

Fakultet TEHNOLOŠKO-METALURŠKI
FAKULTET
35/104
(Broj zahteva)
24.06.2010.
(datum)

Obrazac 2
UNIVERZITET U BEOGRADU
VEĆE NAUČNIH OBLASTI TEHNIČKIH
NAUKA
(naziv veća naučne oblasti kome se zahtev upućuje)

Beograd
Studentski trg br. 1

ZAHTEV
za davanje saglasnosti na referat o urađenoj doktorskoj disertaciji

Molimo da, shodno članu 46. st.5 Statuta Univerziteta u Beogradu ("Glasnik Univerziteta" broj 131/06), date saglasnost na referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Mr MIRKO (Zoran) STIJEPOVIĆ
(ime, ime jednog od roditelja i prezime)

KANDIDAT: Mr MIRKO (Zoran) STIJEPOVIĆ prijavio je doktorsku disertaciju pod nazivom:
(ime, ime jednog od roditelja i prezime)

„MODELOVANJE I ENERGETSKA OPTIMIZACIJA PROCESA
KATALITIČKOG REFORMINGA BENZINA“

Iz naučne oblasti: **HEMIJA I HEMIJSKA TEHNOLOGIJA**

Univerzitet je dana 03.07.2009. svojim aktom pod br. 612-25/79/09 dao saglasnost na predlog teme doktorske disertacije koja je glasila

„MODELOVANJE I ENERGETSKA OPTIMIZACIJA PROCESA
KATALITIČKOG REFORMINGA BENZINA“

Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata: Mr MIRKO (Zoran) STIJEPOVIĆ
(ime, ime jednog od roditelja i prezime)
obrazovana je na sednici održanoj 25.03.2010. odlukom fakulteta pod br. 35/50 u sastavu:

Ime i prezime člana komisije	Zvanje	Naučna oblast
1. Dr Mirjana Kijevčanin	Vanredni profesor	Hemijsko inženjerstvo
2. Dr Slobodan Šerbanović	Redovni profesor	Hemijsko inženjerstvo
3. Dr Aleksandar Orlović	Vanredni profesor	Hemijsko inženjerstvo
4. Dr Dušan Grozdanić	Redovni profesor	Hemijsko inženjerstvo
5. Dr Nikola Klem	Redovni profesor	Primena računara u građevinarstvu i geodeziji

Nastavno-naučno veće fakulteta prihvatilo je izveštaj Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije na sednici održanoj dana 20.05.2010.

DEKAN FAKULTETA

Prof. dr Ivanka Popović

Prilog:

1. Izeštaj Komisije sa predlogom.
2. Akt Nastavno-naučnog veća Fakulteta o usvajanju izveštaja.
3. Primedbe date u toku stavljanja izveštaja na uvid javnosti, ukoliko je takvih primedbi bili

DIV

Na osnovu čl. 128. Zakona o visokom obrazovanju i čl. 122. Statuta TMF-a, na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta od 20.05.2010. godine, doneta je

O D L U K A

o prihvatanju Izveštaja o oceni doktorske disertacije

Prihvata se Izveštaj Komisije za ocenu **doktorske disertacije** **Mr MIRKA STIJEPOVIĆA, dipl. inž.**, pod nazivom: „**MODELOVANJE I ENERGETSKA OPTIMIZACIJA PROCESA KATALITIČKOG REFORMINGA BENZINA**“.

Izveštaj o oceni doktorske disertacije dostavlja se na uvid javnosti, a po isteku roka od 30 dana na saglasnost odgovarajućem Veću naučnih oblasti Univerziteta.

Odluka se dostavlja: Univerzitetu, doktorantu, Službi za nastavno-studentske poslove, Biblioteci i arhivi fakulteta.

