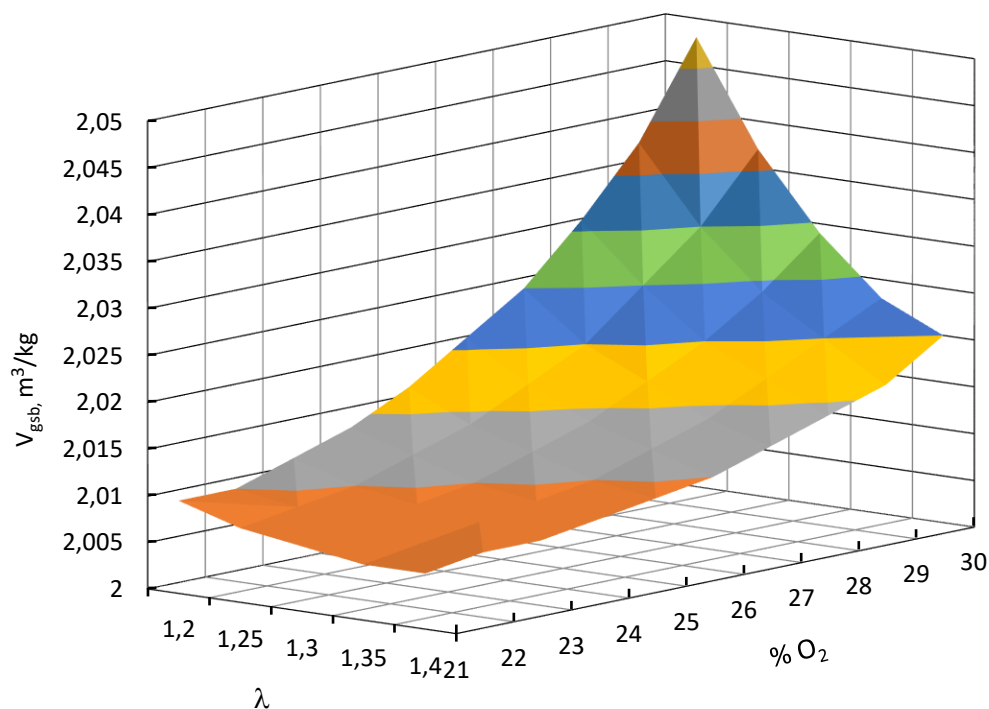
U industrijskim procesima u kojima se koriste fosilna goriva, često se, u cilju poboljšanja ekonomičnosti sagorijevanja, posebno siromašnih goriva, primjenjuju istovremeno i povećanje koeficijenta viška vazduha i obogaćenost kiseonikom.

U tom smislu je izvršen proračun istovremenog uticaja ovih parametara na zbirnu jediničnu emisiju gasova sa efektom staklene bašte (V_{gsb}), koja je u ovom slučaju aproksimirana zbirom CO_2 i NO_x , kao dominantnih komponenti.

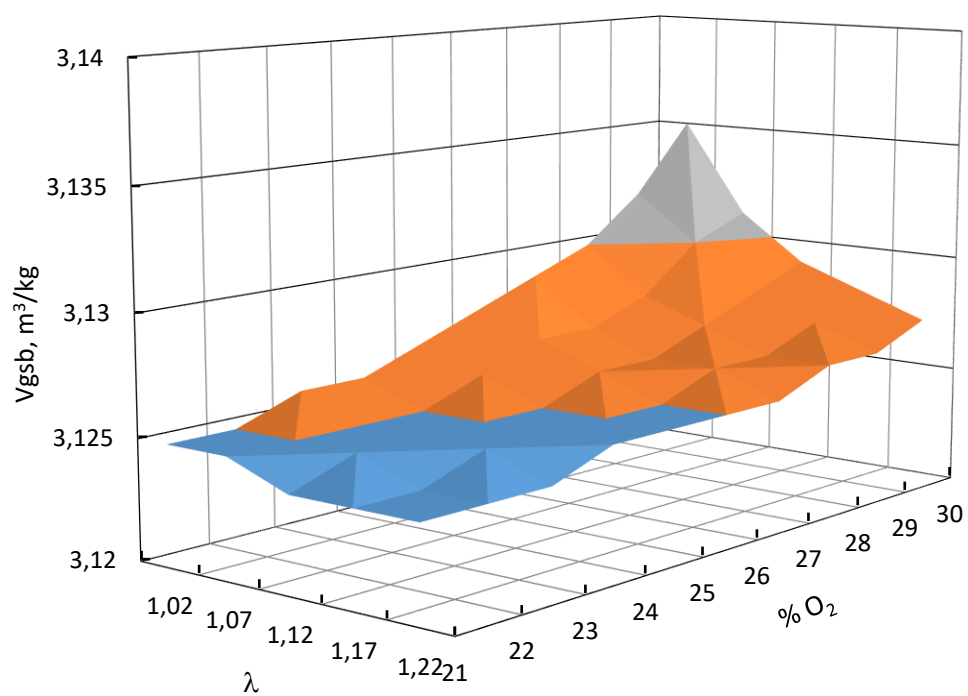
Za analize je uzeto po jedno karakteristično gorivo iz svake grupe (S1, L1, G1), pri čemu je koeficijent λ variran od 1,2 do 1,4 za čvrsta i 1,02 do 1,22 za tečna i gasovita goriva.

Vrijednosti obogaćenosti vazduha kiseonikom se nalaze u opsegu 21-30 % O_2 , što predstavlja maksimum u realnim procesima, osim ako se ne radi o specifičnim “oxy-fuel” smješama.

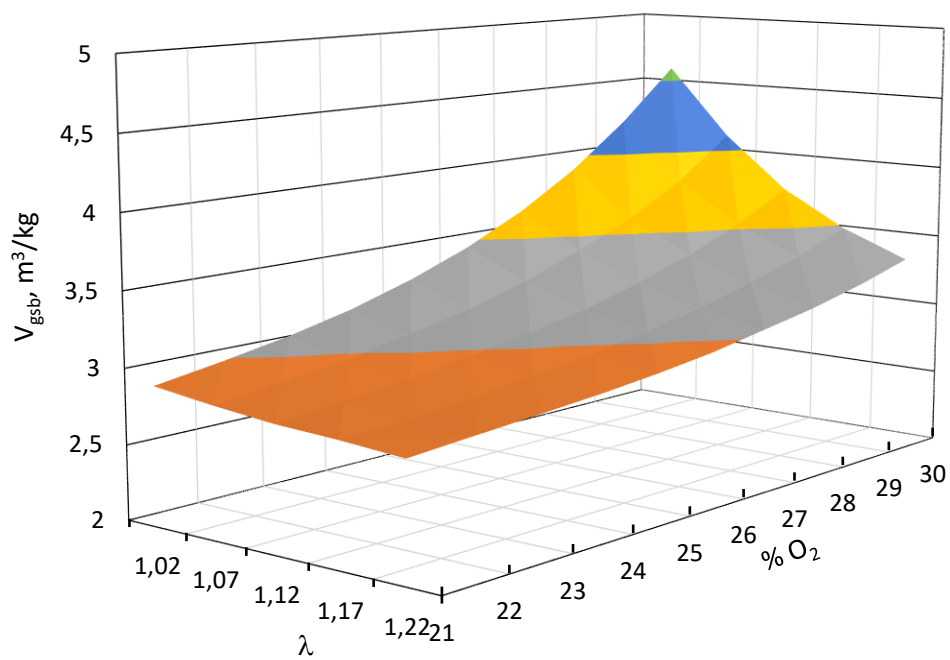
Grafički prikazi rezultata navedenih proračuna su dati na slikama 4.19 - 4.21, uz napomenu da se slični prikazi mogu jednostavno uraditi na osnovu numeričkih vrijednosti za sve ostale sastave goriva, koje su date u tabelama u Prilogu.



Slika 4.19. Uticaj λ i obogaćenosti vazduha na emisiju gasova staklene bašte kod čvrstih goriva (S1)



Slika 4.20. Uticaj λ i obogaćenosti vazduha na emisiju gasova staklene bašte kod tečnih goriva (L1)



Slika 4.21. Uticaj λ i obogaćenosti vazduha na emisiju gasova staklene bašte kod gasovitih goriva (G1)

Na osnovu navedenih prikaza može se zaključiti da, kod svih analiziranih goriva, emisija gasova staklene bašte blago opada sa povećanjem koeficijenta viška vazduha. Ovakav trend se može objasniti dvojako. Prvo: povećanje koeficijenta λ generalno ne utiče na emisiju CO_2 , kao dominantne komponente već samo na NO_x , čiji je relativni udio u V_{gsb} mali. Osim toga povećanje λ uslovljava nižu temperaturu sagorijevanja, što doprinosi nešto nižoj emisiji NO_x .

Nasuprot tome, povećanje % O_2 u vazduhu povećava temperaturu plamena, što je poželjno sa toplotehničkog stanovišta, ali na taj način omogućava intenziviranje obrazovanja NO_x , što povećava V_{gsb} i nepoželjno je sa aspekta zaštite životne sredine.

Upoređujući ova dva faktora vidi se da obogaćivanje vazduha kiseonikom znatno više utiče na pomenute parametre.

Imajući u vidu suprostavljani trend uticaja λ i % O_2 na pokazatelje efikasnosti sagorijevanja i koeficijente emisije zagađujućih materija optimalno vođenje procesa zahtijeva traženje “tačke” sučeljavanja, tj. realne oblasti prihvatljivosti, pri čemu kao referenti parametri mogu poslužiti npr. $K(\text{NO}_x)$ i ekonomija goriva.

