

Numerička simulacija strujanja unutar korenog dela industrijskog dimnjaka sa više dimovodnih kanala

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW INSIDE THE ROOT SECTION OF INDUSTRIAL CHIMNEY WITH MULTIPLE INFLOW FLUE DUCTS

Rezime:

Pregrade unutar korenog dela čeličnih industrijskih dimnjaka sprečavaju međusobni uticaj struja dimnih gasova iz naspramno postavljenih dimovodnih kanala. U slučaju nesimetričnosti masenih protoka i različitih temperatura gasova, kao i neadekvatnog izbora dimenzija pregrade, može doći kako do povećanja lokalnih gubitaka strujanja tako i do neravnomerne raspodele termičkih opterećenja plašta dimnjaka. Nesimetrična raspodela napona po obimu plašta dimnjaka nepovoljno utiče na ponašanje konstrukcije u toku eksploatacije, te može rezultovati pojavom oštećenja i ugroziti integritet konstrukcije. Pri postavljanju pregrade potrebno je razmotriti njen uticaj na strujanje u dimnjaku, njegovu funkcionalnost i efikasnost rada imajući u vidu različite radne režime celokupnog sistema. U radu su prikazani rezultati izvedenih CFD analiza strujanja unutar korenog dela dimnjaka sa više dimovodnih kanala. Izvršeno je poređenje rezultata numeričkih simulacija strujanja sa i bez pregrade. Takođe je izvršena analiza uticaja pregrade na ravnomernost raspodele termičkih opterećenja korenog dela dimnjaka.

KLjučne reči: industrijski dimnjaci, numerička simulacija strujanja fluida, CFD

Abstract:

Barrier within a root section of steel industrial chimney prevent mutual influence of flue gas currents from the opposite flue ducts. Asymmetric mass flow and different temperatures in gas inflows, as well as the inadequate choice of barrier dimensions, can increase the local flow losses and to result in uneven thermal loads distribution of chimney walls. Asymmetric distribution of stresses in chimney walls adversely affect the construction, and may result in the appearance of damage and to endanger integrity of the structure. When setting up barrier it is necessary to consider its impact on the flow in the chimney, its functionality and efficiency by taking into account different operating modes of the entire system. Results of the CFD flow analysis inside the root section of chimney with multiple inflow flue ducts are presented. Comparison of the results with and without barrier are presented. Barrier influence on thermal stress distribution in root section of the chimney was analyzed.

Keywords: industrial chimneys, numerical simulation of fluid flow, CFD

1. UVOD

Industrijski čelični dimnjaci mogu imati više otvora u korenom delu za prihvatanje dimnih gasova. Pored uštede koja se ostvaruje izgradnjom jednog dimnjaka, ovaj tip rešenja dovoda dimnih gasova do dimnjaka najčešće je posledica tehničko-tehnoloških ograničenja (prostorni raspored uređaja koji generišu dimne gasove, gabariti i trase dimovodnih kanala do dimnjaka, brzine i padovi pritisaka u kanalima, raspoloživi prostor za izgradnju dimnjaka, uslovi bezbednosti i zaštite životne sredine i dr.).

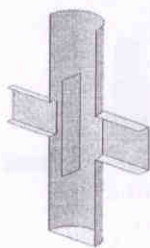
Industrijski dimnjaci su namenjeni dugogodišnjoj eksploataciji, te eksploatacioni uslovi mogu značajno odstupati od projektom predviđenih [1]. Takođe, u praksi je čest slučaj proširivanja proizvodnih kapaciteta postrojenja priključenog na dimnjak i povećanje masenog protoka dimnih gasova kroz dimnjak.

