

UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO - METALURŠKI FAKULTET

Mr. Zoran M. SLOVIĆ, dipl. inž.met.

**TERMODINAMIČKI PRISTUP
DESULFURACIJI PRI VANPEĆNOJ
OBRADI KISEONIČNO-
KONVERTORSKOG ČELIKA**

-Doktorska disertacija-

Beograd, 2013. godine

Mentor:

Dr. Karlo Raić, redovni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Komisija:

Dr. Tatjana Volkov-Husović, redovni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Dr. Zoran Odanović,
Naučni savetnik, Institut IMS Beograd

Datum odbrane doktorske disertacije: _____

Kandidat:

Mr. Zoran M.Slović, dipl.inž.met.

Beograd, 2013. godine

Nataši, Jeleni i Dragici

Oni koji žele nešto da nauče, nikada nisu bili besposleni

MONTESKIJE

Najveću zahvalnost dugujem svom mentoru prof. Dr. Karlu Raiću za stručno vođenje, korisne sugestije, i ohrabrivanje u različitim fazama izrade teze.

Svoju duboku zahvalnost dugujem prof. Dr. Ljubomiru Nedeljkoviću za podršku, konstruktivne savete i vredne sugestije tokom izrade teze.

Zahvaljujem se prof. Dr. Tatjani Volkov-Husović i naučnom savetniku u Institutu IMS Dr. Zoranu Odanoviću za korisne savete i nesebičnu pomoć tokom pisanja rada.

Ljubaznošću Prof. Dr. N.Bannenberg-a i Dr. H. Lachmund-a iz čeličane Dillinger Hüttewerke u Dillingenu (Nemačka) obezbeđeni su neophodni proizvodni podaci za izradu ove disertacije. Izražavam im zahvalnost za kooperativnost, podršku i korisne savete.

Posebnu zahvalnost dugujem mnogim kolegama i prijateljima na pomoći oko obezbeđivanja literaturnih podataka. Pojedinačno pominjanje bi sigurno ispunilo celu ovu stranicu, pa im zbog toga, poimence ih ne navodeći, u ovoj prilici, upućujem samo jedno veliko ljudsko HVALA.

Ne mogu, a da ne pomenem i izrazim svoju zahvalnost inženjerima Svetlani Mišić i Ivici Pavličeku na pomoći oko sređivanja podataka, tabela, dijagrama i slika.

Na kraju, ali ne i najmanje važno, iskrenu zahvalnost dugujem svojoj porodici za ohrabrivanje, strpljenje i finansijsku podršku.

TERMODINAMIČKI PRISTUP DESULFURACIJI PRI VANPEĆNOJ OBRADI KISEONIČNO KONVERTORSKOG ČELIKA

IZVOD

Razvoj vanpećne obrade čelika započeo je ranih pedesetih godina prošlog veka. Danas je zajedno sa ostalim inovacijama u proizvodnji čelika toga vremena – kiseonično-konvertorskim postupkom izrade čelika, kontinuiranim livenjem, degazacijom čelika u vakuumu, odvajanjem troske pri izlivu čelika iz primarnog uređaja u livni lonac,... – postala obavezna rafinaciona operacija, naročito kada su u pitanju čelici visokog kvaliteta, takozvani „čisti čelici“.

Na savremenoj opremi za rafinaciju čelika u reprezentativnoj zapadnoevropskoj čeličani za proizvodnju čistih čelika („clean steels“) Dillinger Hütte u Dillingenu (Nemačka), sa sadržajima kiseonika nižim od 1ppm i sadržajima sumpora ispod 10ppm, izrađena je 31 šarža pod proširenom tehnološkom i analitičkom kontrolom. Dobijeni rezultati su obrađeni statističkim metodama, iz kojih su numeričkom analizom raspoloživih podataka međusobno uslovljenih reakcija dezoksidacije i desulfuracije pri vanpećnoj rafinaciji čelika u livnom loncu izvedene regresione jednačine za proračun završnog sadržaja sumpora u čeliku na kraju procesa vakuumiranja.