ZAKLJUČCI

Na osnovu navedenih proračuna može se zaključiti sledeće:

1. Porast vrijednosti λ uzrokuje linearni porast zapremine produkata sagorijevanja i pad temperature sagorijevanja kod svih vrsta goriva, što je posebno izraženo kod goriva sa niskom toplotnom moći.
2. Koeficijent viška vazduha ne utiče na emisiju CO_2 , koja uglavnom zavisi od hemijskog sastava goriva, ali smanjuje njegov relativni udio u produktima sagorijevanja, jer se njihova zapremina povećava. Nasuprot tome povećanje koeficijenta λ generalno dovodi do smanjenja jedinične zapreminske emisije $V(\text{NO}_x)$ i koeficijenta emisije $K(\text{NO}_x)$. Iako bi, pri upoređenju apsolutnih vrijednosti, “siromašna goriva”, zbog niže temperature sagorijevanja, trebalo da imaju manji potencijal za stvaranje “termičkog” NO_x , dominantnu ulogu ima njihova niska Q_d , koja uslovljava visoke vrijednosti koeficijenta emisije.
3. Kod svih analiziranih goriva, sa povećanjem % O_2 , zapremina produkata sagorijevanja opada, a temperatura plamena raste. Imajući ovo u vidu, najpovoljniji toplotni pokazatelji se postižu pri obogaćenju od 30% O_2 , ali se moraju uzeti u obzir i efekti na životnu sredinu.
4. Emisija CO_2 zavisi isključivo od polaznog sadržaja C i stehiometrijskih korelacija, a ne od stepena obogaćenosti vazduha.
5. Povećanjem % O_2 opada % N_2 u vazduhu i time se umanjuje jedan od raspoloživih “izvora” nastanka NO_x . Međutim, sa druge strane, znatno se povećava temperatura sagorijevanja, što je osnovni preduslov za formiranje “termičkog” NO_x . Očigledno je da je drugi uticaj dominantan, tako da, u konačnom, obogaćivanje vazduha kiseonikom dovodi do povećanja koeficijenta emisije NO_x .
6. Relativne promjene $K(\text{NO}_x) = f(\% \text{O}_2)$ su najmanje kod gasovitih goriva, što se, vjerovatno, može dovesti u vezu sa činjenicom da, zbog velikog polaznog sadržaja N_2 u gorivu, dominira taj “izvor” NO_x , u odnosu na onaj iz vazduha.
7. Kod svih analiziranih goriva, aproksimativna emisija gasova staklene bašte blago opada sa povećanjem koeficijenta viška vazduha jer on ne utiče na CO_2 , a relativni udio NO_x je mali. Nasuprot tome, povećanje % O_2 omogućava intenziviranje obrazovanja NO_x , što povećava V_{gsb} .
8. Suprotstavljani trendovi uticaja λ i % O_2 na pokazatelje efikasnosti sagorijevanja i koeficijente emisije gasova zahtijeva traženje “optimalnog presjeka”, pri čemu kao referenti parametri mogu poslužiti npr. $K(\text{NO}_x)$ i ekonomija goriva.

LITERATURA

- [1] Volkov-Husović, T; Rajić, K: Goriva i sagorijevanje, Beograd, (2008), 202.
- [2] Bell, K.J: Heat Exchangers design for The Process Industries, Journal of Heat Transfer, (2004), 26 (6), 877-885.
- [3] Lalović, M.; Radović, Ž.; Jauković, N.: Flame temperature as a function of the combustion conditions of gaseous fuels, Materiali in Tehnologije (2006),40 (3),89.
- [4] Gil, S.; Fuel-N Conversion to NO, N₂O and N₂ During Coal Combustion, Fossil Fuel and the Environment, Dr. Shahriar Khan (Ed.), (2012), 37-61.
- [5] Gates, A. E., Blauvelt, R. P.: NO_x (oxides of nitrogen), Encyclopedia of Pollution, New York, (2011), 507 – 513.
- [6] Mussatti, D.C., The EPA Air Pollution Control Cost Manual: Section 4 NO_x controls, Technical report 452/B-02-001, US EPA, (2002), 234.
- [7] Ghadamgahi, M.; Ölund, P.; Andersson, N.; Jönsson, P.: Numerical Study on the Effect of Lambda Value on Temperature Distribution and Efficiency of a Flameless Oxyfuel Combustion System., Energies, (2017), 10, 337-353.
- [8] Ghadamgahi, M.; Ölund, P.; Ekman, T.; Andersson, N.; Jönsson, P.: A comparative CFD study on simulating flameless oxy-fuel combustion in a pilot-scale furnace, Journal of Combustion, (2016), 7, 1-11.
- [9] Gascoin, N.; Yang, Q.; Chetehouna, K.: Thermal Effects of CO₂ on the NO_x Formation Behavior in the CH₄ Diffusion Combustion System, Applied Thermal Engineering, (2017), 110, 144-149.
- [10] Abbas, A.; Audai, H.; Jamal N.: Effect of chemical reaction mechanisms and NO_x modeling on air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in a 100-kW furnace. Energy & Fuels (2012), 26,6 3329-3348.
- [11] Song, Y. et al.: The chemical mechanism of the effect of CO₂ on the temperature in methane oxy-fuel combustion.; International Journal of Heat and Mass Transfer (2015),86, 622-628.
- [12] Glarborg, P.; Line B.: Chemical effects of a high CO₂ concentration in oxy-fuel combustion of methane; Energy & Fuels (2008), 22,1, 291-296.
- [13] Odeh, A.O.; Okpaire, L.A.; Oyedoh, E.A.: Process simulation of oxy-fuel combustion for A 120 MW coal-fired power plant using aspen plus, International Journal of Natural Sciences Research, (2021), 9,1, 26-38.
- [14] Buhre, B.; Elliott L.; Wall T.: Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation, Progress in Energy and Combustion Science, (2005), 31, 288-307.
- [15] Suarez, I.; Diez, M.; Rubiera, F.: Coal: In new trends in coal conversion, The Netherlands Elsevier, (2019), 1-30.
- [16] Chaour, M.; Boulkroune, S.; Bourebia, M.: Numerical study of air preheating

- effect on NO_x emission in a heating furnace, International Journal of Computational Science and Engineering, (2016), 2,2, 14-16.
- [17] Bebar L.; Kermes B.; Low NO_x burners prediction of emissions concentration based on design, Waste management (2002),22,4, 443-451.
- [18] Bonefačić, I.; Analiza utjecaja oblika i veličine čestica goriva pri izgaranju, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Rijeka (2012), 45.
- [19] http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/combustion_en/NOx/NOx_formation.pdf

P R I L O G

Tabela P1. Proračun sagorijevanja čvrstih goriva (S1, S2, S3)

S1											
λ	1,2	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4
CO ₂ , m ³ /kg	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
NO _x , m ³ /kg	0,0149	0,0144	0,0141	0,0138	0,0135	0,0132	0,013	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122
V _{ps} , m ³ /kg	9,48	9,63	9,78	9,93	10,08	10,24	10,39	10,54	10,69	10,84	10,99
V _{gsb} , m ³ /kg	2,009	2,008	2,008	2,008	2,007	2,007	2,007	2,007	2,006	2,006	2,006
r(CO ₂),%	13,79	13,57	13,36	13,16	12,96	12,77	12,58	12,4	12,23	12,06	11,89
r(NO _x),%	0,157	0,15	0,144	0,138	0,134	0,129	0,125	0,121	0,118	0,114	0,09
ts, °C	1811,84	1785,82	1760,54	1735,96	1712,06	1688,81	1666,18	1644,15	1622,69	1601,79	1581,42
K(CO ₂), kg/GJ	87,42	87,42	87,42	87,42	87,42	87,42	87,42	87,42	87,42	87,42	87,42
K(NO _x), g/GJ	0,632	0,615	0,599	0,585	0,573	0,562	0,552	0,543	0,535	0,527	0,521

S2											
λ	1,2	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4
CO ₂ , m ³ /kg	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
NO _x , m ³ /kg	0,021	0,0204	0,0199	0,0194	0,019	0,0186	0,0183	0,018	0,0177	0,0174	0,0172
V _{ps} , m ³ /kg	9,56	9,71	9,87	10,02	10,174	10,33	10,482	10,64	10,79	10,94	11,1
V _{gsb} , m ³ /kg	1,952	1,952	1,951	1,951	1,95	1,95	1,949	1,949	1,949	1,949	1,948
r(CO ₂),%	14,65	14,42	14,19	13,97	13,76	13,56	13,36	13,17	12,98	12,8	12,62
r(NO _x),%	0,22	0,21	0,202	0,194	0,187	0,18	0,174	0,169	0,164	0,159	0,155
ts, °C	1821,7	1795,31	1769,67	1744,76	1720,53	1696,97	1674,05	1651,74	1630,01	1608,85	1588,23
K(CO ₂), kg/GJ	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3
K(NO _x), g/GJ	0,882	0,856	0,834	0,814	0,796	0,78	0,766	0,753	0,741	0,731	0,721

S3											
λ	1,2	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,32	1,34	1,36	1,38	1,4
CO ₂ , m ³ /kg	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47
NO _x , m ³ /kg	0,0252	0,0245	0,0238	0,0232	0,0227	0,0222	0,0218	0,0214	0,0211	0,0208	0,0205
V _{ps} , m ³ /kg	9,36	9,51	9,66	9,81	9,97	10,12	10,27	10,423	10,58	10,73	10,88
V _{gsb} , m ³ /kg	1,832	1,832	1,831	1,83	1,83	1,829	1,829	1,828	1,828	1,82	1,82
r(CO ₂),%	15,76	15,51	15,26	15,03	14,8	14,58	14,36	14,15	13,95	13,75	13,56
r(NO _x),%	0,269	0,257	0,246	0,237	0,228	0,22	0,212	0,206	0,2	0,194	0,189
ts, °C	1827,81	1801,11	1775,17	1749,97	1725,48	1701,66	1678,49	1655,95	1634	1612,62	1591,8
K(CO ₂), kg/GJ	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77
K(NO _x), g/GJ	1,074	1,042	1,014	0,989	0,967	0,947	0,929	0,913	0,899	0,886	0,874

Tabela P2. Proračun sagorijevanja tečnih goriva (L1,L2, L3)

L1											
λ	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22
CO ₂ , m ³ /kg	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
NO _x , m ³ /kg	0,0020	0,0019	0,0018	0,0017	0,0017	0,0016	0,0015	0,0150	0,0015	0,0014	0,0014
V _{ps} , m ³ /kg	11,99	12,21	12,43	12,65	12,87	13,09	13,31	13,53	13,75	13,97	14,18
V _{gsb} , m ³ /kg	3,125	3,125	3,125	3,124	3,124	3,124	3,124	3,124	3,124	3,124	3,124
r(CO ₂),%	12,61	12,38	12,16	11,95	11,75	11,55	11,36	11,18	11,001	10,828	10,661
r(NO _x),%	0,0170	0,0160	0,0150	0,0140	0,0130	0,0120	0,0120	0,0110	0,0110	0,0100	0,0100
ts, °C	2029,3	1996,32	1964,39	1933,47	1903,5	1874,46	1846,28	1818,94	1792,39	1766,61	1741,57
K(CO ₂),kg/GJ	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6
K(NO _x),g/GJ	0,060	0,057	0,054	0,052	0,049	0,048	0,046	0,044	0,043	0,042	0,041

