



ELEKTRANE 2010

Međunarodna konferencija

26-29. oktobar 2010. Vrnjačka Banja, Srbija

**MODELIRANJE I ANALIZA FORMIRANJA I DESTRUKCIJE NO_x U LOŽIŠTU
ENERGETSKOG KOTLA SA SAGOREVANJEM UGLJENOG PRAHA**

**MODELING AND ANALYSIS OF NO_x FORMATION AND DESTRUCTION
IN A PULVERIZED COAL-FIRED UTILITY BOILER FURNACE**

**Branislav Stanković, Srđan Belošević, Miroslav Sijerčić, Nenad Crnomarković,
Dragan Tucaković,
Slobodan Đekić**

**Institut za nuklearne nauke – VINČA, Laboratorija za termotehniku i energetiku
PO Box 522, 11001 Beograd, Srbija**

**Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd 35,
Srbija**

Elektroprivreda Srbije, Vojvode Stepe 412, 11000 Beograd, Srbija

UVOD

✓ Glavni cilj rada ⇒

razvoj matematičkog modela formiranja i destrukcije azotnih oksida u ložištu kotla sa sagorevanjem ugljenog praha i njegova primena kroz numeričke simulacije uticaja različite raspodele ugljenog praha po visini gorionika na emisiju NO_x iz ložišta kotla.

✓ Oksidi azota ⇒

koji imaju najveći uticaj na zagađenje životne okoline su azot-monoksid (NO), azot-dioksid (NO_2) i azot-suboksid (N_2O). NO i NO_2 se zajedno označavaju kao NO_x .

✓ Postupci za smanjenje emisije ⇒

azotnih oksida mogu se podeliti u dve grupe: primarni (modifikacije procesa sagorevanja u ložištu) i sekundarni (prečišćavanje dimnih gasova). Primarne mere predstavljaju najekonomičniju mogućnost.

✓ Preliminarna validacija modela ⇒

izvršena je poređenjem proračunatih vrednosti emisije azotnih oksida sa raspoloživim rezultatima periodičnih merenja emisije na predmetnom kotlu – TE Kostolac B.

MEHANIZAM PROCESA NASTAJANJA NO_x

✓ **Obrazovanje azotnih oksida** ⇒

značajan uticaj imaju: karakteristike goriva, konstruktivne karakteristike kotla i karakteristike procesa sagorevanja. Veoma složeni mehanizmi hemijskih reakcija.

✓ **Glavni oksid azota** ⇒

u ložištima na sprašeni ugalj je azot-monoksid (oko 90%); azot-dioksid (manje od 10%) i azot-suboksid (manje od 1%).

✓ **Tri osnovna mehanizma formiranja NO** ⇒

u procesu sagorevanja uglja dovode do nastanka sledećih “tipova” NO: termički NO, promptni NO i gorivi NO. Doprinos promptnog NO se može zanemariti.

✓ **Termički NO** ⇒

predstavlja 5-25% ukupne količine NO_x ; veoma je izražena zavisnost od temperature, postaje značajan za temperature u plamenu veće od 1650 K (često tek za > 1800 K).

✓ **Gorivi NO** ⇒

predstavlja 75-95% ukupne količine NO_x . Prvenstveno zavisi od sadržaja azota u gorivu, znatno manje od temperature, a više od odnosa goriva i vazduha. Azot iz goriva oslobađa se devolatilizacijom u formi HCN kao intermedijara, koji dalje reaguje u gasnoj fazi.

Podmodel formiranja i destrukcije NO_x-a

- Sveobuhvatno modeliranje procesa: detaljan CFD, pojednostavljena hemijska kinetika
- Sistem “postprocessing-a”: proračun NO_x se izvodi u već iskonvergiranim poljima
- **Termički NO**: pojednostavljen mehanizam Zeldovich-a za ukupnu brzinu formir./destr.