Predložen je model predviđanja završnog sadržaja sumpora zasnovan na masenom bilansu aluminijuma i sumpora. Analizom uticajnih faktora na proces odsumporavanja definisane su nezavisne promenljive: sumporni kapacitet, polazni sadržaj sumpora i količina troske u livnom loncu.

Razmatrane su termodinamičke relacije pri prevođenju sumpora iz čelika u trosku u heterogenom, trofaznom reakcionom sistemu čelik-troska-gas u kome se istovremeno odvijaju dezoksidacija i odsumporavanje kao dve međusobno uslovljene reakcije, uz aktivno učešće svih triju faza.

Dat je postupak proračuna termodinamičkih parametara neophodnih za procenu da li se i u kojoj meri reakcija odsumporavanja u industrijskim uslovima rafinacije čelika u livnom loncu približava ravnoteži.

Zbog činjenice da je količina troske koja je prisutna u toku rafinacije čelika u livnom loncu teško merljiv parametar, te se zbog toga u do sada u objavljenim modelima u literaturi za proračun sumpornog kapaciteta ili završnog sadržaja sumpora nije uzimala u razmatranje, u ovoj tezi je prikazan postupak predviđanja njene količine na osnovu masenog bilansa sumpora i aluminijuma.

Vrednosti sumpornog kapaciteta određene su preko nekoliko poznatih modela kao što su modeli Young-a i saradnika, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a koji u sebi uključuju koncept optičkog baziciteta i KTH modela koji se zasniva na međusobnom odnosu interakcionih koeficijenata oksida koji ulaze u sastav troske. Pošto aktiviteti kiseonika u čeliku nisu mereni, oksidacioni potencijal troske i čelika određen je preko ravnotežnih termodinamičkih reakcija u sistemu $\text{Al/Si/O/Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

Na osnovu dobijenih rezultata predloženi model procene završnog sadržaja sumpora u čeliku na kraju procesa vakuumiranja je primenljiv za pogonske uslove.

Ključne reči: odsumporavanje čelika, sumporni kapacitet, koeficijent raspodele sumpora, optički bazicitet, numerička analiza, aktiviteti, modeliranje

Naučna oblast: Metalurgija i metalurška tehnologija

Uža naučna oblast: Metalurško inženjerstvo

UDK broj: 669.01/.09

THERMODYNAMIC APPROACH TO DESULFURIZATION OF BOF STEEL DURING SECONDARY METALLURGY

ABSTRACT

Development of secondary metallurgy processing began in the early fifties. Today, along with other innovations in the steel production of that time - BOF process, continuous casting, vacuum degassing of steel, slag cut off from the furnace during the tapping ... - became mandatory secondary metallurgy operations, especially for the high-quality steels, so-called "clean steels".

On modern equipment for refining steel in a representative Western European steel mills at Dillinger Hütte in Dillingen (Germany) for production of clean steel with the oxygen content lower than 1 ppm and sulfur content below 10ppm, have been made of 31 heats in real production conditions under the expanded technological and analytical control.

The doctoral thesis is focused on the thermodynamic aspect of sulfur refining CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO ladle slag during VD vacuum degassing in the temperature range of 1565÷1650°C.

A model of predictability of the final sulfur content based on the balance aluminum and sulfur is evaluated. The variables which influence steel desulfurisation such as: sulfur capacity, initial sulfur content, and the amount of ladle slag at the end of VD process is also defined.

It is considered that the thermodynamic relationship during the transfer of sulfur from steel to slag within a heterogeneous, three-phase steel-slag-gas system where deoxidation and desulfuration is simultaneously taking place, exist as two mutually dependent reactions.

Presented is a procedure for calculating the thermodynamic parameters necessary to assess whether and how the reaction of desulfurization approaching equilibrium under industrial conditions during ladle vacuum steel refining is taking place.

Due to the fact that the quantity of the slag is generally hard to measure, it is not often included in alternative published models for the calculation of the final sulfur prediction or slag sulfur capacity. In this thesis however, a method for prediction of slag amount based on material balance of sulfur and aluminum is presented.

