

4.3. VERTIKALNO LOŽIŠTE

U ovome radu opisani matematički model procesa u ložištu generatora pare je primijenjen na ložište protočnog generatora pare RAMZIN P-56 kapaciteta $D = 330$ t/h pregrijane pare temperature $t_{pr} = 540$ °C i tlaka $p = 140$ bar na punom opterećenju, pri izgaranju zemnog plina. Ložište je presjeka $A = 8.4 \times 8.4$ m², a visine $h = 25.1$ m s po dva kombinirana plamenika za plin i mazut na bočnim stranama. Sastav goriva dan je tablici 4.5. Zbog vrlo malih udjela butana i propana u gorivu njihovi su udjeli pripojeni etanu. Donja ogrjevna moć goriva iznosi $H_d = 34460$ kJ/m_n³. Pretičak zraka je $\lambda = 1.05$.

Tablica 4.5. Sastav goriva

kem. vrsta	volumni udio [kmol/kmol]
CH ₄	0.926
C ₂ H ₆	0.034
C ₃ H ₈	0.007
C ₄ H ₁₀	0.003
CO ₂	0.007
N ₂	0.023

Tablica 4.6. Usporedba izlaznih temperatura dimnih plinova iz ložišta

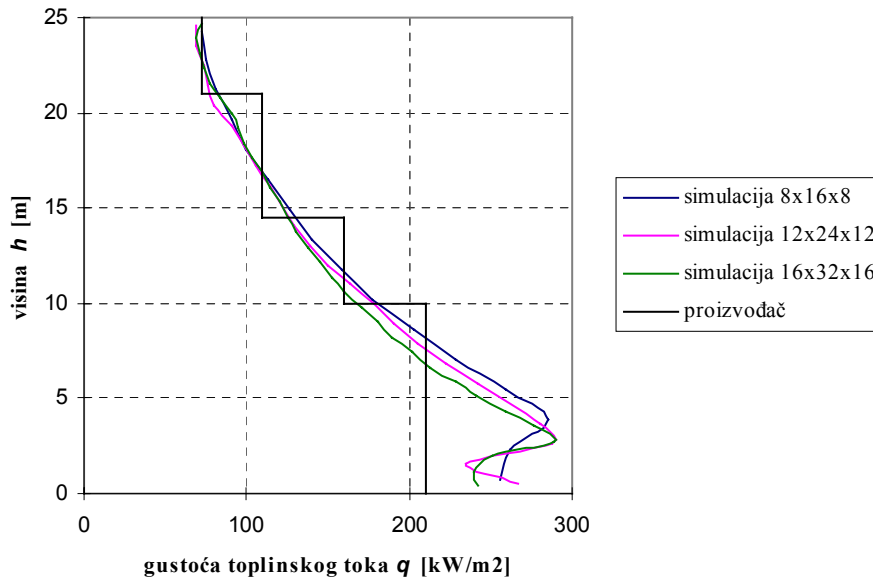
Proračun	temperatura dimnih plinova [°C]
Normativni [2]	1048
Proizvođač [115]	1015
DVODIM [76]	1044
ZONAL 4.40	1002

Tablica 4.7. Prosječne izlazne vrijednosti kemijskih vrsta

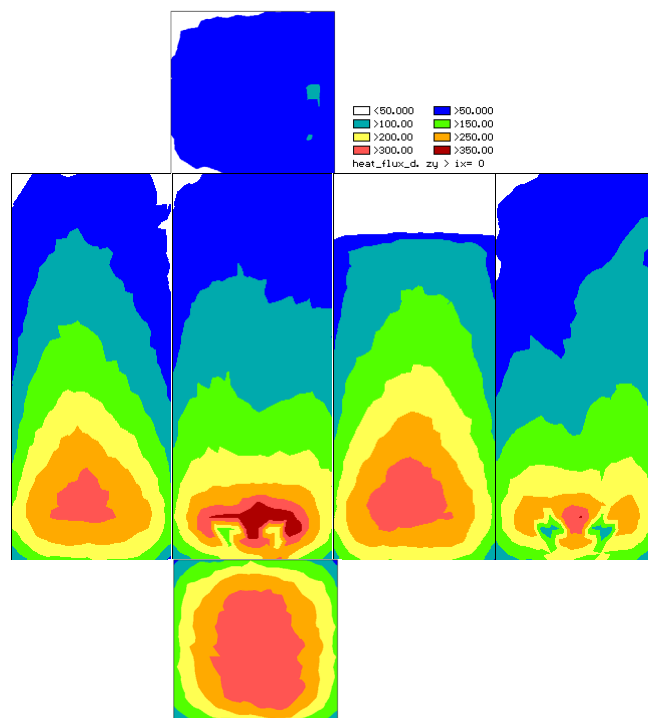
kem. vrst a	\dot{m}_α [kg/s]	Y_α [kg/kg]	X_α [kmol/kmol]
O	6.30E-04	6.03E-06	1.05E-05
O ₂	7.13E-01	6.82E-03	5.92E-03
H	3.53E-05	3.40E-07	9.38E-06
H ₂	1.57E-03	1.50E-05	2.08E-04
OH	1.10E-02	1.05E-04	1.72E-04
H ₂ O	1.24E+01	1.18E-01	1.83E-01
HO ₂	9.70E-06	9.00E-08	7.78E-08
H ₂ O ₂	5.66E-05	5.40E-07	4.43E-07
N ₂	7.47E+01	7.14E-01	7.09E-01
NO	1.51E-01	1.45E-03	1.34E-03
N ₂ O	6.00E-07	1.00E-08	3.54E-09
NO ₂	2.81E-05	2.70E-07	1.62E-07
CO	1.52E-02	1.45E-04	1.44E-04
CO ₂	1.54E+01	1.47E-01	9.27E-02