U radu je razmatran slučaj strujanja kroz koreni deo dimnjaka sa dva naspramno postavljena dimovodna kanala čiji su priključci na približno istoj visini. Maseni protoci i temperature dimnih gasova iz naspramnih kanala su različiti. Ovakvo tehničko rešenje predstavlja nepovoljan slučaj kako u pogledu strujno-termičkih karakteristika tako i spregnutih napreznja konstrukcije čeličnog dimnjaka usled značajno promenjenih geometrijskih karakteristika odgovarajućih poprečnih preseka dimnjaka [2]. Nepovoljan međusobni uticaj struja dimnih gasova na ulazu u dimnjak redukuje se ugradnjom unutrašnje pregrade (slike 1 i 2). U slučaju velike razlike temperatura dimnih gasova u kanalima ugrađivanjem pregrade dolazi do

neravnomernog termičkog opterećenja korena dimnjaka koje za posledicu ima pojavu dodatnih napona konstrukcije, što je posebno izraženo kod dimnjaka koji su dodatno vezani čeličnim užadima.

Imajući u vidu složenost strujanja koje je predmet analize, kao i inženjersku praksu u rešavanju sličnih problema u fazi projektovanja, izvođenja, eksploataciji i održavanju dimnjaka, dostupna literatura o opisanim problemima je oskudna. Ipak, postoji veliki broj naučnih i stručnih radova koji se bave eksperimentalnom i teorijskom analizom strujnih procesa u cevovodima, računama i ventilima pri strujanju fluida različitih karakteristika i temperatura [3-6].

U radu je prikazano poredenje rezultata numeričkih simulacija strujanja dimnih gasova unutar korenog dela dimnjaka sa i bez pregrade, za slučaj naspramno postavljenih dimovodnih kanala koji u dimnjak dovode dimne gasove bitno različitih protoka i temperatura. Nakon uvodnih razmatranja i opisa problema koji je numerički modeliran, u odeljku „Numerički model“ opisani su postavljeni model strujanja i korišćeni granični uslovi. U poglavlju „Prikaz rezultata“ dati su kvalitativni i kvantitativni pokazatelji strujanja unutar korenog dela dimnjaka sa i bez pregrade koja razdvaja naspramne struje dimnih gasova, nakon čega sledi kratak zaključak.



Slika 1. Izometrijski prikaz korenog dela dimnjaka sa unutrašnjom pregradom



Slika 2. Unutrašnja pregrada u korenu dimnjaka



Slika 3. Poprečni presek korenog dela dimnjaka sa mestima priljučaka dimovodnih kanala i položajem unutrašnje pregrade

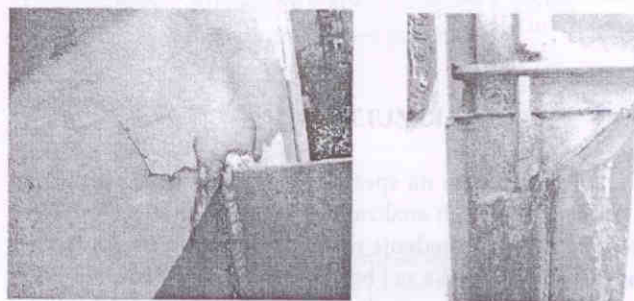
2. OPIS PROBLEMA

Na cilindrični plašt dimnjaka visine 53000 mm, prečnika 1400 mm priključena su dva dimovodna kanala pravougaonog poprečnog preseka različitih dimenzija, K1 i K2. Pravougaoni poprečni presek kanala K1 je dimenzija 1800 x 700 mm, a kanala K2 1400 x 400 mm. Otvori na dimnjaku za dimovodne kanale naspramno su postavljeni i nalaze se na približno istoj visini. U dimnjaku je na odgovarajućoj visini postavljena pregrada koja umanjuje međusobni uticaj struja dimnih gasova iz naspramno postavljenih dimovodnih kanala. Pregrada je postavljena bliže priključku kanala K2, slika 3.