D E K A N

Prof. dr Ivanka Popović

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
U BEOGRADU

Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu održanoj 26.03.2010. godine određeni smo za članove komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije mr Mirka Z. Stijepovića, dipl. ing. tehnologije pod nazivom:

Modelovanje i energetska optimizacija procesa katalitičkog reforminga benzina

Komisija je pregledala dostavljenu disertaciju i Nastavno-naučnom veću podnosi sledeći

IZVEŠTAJ

A. Prikaz disertacije

Doktorska disertacija mr Mirka Z. Stijepovića, dipl. ing. tehnologije pod nazivom "**Modelovanje i energetska optimizacija procesa katalitičkog reforminga benzina**" napisana je na 149 strana, sadrži 36 tabela, 60 slika i 106 literaturnih navoda. Doktorska disertacija sadrži sledeća poglavlja: *Uvod, Proces katalitičkog reforminga benzina, Modelovanje procesa katalitičkog reforminga benzina, Razvoj metode za optimizaciju kontinualno-regenerativnog procesa katalitičkog reforminga benzina, Zaključak i Literatura.*

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je razvoj matematičkog modela za proces katalitičkog reforminga, jednog od primarnih procesa u preradi nafte, kao i metode za njegovu energetska optimizaciju. S obzirom da reaktorski sistem zauzima centralno mesto u procesu katalitičkog reforminga benzina, u okviru priložene disertacije razvijen je kinetički model za proces katalitičkog reforminga benzina. Takođe, razvijena je metoda za određivanje optimalnih parametara procesa katalitičkog reforminga benzina.

U uvodnom delu istaknuti su osnovni ciljevi disertacije, s naglaskom da je za usaglašavanje energetskih, ekonomskih i ekoloških zahteva procesa katalitičkog reforminga, neophodno povećati i efikasnost procesa. Naglašena je i savremena tendencija ka uspostavljanju i primeni matematičkih modela u povećanju efikasnosti i boljem upravljanju hemijskim procesima.

U okviru poglavlja *Proces katalitičkog reforminga benzina* date su osnovne karakteristike procesa, neophodne za dalju analizu, kao što su: kinetika procesa, termodinamičke karakteristike procesa, osobine katalizatora, uticaj parametara procesa na ponašanje sistema, različite vrste tehnologija, odnosno različite konfiguracije procesa, kao i karakteristike proizvoda. Takođe, data je i tehno-ekonomska analiza razmatranog procesa.

U okviru poglavlja *Modelovanje procesa katalitičkog reforminga benzina* opisan je razvoj novog modela procesa katalitičkog reforminga. Posebna pažnja posvećena je uspostavljanju termodinamičkog, kao i razvoju kinetičkog modela procesa. Izbor termodinamičkih modela korišćenih u ovom radu je izvršen na osnovu rezultata dobijenih preko nekoliko različitih termodinamičkih modela koji se koriste pri simulaciji procesa naftne

industrije. Simulacija procesa izvedena je korišćenjem uspostavljenih termodinamičkih modela, pomoću različitih simulacionih paketa (Aspen Plus, Matlab, Prosim Simulis Thermodynamics). Razvoj kinetičkog modela podeljen je u tri faze: definisanje problema, primena numeričkih postupaka i verifikacija i validacija uspostavljenog modela. U okviru prve faze, definisanja problema, opisan je način definisanja pseudo-komponentata, formulisanje kinetike modela, zatim uspostavljanje modela reaktora, kao i procedura neophodna za planiranje i izvođenje industrijskog eksperimenta. U drugoj fazi, primeni numeričkih postupaka, prikazan je način definisanja modela, kao i numeričkih procedura za određivanje nepoznatih parametara modela. Treća faza, verifikacija i validacija modela, ocenjuje pouzdanost razvijenog modela upotrebom različitih metoda, kao što su statistička analiza dobijenih parametara, upoređivanje eksperimentalnih podataka sa vrednostima dobijenim simulacijom uz korišćenje uspostavljenog modela, procenom osetljivosti modela na promene radnih uslova, itd.