U tablici 4.6 dani su podaci za srednju izlaznu temperaturu dimnih plinova. Prva tri podatka preuzeta su iz [76]. Za potrebe toga rada, a radi mogućnosti usporedbe, ložište je proračunato na klasičan način pomoću "normativne" metode, te pomoću dvodimenzionalnog modela procesa u ložištu s jednostavnim jednostepenim modelom izgaranja plina, ugrađenim u

program pod imenom DVODIM. Taj je programski kod prethodio razvoju ZONAL-a. Rezultat dobiven sadašnjim modelom pokazuje bolje slaganje s temperaturom dimnih plinova koju je za takve uvjete izgaranja predvidio proizvođač ložišta, nego i “normativni” i dvodimenzionalni proračun. U tablici 4.7 dane su izlazne vrijednosti masenog toka, masenog udjela i molnog udjela kemijskih vrsta sa značajnijim udjelima na izlazu iz ložišta.

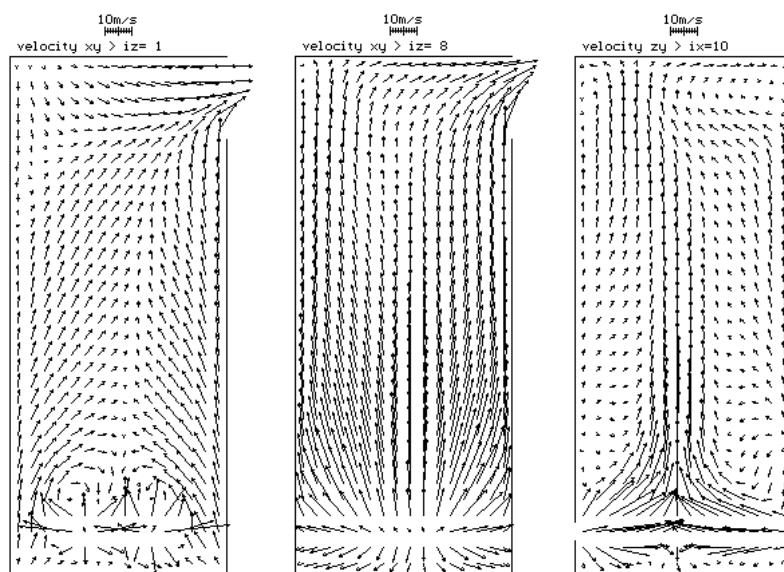


Slika 4.28. Profil gustoće toplinskog toka uzduž ložišta; usporedba rezultata dobivenih simulacijom pomoću opisanog modela s podacima koje daje proizvođač [115]

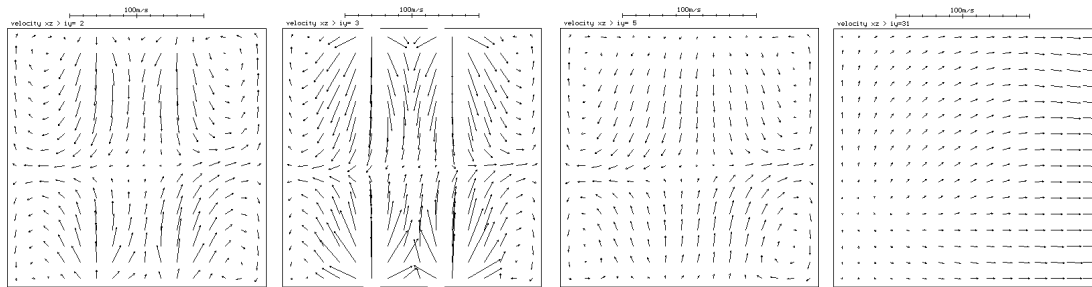


Slika 4.29. Distribucija gustoće toplinskog toka po plaštu ložišta

Na slici 4.28 prikazana je usporedba profila gustoće toplinskog toka uzduž ložišta između rezultata dobivenih simulacijom pomoću opisanog modela s podacima koje daje proizvođač [115]. Matematički je model primijenjen na tri različite mreže ($8 \times 16 \times 8 = 1024$, $12 \times 24 \times 12 = 3456$, $16 \times 32 \times 16 = 8096$ kontrolnih volumena). Slaganje s podacima proizvođača je prilično dobro za sve tri mreže, ali je za najgušću mrežu najbolje, što je i očekivani zaključak. U donjem je dijelu ložišta jedino slaganje rezultata dobivenih računanjem modela na najgušćoj mreži vrlo dobro. Distribucija gustoće toplinskog toka po plaštu ložišta prikazana je na slici 4.29. Vrlo je velika informativnost poznavanja distribucije gustoće toplinskog toka u situacijama u kojima treba pronaći maksimalne tokove koji su uzrok pucanja cijevi. Najveće vrijednosti gustoće toplinskog toka su lokalne i značajno više od srednjih. Poznavajući njihov iznos i lokaciju može se predvidjeti najvjerojatnija pozicija na kojoj će doći do pucanja ekranskih cijevi te pomoću modeliranja različitih situacija eventualno naći način da se incidencija takvih situacija smanji.