The values of sulfur capacity were determined according to well-known models such as the models of Young et al, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi's which include the optical basicity concept and KTH models based on the interaction coefficient of the slag component. Since the activity of oxygen in steel is not measured, oxidation potential of slag and steel was determined using thermodynamic equilibrium reactions in the system $\text{Al/Si/O/Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$.

According to the results, the proposed model for the estimation of the final sulfur content in steel at the end of the vacuum degassing process is acceptable for operational steelplant conditions.

Key words: steel desulfurisation, sulphide capacity, sulfur partition ratio, optical basicity, numerical analysis, oxygen activity, modelling

Scientific field: Metallurgy and Metallurgical Technology

Special topics: Metallurgical Engineering

UDK number: 669.01/.09

IZVOD	i
ABSTRACT	iii
SADRŽAJ	v
LISTA SIMBOLA	ix
POPIS TABELA	xiv
POPIS SLIKA	xii
1. UVOD	1
2. SUMPORNI KAPACITET	7
2.1. Definicija i određivanje sumpornog kapaciteta	7
2.2. Modeli sumpornog kapaciteta	10
2.2.1. Model Sosinsky i Sommerville-a	10
2.2.2. Model Young-a i saradnika	11
2.2.3. Taniguchi model	12
2.2.4. KTH model	13
3. OPTIČKI BAZICITET TROSKI	16
3.1. Izračunavanje optičkog baziciteta troski	16
4. TROJNI DIJAGRAM SISTEMA $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	18
5. RASPODELA SUMPORA	21
5.1. Koeficijent raspodele sumpora	21
6. AKTIVITET KISEONIKA U TROSCI I ČELIKU	24
7. MODELIRANJE ZAVRŠNOG SUMPORA U ČELIKU	26
7.1. Uvod	26
7.2. Opis predloženog modela	27
7.3. Usvojene pretpostavke i pojednostavljenja	31
7.4. Obrazovanje troske za odsumporavanje čelika u livnom loncu	31

7.5. Bilans aluminijuma	33
7.6. Određivanje korelacionog faktora za proračun Al_2O_3 u kg, $F(\text{Al}_2\text{O}_3)$	34
7.7. Bilans sumpora	35
7.8. Polazni sadržaj sumpora	36
7.9. Regresiona analiza	37
8. EKSPERIMENTALNI DEO	39
8.1. Uvod	39
8.2. Opis eksperimentalnog toka tretmana u livnom loncu	42
9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA	47
9.1. Optički bazicitet	47
9.2. Trojni dijagram	48
9.3. Sumporni kapacitet	49
9.3.1. Uvodne napomene	49
9.3.2. Sumporni kapacitet po Young metodologiji	49
9.3.3. Sumporni kapacitet po modelima	54
9.3.4. Razlike u vrednostima sumpornog kapaciteta C_s	59
9.3.4.1. Razlike između izmerenih vrednosti sumpornog kapaciteta C_s izmereno u odnosu na C_s izračunato prema modelima	59
9.3.5. Zavisnost optičkog baziciteta Λ i sumpornog kapaciteta $\log C_s$	62
9.3.6. Analiza uticajnih parametara	64
9.3.6.1. Uticajni faktori na vrednosti C_s prema varijantama A, B i C	65
9.3.6.2. Uticajni faktori na vrednosti C_s prema modelima	69
9.3.6.2.1. Varijanta A	69
9.3.6.2.2. Varijanta B	73
9.3.6.2.3. Varijanta C	77
9.4. Koeficijent raspodele sumpora	80
9.4.1. Young metodologija za izračunavanje C_s	81