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1 \cdot [\text{O}] \cdot [\text{N}_2], \quad [\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] \quad k_1 = 1.8 \cdot 10^8 \cdot e^{-\frac{38370}{T}}, \quad [\text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

[O], [N₂], [NO] [mol/m³], [O] ≈ 0.5 · O₂ ⇌ O konstanta brzine reakcije

- **Gorivi NO**: brzina reakcije formiranja → $\frac{dX_{\text{NO}}}{dt} = 3.5 \cdot 10^{10} \cdot X_{\text{HCN}} \cdot X_{\text{O}_2}^\alpha \cdot e^{-\frac{33732.5}{T}}, \quad [\text{s}^{-1}]$

$$\alpha = 1, \quad X_{\text{O}_2} \leq 4.1 \cdot 10^{-3}$$

$$\alpha = -3.95 - 0.9 \cdot \ln X_{\text{O}_2}, \quad 4.1 \cdot 10^{-3} \leq X_{\text{O}_2} \leq 1.11 \cdot 10^{-2} \quad \alpha \text{ zavisi od lokalne koncentracije O}_2 \text{ prema de Soete-u}$$

$$\alpha = -0.35 - 0.1 \cdot \ln X_{\text{O}_2}, \quad 1.11 \cdot 10^{-2} \leq X_{\text{O}_2} \leq 0.03$$

$$\alpha = 0, \quad X_{\text{O}_2} \geq 0.03$$

$$X_{\text{HCN}}, X_{\text{O}_2}, X_{\text{NO}} \quad [\text{mol/mol}]$$

- **3.5** je korigovana vrednost koficijenta (prema Lockwood-u i Romo-Millares-u za uslove sa relativno niskom koncentracijom goriva koji preovlađuju kod ložišta sa sagorevanjem ugljenog praha) u odnosu na vrednost tog koficijenta kod De Soete-a.

- **Gorivi NO**: brzina reakcije destrukcije → $\frac{dX_{\text{NO}}}{dt} = -3.0 \cdot 10^{12} \cdot X_{\text{HCN}} \cdot X_{\text{NO}} \cdot e^{-\frac{30208.2}{T}}, \quad [\text{s}^{-1}]$

✓ Transportne jednačine za NO i HCN ⇒

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

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

- Y_{NO} [kg/kg], Y_{HCN} [kg/kg]
- S_{NO} → izvor NO-a dobija se prema ukupnoj neto brzini formiranja/destrukcije NO
- S_{HCN} → izvor HCN obuhvata kako izdvajanje HCN devolatilizacijom, tako i trošenje HCN u gasnoj fazi.

✓ Ukupna neto brzina formiranja/destrukcije NO ⇒

$$\overline{R}_{\text{NO}} = \left(R_{\text{NO}} - R_{\text{N}_2} - \overline{R}_{\text{char}} \right) M_{\text{NO}} + R_{\text{NO}_{\text{thermal}}} + R_{\text{NO}_{\text{prompt}}}$$