L2											
λ	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22
CO ₂ , m ³ /kg	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624
NO _x , m ³ /kg	0,0143	0,0134	0,0127	0,0121	0,0115	0,0111	0,0106	0,0103	0,01	0,0097	0,0094
V _{ps} , m ³ /kg	10,396	10,591	10,786	10,98	11,175	11,369	11,564	11,758	11,953	12,148	12,342
V _{gsb} , m ³ /kg	2,523	2,522	2,521	2,521	2,52	2,52	2,519	2,519	2,519	2,518	2,518
r(CO ₂),%	15,623	15,336	15,06	14,793	14,535	14,287	14,04	13,814	13,589	13,37	13,161
r(NO _x),%	0,137	0,127	0,118	0,11	0,103	0,097	0,092	0,087	0,083	0,08	0,076
ts, °C	2060,8	2026,6	1993,6	1961,6	1930,6	1900,6	1871,5	1843,3	1815,9	1789,3	1763,5
K(CO ₂),kg/GJ	85,75	85,75	85,75	85,75	85,75	85,75	85,75	85,75	85,75	85,75	85,75
K(NO _x),g/GJ	0,48	0,451	0,427	0,406	0,387	0,371	0,357	0,345	0,334	0,325	0,316

L3											
λ	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22
CO ₂ , m ³ /kg	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
NO _x , m ³ /kg	0,029	0,027	0,026	0,025	0,023	0,022	0,022	0,021	0,020	0,020	0,019
V _{ps} , m ³ /kg	10,595	10,794	10,99	11,192	11,39	11,59	11,788	11,987	12,186	12,385	12,584
V _{gsb} , m ³ /kg	2,553	2,551	2,55	2,548	2,547	2,546	2,545	2,545	2,544	2,543	2,543
r(CO ₂),%	15,683	15,394	15,11	14,847	14,588	14,338	14,096	13,862	13,636	13,417	13,205
r(NO _x),%	0,274	0,253	0,234	0,219	0,205	0,193	0,182	0,173	0,165	0,157	0,151
ts, °C	2069,3	2034,9	2001,6	1969,4	1938,2	1908	1878,3	1850,3	1822,7	1796,2	1770,4
K(CO ₂),kg/GJ	85,76	85,76	85,76	85,76	85,76	85,76	85,76	85,76	85,76	85,76	85,76
K(NO _x),g/GJ	0,953	0,895	0,845	0,803	0,765	0,733	0,705	0,68	0,658	0,639	0,622

Tabela P3. Proračun sagorijevanja gasovitih goriva (G1,G2,G3)

G1											
λ	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22
CO ₂ , m ³ /kg	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864	0,864
NO _x , m ³ /kg	0,378	0,342	0,311	0,284	0,260	0,239	0,221	0,205	0,190	0,177	0,166
V _{ps} , m ³ /kg	9,375	9,539	9,700	9,867	10,030	10,194	10,358	10,522	10,686	10,849	11,013
V _{gsb} , m ³ /kg	3,035	2,999	2,968	2,941	2,917	2,896	2,878	2,862	2,847	2,834	2,823
r(CO ₂),%	9,216	9,057	8,900	8,757	8,614	8,475	8,340	8,210	8,086	7,964	7,845
r(NO _x),%	4,034	3,859	3,200	2,878	2,594	2,347	2,132	1,944	1,779	1,634	1,505
ts, °C	2012,3	1980,6	1949,9	1920,1	1891,3	1863,2	1836,1	1809,6	1784,0	1759,0	1734,8
K(CO ₂),kg/GJ	54,764	54,764	54,764	54,764	54,764	54,764	54,764	54,764	54,764	54,764	54,764
K(NO _x),g/GJ	15,257	13,809	12,552	11,455	10,495	9,652	8,908	8,251	7,668	7,149	6,686

G2											
λ	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22
CO ₂ , m ³ /kg	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
NO _x , m ³ /kg	1,35	1,25	1,15	1,07	1,00	0,93	0,87	0,81	0,77	0,72	0,68
V _{ps} , m ³ /kg	2,878	2,920	2,962	3,004	3,046	3,087	3,129	3,171	3,213	3,255	3,296
V _{gsb} , m ³ /kg	2,20	2,10	2,00	1,92	1,85	1,78	1,72	1,66	1,62	1,57	1,53
r(CO ₂),%	11,33	11,16	11,01	10,85	10,70	10,56	10,42	10,28	10,15	10,02	9,89
r(NO _x),%	46,960	42,705	38,955	35,639	32,700	30,088	27,759	25,678	23,814	22,140	20,633
ts, °C	1984,9	1959,1	1933,9	1909,4	1885,5	1862,2	1839,4	1817,2	1795,5	1774,4	1753,7
K(CO ₂),kg/GJ	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3
K(NO _x),g/GJ	178,5	164,7	152,4	141,4	131,5	122,7	114,7	107,5	101,0	95,1	89,8

G3											
λ	1,02	1,04	1,06	1,08	1,1	1,12	1,14	1,16	1,18	1,2	1,22
CO ₂ , m ³ /kg	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626
NO _x , m ³ /kg	2,15	1,95	1,78	1,63	1,50	1,39	1,28	1,19	1,11	1,04	0,97
V _{ps} , m ³ /kg	6,01	6,11	6,21	6,31	6,41	6,50	6,60	6,70	6,80	6,89	6,99
V _{gsb} , m ³ /kg	3,68	3,49	3,32	3,17	3,04	2,92	2,82	2,73	2,65	2,58	2,51
r(CO ₂),%	10,42	10,25	10,08	9,93	9,77	9,63	9,48	9,34	9,21	9,08	8,95
r(NO _x),%	35,72	31,98	27,73	25,92	23,47	21,33	19,45	17,80	16,34	15,05	13,90
ts, °C	2018,2	1988,3	1959,1	1930,9	1903,4	1876,7	1850,8	1825,5	1801,0	1777,1	1753,8
K(CO ₂),kg/GJ	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8	60,8
K(NO _x),g/GJ	135,2	123,0	112,3	102,9	94,6	87,3	80,9	75,1	70,0	65,4	61,2

Tabela P4. Uticaj % O₂ na sagorijevanje čvrstih goriva

S1 (1,2)										
	λ=1,2; O ₂ =21%	λ=1,2; O ₂ =22%	λ=1,2; O ₂ =23%	λ=1,2; O ₂ =24%	λ=1,2; O ₂ =25%	λ=1,2; O ₂ =26%	λ=1,2; O ₂ =27%	λ=1,2; O ₂ =28%	λ=1,2; O ₂ =29%	λ=1,2; O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307
NO _x , m ³ /kg	0,007	0,0077	0,0086	0,0096	0,011	0,0127	0,0149	0,0177	0,0211	0,0254
V _{ps} , m ³ /kg	9,48	9,07	8,692	8,348	8,03	7,738	7,467	7,215	6,98	6,76
V, m ³ /kg	2,01	2,01	2,012	2,014	2,017	2,021	2,025	2,031	2,038	2,048
r(CO ₂), %	13,79	14,41	15,035	15,656	16,274	16,89	17,5	18,11	18,721	19,326
r(NO _x), %	0,1	0,11	0,125	0,14	0,16	0,185	0,215	0,26	0,32	0,376
ts, °C	1811,9	1885,96	1959,11	2031,3	2102,68	2173	2242,6	2311,3	2379,1	2446
K(NO _x), g/GJ	4,92	5,38	5,98	6,732	7,69	8,9	10,41	12,35	14,77	17,78
K(CO ₂), kg/GJ	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419

S1(1,25)										
	λ=1,25; O ₂ =21%	λ=1,25; O ₂ =22%	λ=1,25; O ₂ =23%	λ=1,25; O ₂ =24%	λ=1,25; O ₂ =25%	λ=1,25; O ₂ =26%	λ=1,25; O ₂ =27%	λ=1,25; O ₂ =28%	λ=1,25; O ₂ =29%	λ=1,25; O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307
NO _x , m ³ /kg	0,0066	0,0071	0,0078	0,0086	0,0096	0,0109	0,0126	0,0146	0,0171	0,0203
V _{ps} , m ³ /kg	9,858	9,429	9,038	8,678	8,348	8,043	7,76	7,498	7,254	7,027
V, m ³ /kg	2,008	2,009	2,01	2,012	2,014	2,017	2,02	2,025	2,03	2,037
r(CO ₂), %	13,257	13,861	14,46	15,06	15,656	16,25	16,84	17,429	18,01	18,6
r(NO _x), %	0,067	0,075	0,086	0,099	0,115	0,136	0,162	0,195	0,236	0,289
ts, °C	1748,18	1820	1891	1961,14	2030,4	2098,8	2166,4	2233,2	2299	1364,4
K(NO _x), g/GJ	4,608	4,967	5,422	5,997	6,721	7,632	8,774	10,2	11,98	14,19
K(CO ₂), kg/GJ	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419

S1(1,3)										
	λ=1,3; O ₂ =21%	λ=1,3; O ₂ =22%	λ=1,3; O ₂ =23%	λ=1,3; O ₂ =24%	λ=1,3; O ₂ =25%	λ=1,3; O ₂ =26%	λ=1,3; O ₂ =27%	λ=1,3; O ₂ =28%	λ=1,3; O ₂ =29%	λ=1,3; O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307
NO _x , m ³ /kg	0,0063	0,0067	0,0072	0,0078	0,0086	0,0096	0,0108	0,0124	0,0143	0,0167
V _{ps} , m ³ /kg	10,235	9,789	9,382	9,008	8,665	8,348	8,054	7,782	7,528	7,29
V, m ³ /kg	2,007	2,008	2,009	2,01	2,012	2,014	2,017	2,02	2,024	2,029
r(CO ₂), %	12,769	13,35	13,93	14,5	15,083	15,656	16,226	16,795	17,361	17,925
r(NO _x), %	0,067	0,075	0,086	0,099	0,115	0,136	0,162	0,195	0,236	0,289
ts, °C	1688,8	1758,6	1827,53	1859,6	1962,9	2029,4	2095,2	2160,2	2224,4	2287,9
K(NO _x), g/GJ	4,373	4,655	5,01	5,455	6,013	6,71	7,58	8,657	9,99	11,64
K(CO ₂), kg/GJ	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419

S1(1,35)