9.4.2. Young originalni koeficijenti	85
9.4.3. Sosinsky - Sommerville originalni koeficijenti	89
9.4.4. Taniguchi originalni koeficijenti	92
9.4.5. KTH model - originalni koeficijenti	95
9.5. Analiza uticajnih parametara	98
9.5.1. Koeficijent raspodele sumpora Ls sa sumpornim kapacitetom prema Young metodologiji	98
9.5.2. Koeficijent raspodele sumpora Ls sa sumpornim kapacitetom određenim prema modelima	102
9.5.2.1. Varijanta A	102
9.5.2.2. Varijanta B	105
9.5.2.3. Varijanta C	107
9.6. Aktiviteti kiseonika	109
9.6.1. Aktivitet kiseonika u trosi	109
9.6.2. Aktivitet kiseonika u čeliku	111
9.7. Numerička analiza	113
9.7.1. Obrazovanje desulfuracije troske	113
9.7.1.1. Određivanje količina TROSKE ₁ i TROSKA ₂	113
9.7.1.2. Količina TROSKA _{LD} , TROSKA ₍₋₁₎	114
9.7.1.2.1. Obrazovanje desulfuracije troske preko bilansa aluminijuma	115
9.7.1.2.2. Određivanje korelacionog faktora za proračun Al ₂ O ₃ u kg, F(Al ₂ O ₃)	115
9.7.1.2.3. Bilans aluminijuma preko Ulaz-Izlaz parametara	116
9.7.1.2.4. Provera jednakosti	118
9.7.2. Određivanje polaznog sadržaja sumpora	122
9.7.3. Regresione jednačine	126
9.7.4. Načini smanjenja negativnog uticaja polaznog sadržaja sumpora u trosi livnog lonca na proces odsumporavanja	127

9.7.5. Parametri Regresione analize	128
9.7.6. Regresione jednačine sa Cs po Varijantama A, B i C	129
9.7.6.1. Rezultati po Varijanti A	132
9.7.6.1.1. Prikaz za n=31 šaržu	132
9.7.6.1.2. Prikaz za n=12 šarži	133
9.7.6.1.3. Prikaz za n=19 šarži	135
9.7.6.2. Rezultati po Varijanti B	136
9.7.6.2.1. Prikaz za n=31 šaržu	136
9.7.6.2.2. Prikaz za n=12 šarži	137
9.7.6.2.3. Prikaz za n=19 šarži	138
9.7.6.3. Varijanta C	140
9.7.6.3.1. Prikaz za n=31 šaržu	140
9.7.6.3.2. Prikaz za n=12 šarži	141
9.7.6.3.3. Prikaz za n=19 šarži	142
9.7.7. Regresione jednačine sa Cs po modelima	143
9.7.7.1. Model Young-a i saradnika	145
9.7.7.1.1. Prikaz za n=31 šaržu	145
9.7.7.1.2. Prikaz za n=12 šarži	146
9.7.7.1.3. Prikaz za n=19 šarži	147
9.7.7.2. Sosinsky-Sommerville model	149
9.7.7.2.1. Prikaz za n=31 šaržu	149
9.7.7.2.2. Prikaz za n=12 šarži	150
9.7.7.2.3. Prikaz za n=19 šarži	151
9.7.7.3. Taniguchi model	153
9.7.7.3.1. Prikaz za n=31 šaržu	153
9.7.7.3.2. Prikaz za n=12 šarži	154
9.7.7.3.3. Prikaz za n=19 šarži	155
9.7.7.4. KTH model	157
9.7.7.4.1. Prikaz za n=31 šaržu	157
9.7.7.4.2. Prikaz za n=12 šarži	158

9.7.7.4.3. Prikaz za n=19 šarži	160
10. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I ZAKLJUČCI	163
11. PRILOZI	168
PRILOG 1: Proračun aktiviteta kiseonika u trosi i čeliku	168
1.1. Proračun po Varijanti A	168
1.2. Proračun po Varijanti B	168
1.3. Proračun po Varijanti C	169
1.4. Proračun aktiviteta Al_2O_3	170
1.5. Proračun aktiviteta SiO_2	170
PRILOG 2: Provera konstanti ravnoteže za ravnotežne reakcije prikazane u Poglavlju 6 - jednačine (31) i (33)	171
2.1. Provera vrednosti konstante ravnoteže $K_{\text{Al-Si}}$ i odgovarajuće slobodne entalpije $\Delta G_{\text{Al-Si}}$ odnosno provera vrednosti konstante ravnoteže K_{Al} i odgovarajuće slobodne entalpije ΔG_{Al}	171
2.2. Provera vrednosti konstante ravnoteže $K_{\text{Al-Si}}$ i odgovarajuće slobodne entalpije $\Delta G_{\text{Al-Si}}$	172
2.3. Provera vrednosti konstante ravnoteže K_{Al} i odgovarajuće slobodne entalpije ΔG_{Al}	173
PRILOG 3: Bilans aluminijuma	175
3.1. Postupak proračuna bilansa aluminijuma prema reakciji dezoksidacije $[\text{Al}] \rightarrow (\text{Al}_2\text{O}_3)$	175
3.2. Postupak proračuna Ulaz-Izlaz bilansa aluminijuma	176
PRILOG 4: Proračun polaznog sadržaja sumpora	178
4.1. Tabela 62: Bilans sumpora 1	178
4.2. Tabela 63: Bilans sumpora 2	178
PRILOG 5: Algoritmi za proračun završnog sadržaja sumpora u čeliku	179
5.1. Algoritam toka proračuna završnog sadržaja sumpora prema predloženom modelu	179
5.2. Algoritam toka proračuna količine troske u livnom loncu	180
5.3. Algoritam toka proračuna polaznog sadržaja sumpora u trosi i čeliku ..	181