Slika 4.30. Distribucija brzina strujanja
 a) ravnina uz bočni zid, pogled sa strane
 b) centralna ravnina, pogled sa strane
 c) ravnina plamenika, pogled sprijeda



Slika 4.31. Distribucija brzina strujanja, tlocrt

- a) ravnina ispod plamenika
- b) ravnina plamenika
- c) ravnina iznad plamenika
- d) izlazna ravnina

Distribucija brzine u ložištu prikazana je na slikama 4.30 i 4.31 za različite presječne ravnine. Područje plamenika prikazano je presjekom 4.30c s prednje strane i slikom 4.31b iz tlocrta. Može se vidjeti da se struje iz nasuprotnih plamenika sudaraju, i da time stvaraju kutne vrtloge. Ti se vrtlozi još bolje mogu zamijetiti u presječnim ravninama ispod (sl. 4.31a) i nešto iznad (sl. 4.31c) ravnine plamenika. Slika 4.30c pokazuje da većina masenog toka prolazi sredinom ložišta, što je i za očekivati. Mogu se uočiti i vrtlozi koji nastaju u području iznad plamenika. Također je vidljiva nesimetrija koja je posljedica prethodno objašnjenih uzroka. Slika 4.30b prikazuje upravo centralnu ravninu u kojoj je uzlazno strujanje najjače.

Distribucija temperature prikazana je na slikama 4.32, 4.33 i 4.34 u različitim presječnim ravninama. Slike 4.32a-4.32d prikazuju promjenu temperaturnog polja prilikom pomicanja presjeka od bočnog zida do centralne ravnine. Primjetno je hladno područje oko plamenika u prvom i drugom presjeku do zida (sl. 4.32a-4.32b) koje već sasvim nestaje u petoj ravnini (sl. 4.32c). Daljnjim se pomakom prema centralnoj ravnini smanjuje područje najviših temperatura ($>1600\text{ °C}$), ali se zato povećava oblak visokih temperatura. To ukazuje da se glavina reakcija koje oslobađaju toplinu nalazi negdje na četvrtini ložišta, gledano s bočne strane.

Usporedbom slika 4.32a i 4.32e može se dobiti uvid u nesimetričnost rezultata, koja je u donjem dijelu ložišta, u kojem se ionako nalaze kritični toplinski tokovi, mala, dok je nešto veća u gornjem dijelu ložišta, što se može uočiti s promatranjem distribucije toplinskih tokova (sl. 4.29).

Na slici 4.33a prikazana je ravnina plamenika u presjeku sprijeda. Vide se hladne zone u okolini samih plamenika, te područja visokih temperatura uokolo tih hladnih zona koja predstavljaju plamen. Uočljivo je da su zone najviših temperatura prepoznatljivije, tj. ne dolazi do njihovog potpunog spajanja za nasuprotne plamenike. Slika 4.33b prikazuje temperaturnu distribuciju uz stražnji zid. Ta distribucija ima veliki utjecaj na iznos toplinskih tokova, što se može i vidjeti usporedbom sa sl. 4.29. Slika 4.33c prikazuje distribuciju temperature na izlasku iz ložišta.

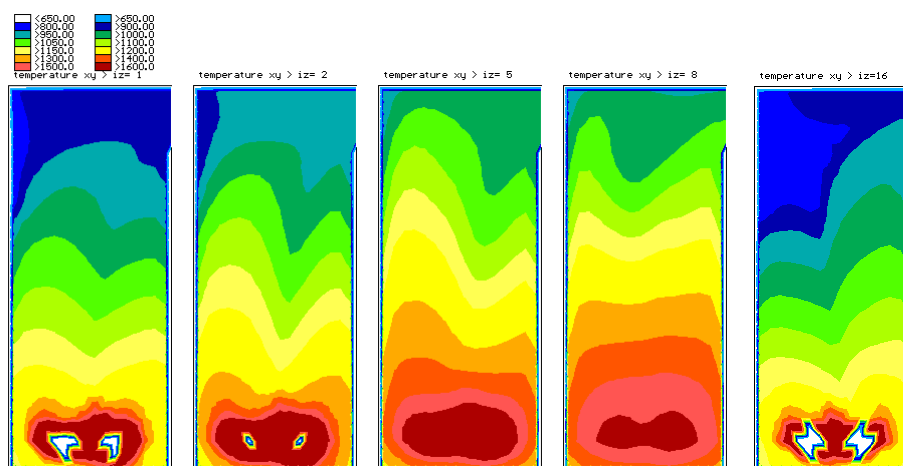
Na slici 4.34b prikazana je distribucija temperature u ravnini plamenika u tlocrtu. Uočljive su hladne zone neupaljene smjese goriva i zraka. Na sl. 4.34a prikazana je situacija ispod ravnine plamenika, a na sl. 4.34c i 4.34d iznad te ravnine. Najviši prikazani horizontalni

presjek ložišta nalazi se iznad zone plamena. Može se primijetiti da plamen ima ovalni presjek, tj. da je bliže prednjem i stražnjem ekranu nego bočnim stranama. Na taj se način može objasniti i distribucija gustoće toplinskog toka (sl. 4.29) s većim područjima jakih toplinskih tokova na prednjem i stražnjem zidu, iako su maksimalni tokovi u zoni oko plamenika na bočnim zidovima.