Poglavlje *Razvoj metode za optimizaciju kontinualno-regenerativnog procesa katalitičkog reforminga benzina* sadrži prikaz razvoja metoda za unapređenje i optimizovanje navedenog procesa. Unapređenje i optimizacija procesa imala je za cilj određivanje vrednosti procesnih parametara koje će voditi ka optimalnom radu procesa. Optimizacija je sprovedena prema unapred uspostavljenim kriterijumima, odnosno definisanjem funkcije cilja koja će uključiti u razmatranje različite aspekte procesa, kao što su: operativni troškovi, kvalitet proizvoda, ukupan profit, kao i uticaj procesa na životnu sredinu. Takođe, pored optimizacije procesa katalitičkog reforminga benzina, razmatrana je upotreba Rankine-ovog ciklusa za proizvodnju električne energije iz neiskorišćene toplote niskog toplotnog kvaliteta („low grade heat“), a koju je potrebno ukloniti iz procesa.

U okviru poglavlja *Zaključak* dati su sumirani zaključni komentari rezultata dobijenih u ovoj tezi uz obrazloženje njenog naučnog doprinosa.

B. Kratak opis postignutih rezultata

U okviru doktorske teze razvijen je nov matematički model za proces katalitičkog reforminga benzina. Razvijen matematički model pokazao se kao veoma uspešan u opisivanju realnog ponašanja procesa. Takođe, razvijena je i optimizaciona metoda za kontinualno-regenerativni proces katalitičkog reforminga benzina. Pokazano je da uspostavljena optimizaciona metoda dovodi do povećanja energetske efikasnosti procesa, a samim tim i do ekonomske i ekološke koristi.

Razvijeni model procesa katalitičkog reforminga benzina organizovan je u dva nivoa, preko model celog procesa, kao i u modele delova procesa (kinetički, termo-fizički i modeli procesnih jedinica).

S obzirom da se reakciona smeša sastoji od nekoliko stotina jedinjenja, pri čemu svako od jedinjenja podleže nizu konsekutivno-paralelnih reakcija, u cilju smanjenja kompleksnosti sistema, korišćena je metoda za grupisanje komponenata u pseudo-komponente. Definisanje pseudo-komponentata bazirano je na vrednostima dobijenim upotrebom standardne metode za analizu sastava benzina „PIONA“ (ASTM D5134-98), čime je reakciona smeša, koja se sastoji od više stotina jedinjenja, definisana preko 22 komponente. Na osnovu ovako definisanih pseudo-komponentata razvijena je kinetička šema procesa i kinetički model. Takođe, razvijen je i novi način za grupisanje energije aktivacije u kinetičkim izrazima koji se bazira na klasi reakcija i vrsta pseudo-komponentata koje u njima učestvuju. Rezultati dobijeni iz industrijskog

eksperimenta upotrebljeni su za određivanje nepoznatih parametara modela, kao što su energije aktivacija, predeksponencijalni faktori u kinetičkim izrazima, itd.

S obzirom da je sastav procesnih struja opisan preko pseudo-komponenti, bilo je neophodno izabrati termodinamički model koji daje realistična rešenja pri simulaciji posmatranog procesa. Uspostavljanje termodinamičkog modela izvršeno je upoređivanjem performansi različitih modela koju se koriste za određivanje termodinamičkih osobina smeša ugljovodonika, kao što su modeli Chao-Seader-a, Redlich-Kwong-a, Soave-Redlich-Kwong-a i Benedict-Webb-Rubin-Starling-a. Korišćenjem više kriterijuma (kao što su: prisustvo vodonika, fleksibilnost modela za korišćenje u širim opsezima temperatura i pritisaka, upoređivanje sa eksperimentalnim podacima itd.) pokazano je da model Soave-Redlich-Kwong-a daje najbolje rezultate pri modelovanju smeša ugljovodonika uz prisustvo vodonika, u procesu katalitičkog reforminga benzina.