LITERATURA	182
BIOGRAFIJA	196

LISTA SIMBOLA

B - bazicitet

C_s - sumporni kapacitet

T - temperatura metala

$^{\circ}C$ - stepeni celzijusa

K - stepeni Kelvina

K_{OS} - konstanta ravnoteže

$[\%]$ - težinski procenat

$[\%S]$ - težinski % sumpora u čeliku

$(\%S)$ - težinski % sumpora, u troski

P_O - parcijalni pritisak kiseonika

P_S - parcijalni pritisak sumpora

A - optički bazicitet

n - broj pojedinačnih elektrona

X_i - molski udeo oksida

f - koeficijent aktiviteta

e - koeficijent interakcije

$[a]_o$ - aktivitet kiseonika u čeliku

$[a]_s$ - aktivitet sumpora u čeliku

$a_{(Al_2O_3)}$ - aktivitet oksida Al_2O_3 u troski

$a_{(SiO_2)}$ - aktivitet oksida SiO_2 u troski

$[a_o]^{izrač.}$ - izračunata vrednost aktiviteta kiseonika u ravnoteži

$Al/Si/O/Al_2O_3/SiO_2$

e_{ji} - interakcioni parameter j na i

f_i - Henrijev koeficijent aktiviteta konstituenta i u tečnom čeliku

ΔG° - Gibbs slobodna energija, [J/mol]

$L_s = (\%S)/[\%S]$ - koeficijent raspodele sumpora između troske i metala

L/L - livni lonac

$W_{\text{ČELIK}}$ - težina čelika u livnom loncu, [kg]

W_{TROSKALD} - količina troske koja dospe u L/L u toku izliva iz konvertora, [kg]

$W_{TROSKA(-1)}$ - količina troske predhodnih šarži ulepljena na zidovima livnog lonca, [kg]

$W_{TROSKA1}$ - procenjena količina troske u livnom loncu nakon mešanja argonom, [kg]

$W_{TROSKA2}$ - procenjena količina troske u livnom loncu nakon vakuumске degazacije, [kg]

$(\%S)_p$ - procenjeni početni sadržaj sumpora u trosци, [tež. %]

$[\%S]_p$ - procenjeni početni sadržaj sumpora u čeliku, [tež. %]

$(\%S)_1$ - sadržaj sumpora u trosци nakon mešanja argonom u livnom loncu, [tež. %]

$[\%S]_1$ - sadržaj sumpora u čeliku nakon mešanja argonom u livnom loncu, [tež. %]

$(\%S)_2$ - sadržaj sumpora u trosци na kraju vakuum tretmana, [tež. %]

$[\%S]_2$ - sadržaj sumpora u čeliku na kraju vakuum tretmana, [tež. %]

$F_{(Al_2O_3)}$ - korektivni faktor za izračunavanje sadržaja Al_2O_3 u kg

Index „**p**” - procenjeni polazni sadržaj ili težina sumpora/aluminata u trosци i čeliku pre prođuvavanja argonom