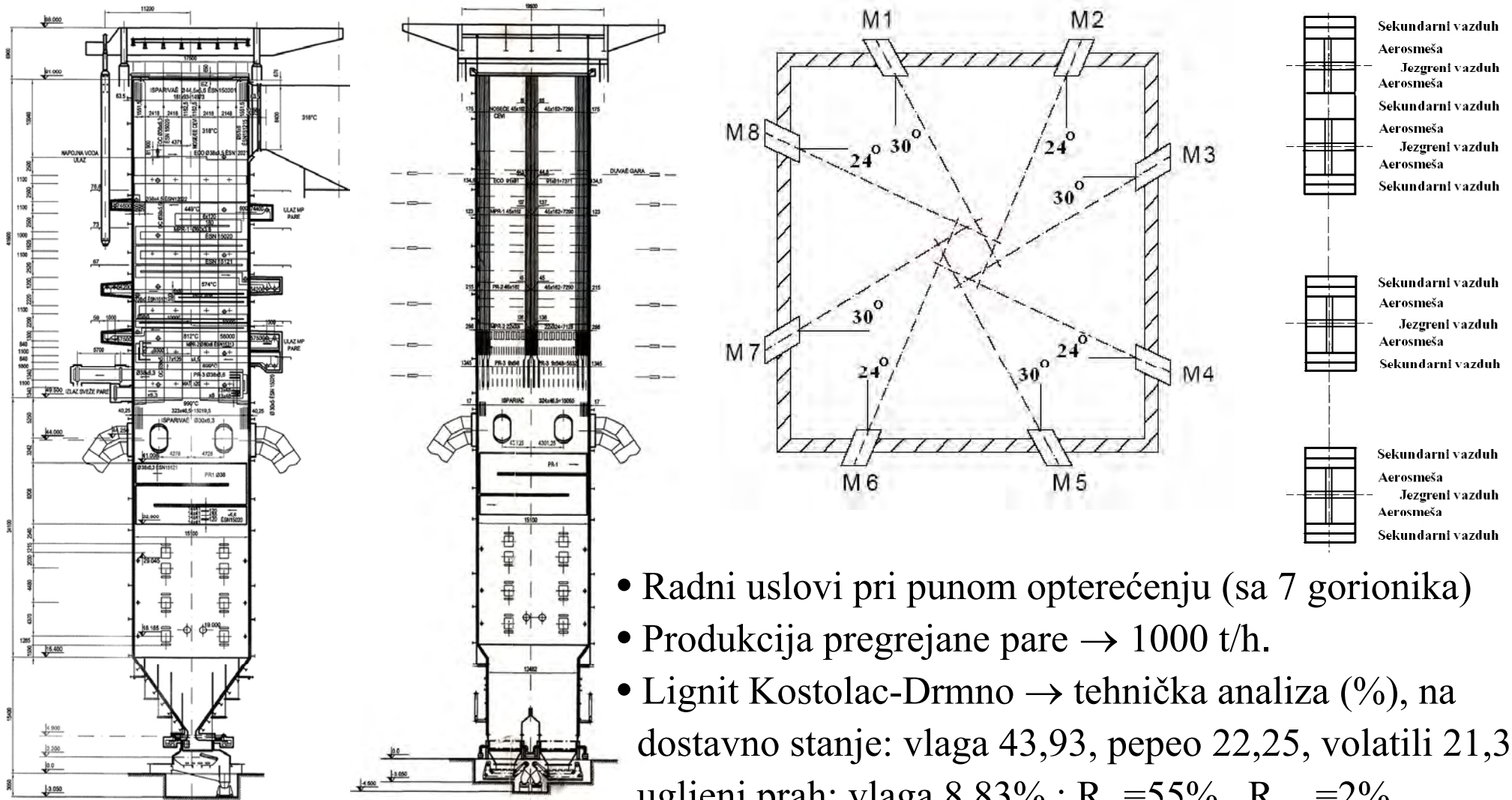
- Pretpostavljeno je da se uticaj promptnog NO i reakcije redukcije NO sa koksnim ostatkom mogu zanemariti.

3D MATEMATIČKI MODEL PROCESA U LOŽIŠTU

- ✓ Matematički model stvaranja i destrukcije NO_x inkorporiran je u ukupan prethodno razvijen i verifikovan 3D CFD diferencijalni matematički model dvofaznog gas-čestice turbulentnog strujanja sa sagorevanjem ugljenog praha, radijaciono-konvektivnom razmenom toplote i mase, sa Euler-Langrange-evim pristupom modeliranju dvofaznog toka.
- ✓ Testiran je uticaj gustine mreže na rezultate proračuna i procenjena je razlika u rezultatima dobijenim na mrežama različite gustine, što je ovde od posebnog značaja jer se razmatraju problemi u realnoj industrijskoj razmeri. Kao zadovoljavajući kompromis između numeričke tačnosti i proračunske efikasnosti, usvojena je mreža sa $130 \times 65 \times 65 = 549250$ kontrolnih zapremina.
- ✓ Što se tiče numeričkog praćenja čestica, posmatra se 200 trajektorija po etaži gorionika. Na osnovu sitovne analize, Rozin-Ramler raspodele i numeričkih eksperimenata u simulacijama test-slučajeva usvojen je reprezentativni prečnik čestice monodisperznog ugljenog praha: $d_p = 150 \mu\text{m}$.