Da bi se optimizacijom dobili pouzdani parametri modela, za određivanje parametara kinetičkog modela testiran je veći broj savremenih numeričkih metoda, kao što su metoda najbržeg spusta („Steepest Descent“), Gauss-Newton i Levenberg-Marquardt. Iz dobijenih rezultata zaključeno je da je Levenberg-Marquardt metoda najprikladnija za određivanje parametara kompleksnih modela, odnosno da je pri optimizaciji vodila ka najrealističnijim rešenjima.

Razvijeni matematički model je verifikovan upotrebom više kriterijuma: statističkom analizom dobijenih parametara, upoređivanjem vrednosti nezavisnih eksperimenata sa vrednostima dobijenim simulacijom pomoću uspostavljenog modela, kao i studijom osetljivosti modela na promene radnih uslova. Iz rezultata dobijenih pomoću navedenih metoda, zaključeno je da uveden kinetički model, ali i celokupan model procesa katalitičkog reforminga benzina, adekvatno opisuje proces.

U okviru doktorske teze razvijen je model za energetske optimizaciju kontinualnog procesa katalitičkog reforminga benzina. Za dati sistem karakteristično je da jednačine kinetičkog modela i modela reaktora sa pokretnim slojem formiraju sistem parcijalnih diferencijalnih jednačina. S obzirom da se proces sastoji od nekoliko reaktora sa reciklom, rešavanje celokupnog modela procesa bilo bi vremenski veoma zahtevno i veoma nepraktično za izvođenje optimizacionih studija. Zato je razvijen pristup rešavanju modela procesa zasnovan na kvazi-stacionarnim pretpostavkama. Da bi kvazistacionarne pretpostavke bile validne, razvijen je postupak za fragmentaciju reaktora sa pokretnim slojem. Razvijeni kvazi-stacionarni model se pokazao kao veoma uspešan za opisivanje procesa, pa je upotrebljen za optimizaciju procesa.

Proces katalitičkog reforminga benzina zahteva veliku količinu toplote, koja se obezbeđuje sagorevanjem energenata, pa je energetska optimizacija procesa izvršena u cilju smanjenja potrošnje energenata. Da bi se izvršila energetska optimizacija procesa uvedena je metoda, koja je prikazana zajedno sa predlogom za novu funkciju cilja. Funkcija cilja uvedena u ovom radu predstavlja kompromis između energetske, ekonomske i zahteva zaštite životne sredine. Funkcija cilja korišćena u ovom radu, data je kao odnos jedinica mase potrošenog energenta prema jedinici mase proizvoda. Takođe, u cilju energetske optimizacije uvedena je veza između procesa katalitičkog reforminga sa procesima za proizvodnju energije, kao što su procesi za proizvodnju toplote (proces u pećima) i u sistemu za proizvodnju električne energije. Dalje, razmotrena je upotreba Rankine-ovog ciklusa za dodatnu proizvodnju električne energije iz toplotnog izvora niskog toplotnog kvaliteta.

Određivanje parametara kinetičkog modela, simulacija procesa, verifikaciju i validaciju modela, ali i energetska optimizacija sistema, izvedeni su upotrebom nekoliko softvera. Za

određivanje parametra procesa kinetičkog modela korišćeni su simulacioni paket Matlab i termodinamički paket Prosim Simulis Thermodynamics. Za simulaciju procesa, verifikaciju i validaciju modela korišćen je softver Aspen Plus.