Izvršen je proračun strujanja kroz koreni deo dimnjaka za različite parametre strujanja u dimovodnim kanalima K1 i K2, prema tabeli 1. Imajući u vidu dugotrajni radni vek industrijskih dimnjaka i moguće izmene na postrojenjima javlja se potreba za razmatranjem radnih režima koji nisu predviđeni prvobitnim projektom dimnjaka. Maseni protoci i temperature dimnih gasova iz kanala koji su priključeni na dimnjak mogu se značajno razlikovati, što može imati uticaja na funkcionalnost dimnjaka i efikasnost rada, kao i na integritet konstrukcije. Usled neravnomernih i promenljivih termičkih i drugih opterećenja pri analizi mogućnosti povećanja kapaciteta dimnjaka treba uzeti u obzir oba kriterijuma. Parametre je u praksi moguće ostvariti pri čemu dolazi do naprezanja korenog dela dimnjaka koji projektom nisu predviđeni, te i do moguće pojave oštećenja prikazanih na slikama 4a i 4b. Strujanje u korenom delu dimnjaka ana-

Tabela 1. Analizirani radni režimi

Radni režim	Parametri strujanja	Kanal 1	Kanal 2
1	Maseni protok[kg/s]	9.8	5.9
	Temperatura[°C]	300	500
2	Maseni protok[kg/s]	7.85	7.85
	Temperatura[°C]	300	500
3	Maseni protok[kg/s]	5.9	9.8
	Temperatura[°C]	300	500



Slika 4. Oštećenja strukture korenog dela dimnjaka

3. NUMERIČKI MODEL

U tabeli 2 prikazan je sastav produkata sagorjevanja koji se odvođe dimnjakom u atmosferu, prema kome su modelirane karakteristike smeše gasova [7.]. Gustina, specifični toplotni kapacitet i dinamička viskoznost mešavine su u simulaciji određivani linearnom interpolacijom koristeći podatke o prethodno određenim karakteristikama na temperaturama između 50° C i 600° C sa korakom od 50 °C [8].

Tabela 2. Sastav produkata sagorevanja

Komponenta	Molski udeo y [%]
CO ₂	13.3
O ₂	4.17
SO ₂	0.14
H ₂ O	11.03
N ₂	71.36

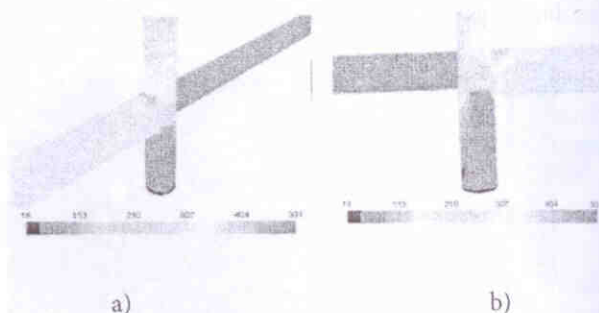
Numerička simulacija strujanja izvršena je u softverskom paketu ANSYS Fluent v12 primenom metode konačnih zapremine. Za definisanu smešu dimnih gasova rešavane su Reynoldsove jednačine i jednačina energije na nestrukturiranoj proračunskoj mreži diskretizovanog fluidnog domena koja je imala 4 miliona elemenata oblika tetraedra. Sve pomenute jednačine su osrednjene u vremenu. Proračunska mreža u blizini zidova sastojala se od prizmi. Veličina elemenata u pravcu normalnom na zidove izabrana je tako da je bezdimenziona udaljenost od zida $y^+ < 5$ u celom proračunskom domenu. Sistem jednačina zatvoren je reliazable K- ϵ turbulentnim modelom [9]. Granični sloj modeliran je poboljšanim zidnim funkcijama [10]. Na granicama domena obezbeđena je ravnomernost pritisa i brzina [11]. Konvektivni članovi transportnih jednačina aproksimirani su uzvodnom šemom drugog reda (2nd order upwind). Za određivanje polja pritisa i vektora brzina korišćen je SIMPLE algoritam.