PREDMETNO LOŽIŠTE I RADNI USLOVI

✓ Ložište kotla sa sagorevanjem ugljenog praha Kostolac-B 350 MW_e sa 8 tangencijalno postavljenih gorionika



✓ B1 blok → centrifugalni razdvajači (~ 70% ugljenog praha preko glavnih gorionika)

✓ B2 blok → inercijalni razdvajači (~ 80% ugljenog praha preko glavnih gorionika)

ANALIZA REZULTATA

✓ Poređenje ⇒

proračunatih vrednosti emisije azotnih oksida sa raspoloživim rezultatima periodičnih merenja emisije na predmetnom kotlu – TE Kostolac B (i graničnim vrednostima emisije).

Emisija NO _x iz ložišta prema rezultatima numeričkih simulacija [mg/Nm ³]			Emisija NO _x [mg/Nm ³]			
			TE Kostolac – rezultati periodičnih merenja emisije		*Granične vrednosti emisije (GVE)	
TEKO B-1		TEKO B-2	B-1	B-2	Sl. glasnik RS br. 30/97	Direktiva Evropske Unije 2001/80/EC
TS 1	TS 2	TS 4	1051	893	450	500 (**200)
1037	1148	931				

*Granične vrednosti emisije NO_x (mereno kao NO₂, referentni udeo 6% O₂ u suvim produktima sagorevanja, za čvrsta goriva i snagu kotla > 500 MW_{th})

**Važiće od 2016. god.

Numerički proračunate vrednosti srednje temperature na izlazu iz ložišta i emisije NO_x

Test-slučajevi	Raspodela ugljenog praha po gorionicima (%)				Udeo protoka otparaka kroz GG (%)	Udeo protoka sekundarno g vazduha kroz GG (%)	t _{izl} (°C)	Emisija NO _x iz ložišta [mg·Nm ⁻³]
	Glavni gorionici (GG)		Bridovi gorionici					
	donji	gornji	donji	gornji				
1	45.5	24.5	19.5	10.5	57.0	67.8	1021	1037
2	30.6	25.6	30.7	13.1	48.9	74.8	1096	1148
3	40	50	4.5	5.5	64.0	74.2	997	841
4	28	48	11	13	55.1	71.4	1047	931
5	27	43	13	17	51.3	71.4	1075	1118
6	26	38	15	21	47.8	71.4	1100	1244

Numerički rezultati za referentni test-slučaj 1

$t_{izl} = 1021 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gorionici bridovi