	$\lambda=1,35;$ O2=21%	$\lambda=1,35;$ O2=22%	$\lambda=1,35;$ O2=23%	$\lambda=1,35;$ O2=24%	$\lambda=1,35;$ O2=25%	$\lambda=1,35;$ O2=26%	$\lambda=1,35;$ O2=27%	$\lambda=1,35;$ O2=28%	$\lambda=1,35;$ O2=29%	$\lambda=1,35;$ O2=30%
CO2, m3/kg	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307
NOx,m3/kg	0,006	0,0063	0,0067	0,0072	0,0079	0,0086	0,0096	0,0108	0,0122	0,014
Vps, m3/kg	10,613	10,15	9,727	9,34	8,982	8,65	8,348	8,065	7,8	7,55
V, m3/kg	2,006	2,007	2,008	2,009	2,01	2,012	2,014	2,017	2,02	2,023
r(CO2), %	12,314	12,876	13,436	13,994	14,55	15,1	15,656	16,2	16,75	17,3
r(NOx), %	0,057	0,062	0,069	0,077	0,087	0,1	0,115	0,134	0,157	0,186
ts, °C	1633,3	1701,16	1768,1	1834,4	1899,8	1964,5	2028,5	2091,8	2154,3	2216,2
K(NOx), g/GJ	4,193	4,418	4,699	5,05	5,486	6,028	6,699	7,528	8,55	9,806
K(CO2), kg/GJ	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419

S1 (1,40)

	$\lambda=1,4;$ O2=21%	$\lambda=1,4;$ O2=22%	$\lambda=1,4;$ O2=23%	$\lambda=1,4;$ O2=24%	$\lambda=1,4;$ O2=25%	$\lambda=1,4;$ O2=26%	$\lambda=1,4;$ O2=27%	$\lambda=1,4;$ O2=28%	$\lambda=1,4;$ O2=29%	$\lambda=1,4;$ O2=30%
CO2, m3/kg	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307	1,307
NOx,m3/kg	0,0058	0,0061	0,0064	0,0068	0,0073	0,0079	0,0086	0,0096	0,0107	0,0121
Vps, m3/kg	10,99	10,51	10,07	9,67	9,3	8,958	8,64	8,348	8,074	7,82
V, m3/kg	2,006	2,007	2,007	2,008	2,009	2,01	2,012	2,014	2,016	2,02
r(CO2), %	11,891	12,435	12,977	13,516	14,05	14,59	15,12	15,656	16,2	16,7
r(NOx), %	0,053	0,058	0,063	0,07	0,078	0,088	0,1	0,115	0,133	0,155
ts, °C	1581,4	1647,35	1712,5	1776,9	1840,6	1903,6	1965,97	2027,6	2088,5	2148,8
K(NOx), g/GJ	4,054	4,235	4,461	4,741	5,087	5,515	6,042	6,688	7,48	8,45
K(CO2), kg/GJ	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419	87,419

S2 (1,2)

	$\lambda=1,2;$ O2=21%	$\lambda=1,2;$ O2=22%	$\lambda=1,2;$ O2=23%	$\lambda=1,2;$ O2=24%	$\lambda=1,2;$ O2=25%	$\lambda=1,2;$ O2=26%	$\lambda=1,2;$ O2=27%	$\lambda=1,2;$ O2=28%	$\lambda=1,2;$ O2=29%	$\lambda=1,2;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
NO _x , m ³ /kg	0,01	0,0109	0,0122	0,0138	0,0159	0,0185	0,0218	0,026	0,0312	0,0375
V _{ps} , m ³ /kg	9,56	9,14	8,76	8,4	8,083	7,785	7,51	7,253	7,014	6,79
V, m ³ /kg	1,952	1,954	1,957	1,96	1,965	1,97	1,977	1,986	1,997	2,01
r(CO ₂), %	14,65	15,32	15,99	16,66	17,324	17,987	18,648	19,3	19,96	20,6
r(NO _x), %	0,104	0,12	0,139	0,164	0,196	0,237	0,29	0,358	0,445	0,553
ts, °C	1821,7	1896,9	1971,2	2044,6	2117,1	2188,7	2259,6	2329,5	2398,7	2467,1
K(NO _x), g/GJ	6,86	7,54	8,4	9,51	10,92	12,71	14,99	17,86	21,49	26
K(CO ₂), kg/GJ	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3

S2 (1,25)

	$\lambda=1,25;$ O2=21%	$\lambda=1,25;$ O2=22%	$\lambda=1,25;$ O2=23%	$\lambda=1,25;$ O2=24%	$\lambda=1,25;$ O2=25%	$\lambda=1,25;$ O2=26%	$\lambda=1,25;$ O2=27%	$\lambda=1,25;$ O2=28%	$\lambda=1,25;$ O2=29%	$\lambda=1,25;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
NO _x , m ³ /kg	0,0093	0,001	0,011	0,0122	0,0138	0,0157	0,0182	0,0213	0,0251	0,03
V _{ps} , m ³ /kg	9,94	9,507	9,1	8,74	8,4	8,09	7,81	7,54	7,29	7,06
V, m ³ /kg	1,951	1,952	1,954	1,957	1,96	1,964	1,97	1,976	1,984	1,994
r(CO ₂), %	14,08	14,73	15,37	16,02	16,66	17,23	17,93	18,57	19,2	19,83
r(NO _x), %	0,094	0,106	0,121	0,14	0,164	0,194	0,233	0,282	0,345	0,424
ts, °C	1757,1	1830	1902	1973,2	2043,6	2113,2	2181,97	2250	2317,2	2383,7
K(NO _x), g/GJ	6,412	6,93	7,59	8,043	9,49	10,83	12,52	14,64	17,3	20,62
K(CO ₂), kg/GJ	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3

S2 (1,3)

	$\lambda=1,3;$ O2=21%	$\lambda=1,3;$ O2=22%	$\lambda=1,3;$ O2=23%	$\lambda=1,3;$ O2=24%	$\lambda=1,3;$ O2=25%	$\lambda=1,3;$ O2=26%	$\lambda=1,3;$ O2=27%	$\lambda=1,3;$ O2=28%	$\lambda=1,3;$ O2=29%	$\lambda=1,3;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
NO _x , m ³ /kg	0,0088	0,0094	0,0102	0,0111	0,0123	0,0138	0,0165	0,018	0,0208	0,0244
V _{ps} , m ³ /kg	10,328	9,873	9,46	9,08	8,73	8,4	8,107	7,83	7,57	7,33
V, m ³ /kg	1,95	1,951	1,953	1,955	1,957	1,96	1,964	1,97	1,975	1,983
r(CO ₂), %	13,558	14,182	14,8	15,42	16,04	16,66	17,273	17,88	18,5	19,1
r(NO _x), %	0,085	0,095	0,107	0,122	0,141	0,164	0,193	0,229	0,275	0,333
ts, °C	1697	1767,7	1837,6	1906,7	1975	2042,7	2109,5	2175,6	2241	2306,7
K(NO _x), g/GJ	6,07	6,48	6,99	7,64	8,455	9,476	10,755	12,35	14,336	16,8
K(CO ₂), kg/GJ	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3

S2 (1,35)

	$\lambda=1,35;$ O2=21%	$\lambda=1,35;$ O2=22%	$\lambda=1,35;$ O2=23%	$\lambda=1,35;$ O2=24%	$\lambda=1,35;$ O2=25%	$\lambda=1,35;$ O2=26%	$\lambda=1,35;$ O2=27%	$\lambda=1,35;$ O2=28%	$\lambda=1,35;$ O2=29%	$\lambda=1,35;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
NO _x , m ³ /kg	0,0088	0,0094	0,0102	0,0111	0,0123	0,0138	0,0156	0,018	0,0208	0,0244
V _{ps} , m ³ /kg	10,712	10,24	9,81	9,4	9,05	8,71	8,4	8,11	7,85	7,6
V, m ³ /kg	1,949	1,95	1,951	1,953	1,955	1,957	1,96	1,964	1,97	1,974
r(CO ₂), %	13,07	13,67	14,27	14,87	15,47	16,06	16,66	17,25	17,84	18,43
r(NO _x), %	0,079	0,087	0,097	0,109	0,123	0,141	0,163	0,191	0,226	0,269
ts, °C	1640,8	1709,5	1777,4	1844,5	1911	1976,7	2041,7	2106	2169,7	2232,6
K(NO _x), g/GJ	5,815	6,138	6,543	7,05	7,686	8,477	9,46	10,68	12,19	14,05
K(CO ₂), kg/GJ	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3

S2 (1,4)

	$\lambda=1,4;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,4;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
NO _x , m ³ /kg	0,0082	0,0085	0,009	0,0096	0,0103	0,0112	0,0123	0,0137	0,0154	0,0175
V _{ps} , m ³ /kg	11,097	10,607	10,16	9,75	9,374	9,03	8,7	8,406	8,13	7,868
V, m ³ /kg	1,948	1,949	1,95	1,951	1,953	1,955	1,957	1,96	1,964	1,968
r(CO ₂), %	12,62	13,2	13,78	14,36	14,94	15,5	16,1	16,66	17,23	17,8
r(NO _x), %	0,073	0,08	0,089	0,098	0,11	0,124	0,142	0,163	0,19	0,222
ts, °C	1588,2	1654,9	1721	1786,3	1850,9	1914,9	1978,1	2040,8	2102,7	2164
K(NO _x), g/GJ	5,616	5,876	6,2	6,6	7,1	7,73	8,496	9,44	10,61	12,04
K(CO ₂), kg/GJ	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3

S3 (1,20)

	$\lambda=1,2;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,2;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475
NO _x , m ³ /kg	0,012	0,0132	0,0147	0,0167	0,0193	0,0255	0,0267	0,032	0,0387	0,0472
V _{ps} , m ³ /kg	9,358	8,943	8,564	8,217	7,9	7,6	7,33	7,076	6,84	6,62
V, m ³ /kg	1,832	1,835	1,838	1,842	1,848	1,855	1,863	1,875	1,89	1,907
r(CO ₂), %	15,762	16,5	17,22	17,95	18,676	19,4	20,12	20,84	21,56	22,28
r(NO _x), %	0,128	0,147	0,172	0,203	0,244	0,296	0,364	0,452	0,566	0,712
ts, °C	1827,8	1904	1979,2	2053,6	2127,2	2200	2271,9	2343	2413,4	2483
K(NO _x), g/GJ	8,362	9,206	10,294	11,69	13,48	15,762	18,68	22,38	27,08	33
K(CO ₂), kg/GJ	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77

S3 (1,25)

	$\lambda=1,25;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,25;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475
NO _x , m ³ /kg	0,0111	0,0121	0,0133	0,0148	0,0167	0,0191	0,0222	0,0261	0,031	0,0371
V _{ps} , m ³ /kg	9,738	9,306	8,911	8,55	8,217	7,91	7,625	7,36	7,115	6,89
V, m ³ /kg	1,831	1,832	1,835	1,838	1,842	1,847	1,854	1,862	1,872	1,885
r(CO ₂), %	15,146	15,85	16,55	17,25	17,95	18,65	19,34	20,04	20,73	21,42
r(NO _x), %	0,114	0,13	0,149	0,173	0,203	0,242	0,291	0,354	0,435	0,539
ts, °C	1762,5	1836,25	1909,2	1981,3	2052,6	2123,2	2193	2262,1	2330	2398
K(NO _x), g/GJ	7,8	8,445	9,273	10,328	11,67	13,37	15,52	18,24	21,65	25,94
K(CO ₂), kg/GJ	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77