Index „**izračunato**” - izračunati sadržaj ili težina sumpora/aluminata u trosци i čeliku

Index „**izmereno**” - izmereni sadržaj ili težina sumpora/aluminata u trosци i čeliku

Index **Dodaci**- dodaci nosioci obrazovanja sumpora i aluminijuma/aluminata u trosци i čeliku

Index „**kor.**” - korigovan sadržaj ili težina sumpora/aluminijuma u trosци i čeliku

Index „**ulaz**” - ulazni sadržaj ili težina elemenata koji obrazuju sumpor/aluminijum u trosци i čeliku

Index „**izlaz**” - izlazni sadržaj ili težina elemenata koji obrazuju sumpor/aluminijum u trosци i čeliku

index **VD** - desulfurizacija u VD vakuum uređaju

index 1 - uzorci uzeti 2 min nakon intenzivnog mešanja argonom

index 2 - uzorci uzeti nakon tretmana u vakuumu

Varijanta A kada je aluminijum sredstvo za dezoksidaciju (jednačina 25)

Varijanta B kada je silicijum sredstvo za dezoksidaciju (jednačina 26)

Varijanta C kada se koristi kombinacija aluminijum i silicijuma za duboku dezoksidaciju čelika (jednačina 27)

ΔL_s za različite vrednosti aktiviteta kiseonika $[a_o]$:

Varijanta A: $\Delta L_s = L_s \text{ izmereno} - L_s \text{ izračunato } [a_o]_{Al}$;

Varijanta B: $\Delta L_s = L_s \text{ izmereno} - L_s \text{ izračunato } [a_o]_{Si}$;

Varijanta C: $\Delta L_s = L_s \text{ izmereno} - L_s \text{ izračunato } [a_o]_{Si-Al}$;

Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$

POPIS TABELA

Tabela 1: Kretanje ciljanih sadržaja pojedinih elemenata i gasova u čeliku izražen u ppm-a.....	2
Tabela 2: Maximalno dozvoljeni sadržaji elemenata za različite vrste čelika.....	2
Tabela 3: Modeli sumpornih kapaciteta	15
Tabela 4: Šematski prikaz modela	28
Tabela 5: Dodaci u livni lonac u toku izliva iz konvertora, za vreme mešanja argonom i u toku vakuumiranja.....	44
Tabela 6: Hemijski sastav i temperature analiziranog čelika	45
Tabela 7: Hemijski sastav analiziranih troski	46
Tabela 8: Izračunate vrednosti optičkog baziciteta.....	47
Tabela 9: Izmerene vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{S_{izmereno}}$ i $C_{S_{izmereno}}$ po Young metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika $[a_o]$	51
Tabela 10: Izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{S_{izračunato}}$ i $C_{S_{izračunato}}$ po Young metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika $[a_o]$	52
Tabela 11: Po Young metodologiji određeni sumporni kapacitet $\log C_{S_{izmereno}}$ i $\log C_{S_{izračunato}}$ za različite vrednosti aktiviteta kiseonika	53
Tabela 12: Koeficijent korelacije između izmerene i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{S_{izmereno}} - \log C_{S_{izračunato}}$ po Young metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika	53
Tabela 13: Po Young metodologiji određeni sumporni kapacitet C_s izmereno i C_s izračunato za različite vrednosti aktiviteta kiseonika.....	54
Tabela 14: Izmerene vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{S_{izmereno}}$ po Young metodologiji sa parametrima Dillingen šarži u poređenju sa izračunatim $\log C_s$ sa originalnim koeficijentima Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH modela.....	55