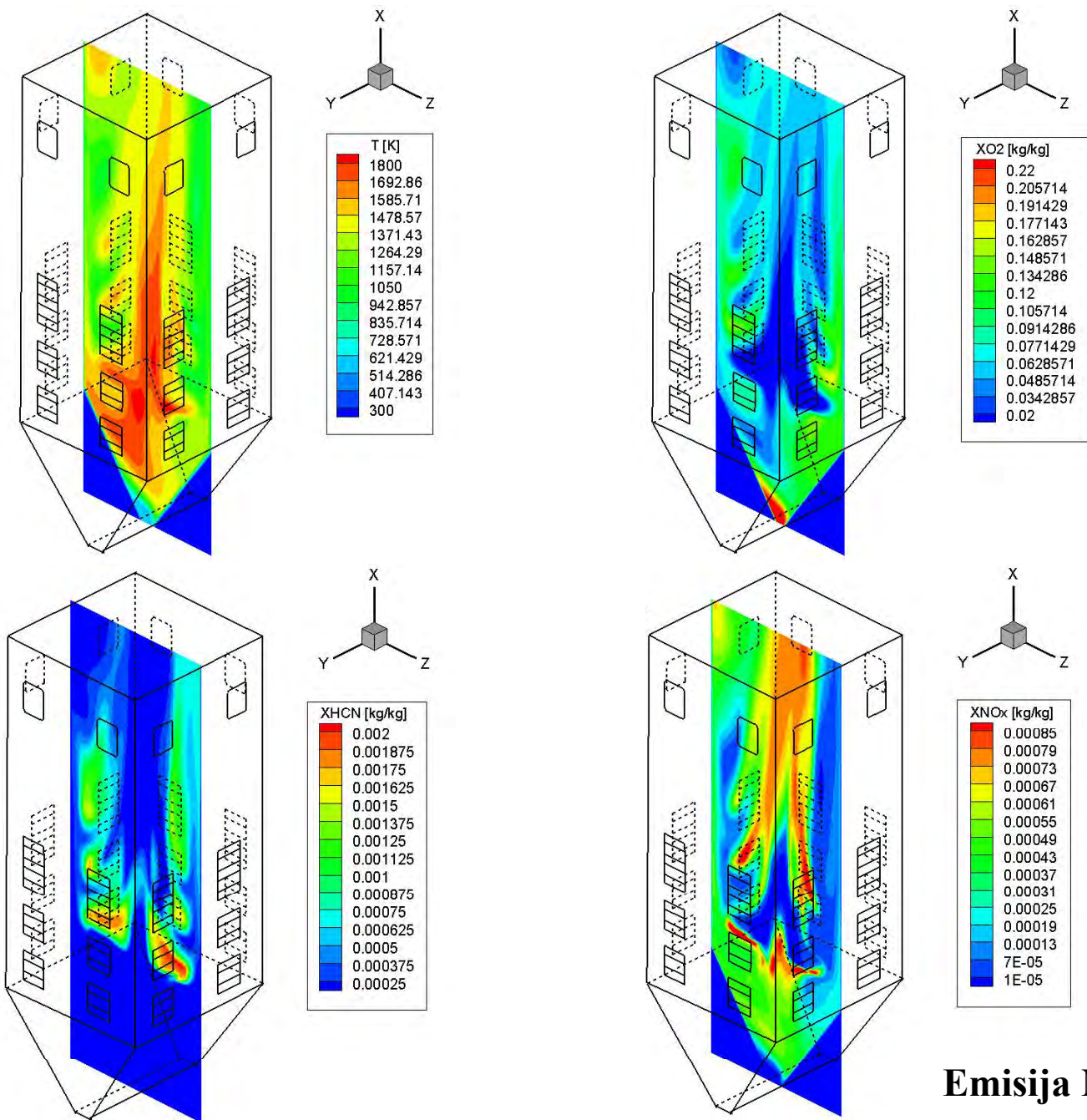
10.5 % →

19.5 % →

24.5 % →

45.5 % →

Glavni gorionici



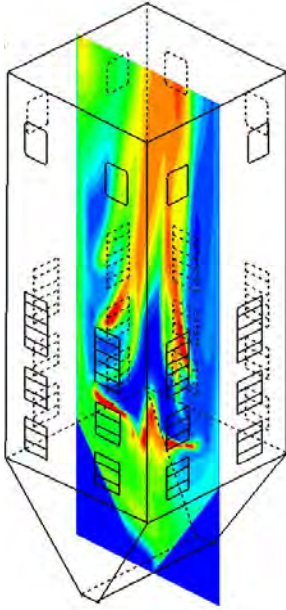
Emisija $\text{NO}_x = 1037 \text{ mg/Nm}^3$

Polja temperature gasova i masenih udela O_2 , HCN i NO_x u ložištu TEKO B

Numerička analiza uticaja raspodele ugljenog praha po gorionicima na emisiju

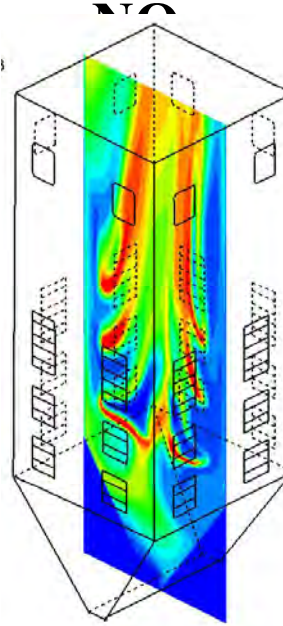
$t_{izl} = 1021 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gorionici
bridovi
10.5 % →
19.5 % →
24.5 % →
45.5 % →
Glavni
gorionici