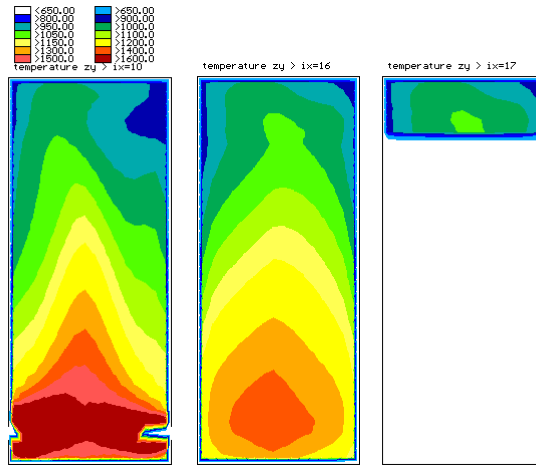
Distribucija goriva je prikazana na slici 4.35, razdvojenog na metan (sl. 4.35a) i etan (sl. 4.35b). Uočljiva je njihova vrlo brza razgradnja u metilni (CH_3) i etilni (C_2H_5) radikal čije su distribucije prikazane na sl. 4.36. Uočljivo je da su koncentracije tih radikala vrlo male, što znači da je njihovo trajanje kratko, te je njihova važnost u tome što su prijelazne kemijske vrste u procesu izgaranja. Na slici 4.35b nije moguće razlučiti sekundarni etan koji nastaje rekombinacijom dvaju metilnih radikala jer je maseni udio etana u gorivu značajan (tab. 4.5).

Daljnjom oksidacijom metilnog radikala CH_3 nastaju vrlo kratkotrajne kemijske vrste poput CH_2O , CH_2 , CH_2OH i CH_3O , ali njihove distribucije ovdje nisu prikazane jer je nemoguće odvojiti vrijednosti od šuma metode. Ubrzo, sve te kratkotrajne kemijske vrste oksidiraju u radikal HCO , čija je distribucija prikazana na slici 4.37. Pogled sa strane dan je na sl. 4.37a, centralna ravnina u pogledu sprijeda na sl. 4.37b, dok je ravnina plamenika u tlocrtu prikazana na sl. 4.37c.

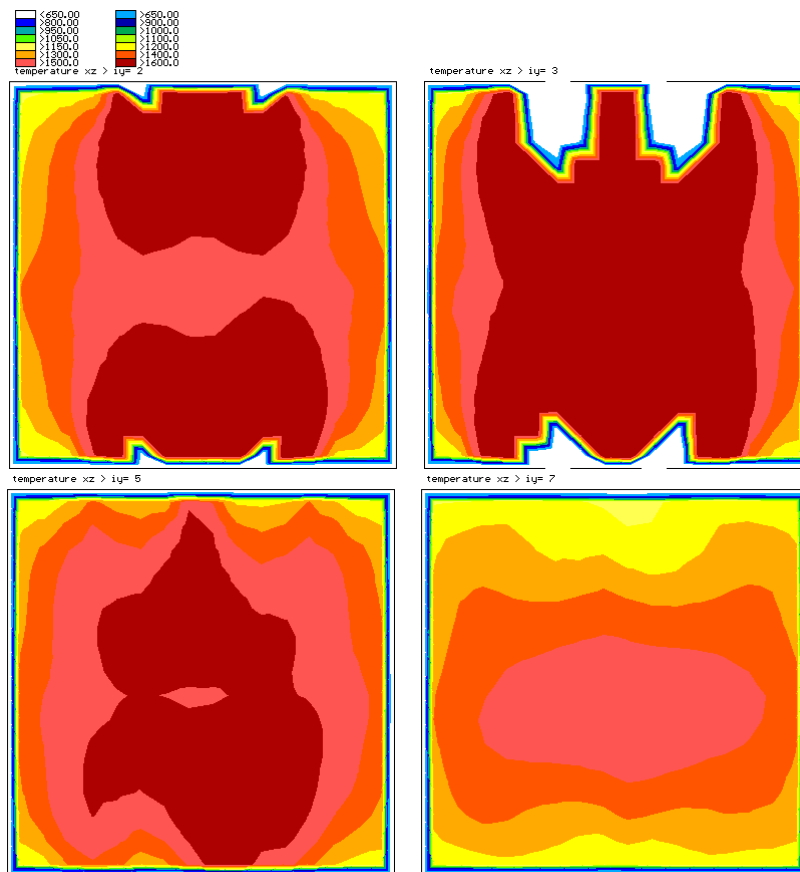
Daljnjom oksidacijom etilnog radikala C_2H_5 nastaje C_2H_4 , čija je distribucija prikazana na slici 4.38. U pogledu sa strane (sl. 4.38a-b) presječenom u dvije različite ravnine vidljivo je da je maksimalna koncentracija ovoga radikala u području gorionika, te da ona rapidno pada u području u kojem se plamenovi sudaraju. Još je to bolje uočljivo u pogledu sprijeda (sl. 4.38c). Prema tome se može zaključiti da ovaj radikal nastaje već kod nižih temperatura, te da se naročito nakuplja u područjima nižih temperatura ($<1100\text{ }^\circ\text{C}$), dok u centru plamena, gdje su temperature više, maseni udio C_2H_4 pada vrlo nisko. Jedan dio nešto višeg masenog udjela C_2H_4 u gornjoj polovici ložišta posljedica je slabog uzlaznog strujanja uz zidove iz područja visokih udjela u zoni plamenika, ali čini se da veći dio ipak nastaje zbog redukcije u područjima nižih temperatura.