S3 (1,3)

	$\lambda=1,3$; O2=21%	$\lambda=1,3$; O2=22%	$\lambda=1,3$; O2=23%	$\lambda=1,3$; O2=24%	$\lambda=1,3$; O2=25%	$\lambda=1,3$; O2=26%	$\lambda=1,3$; O2=27%	$\lambda=1,3$; O2=28%	$\lambda=1,3$; O2=29%	$\lambda=1,3$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475
NO _x , m ³ /kg	0,0105	0,0113	0,0122	0,0133	0,0148	0,0167	0,019	0,0219	0,0255	0,03
V _{ps} , m ³ /kg	10,118	9,67	9,26	8,88	8,546	8,217	7,92	7,64	7,39	7,15
V, m ³ /kg	1,829	1,831	1,833	1,835	1,838	1,842	1,847	1,853	1,86	1,87
r(CO ₂), %	14,577	15,254	15,93	16,6	17,28	17,95	18,62	19,29	19,96	20,62
r(NO _x), %	0,104	0,116	0,132	0,15	0,173	0,203	0,239	0,286	0,345	0,42
t _s , °C	1702	1773	1844	1914	1983	2051	2119,5	2186	2253	2319
K(NO _x), g/GJ	7,35	7,88	8,52	9,33	10,36	11,65	13,27	15,3	17,84	21
K(CO ₂), kg/GJ	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77

S3 (1,35)

	$\lambda=1,35$; O2=21%	$\lambda=1,35$; O2=22%	$\lambda=1,35$; O2=23%	$\lambda=1,35$; O2=24%	$\lambda=1,35$; O2=25%	$\lambda=1,35$; O2=26%	$\lambda=1,35$; O2=27%	$\lambda=1,35$; O2=28%	$\lambda=1,35$; O2=29%	$\lambda=1,35$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475
NO _x , m ³ /kg	0,0101	0,0107	0,0114	0,0123	0,0134	0,0148	0,0166	0,0188	0,0216	0,025
V _{ps} , m ³ /kg	10,5	10,03	9,606	9,215	8,85	8,52	8,217	7,93	7,67	7,418
V, m ³ /kg	1,828	1,83	1,831	1,833	1,835	1,838	1,842	1,847	1,853	1,86
r(CO ₂), %	14,05	14,7	15,35	16	16,65	17,3	17,95	18,6	19,24	19,88
r(NO _x), %	0,096	0,106	0,118	0,133	0,152	0,174	0,202	0,237	0,282	0,337
t _s , °C	1645	1714	1783	1851	1918	1985	2051	2116	2180	2244
K(NO _x), g/GJ	7,05	7,45	7,96	8,6	9,39	10,387	11,63	13,18	15,1	17,48
K(CO ₂), kg/GJ	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77

S3 (1,40)

	$\lambda=1,4$; O2=21%	$\lambda=1,4$; O2=22%	$\lambda=1,4$; O2=23%	$\lambda=1,4$; O2=24%	$\lambda=1,4$; O2=25%	$\lambda=1,4$; O2=26%	$\lambda=1,4$; O2=27%	$\lambda=1,4$; O2=28%	$\lambda=1,4$; O2=29%	$\lambda=1,4$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475	1,475
NO _x , m ³ /kg	0,0098	0,0102	0,0108	0,0115	0,0124	0,0135	0,015	0,0166	0,0187	0,0213
V _{ps} , m ³ /kg	10,88	10,39	9,95	9,548	9,175	8,83	8,513	8,217	7,94	7,684
V, m ³ /kg	1,828	1,829	1,83	1,831	1,833	1,836	1,838	1,842	1,847	1,852
r(CO ₂), %	13,56	14,19	14,82	15,45	16,07	16,7	17,326	17,95	18,57	19,2
r(NO _x), %	0,089	0,098	0,108	0,12	0,135	0,153	0,175	0,202	0,236	0,277
t _s , °C	1592	1659	1726	1792	1857	1922	1986	2050	2113	1275
K(NO _x), g/GJ	6,8	7,13	7,53	8,036	8,663	9,44	10,41	11,61	13,09	14,9
K(CO ₂), kg/GJ	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77	98,77

Tabela P5. Uticaj % O₂ na sagorijevanje tečnih goriva

L1 (1,02)										
	$\lambda=1,02;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512
NO _x , m ³ /kg	0,001	0,0011	0,0013	0,0016	0,0019	0,0023	0,0029	0,0036	0,0045	0,0056
V _{ps} , m ³ /kg	11,99	11,49	11,02	10,6	10,2	9,846	9,512	9,2	8,91	8,643
V, m ³ /kg	3,125	3,125	3,126	3,126	3,127	3,128	3,129	3,13	3,132	3,135
r(CO ₂), %	12,6	13,16	13,72	14,27	14,82	15,36	15,9	16,43	16,97	17,5
r(NO _x), %	0,008	0,01	0,012	0,015	0,019	0,024	0,03	0,039	0,05	0,065
t _s , °C	2029	2109	2188	2265	2341	2416	2490	2563	2635	2705
K(NO _x), g/GJ	0,468	0,544	0,642	0,769	0,934	1,142	1,41	1,751	2,183	2,73
K(CO ₂), kg/GJ	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6
L1 (1,07)										
	$\lambda=1,07;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,06;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512
NO _x , m ³ /kg	0,0008	0,001	0,0011	0,0013	0,0015	0,0018	0,0022	0,0027	0,0033	0,0041
V _{ps} , m ³ /kg	12,54	12	11,52	11,08	10,67	10,29	9,94	9,61	9,31	9,03
V, m ³ /kg	3,125	3,125	3,125	3,125	3,126	3,127	3,127	3,128	3,13	3,131
r(CO ₂), %	12,06	12,6	13,12	13,65	14,18	14,7	15,22	15,73	16,24	16,75
r(NO _x), %	0,007	0,008	0,01	0,012	0,014	0,018	0,022	0,028	0,036	0,045
t _s , °C	1949	2026	2102	2177	2251	2324	2395	2466	2536	2605
K(NO _x), g/GJ	0,411	0,466	0,536	0,627	0,743	0,891	1,078	1,315	1,613	1,988
K(CO ₂), kg/GJ	70,06	70,06	70,06	70,06	70,06	70,06	70,06	70,06	70,06	70,06
L1(1,12)										
	$\lambda=1,12;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512
NO _x , m ³ /kg	0,0008	0,0008	0,0009	0,0011	0,0013	0,0015	0,0018	0,0021	0,0025	0,0031
V _{ps} , m ³ /kg	13,09	12,53	12,02	11,55	11,12	10,73	10,36	10,02	9,7	9,41
V, m ³ /kg	3,124	3,125	3,125	3,125	3,125	3,126	3,126	3,127	3,128	3,129
r(CO ₂), %	11,55	12,07	12,58	13,09	13,6	14,1	14,6	15,1	15,6	16,1
r(NO _x), %	0,006	0,007	0,008	0,009	0,011	0,014	0,017	0,021	0,026	0,033
t _s , °C	1874	1949	2023	2096	2167	2238	2308	2376	2444	2511
K(NO _x), g/GJ	0,37	0,411	0,463	0,53	0,614	0,72	0,855	1,023	1,234	1,498
K(CO ₂), kg/GJ	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6

L1(1,17)

	$\lambda=1,17$; O2=21%	$\lambda=1,17$; O2=22%	$\lambda=1,17$; O2=23%	$\lambda=1,17$; O2=24%	$\lambda=1,17$; O2=25%	$\lambda=1,17$; O2=26%	$\lambda=1,17$; O2=27%	$\lambda=1,17$; O2=28%	$\lambda=1,17$; O2=29%	$\lambda=1,17$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512
NO _x , m ³ /kg	0,0007	0,0008	0,0008	0,0009	0,0011	0,0012	0,0014	0,0017	0,002	0,0024
V _{ps} , m ³ /kg	13,64	13,06	12,52	12,04	11,59	11,17	10,8	10,43	10,1	9,8
V, m ³ /kg	3,124	3,124	3,125	3,125	3,125	3,125	3,126	3,126	3,127	3,128
r(CO ₂), %	11,09	11,6	12,08	12,56	13,05	13,53	14,02	14,5	14,97	15,4
r(NO _x), %	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,011	0,013	0,016	0,02	0,024
ts, °C	1805	1878	1949	2020	2090	2158	2226	2293	2359	2424
K(NO _x), g/GJ	0,341	0,372	0,411	0,461	0,524	0,602	0,7	0,823	0,976	1,166
K(CO ₂), kg/GJ	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6

L1 (1,22)

	$\lambda=1,22$; O2=21%	$\lambda=1,22$; O2=22%	$\lambda=1,22$; O2=23%	$\lambda=1,22$; O2=24%	$\lambda=1,22$; O2=25%	$\lambda=1,22$; O2=26%	$\lambda=1,22$; O2=27%	$\lambda=1,22$; O2=28%	$\lambda=1,22$; O2=29%	$\lambda=1,22$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512	1,512
NO _x , m ³ /kg	0,0007	0,0007	0,0008	0,008	0,009	0,0011	0,0012	0,0014	0,0016	0,0019
V _{ps} , m ³ /kg	14,18	13,58	13,02	12,5	12,05	11,61	11,21	10,84	10,5	10,18
V, m ³ /kg	3,124	3,124	3,124	3,125	3,125	3,125	3,125	3,126	3,126	3,127
r(CO ₂), %	10,66	10,14	11,61	12,08	12,55	13,02	13,48	13,94	14,4	14,86
r(NO _x), %	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,011	0,013	0,016	0,019
ts, °C	1741	1812	1881	1950	2018	2084	2150	2215	2279	2342
K(NO _x), g/GJ	0,32	0,344	0,374	0,412	0,459	0,518	0,592	0,683	0,796	0,935
K(CO ₂), kg/GJ	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6	70,6

L2(1,02)