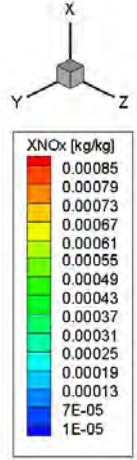
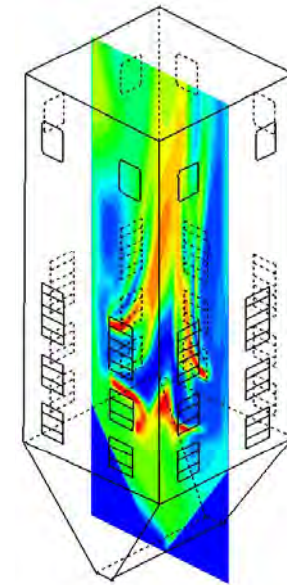
$t_{izl} = 1096 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gorionici
bridovi
13.1 % →
30.7 % →
25.6 % →
30.6 % →
Glavni
gorionici



$t_{izl} = 997 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gorionici
bridovi
5.5 % →
4.5 % →
50.0 % →
40.0 % →
**Glavni
gorionici**



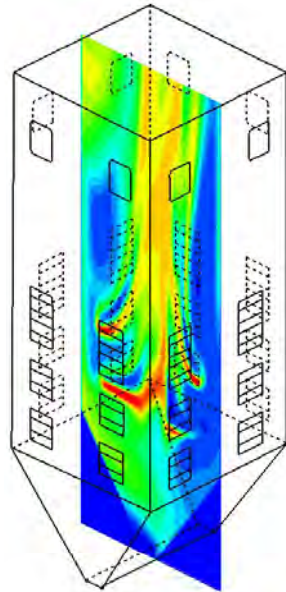
Emisija $\text{NO}_x = 1037 \text{ mg/Nm}^3$

Emisija $\text{NO}_x = 1148 \text{ mg/Nm}^3$

Emisija $\text{NO}_x = 841 \text{ mg/Nm}^3$

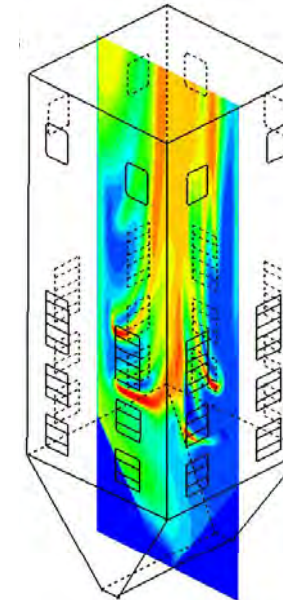
$t_{izl} = 1047 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gorionici
bridovi
13.0 % →
11.0 % →
48.0 % →
28.0 % →
Glavni
gorionici



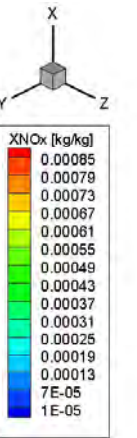
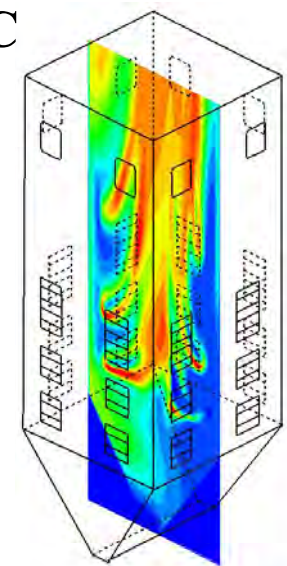
$t_{izl} = 1075 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gorionici
bridovi
17.0 % →
13.0 % →
43.0 % →
27.0 % →
Glavni
gorionici