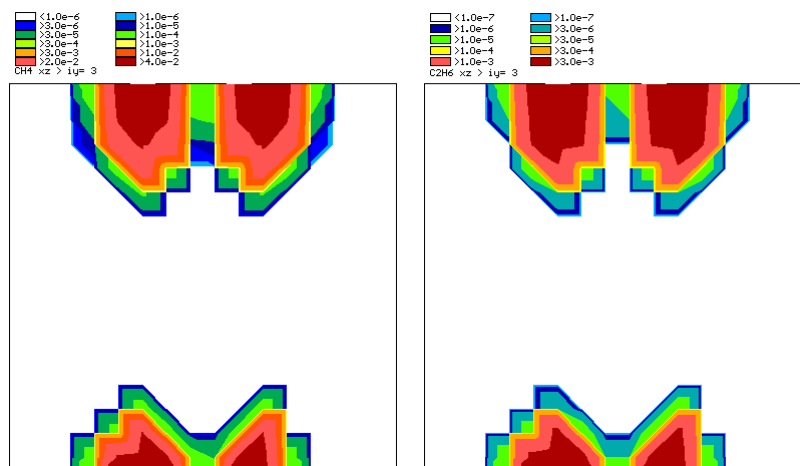
Slika 4.32. Distribucija temperature, pogled sa strane



Slika 4.33. Distribucija temperature, pogled sprijeda
a) ravnina plamenika
b) ravnina uz stražnji zid
c) izlazna ravnina



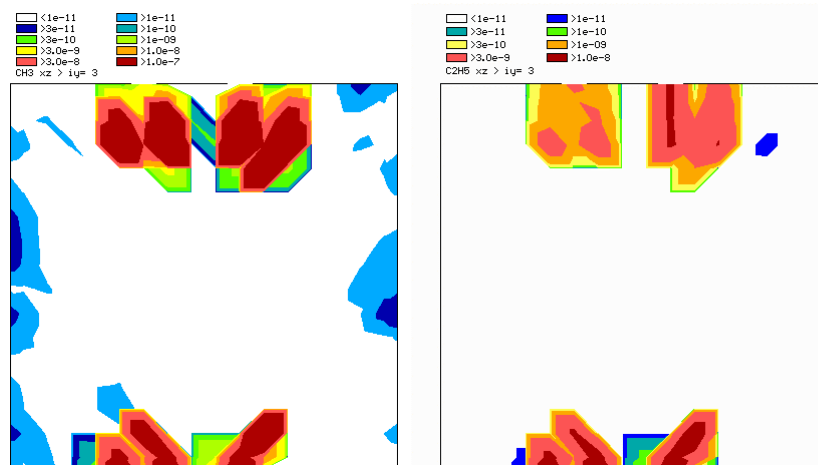
Slika 4.34. Distribucija temperature, tlocrt