Dimnjak je modeliran do 32 m visine, dok su granice dimovodnih kanala postavljene 15 m od priključaka na dimnjak. Na ulazima u dimovodne kanale zadati su maseni protoci i temperature dimnih gasova, dok je na izlazu iz dimnjaka zadat podpritisak koji predstavlja uticaj dela dimnjaka koji nije modeliran. Brzina na zidovima dimnjaka i dimovodnih kanala jednaka je nuli. Zidovi kanala su izolovani, dok zid dimnjaka razmenjuje toplotu sa okolinom čija temperatura je 0 °C.

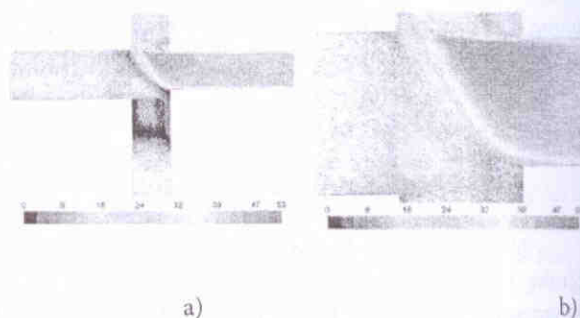
4. PRIKAZ REZULTATA

S obzirom na specifičnosti razmatranog problema i nedostatak sličnih analiza, prikazani rezultati su korišćeni za međusobno poređenje različitih slučajeva strujanja kroz koreni deo dimnjaka sa i bez unutrašnje pregrade. Na slikama 5-12 prikazana su polja temperatura i vektora brzina u karakterističnim presecima i na zidovima dimnjaka. Ekstremno velika razlika u temperaturi ulaznih gasova ilustrovana je na svim slikama. Proces mešanja fluidnih struja bolji je za slučajeve strujanja u korenom delu dimnjaka bez unutrašnje pregrade, što ima povoljan uticaj na ravnomernost raspodele termičkih opterećenja u zoni dimnjaka iznad dimovodnih kanala. Ipak, može se uočiti da su vrtložnja u zoni interakcije naspramnih struja fluida u korenom delu dimnjaka u tom slučaju (slike 6 i 8) znatno većeg intenziteta u odnosu na slučaj strujanja sa postavljenom pregradom (slika 10). U slučaju kada je maseni protok kroz kanal 1 5.8kg/s, a kroz kanal 2 9.89 kg/s (radni režim 3) može se primetiti oblast vrtložnog strujanja sa izuzetno niskim brzinama koja predstavlja fluidnu barijeru između

dve naspramne struje dimnih gasova. U ovom slučaju postoji opasnost od zagušenja kanala 1 (slika 6), te je uvođenje unutrašnje pregrade opravdano. S druge strane, uvođenjem unutrašnje pregrade ostvaren je negativan uticaj na ravnomernost termičkih opterećenja koja deluju na plašt dimnjaka (slike 9 i 11). Posebno osetljive zone predstavljaju zavarane ivice priključaka dimovodnih kanala i oblast dimnjaka koja odgovara poziciji zavarivanja unutrašnje pregrade. Na ovim mestima temperaturni gradijenti su izuzetno visoki i utiču na povećano opterećenje konstrukcije.



Slika 5. Temperature korenog dela dimnjaka, radni režim 3, strujanje bez pregrade



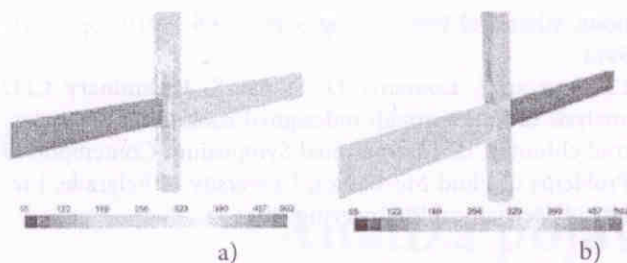
Slika 6. Vektori brzina u korenom delu dimnjaka, radni režim 3, strujanje bez pregrade