$t_{izl} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Gorionici
bridovi
21.0 % →
15.0 % →
38.0 % →
26.0 % →
Glavni
gorionici



Emisija
 $\text{NO}_x = 931 \text{ mg/Nm}^3$

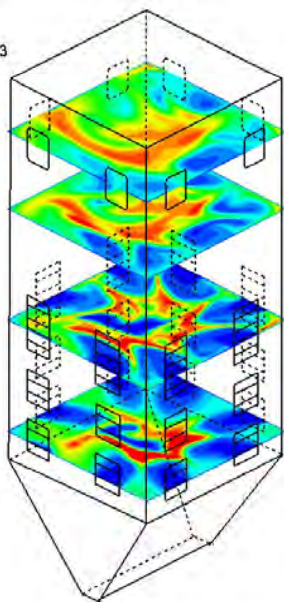
Emisija $\text{NO}_x = 1118 \text{ mg/Nm}^3$

Emisija
 $\text{NO}_x = 1244 \text{ mg/Nm}^3$

Polje masenog udela NO_x u ložištu (vertikalni presek)

Numerička analiza uticaja raspodele ugljenog praha po gorionicima na emisiju NO

$t_{izl} = 1021 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Gorionici

bridovi

10.5 % →

19.5 % →

24.5 % →

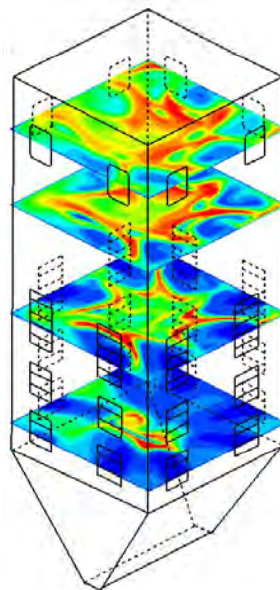
45.5 % →

Glavni

gorionici

Emisija NO_x=1037 mg/Nm³

$t_{izl} = 1096 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Gorionici

bridovi

13.1 % →

30.7 % →

25.6 % →

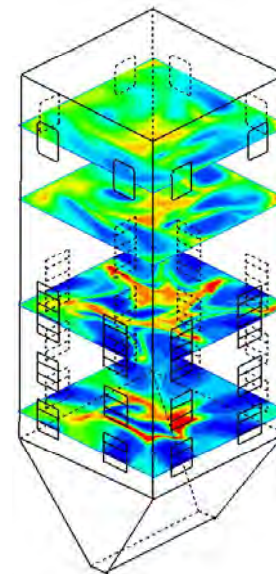
30.6 % →

Glavni

gorionici

Emisija NO_x=1148 mg/Nm³

$t_{izl} = 997 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Gorionici

bridovi

5.5 % →

4.5 % →

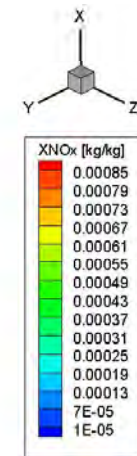
50.0 % →

40.0 % →

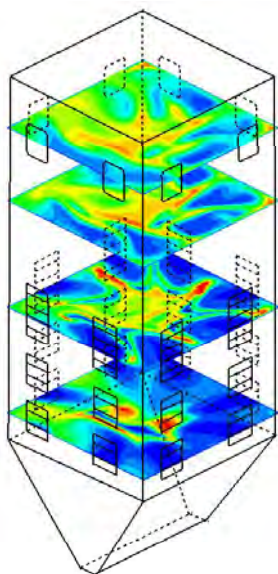
Glavni

gorionici

Emisija NO_x=841 mg/Nm³



$t_{izl} = 1047 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Gorionici

bridovi

13.0 % →

11.0 % →

48.0 % →

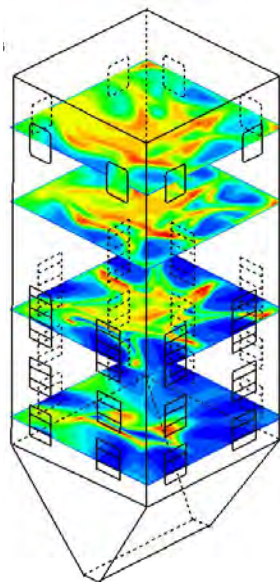
28.0 % →

Glavni

gorionici

**Emisija
NO_x=931 mg/Nm³**

$t_{izl} = 1075 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Gorionici

bridovi

17.0 % →

13.0 % →

43.0 % →

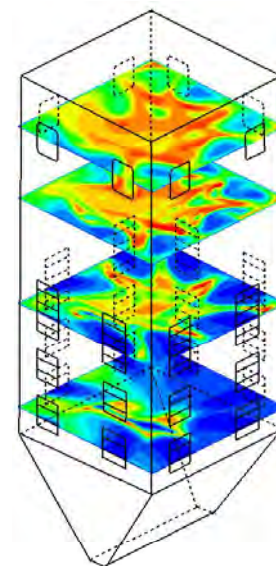
27.0 % →

Glavni

gorionici

Emisija NO_x=1118 mg/Nm³

$t_{izl} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Gorionici

bridovi

21.0 % →

15.0 % →

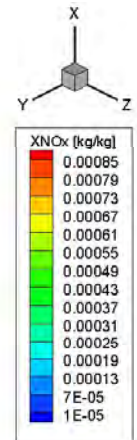
38.0 % →

26.0 % →

Glavni

gorionici

**Emisija
NO_x=1244 mg/Nm³**



Polje masenog udela NO_x u ložištu (horizontalni preseki)