Slika 4.35. Distribucija goriva, tloert

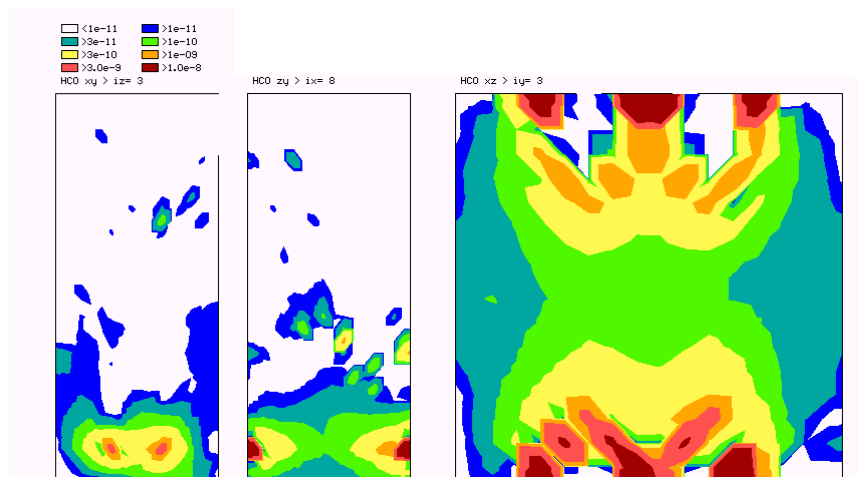
- a) metan
b) etan

Proces izgaranja C_2H_4 se nastavlja uglavnom gubitkom jednog vodikovog atoma, tj. prelaskom u radikal C_2H_3 , ali i u nekoliko drugih nestabilnih kemijskih vrsta (C_2H_2 , CH_2O , HCO). Radikal C_2H_3 dalje prelazi uglavnom u C_2H_2 , ali i u CH_2CO , C_2H , $HCCO$. Svi ti radikali (osim prethodno prikazane distribucije radikala HCO) su vrlo kratkotrajni, te im maseni udjeli ne dostižu vrijednosti koje se mogu prikazati kao distribucije odvojeno od šuma metode, iako su značajni kao prijelazni spojevi u kinetici izgaranja etana.



Slika 4.36. Distribucija radikala, ravnina plamenika, tloert

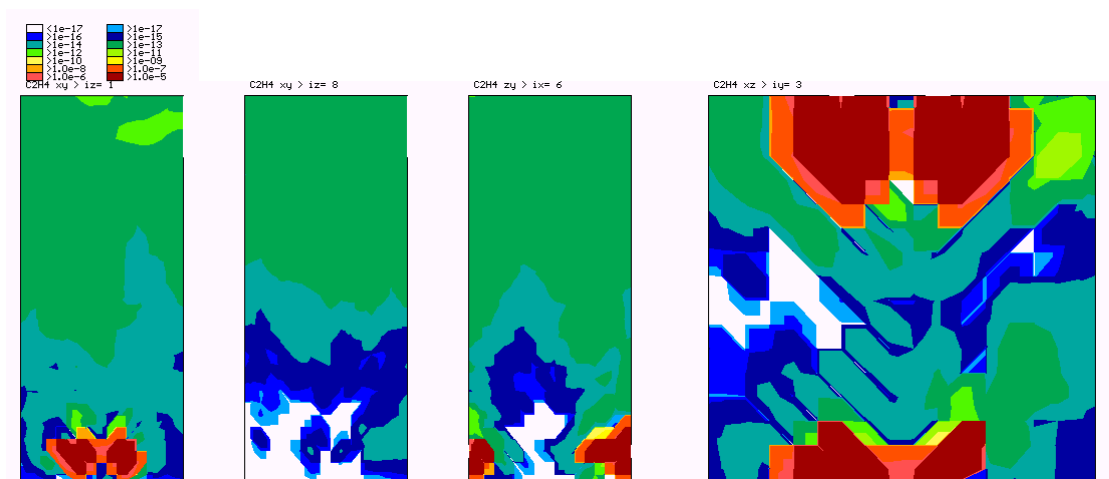
- a) metilni radikal CH_3
b) etilni radikal C_2H_5



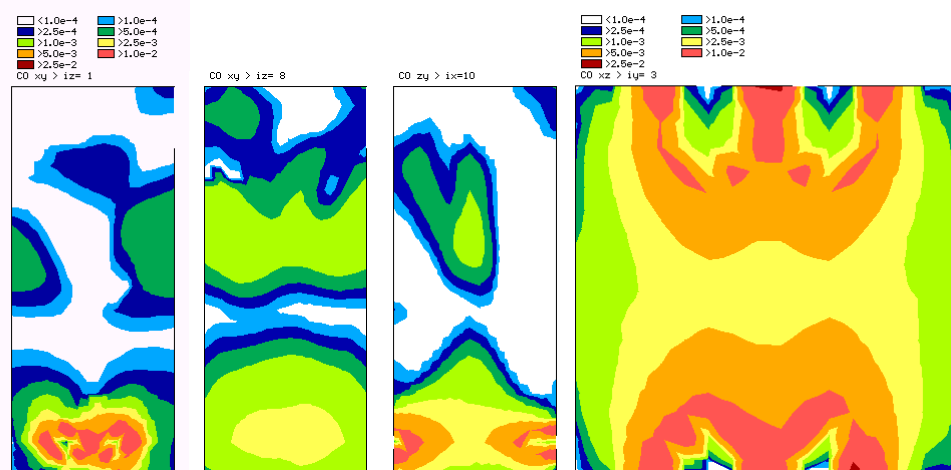
Slika 4.37. Distribucija radikala HCO

- pogled sa strane
- centralna ravnina, pogled sprijeda
- ravnina plamenika, tlocrt

Veći dio masenog udjela radikala C_2H_2 gubi atom ugljika i prelazi u radikal CH_2 , a ostatak prelazi u CH_2CO , C_2H , $HCCO$ i CH_3 . Radikal CH_2CO je vrlo kratkotrajan i prelazi u jednu od sljedećih kemijskih vrsta: CH_2O , HCO , $HCCO$ ili se raspada na molekule CH_2 i CO . Radikal $HCCO$ uglavnom prelazi u ugljik (II) oksid, kao i radikali C_2H , HCO , CH_2 , CH , ali jedan dio gubi ili atom ugljika ili atom kisika pa prelazi ili u HCO ili u C_2H . U svakom slučaju, kojim god putem da se odvijala kinetika izgaranja metana i etana, gotovo sav ugljik nakon gubitka vodikovih atoma prelazi u ugljik (II) oksid.