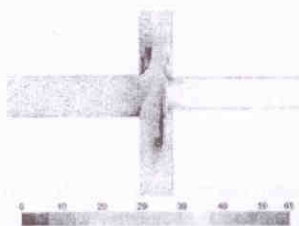
Slika 7. Temperature fluida presek korenog dela dimnjaka, radni režim 3, strujanje bez pregrade



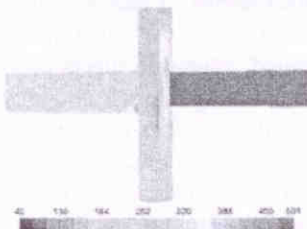
Slika 8. Vektori brzina u korenom delu dimnjaka, radni režim 2, strujanje bez pregrade



Slika 9. Temperature korenog dela dimnjaka, radni režim 3, strujanje sa pregradom



Slika 10. Vektori brzina u korenom delu dimnjaka, radni režim 3, strujanje sa pregradom

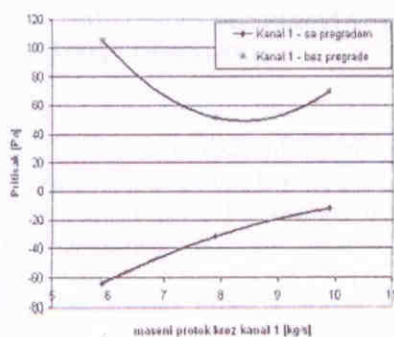


Slika 11. Temperature korenog dela dimnjaka, radni režim 1, strujanje sa pregradom

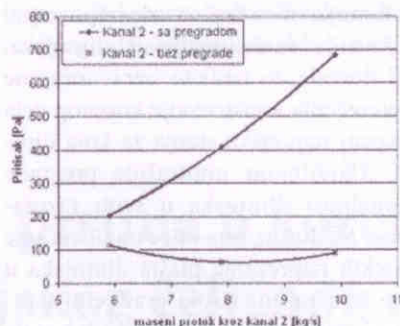


Slika 12. Vektori brzina u korenom delu dimnjaka, radni režim 1, strujanje sa pregradom

Na slikama 14 i 15 prikazane su zavisnosti statičkih pritisaka na ulazima u proračunski domen sa strane dimovodnih kanala 1 i 2 od zadatih masenih protoka. Date su vrednosti za tri razmatrana radna režima u slučaju strujanja sa i bez unutrašnje pregrade u korenom delu dimnjaka.



Slika 14. Zavisnost statičkog pritiska od masenog protoka - ulaz u dimovodni kanal K1



Slika 15. Zavisnost statičkog pritiska od masenog protoka - ulaz u dimovodni kanal K2

Ukupni koeficijenti otpora za deonice od ulaza u dimovodne kanale do izlaza iz modeliranog dela dimnjaka K1 i K2 za analizirane radne režime i slučajeve strujanja sa i bez unutrašnje pregrade prikazani su u tabelama 3 i 4. Koeficijenti otpora obuhvataju lokalne gubitke i gubitke na trenje u datim deonicama i računati su prema sledećim izrazima:

$$K_2 = \frac{P_{o,2} - P_{o,izl}}{0.5 \cdot \rho_{izl} \cdot v_{izl}^2}$$

$$K_2 = \frac{P_{o,2} - P_{o,izl}}{0.5 \cdot \rho_{izl} \cdot v_{izl}^2}$$

gde su $p_{o,1}$ i $p_{o,2}$ totalni pritisci na ulazima u kanale 1 i 2, $p_{o,izl}$ totalni pritisak na izlazu iz modeliranog dela dimnjaka, ρ_{izl} - gustina dimnih gasova na izlazu, v_{izl} - brzina strujanja dimnih gasova na izlazu iz modeliranog dela dimnjaka.