	$\lambda=1,02$; O2=21%	$\lambda=1,02$; O2=22%	$\lambda=1,02$; O2=23%	$\lambda=1,02$; O2=24%	$\lambda=1,02$; O2=25%	$\lambda=1,02$; O2=26%	$\lambda=1,02$; O2=27%	$\lambda=1,02$; O2=28%	$\lambda=1,02$; O2=29%	$\lambda=1,02$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624
NO _x , m ³ /kg	0,0068	0,008	0,0096	0,0116	0,0143	0,0178	0,0224	0,0282	0,0357	0,0454
V _{ps} , m ³ /kg	10,4	9,94	9,53	9,15	8,81	8,49	8,19	7,91	7,66	7,92
V, m ³ /kg	2,523	2,525	2,529	2,533	2,539	2,546	2,556	2,568	2,584	2,604
r(CO ₂), %	15,56	16,33	17,04	17,74	18,44	19,13	19,83	20,52	21,2	21,9
r(NO _x), %	0,065	0,08	0,1	0,127	0,163	0,21	0,273	0,356	0,467	0,611
ts, °C	2060	2144	2225	2306	2385	2463	2540	2617	2692	2766
K(NO _x), g/GJ	3,736	4,398	5,27	6,41	7,9	9,83	12,33	15,56	19,71	25,03
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L2 (1,07)

	$\lambda=1,07$; O2=21%	$\lambda=1,07$; O2=22%	$\lambda=1,07$; O2=23%	$\lambda=1,07$; O2=24%	$\lambda=1,07$; O2=25%	$\lambda=1,07$; O2=26%	$\lambda=1,07$; O2=27%	$\lambda=1,07$; O2=28%	$\lambda=1,07$; O2=29%	$\lambda=1,07$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624
NO _x , m ³ /kg	0,0059	0,0067	0,0079	0,0093	0,0112	0,0136	0,0167	0,0207	0,0258	0,0323
V _{ps} , m ³ /kg	10,88	10,41	9,98	9,58	9,21	8,88	8,57	8,28	8,01	7,76
V, m ³ /kg	2,52	2,523	2,525	2,528	2,532	2,537	2,544	2,552	2,563	2,577
r(CO ₂), %	14,92	15,6	16,28	16,95	17,62	18,29	18,95	19,62	20,27	20,93
r(NO _x), %	0,054	0,065	0,079	0,097	0,122	0,153	0,195	0,251	0,323	0,416
ts, °C	1977	2057	2136	2214	2291	2367	2441	2515	2588	2660
K(NO _x), g/GJ	3,237	3,713	4,33	5,137	6,177	7,517	9,24	11,44	14,251	17,824
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L2 (1,12)

	$\lambda=1,12$; O2=21%	$\lambda=1,12$; O2=22%	$\lambda=1,12$; O2=23%	$\lambda=1,12$; O2=24%	$\lambda=1,12$; O2=25%	$\lambda=1,12$; O2=26%	$\lambda=1,12$; O2=27%	$\lambda=1,12$; O2=28%	$\lambda=1,12$; O2=29%	$\lambda=1,12$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624
NO _x , m ³ /kg	0,0052	0,0059	0,0067	0,0077	0,0091	0,0108	0,013	0,0158	0,0194	0,0239
V _{ps} , m ³ /kg	11,37	10,87	10,42	10	9,62	9,27	8,95	8,64	8,36	8,1
V, m ³ /kg	2,52	2,521	2,523	2,525	2,528	2,531	2,536	2,542	2,55	2,56
r(CO ₂), %	14,29	14,94	15,59	16,23	16,87	17,51	18,15	18,79	19,42	20,05
r(NO _x), %	0,046	0,054	0,064	0,077	0,095	0,117	0,146	0,183	0,232	0,295
ts, °C	1901	1978	2054	2130	2204	2378	2350	2422	2492	2562
K(NO _x), g/GJ	2,89	3,24	3,692	4,274	5,02	5,974	7,19	8,734	10,69	13,16
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L2 (1,17)

	$\lambda=1,17$; O2=21%	$\lambda=1,17$; O2=22%	$\lambda=1,17$; O2=23%	$\lambda=1,17$; O2=24%	$\lambda=1,17$; O2=25%	$\lambda=1,17$; O2=26%	$\lambda=1,17$; O2=27%	$\lambda=1,17$; O2=28%	$\lambda=1,17$; O2=29%	$\lambda=1,17$; O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624
NO _x , m ³ /kg	0,0048	0,0053	0,0059	0,0067	0,0077	0,0089	0,0105	0,0125	0,015	0,0182
V _{ps} , m ³ /kg	11,85	11,34	10,87	10,43	10,03	9,67	9,32	9,01	8,71	8,44
V, m ³ /kg	2,519	2,52	2,521	2,523	2,525	2,527	2,53	2,535	2,54	2,547
r(CO ₂), %	13,7	14,32	14,95	15,57	16,19	16,8	17,4	18,03	18,63	19,24
r(NO _x), %	0,04	0,046	0,054	0,064	0,076	0,092	0,113	0,139	0,173	0,216
ts, °C	1829	1904	1978	2051	2124	2195	2265	2335	2403	2471
K(NO _x), g/GJ	2,642	2,905	3,242	3,672	4,22	4,915	5,795	6,9	8,3	10,05
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L2 (1,22)

	$\lambda=1,22;$ O2=21%	$\lambda=1,22;$ O2=22%	$\lambda=1,22;$ O2=23%	$\lambda=1,22;$ O2=24%	$\lambda=1,22;$ O2=25%	$\lambda=1,22;$ O2=26%	$\lambda=1,22;$ O2=27%	$\lambda=1,22;$ O2=28%	$\lambda=1,22;$ O2=29%	$\lambda=1,22;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624	1,624
NO _x , m ³ /kg	0,0045	0,0048	0,0053	0,0059	0,0066	0,0076	0,0087	0,0102	0,0121	0,0144
V _{ps} , m ³ /kg	12,342	11,8	11,31	10,86	10,44	10,06	9,7	9,375	9,07	8,78
V, m ³ /kg	2,518	2,519	2,52	2,521	2,523	2,525	2,527	2,53	2,534	2,539
r(CO ₂), %	13,16	13,76	14,36	14,96	15,55	16,15	16,34	17,33	17,9	18,5
r(NO _x), %	0,036	0,041	0,047	0,054	0,063	0,075	0,09	0,109	0,133	0,164
ts, °C	1764	1836	1908	1979	2049	2118	2186	2254	2320	2386
K(NO _x), g/GJ	2,46	2,66	2,92	3,244	3,654	4,17	4,82	5,636	6,654	7,923
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L3 (1,02)

	$\lambda=1,02;$ O2=21%	$\lambda=1,02;$ O2=22%	$\lambda=1,02;$ O2=23%	$\lambda=1,02;$ O2=24%	$\lambda=1,02;$ O2=25%	$\lambda=1,02;$ O2=26%	$\lambda=1,02;$ O2=27%	$\lambda=1,02;$ O2=28%	$\lambda=1,02;$ O2=29%	$\lambda=1,02;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662
NO _x , m ³ /kg	0,0138	0,0163	0,0196	0,024	0,0295	0,037	0,0464	0,059	0,0747	0,0952
V _{ps} , m ³ /kg	10,595	10,134	9,71	9,33	8,97	8,64	8,34	8,06	7,8	7,55
V, m ³ /kg	2,553	2,558	2,565	2,574	2,586	2,602	2,622	2,65	2,682	2,72
r(CO ₂), %	15,68	16,4	17,11	17,81	18,52	19,22	19,92	20,62	21,31	22
r(NO _x), %	0,13	0,16	0,2	0,256	0,33	0,427	0,557	0,73	0,96	1,261
ts, °C	2069	2153	2235	2316	2396	2475	2553	2630	2706	2780
K(NO _x), g/GJ	7,42	8,767	10,54	12,87	15,92	19,89	25,04	31,07	40,3	51,32
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L3 (1,07)

	$\lambda=1,07;$ O2=21%	$\lambda=1,07;$ O2=22%	$\lambda=1,07;$ O2=23%	$\lambda=1,07;$ O2=24%	$\lambda=1,07;$ O2=25%	$\lambda=1,07;$ O2=26%	$\lambda=1,07;$ O2=27%	$\lambda=1,07;$ O2=28%	$\lambda=1,07;$ O2=29%	$\lambda=1,07;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662
NO _x , m ³ /kg	0,012	0,0137	0,016	0,0191	0,023	0,0281	0,0346	0,043	0,0538	0,0675
V _{ps} , m ³ /kg	11,092	10,61	10,17	9,76	9,39	9,05	8,73	8,43	8,16	7,9
V, m ³ /kg	2,549	2,553	2,558	2,564	2,572	2,583	2,597	2,615	2,637	2,67
r(CO ₂), %	14,98	15,66	16,34	17,02	17,7	18,37	19,04	19,71	20,37	21,03
r(NO _x), %	0,107	0,129	0,158	0,195	0,245	0,31	0,397	0,51	0,66	0,854
ts, °C	1985	2066	2146	2224	2301	2378	2453	2528	2601	2674
K(NO _x), g/GJ	6,41	7,375	8,634	10,272	12,4	15,14	18,67	23,2	29	36,388
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L3 (1,12)

	$\lambda=1,12;$ O2=21%	$\lambda=1,12;$ O2=22%	$\lambda=1,12;$ O2=23%	$\lambda=1,12;$ O2=24%	$\lambda=1,12;$ O2=25%	$\lambda=1,12;$ O2=26%	$\lambda=1,12;$ O2=27%	$\lambda=1,12;$ O2=28%	$\lambda=1,12;$ O2=29%	$\lambda=1,12;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662
NO _x , m ³ /kg	0,0106	0,0119	0,0136	0,0158	0,0186	0,0222	0,0268	0,0327	0,04	0,05
V _{ps} , m ³ /kg	11,589	11,08	10,621	10,2	9,81	9,45	9,11	8,8	8,5	8,25
V, m ³ /kg	2,546	2,549	2,553	2,557	2,563	2,571	2,58	2,593	2,609	2,629
r(CO ₂), %	14,338	14,99	15,64	16,3	16,94	17,59	18,23	18,87	19,51	20,14
r(NO _x), %	0,107	0,129	0,158	0,195	0,245	0,31	0,397	0,51	0,66	0,854
ts, °C	1908	1986	2063	2139	2214	2288	2361	2433	2504	2575
K(NO _x), g/GJ	6,41	7,375	8,634	10,272	12,4	15,14	18,67	23,2	29	36,388
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L3 (1,17)