Tabela 15: Izmerene po Young metodologiji i izračunate prosečne vrednosti sumpornog kapaciteta C_s prema modelima Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH	56
Tabela 16: Koeficijent korelacije između izmerene i izračunate vrednosti $C_{Sizmereno} - C_{Sizračunato}$ sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika	57
Tabela 17: Polinomske jednačine zavisnosti $C_{Sizmereno} - C_{Sizračunato}$	57
Tabela 18: Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti sumpornog kapaciteta $\Delta C_s = C_{Sizmereno}$ (Varijanta A) - $C_{Sizračunato}$ (Young, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi, KTH) za srednje vrednosti završnog sumpora.....	59
Tabela 19: Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti sumpornog kapaciteta $\Delta C_s = C_{Sizmereno}$ (Varijanta B) - $C_{Sizračunato}$ (Young, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi, KTH) za srednje vrednosti završnog sumpora	60
Tabela 20: Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti sumpornog kapaciteta $\Delta C_s = C_{Sizmereno}$ (Varijanta C) - $C_{Sizračunato}$ (Young, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi, KTH) za srednje vrednosti završnog sumpora.....	60
Tabela 21: Razlika izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta C_s po Varijanti A i po modelima Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH, [$\Delta C_s = C_{Sizračunato}$ (Varijanta A) - $C_{Sizračunato}$ (Young, S-S, Taniguchi, KTH)].....	61
Tabela 22: Razlika izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta C_s po Varijanti B i po modelima Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH [$\Delta C_s = C_{Sizračunato}$ (Varijanta B) - $C_{Sizračunato}$ (Young, S-S, Taniguchi, KTH)].....	61
Tabela 23: Razlika izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta C_s po Varijanti C i po modelima Young-a, S-S, Taniguchi-a i KTH [$\Delta C_s = C_{Sizračunato}$ (Varijanta C) - $C_{Sizračunato}$ (Young, S-S, Taniguchi, KTH)].....	61
Tabela 24: Uticajni parametri za vrednosti izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Sizmereno}$ u zavisnosti od izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]$ po Varijantama A, B i C	65
Tabela 25: Vrednosti koeficijenta raspodele sumpora L_s za različite vrednosti aktiviteta kiseonika $[a_o]$ po Varijanti A, B i C	82

Tabela 26: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{Sizmereno}$ i $L_{Sizračunato}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($C_{Sizračunato}$ po Young-ovoj metodologiji)	83
Tabela 27: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($C_{Sizračunato}$ prema Young-voj metodologiji)	83
Tabela 28: Uticajni parametri na vrednost $L_{Sizračunato}$ (Varijanta A)	84
Tabela 29: Korelacioni koeficijenti za $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$	85
Tabela 30: Koeficijenti raspodele sumpora sa log $C_{Sizračunato}$ iz Young-ove originalne jednačine	86
Tabela 31: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{Sizmereno}$ i $L_{Sizračunato}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora (log $C_{Sizračunato}$ iz Young-ove originalne jednačine)	87
Tabela 32: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($C_{Sizračunato}$ iz Young-ove originalne jednačine)	88
Tabela 33: Korelacioni koeficijenti za $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ (log $C_{Sizračunato}$ iz Young-ove originalne jednačine)	88
Tabela 34: Koeficijenti raspodele sumpora sa log $C_{Sizračunato}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine	89
Tabela 35: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{Sizmereno}$ i $L_{Sizračunato}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora (log $C_{Sizračunato}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine)	90
Tabela 36: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora (log $C_{Sizračunato}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine)	90
Tabela 37: Korelacioni koeficijenti za $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ (log $C_{Sizračunato}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine)	91
Tabela 38: Koeficijenti raspodele sumpora sa log $C_{Sizračunato}$ iz Taniguchi originalne jednačine	92

Tabela 39: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz Taniguchi originalne jednačine)	93
Tabela 40: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_s$ izračunato iz Taniguchi originalne jednačine)	94
Tabela 41: Korelacioni koeficijenti za $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz Taniguchi originalne jednačine)	94
Tabela 42: Koeficijenti raspodele sumpora sa $\log C_{S_{izračunato}}$ iz KTH modela.....	95
Tabela 43: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz KTH modela)	96
Tabela 44: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz KTH modela)	97
Tabela 45: Korelacioni koeficijenti za $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz KTH modela)	97
Tabela 46: Korelacioni koeficijent R za $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$	98
Tabela 47: Prosečne vrednosti baziciteta, hemijskog sastava troske i temperature metalnog kupatila na kraju procesa rafinacije čelika u livnom loncu	98
Tabela 48 : Uticaj vrednosti $\%SiO_2$, odnosa $\%CaO/Al_2O_3$ i aktiviteta $a(Al_2O_3)$ na izračunate vrednosti $L_{S_{izračunato}}$ i izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]_{Al}$ po Varijanti A	103
Tabela 49: Uticaj sadržaja $\%SiO_2$ na vrednosti $L_{S_{izračunato}}$ prema analiziranim modelima	104
Tabela 50: Uticajni parametri na vrednost $L_{S_{izračunato}}$ za Varijantu A	105
Tabela 51: Zavisnost izračunatog koeficijenta raspodele sumpora $L_{S_{izračunato}}$ od izračunatog aktiviteta $a(SiO_2)$ u troski i izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]_{Si}$ po Varijanti B	106
Tabela 52: Zavisnost L_s od $\%SiO_2$ za različite C_s i $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B).....	107