C. Uporedna analiza rezultata kandidata sa rezultatima iz literature

Višenamenski matematički modeli koji kontrolišu dnevne performanse industrijskih postrojenja sve više se upotrebljavaju u svakodnevnoj praksi u industrijskim sistemima pri optimizaciji procesa, a u cilju povećanja profita, ali uz poštovanje svih ekoloških i energetske normativ. Sa gledišta sadašnjeg tehnološkog razvoja u svetu, razvoj i primena višenamenskih matematičkih modela postaje imperativ, s obzirom da se pri projektovanju i vođenju procesa postavljaju zahtevi, ne samo ekonomske, već i ekološke i energetske prirode. Predviđanja jasno pokazuju da će budući razvoji i unapređenja tehnoloških procesa biti nezamislivi bez upotrebe ovih modela. Sa druge strane, razvijeni modeli mogu se primeniti za projektovanje novih postrojenja i za rekonstrukcije postojećih procesa, u cilju optimizovanja proizvodnje i smanjenja emisija štetnih gasova.

Pristup koji se bazira na primeni kompleksnih matematičkih modela, pri analizi i optimizaciji procesa, već je donekle korišćen za optimizovanje velikog broja procesa i sve veću primenu nalazi kao osnovni alat za povezivanje različitih segmenta u proizvodno-poslovnoj hijerarhiji.

Priložena doktorska teza predstavlja značajan doprinos razvoju i primeni matematičkih modela hemijskih procesa. Takođe, u doktorskoj tezi su razvijeni novi pristupi za modelovanje kinetike procesa, samog procesa, kao i metode za optimizaciju procesa katalitičkog reforminga benzina.

D. Objavljeni ili saopšteni rezultati koji čine deo teze

Radovi u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21)

1. **M. Z. Stijepovic**, A. Vojvodic-Ostojic, I. Milenkovic, P. Linke, "Development of a Kinetic Model for Catalytic Reforming of Naphtha and Parameter Estimation Using Industrial Plant Data", Energy & Fuels, 23(2009) 979-983
2. **M. Z. Stijepovic**, P. Linke, M. Lj. Kijevcanin, "Optimization Approach for Continuous Catalytic Regenerative Reformer Processes", Energy & Fuels, 24(2010) 1908–1916

Radovi u istaknutim međunarodnim časopisima (M22)

1. A. Papadopoulos, **M. Stijepovic**, P. Linke, "On the Systematic Design and Selection of Optimal Working Fluids for Organic Rankine Cycles", Applied Thermal Engineering, 30(2010) 760-769

E. Zaključak

Na osnovu svega napred iznetog Komisija smatra da doktorska disertacija mr Mirka Stijepovića, dipl. ing. tehnologije, pod naslovom „**Modelovanje i energetska optimizacija procesa katalitičkog reforminga benzina**” predstavlja značajan originalni naučni doprinos u oblasti hemijskog inženjerstva, što je potvrđeno objavljivanjem naučnih radova u vodećim međunarodnim časopisima.

Značajan doprinos ove disertacije ogleda se u razvijanju i primeni savremenih modela, koji su simulacijom eksperimentalnih rezultata i predviđanjem ponašanja procesa katalitičkog reforminga benzina opravdali svoju ulogu nezamenljivog alata u savremenim istraživanjima i direktnoj industrijskoj primeni, a sve u cilju poboljšanja efikasnosti, odnosno uštede energije i ljudskog resursa. Rezultati ovih istraživanja doprinose boljem razumevanju procesa katalitičkog reforminga benzina, razvojem adekvatnog matematičkog modela, kao i optimizacione metode za posmatrani proces.

Imajući u vidu kvalitet i značaj postignutih rezultata, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, da prihvati ovaj Izveštaj i da ga zajedno sa urađenom doktorskom disertacijom mr Mirka Z. Stijepovića, dipl. inž. tehnologije učini dostupnim na uvid javnosti u zakonski predviđenom roku, a da nakon toga pozove kandidata na usmenu odbranu pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 10.5.2010.

Članovi Komisije

1. Dr Mirjana Kijevčanin, vanredni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
2. Dr Slobodan Šerbanović, redovni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
3. Dr Aleksandar Orlović, vanredni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
4. Dr Dušan Grozdanić, redovni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
5. Dr Nikola Klem, redovni profesor
Građevinski fakultet, Beograd