	$\lambda=1,17;$ O2=21%	$\lambda=1,17;$ O2=22%	$\lambda=1,17;$ O2=23%	$\lambda=1,17;$ O2=24%	$\lambda=1,17;$ O2=25%	$\lambda=1,17;$ O2=26%	$\lambda=1,17;$ O2=27%	$\lambda=1,17;$ O2=28%	$\lambda=1,17;$ O2=29%	$\lambda=1,17;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662
NO _x , m ³ /kg	0,0097	0,0106	0,012	0,0135	0,0156	0,0182	0,0215	0,0258	0,0311	0,0377
V _{ps} , m ³ /kg	12,09	11,56	11,08	10,63	10,22	9,85	9,5	9,18	8,88	8,59
V, m ³ /kg	2,54	2,546	2,549	2,552	2,557	2,562	2,569	2,578	2,589	2,603
r(CO ₂), %	13,75	14,38	15	15,63	16,25	16,87	17,49	18,1	18,72	19,33
r(NO _x), %	0,08	0,092	0,108	0,127	0,152	0,185	0,227	0,281	0,35	0,44
ts, °C	1836	1912	1986	2060	2133	2204	2275	2345	2415	2483
K(NO _x), g/GJ	5,21	5,74	6,42	7,29	8,4	9,82	11,615	13,88	16,74	20,34
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

L3 (1,22)

	$\lambda=1,22;$ O2=21%	$\lambda=1,22;$ O2=22%	$\lambda=1,22;$ O2=23%	$\lambda=1,22;$ O2=24%	$\lambda=1,22;$ O2=25%	$\lambda=1,22;$ O2=26%	$\lambda=1,22;$ O2=27%	$\lambda=1,22;$ O2=28%	$\lambda=1,22;$ O2=29%	$\lambda=1,22;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /kg	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662	1,662
NO _x , m ³ /kg	0,009	0,0097	0,0107	0,012	0,0135	0,0154	0,018	0,021	0,0248	0,0296
V _{ps} , m ³ /kg	12,58	12,03	11,53	11,07	10,64	10,25	9,89	9,55	9,24	8,94
V, m ³ /kg	2,543	2,544	2,546	2,55	2,552	2,556	2,562	2,568	2,576	2,58
r(CO ₂), %	13,2	13,81	14,41	15,01	15,61	16,21	16,8	17,4	17,99	18,58
r(NO _x), %	0,07	0,081	0,093	0,108	0,126	0,15	0,18	0,22	0,268	0,33
ts, °C	1770	1843	1815	1987	2057	2127	2196	2264	2331	2397
K(NO _x), g/GJ	4,843	5,25	5,76	6,42	7,25	8,3	9,63	11,29	13,37	15,97
K(CO ₂), kg/GJ	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7	85,7

Tabela P6. Uticaj % O₂ na sagorijevanje gasovitih goriva

G1 (1,02)

	$\lambda=1,02;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86		0,86	0,86	0,86	0,86
NO _x , m ³ /m ³	0,0065	0,0068	0,0071	0,0074	0,0079	0,0084	0,0091	0,0098	0,0105	0,0114
V _{ps} , m ³ /m ³	9,375	8,996	8,65	8,33	8,04	7,77	7,52	7,29	7,07	6,87
V _{gsb} , m ³ /m ³	2,92	2,99	3,07	3,17	3,3	3,46	3,66	3,91	4,22	4,59
r(CO ₂),%	9,22	9,6	9,99	10,37	10,75	11,12	11,5	11,9	12,22	12,58
r(NO _x),%	0,066	0,073	0,077	0,086	0,099	0,11	0,12	0,13	0,15	0,17
ts, °C	2012	2089	2164	2237	2310	2381	2451	2519	1587	2653
K(NO _x), g/GJ	4,16	4,378	4,626	4,91	5,23	5,59	6	6,47	6,99	7,57
K(CO ₂), kg/GJ	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76

G1 (1,07)

	$\lambda=1,07;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,07;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
NO _x , m ³ /m ³	0,006	0,0063	0,0066	0,0069	0,0073	0,0078	0,0083	0,0088	0,0095	0,0102
V _{ps} , m ³ /m ³	9,78	9,39	9,02	8,69	8,38	8,1	7,84	7,59	7,37	7,16
V _{gsb} , m ³ /m ³	2,87	2,92	2,98	3,06	3,15	3,27	3,42	3,59	3,81	4,1
r(CO ₂),%	8,83	9,2	9,58	9,94	10,31	10,67	11,02	11,38	11,73	12,07
r(NO _x),%	0,06	0,07	0,073	0,08	0,087	0,096	0,106	0,116	0,129	0,143
ts, °C	1935	2009	2082	2153	2224	2293	2361	2428	2493	2558
K(NO _x), g/GJ	3,97	4,15	4,358	4,59	4,85	5,15	5,485	5,86	6,284	6,758
K(CO ₂), kg/GJ	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76

G1(1,12)

	$\lambda=1,12;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,12;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
NO _x , m ³ /m ³	0,0058	0,006	0,0063	0,0065	0,0069	0,0072	0,0077	0,0081	0,0087	0,0092
V _{ps} , m ³ /m ³	10,2	9,78	9,4	9,05	8,73	8,43	8,16	7,9	7,66	7,44
V _{gsb} , m ³ /m ³	2,83	2,87	2,92	2,98	3,05	3,13	3,24	3,37	3,53	3,73
r(CO ₂),%	8,48	8,84	9,19	9,55	9,9	10,25	10,6	10,9	11,3	11,6
r(NO _x),%	0,057	0,061	0,067	0,072	0,079	0,086	0,094	0,103	0,113	0,124
ts, °C	1863	1935	2006	2075	2144	2211	2277	2342	2407	2470
K(NO _x), g/GJ	3,824	3,974	4,145	4,34	4,557	4,8	5,08	5,39	5,74	6,125
K(CO ₂), kg/GJ	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76

G1(1,17)

	$\lambda=1,17;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,17;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
NO _x , m ³ /m ³	0,0056	0,0058	0,006	0,0062	0,0065	0,0068	0,0072	0,0076	0,008	0,0085
V _{ps} , m ³ /m ³	10,6	10,17	9,77	9,4	9,07	8,76	8,47	8,21	7,96	7,73
V _{gsb} , m ³ /m ³	2,81	2,83	2,87	2,92	2,97	3,04	3,12	3,22	3,34	3,48
r(CO ₂), %	8,15	8,5	8,84	9,2	9,53	9,86	10,2	10,53	10,85	11,18
r(NO _x), %	0,053	0,057	0,061	0,066	0,072	0,078	0,085	0,092	0,1	0,11
ts, °C	1797	1867	1935	2003	2070	2135	2200	2263	2326	2387
K(NO _x), g/GJ	3,7	3,83	3,975	4,138	4,322	4,526	4,76	5,02	5,3	5,63
K(CO ₂), kg/GJ	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76

G1(1,22)

	$\lambda=1,22;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,22;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86
NO _x , m ³ /m ³	0,0054	0,0056	0,0058	0,006	0,0062	0,0065	0,0068	0,0071	0,0075	0,0079
V _{ps} , m ³ /m ³	11,01	10,56	10,14	9,76	9,41	9,1	8,8	8,5	8,26	8,02
V _{gsb} , m ³ /m ³	2,78	2,81	2,84	2,87	2,91	2,96	3,03	3,1	3,19	3,3
r(CO ₂), %	7,85	8,18	8,52	8,85	9,18	9,5	9,83	10,15	10,46	10,78
r(NO _x), %	0,005	0,053	0,057	0,061	0,066	0,071	0,077	0,084	0,091	0,098
ts, °C	1735	1803	1870	1936	2000	2064	2127	2190	2250	2310
K(NO _x), g/GJ	3,6	3,713	3,836	3,975	4,13	4,306	4,5	4,72	4,96	5,23
K(CO ₂), kg/GJ	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76	54,76

G2 (1,02)

	$\lambda=1,02;$ O ₂ =21%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =22%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =23%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =24%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =25%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =26%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =27%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =28%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =29%	$\lambda=1,02;$ O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
NO _x , m ³ /m ³	0,0241	0,025	0,0261	0,0272	0,0285	0,0298	0,0313	0,0328	0,0345	0,0363
V _{ps} , m ³ /m ³	2,878	2,78	2,69	2,61	2,54	2,47	2,4	2,34	2,29	2,24
V _{gsb} , m ³ /m ³	1,24	1,28	1,33	1,4	1,46	1,53	1,62	1,71	1,81	1,93
r(CO ₂), %	11,33	11,72	12,11	12,48	12,85	13,2	13,5	13,9	14,2	14,5
r(NO _x), %	0,836	0,9	0,968	1,042	1,121	1,207	1,3	1,4	1,51	1,62
ts, °C	1985	2046	2106	2164	2221	2275	2328	2380	2430	2478
K(NO _x), g/GJ	52,177	54,26	56,54	59,02	59,343	64,65	67,8	71,22	74,9	78,83
K(CO ₂), kg/GJ	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3

G2 (1,07)

	$\lambda=1,07;$ O2=21%	$\lambda=1,07;$ O2=22%	$\lambda=1,07;$ O2=23%	$\lambda=1,07;$ O2=24%	$\lambda=1,07;$ O2=25%	$\lambda=1,07;$ O2=26%	$\lambda=1,07;$ O2=27%	$\lambda=1,07;$ O2=28%	$\lambda=1,07;$ O2=29%	$\lambda=1,07;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
NO _x , m ³ /m ³	0,0232	0,024	0,025	0,026	0,027	0,0282	0,0294	0,0308	0,0322	0,034
V _{ps} , m ³ /m ³	2,98	2,88	2,79	2,7	2,62	2,55	2,49	2,42	2,37	2,31
V _{gsb} , m ³ /m ³	1,2	1,24	1,28	1,33	1,38	1,44	1,51	1,59	1,67	1,77
r(CO ₂),%	10,93	11,31	11,7	12,06	12,42	12,77	13,11	13,45	13,78	14,1
r(NO _x),%	0,777	0,834	0,894	0,96	1,028	1,103	1,183	1,27	1,362	1,462
t _s , °C	1922	1982	2041	2098	2154	2208	2260	2311	2360	2408
K(NO _x), g/GJ	50,3	52,1	54,06	50,21	58,54	61,07	63,8	66,74	69,9	73,29
K(CO ₂), kg/GJ	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3

G2(1,12)

	$\lambda=1,12;$ O2=21%	$\lambda=1,12;$ O2=22%	$\lambda=1,12;$ O2=23%	$\lambda=1,12;$ O2=24%	$\lambda=1,12;$ O2=25%	$\lambda=1,12;$ O2=26%	$\lambda=1,12;$ O2=27%	$\lambda=1,12;$ O2=28%	$\lambda=1,12;$ O2=29%	$\lambda=1,12;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
NO _x , m ³ /m ³	0,0225	0,0232	0,024	0,0248	0,0258	0,0268	0,028	0,0291	0,0303	0,0317
V _{ps} , m ³ /m ³	3,1	2,98	2,88	2,8	2,71	2,64	2,57	2,5	2,44	2,38
V _{gsb} , m ³ /m ³	1,17	1,2	1,24	1,28	1,32	1,37	1,43	1,49	1,56	1,64
r(CO ₂),%	10,5	10,94	11,3	11,67	12	12,36	12,7	13	13,35	13,67
r(NO _x),%	0,728	0,778	0,832	0,89	0,95	1,016	1,086	1,161	1,242	1,328
t _s , °C	1862	1922	1980	2036	2091	2144	2196	2246	2295	2342
K(NO _x), g/GJ	48,73	50,3	52,02	53,88	55,9	58,1	60,48	63,04	65,78	68,726
K(CO ₂), kg/GJ	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3