ZAKLJUČAK

✓ **Izabran je pristup modeliranju** ⇒

koji zahteva zajedničko rešavanje kompleksnih transportnih jednačina CFD-a za turbulentni tok u kombinaciji sa pojednostavljenim mehanizmima učestvujućih hemijskih reakcija.

✓ **Podmodel NO_x** ⇒

inkorporiran je u ukupan model reaktivnog dvofaznog turbulentnog strujanja i odgovarajući numerički kod, kao post-procesor.

✓ **Numerička simulacija i analiza** ⇒

za nekoliko test-slučajeva, u okviru čega je ispitan uticaj različite raspodele ugljenog praha po visini gorionika na emisiju NO_x iz ložišta predmetnih kotlova.

✓ **Niža koncentracija NO_x u razmatranim slučajevima** ⇒

dobijena je u slučajevima većeg udela ugljenog praha kroz glavne gorionike.

✓ **32%** ⇒ razlika najniže emisije postignute numeričkom optimizacijom i najviše, **samo primenom pogodne organizacije sagorevanja** u ložištu bez konstruktivnih izmena.

ZAKLJUČAK

✓ **Smanjenje emisije NO_x \Rightarrow**

može se postići odgovarajućom kontrolom lokalnog koeficijenta viška vazduha u zoni gorionika.

✓ **Procesi formiranja i destrukcije NO_x \Rightarrow**

su veoma kompleksni; njihovo modeliranje je težak zadatak i za svaki konkretan slučaj potrebno je izvesti numeričke simulacije posebno.

✓ **Modeliranje \Rightarrow**

predstavlja koristan način proučavanja koji pruža bolji uvid u suštinu problema i omogućava potpunije razumevanje procesa.

✓ **Modeli za predviđanje emisije NO_x \Rightarrow**

mogu se koristiti za ispitivanje i optimizaciju radnih i projektnih parametara i istraživanje različitih tehničkih rešenja, postupaka i mera sa ciljem smanjenja emisije azotnih oksida u realnim sistemima za sagorevanje.

✓ **Ovakva analiza \Rightarrow**

omogućava optimizaciju pogonskih uslova u ložištu istovremeno sa stanovišta smanjenja emisije i povećanja energetske efikasnosti.