Slika 4.38. Distribucija etilnog radikala C_2H_4

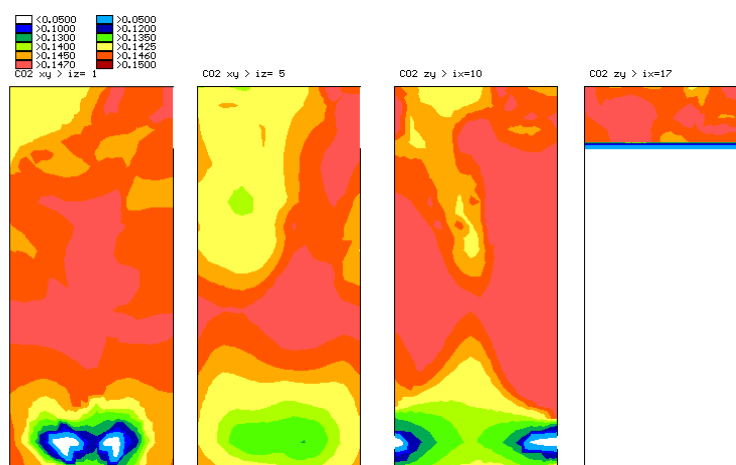
- ravnina uz zid, pogled sa strane
- centralna ravnina, pogled sa strane
- prva ravnina plamenika, pogled sprijeda
- ravnina plamenika, tlocrt



Slika 4.39. Distribucija ugljik (II) oksida

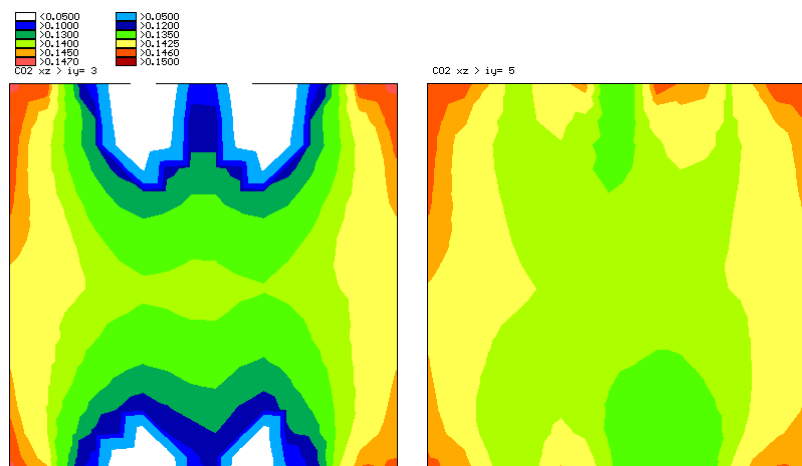
- ravnina uz zid, pogled sa strane
- centralna ravnina, pogled sa strane
- ravnina plamenika, pogled sprijeda
- ravnina plamenika, tlocrt

Distribucija ugljik (II) oksida prikazana je na slici 4.39. Dane su dvije presječne ravnine u pogledu sa strane, jedna uz bočni zid na kojem se nalaze plamenici (sl. 4.39a), a druga je centralna ravnina (sl. 4.39b), presječna ravnina u pogledu sprijeda, u ravnini plamenika (sl. 4.39c), te ravnina plamenika u tlocrtu (sl. 4.39d). Uočljivo je prema slikama 4.39c i 4.39d da CO ne nastaje u hladnoj zoni plamenika, nego tek u onom dijelu u kojem počinje brzo oslobađanje topline. Maseni udio ugljik (II) oksida brzo dostiže vrhunac, i zatim počinje polako opadati daljnjom oksidacijom u ugljik (IV) oksid. Međutim, na slikama 4.39b i 4.39c uočljiva je zona sekundarnog nastajanja CO u području u kojem plamen struji prema gore, što je očito posljedica disocijacije CO_2 .



Slika 4.40. Distribucija ugljik (IV) oksida

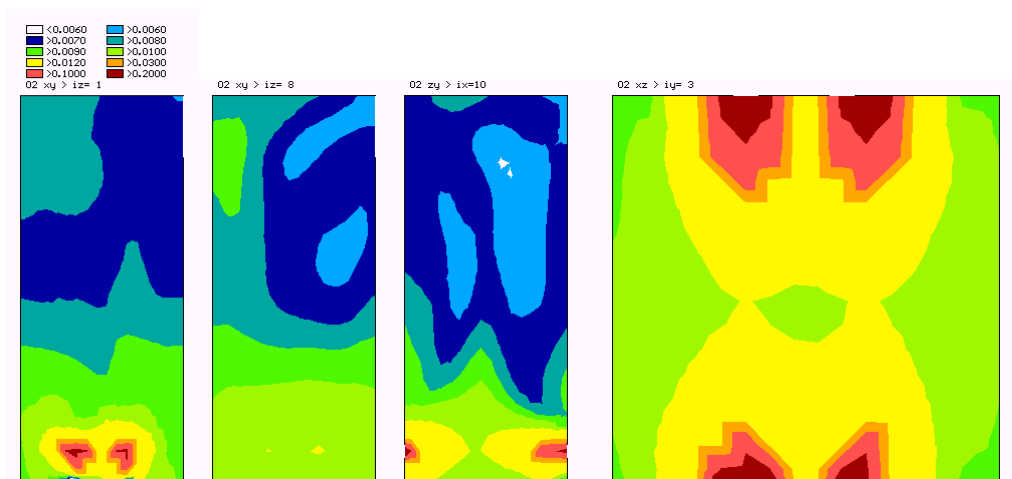
- ravnina uz zid, pogled sprijeda
- centralna ravnina, pogled sprijeda
- ravnina plamenika, pogled sprijeda
- izlazna ravnina, pogled sprijeda