Tabela 3. Koeficijenti otpora za slučaj korenog dela dimnjaka bez pregrade

Radni režim	K_1	K_2
1	1.83	3.07
2	1.43	3.47
3	1.74	4.86

Tabela 4. Koeficijenti otpora za slučaj korenog dela dimnjaka sa pregradom

Radni režim	K_1	K_2
1	1.04	4.19
2	0.58	7.19
3	0.05	10.96

5. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati analize strujanja u korenom delu dimnjaka sa dva naspramno postavljena dimovodna kanala. Geometrija dimovodnih kanala je različita, kao i maseni protoci i temperature gasova koji se kroz njih dovode do dimnjaka. Razmatrani slučajevi strujanja spadaju u radne režime koji značajno odstupaju od uobičajenih

parametara strujanja u dimnjacima i koji su vrlo nepovoljni. Pored mogućeg narušavanja funkcionalnosti dimnjaka, pomenuti radni režimi dovode do izrazito neravnomerne raspodele termičkih opterećenja konstrukcije korenog dela dimnjaka, te mogu izazvati naponska stanja za koja dimnjak nije projektovan. Ugradnjom unutrašnje pregrade obezbeđuje se funkcionalnost dimnjaka u svim razmatranim radnim režimima. Međutim, ona utiče na povećanje neravnomernosti termičkih naprežanja plašta dimnjaka u korenom delu. Posebno su izraženi visoki gradijenti temperaturnog polja u zonama priključaka dimnovodnih kanala i oslanjanja pregrade na zidove dimnjaka. Radni parametri koji su korišćeni u analizi rezultuju radnim režimima koje je potrebno izbegavati u eksploataciji dimnjaka prikazane konstrukcije korenog dela. Za dužu eksploataciju dimnjaka u pomenutim radnim režimima sa izuzetno visokim temperaturama gasova potrebno je izvršiti odgovarajuće rekonstrukcije korenog dela dimnjaka koje bi istovremeno obezbedile funkcionalnost dimnjaka i integritet konstrukcije [12].

Napomena:

Prikazani rezultati u radu su ostvareni u okviru istraživanja TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu i nauku Republike Srbije.

6. LITERATURA

1. Popović O, Bogner M, Simonović A, Stupar S. O dimnjacima, Beograd, ETA, 2011
2. Simonović A, Stupar S, Peković O. Stress Distribution as a Cause of Industrial Steel Chimney Root Section Failure. FME Transactions 36 (2008), 119-125
3. Naeimi H. et al. A Parametric Design of Compact Exhaust Manifold Junction in Heavy Duty Diesel Engine Using Computational Fluid Dynamics Codes. Thermal Science 15 (4) (2011), pp. 1023-1033
4. Frank T. Et al. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junction using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFD. Nuclear Engineering and Design 240 (9) (2010), pp. 2313-2328
5. Fukushima N et al. Numerical and experimental study on turbulent thermal mixing in a T-junction flow. The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, 2003
6. Aulery F. et al. Numerical simulations of sodium mixing in a T-junction, Applied Thermal Engineering 37 (2012) pp. 38-43
7. R.H. Perry, D. Green. Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, New York, 1997
8. Stupar S. et al. Izveštaj o stanju jednoplašnog dimnjaka TO Zemun Ø 1400 x 53000 mm, Mašinski fakultet, Beograd, 2005
9. Shih T-H et al. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. Computer Fluids 24 (3) (1995), pp. 227- 238.
10. ANSYS Inc. ANSYS Fluent v12 Theory Guide, 2009
11. Naik-Nimbalkar V.S. et. al. Thermal mixing in T-junc-

tions. Chemical Engineering Science 65 (2010) pp. 5901-5911

12. Svorcan J, Komarov D, Stupar S. Preliminary CFD analysis of flow through redesigned root section of industrial chimney. III International Symposium Contemporary Problems of Fluid Mechanics, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, 2011