G2(1,17)

	$\lambda=1,17;$ O2=21%	$\lambda=1,17;$ O2=22%	$\lambda=1,17;$ O2=23%	$\lambda=1,17;$ O2=24%	$\lambda=1,17;$ O2=25%	$\lambda=1,17;$ O2=26%	$\lambda=1,17;$ O2=27%	$\lambda=1,17;$ O2=28%	$\lambda=1,17;$ O2=29%	$\lambda=1,17;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
NO _x , m ³ /m ³	0,0219	0,0225	0,0232	0,024	0,0248	0,0257	0,0266	0,0276	0,0287	0,03
V _{ps} , m ³ /m ³	3,2	3,1	2,98	2,89	2,8	2,72	2,65	2,58	2,52	2,46
V _{gsb} , m ³ /m ³	1,14	1,17	1,2	1,23	1,27	1,31	1,36	1,42	1,47	1,54
r(CO ₂),%	10,2	10,58	10,94	11,3	11,64	11,98	12,31	12,63	12,95	13,26
r(NO _x),%	0,685	0,73	0,778	0,83	0,884	0,943	1	1,07	1,14	1,214
t _s , °C	1806	1865	1922	1977	2031	2084	2135	2184	2233	2280
K(NO _x), g/GJ	47,42	48,8	50,3	51,9	53,72	55,64	57,72	59,95	62,35	64,9
K(CO ₂), kg/GJ	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3

G2(1,22)

	$\lambda=1,22;$ O2=21%	$\lambda=1,22;$ O2=22%	$\lambda=1,22;$ O2=23%	$\lambda=1,22;$ O2=24%	$\lambda=1,22;$ O2=25%	$\lambda=1,22;$ O2=26%	$\lambda=1,22;$ O2=27%	$\lambda=1,22;$ O2=28%	$\lambda=1,22;$ O2=29%	$\lambda=1,22;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
NO _x , m ³ /m ³	0,0213	0,0219	0,0255	0,0232	0,0239	0,0247	0,0255	0,0264	0,0274	0,0285
V _{ps} , m ³ /m ³	3,3	3,18	3,07	2,98	2,89	2,8	2,73	2,66	2,59	2,53
V _{gsb} , m ³ /m ³	1,12	1,15	1,17	1,2	1,23	1,27	1,31	1,35	1,4	1,46
r(CO ₂), %	9,89	10,25	10,6	10,95	11,23	11,62	11,94	12,26	12,57	12,88
r(NO _x), %	0,648	0,689	0,733	0,78	0,828	0,88	0,936	0,955	1,057	1,124
t _s , °C	1754	1811	1868	1922	1975	2027	2077	2126	2174	2221
K(NO _x), g/GJ	46,311	47,53	48,86	5031	51,87	53,57	55,4	57,36	59,47	61,73
K(CO ₂), kg/GJ	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3	59,3

G3 (1,02)

	$\lambda=1,02;$ O2=21%	$\lambda=1,02;$ O2=22%	$\lambda=1,02;$ O2=23%	$\lambda=1,02;$ O2=24%	$\lambda=1,02;$ O2=25%	$\lambda=1,02;$ O2=26%	$\lambda=1,02;$ O2=27%	$\lambda=1,02;$ O2=28%	$\lambda=1,02;$ O2=29%	$\lambda=1,02;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
NO _x , m ³ /m ³	0,035	0,0368	0,0388	0,041	0,0434	0,0462	0,0493	0,0527	0,0565	0,0606
V _{ps} , m ³ /m ³	6,01	5,78	5,57	5,38	5,2	5,04	4,9	4,75	4,62	4,5
V _{gsb} , m ³ /m ³	2,13	2,21	2,31	2,42	2,56	2,72	2,9	3,13	3,38	3,67
r(CO ₂), %	10,42	10,83	11,23	11,63	12	12,4	12,8	13,17	13,54	13,9
r(NO _x), %	0,584	0,637	0,696	0,762	0,835	0,916	1	1,108	1,221	1,347
t _s , °C	2018	2090	2161	2230	2297	2363	2428	2491	2253	2613
K(NO _x), g/GJ	36,32	38,11	40,13	42,4	44,94	47,79	50,96	54,48	58,4	62,72
K(CO ₂), kg/GJ	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7

G3 (1,07)

	$\lambda=1,07;$ O2=21%	$\lambda=1,07;$ O2=22%	$\lambda=1,07;$ O2=23%	$\lambda=1,07;$ O2=24%	$\lambda=1,07;$ O2=25%	$\lambda=1,07;$ O2=26%	$\lambda=1,07;$ O2=27%	$\lambda=1,07;$ O2=28%	$\lambda=1,07;$ O2=29%	$\lambda=1,07;$ O2=30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
NO _x , m ³ /m ³	0,0336	0,035	0,0367	0,0385	0,0406	0,0428	0,0454	0,0482	0,0513	0,0548
V _{ps} , m ³ /m ³	6,26	6,02	5,8	5,6	5,41	5,24	5,08	4,94	4,8	4,67
V _{gsb} , m ³ /m ³	2,06	2,12	2,2	2,29	2,4	2,53	2,67	2,84	3,04	3,26
r(CO ₂), %	10	10,4	10,8	11,18	11,57	11,94	12,31	12,68	13,04	13,4
r(NO _x), %	0,537	0,582	0,633	0,688	0,749	0,817	0,893	0,976	1,07	1,172
t _s , °C	1945	2015	2084	2151	2217	2281	2344	2406	2567	2526
K(NO _x), g/GJ	34,74	36,25	37,94	39,84	41,96	44,323	46,95	49,87	53,1	56,67
K(CO ₂), kg/GJ	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7

G3(1,12)

	$\lambda=1,12$; O ₂ =21%	$\lambda=1,12$; O ₂ =22%	$\lambda=1,12$; O ₂ =23%	$\lambda=1,12$; O ₂ =24%	$\lambda=1,12$; O ₂ =25%	$\lambda=1,12$; O ₂ =26%	$\lambda=1,12$; O ₂ =27%	$\lambda=1,12$; O ₂ =28%	$\lambda=1,12$; O ₂ =29%	$\lambda=1,12$; O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
NO _x , m ³ /m ³	0,0324	0,0336	0,035	0,0365	0,0383	0,04	0,0423	0,0447	0,0473	0,05
V _{ps} , m ³ /m ³	6,5	6,25	6,02	5,81	5,62	5,44	5,27	5,12	4,98	4,85
V _{gsb} , m ³ /m ³	2	2,06	2,12	2,19	2,28	2,38	2,5	2,63	2,79	2,96
r(CO ₂),%	9,63	10	10,4	10,77	11,14	11,5	11,9	12,22	12,57	12,92
r(NO _x),%	0,498	0,537	0,581	0,628	0,681	0,738	0,802	0,872	0,95	1,035
t _s , °C	1877	1945	2012	2078	2142	2205	2267	2328	2387	2445
K(NO _x), g/GJ	33,47	34,75	36,18	37,78	39,57	41,56	43,77	46,2	48,9	51,9
K(CO ₂), kg/GJ	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7

G3(1,17)

	$\lambda=1,17$; O ₂ =21%	$\lambda=1,17$; O ₂ =22%	$\lambda=1,17$; O ₂ =23%	$\lambda=1,17$; O ₂ =24%	$\lambda=1,17$; O ₂ =25%	$\lambda=1,17$; O ₂ =26%	$\lambda=1,17$; O ₂ =27%	$\lambda=1,17$; O ₂ =28%	$\lambda=1,17$; O ₂ =29%	$\lambda=1,17$; O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
NO _x , m ³ /m ³	0,0314	0,0324	0,0336	0,0349	0,0364	0,038	0,0398	0,0418	0,044	0,0465
V _{ps} , m ³ /m ³	6,75	6,49	6,25	6,03	5,83	5,64	5,47	5,3	5,16	5,02
V _{gsb} , m ³ /m ³	1,96	2,01	2,06	2,12	2,19	2,27	2,36	2,47	2,59	2,74
r(CO ₂),%	9,27	9,65	10,02	10,38	10,74	11,1	11,45	11,8	12,14	12,47
r(NO _x),%	0,465	0,5	0,538	0,579	0,625	0,674	0,728	0,788	0,854	0,926
t _s , °C	1813	1880	1945	2010	2072	2134	2194	2254	2312	2369
K(NO _x), g/GJ	32,436	33,531	34,75	36,12	37,64	39,33	41,2	43,27	45,55	48,06
K(CO ₂), kg/GJ	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7

G3(1,22)

	$\lambda=1,22$; O ₂ =21%	$\lambda=1,22$; O ₂ =22%	$\lambda=1,22$; O ₂ =23%	$\lambda=1,22$; O ₂ =24%	$\lambda=1,22$; O ₂ =25%	$\lambda=1,22$; O ₂ =26%	$\lambda=1,22$; O ₂ =27%	$\lambda=1,22$; O ₂ =28%	$\lambda=1,22$; O ₂ =29%	$\lambda=1,22$; O ₂ =30%
CO ₂ , m ³ /m ³	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
NO _x , m ³ /m ³	0,0305	0,0314	0,0325	0,0336	0,0349	0,0363	0,0378	0,0395	0,0414	0,0435
V _{ps} , m ³ /m ³	7	6,72	6,47	6,24	6,03	5,84	5,66	5,49	5,34	5,2
V _{gsb} , m ³ /m ³	1,93	1,97	2,01	2,06	2,11	2,18	2,26	2,35	2,45	2,56
r(CO ₂),%	8,95	9,31	9,67	10,03	10,37	10,72	11,06	11,4	11,73	12,06
r(NO _x),%	0,436	0,468	0,502	0,538	0,578	0,621	0,668	0,719	0,776	0,837
t _s , °C	1754	1819	1883	1946	2008	2067	2126	2185	2241	2297
K(NO _x), g/GJ	31,58	32,52	33,58	34,76	36,06	37,512	39,11	40,876	42,82	44,95
K(CO ₂), kg/GJ	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7	60,7