Slika 4.41. Distribucija ugljik (IV) oksida, tlocrt

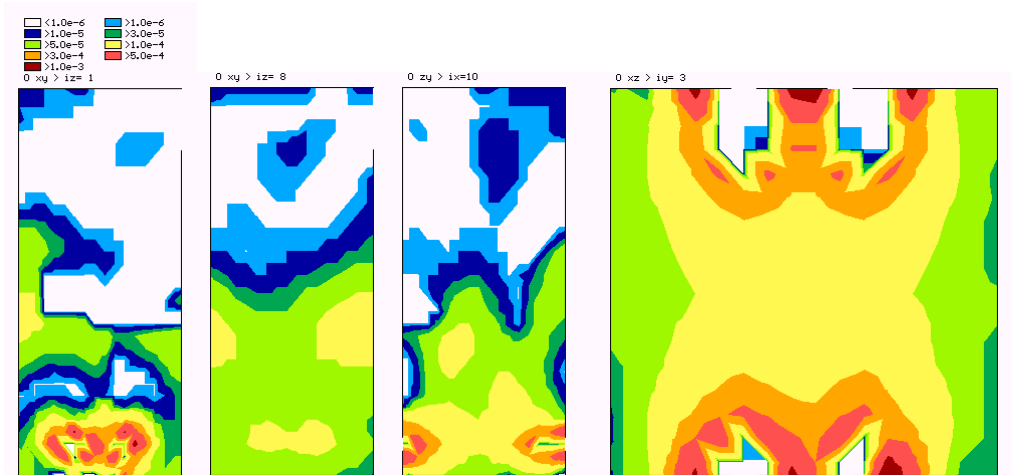
Na slikama 4.40 i 4.41 prikazana je distribucija ugljik (IV) oksida. Prikazane su dvije presječne ravnine u pogledu sa strane (sl. 4.40a-b), presjek u ravnini plamenika (sl. 4.40c) i izlazna ravnina (sl. 4.40d), obje u pogledu sprijeda, te dvije presječne ravnine u tlocrtu, u ravnini plamenika (sl. 4.41a) te iznad plamenika (sl. 4.41b).

Uočljivo je prema slikama 4.40a, 4.40c i 4.41a da CO_2 počinje nastajati tek kasnije u plamenu, tj. usporedbom sa slikama 4.39c i 4.39d moguće je zaključiti da počinje nastajati tek kada maseni udio ugljik (II) oksida dostigne maksimum, te da zatim nastavlja postepeni porast. Na slici 4.40c zamjetljiva je zona disocijacije u gornjem dijelu ložišta, ali se ovdje zamjećuje značajno slabije nego na slikama koje prikazuju distribuciju masenog udjela CO . Zona smanjenja masenog udjela u gornjem lijevom dijelu ložišta koja se može uočiti na slikama 4.40a-b nije međutim bilo moguće objasniti.



Slika 4.42. Distribucija kisika

- a) ravnina uz zid, pogled sa strane
- b) centralna ravnina, pogled sa strane
- c) ravnina plamenika, pogled sprijeda
- d) ravnina plamenika, tlocrt



Slika 4.43. Distribucija atomarnog kisika

- a) ravnina uz zid, pogled sa strane
- b) centralna ravnina, pogled sa strane
- c) ravnina plamenika, pogled sprijeda
- d) ravnina plamenika, tlocrt

Distribucija kisika prikazana je na slici 4.42. Dane su presječne ravnine odmah uz zid plamenika (sl. 4.42a) i na sredini (sl. 4.42b) u pogledu sa strane, ravnina plamenika u pogledu sprijeda (sl. 4.42c) i ravnina plamenika u tlocrtu (sl. 4.42d). Može se uočiti nagli pad masenog udjela molekularnog kisika već na samoj granici hladne zone plamenika na polovicu ulazne vrijednosti, te daljnji postepeni pad u području plamena. Jedan dio molekularnog kisika prelazi u atomarni, i to upravo na samoj granici hladne zone plamenika, što se dobro može uočiti na slikama 4.43a, 4.43c i 4.43d, na kojima je prikazana distribucija molekularnog kisika. Međutim kako je atomarni kisik vrlo kratkog vijeka, ostatak kisika vrlo brzo ulazi u interakciju s vodikom i postaje dio niza radikala, što će biti kasnije prikazano.