Tabela 53: Uticajni faktori na prosečne vrednosti L_{Si} izračunato za različite Cs i $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B)	107
Tabela 54: Zavisnost izračunatog koeficijenta raspodele sumpora L_{Si} izračunato od izračunatog aktiviteta $a_{(Al_2O_3)}$ u troski i izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]_{Si-Al}$ po Varijanti C	108
Tabela 55: Zavisnost L_s od $\%SiO_2$ za različite Cs i $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C)	108
Tabela 56: Uticajni faktori na prosečne vrednosti L_{Si} izračunato za različite Cs i $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C)	109
Tabela 57: Vrednosti izračunatog aktiviteta kiseonika u troski	110
Tabela 58: Vrednosti izračunatog aktiviteta kiseonika u čeliku	112
Tabela 59: Izračunate količine $TROSKA_1$ i $TROSKA_2$	114
Tabela 60: Bilans aluminijuma preko produkata dezoksidacije $[Al] \rightarrow (Al_2O_3)$	116
Tabela 61. Ulaz-Izlaz bilansa aluminijuma	117
Tabela 62: Bilans sumpora 1	123
Tabela 63: Bilans sumpora 2	125
Tabela 64: Korelacioni koeficijenti određeni iz regresionih jednačina sa $[\%S]_{izmereno}$ kao zavisne promenljive i raspoloživih parametara kao nezavisno promenljivih	126
Tabela 65: Parametri koji učestvuju u izradi regresionih jednačina	129
Tabela 66: Regresioni koeficijenti za n=31 šaržu	130
Tabela 67: Regresioni koeficijenti za n=12 šarži	130
Tabela 68: Regresioni koeficijenti za n=19 šarži	130
Tabela 69: Broj i procentni udeo šarži sa različitim nivoima $\Delta\%S$	131
Tabela 70: Razlika $\Delta S = [\%S]_{izračunato} - [\%S]_{izmereno}$ za n=31 šaržu	132
Tabela 71: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{izmereno}$ od $[\%S]_{izračunato}$ za n=31 šaržu	133
Tabela 72: Razlika $\Delta S = [\%S]_{izračunato} - [\%S]_{izmereno}$ za n=12 šarži	133
Tabela 73: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{izmereno}$ od $[\%S]_{izračunato}$ za n=12 šarži	134
Tabela 74: Razlika $\Delta S = [\%S]_{izračunato} - [\%S]_{izmereno}$ za n=19 šarži	135

Tabela 75: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži	136
Tabela 76: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=31 šaržu	136
Tabela 77: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šarži	137
Tabela 78: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=12 šarži	137
Tabela 79: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži	138
Tabela 80: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=19 šarži	138
Tabela 81: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta B)	139
Tabela 82: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=31 šaržu.....	140
Tabela 83: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šarži (Varijanta C)	141
Tabela 84: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=12 šarži	141
Tabela 85: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta C)	142
Tabela 86: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=19 šarži	142
Tabela 87: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta C)	143
Tabela 88: Regresioni koeficijenti za n=31 šaržu	144
Tabela 89: Regresioni koeficijenti za n=12 šarži	144
Tabela 90: Regresioni koeficijenti za n=19 šarži	144
Tabela 91: Broj i procentni udeo šarži sa različitim nivoima $\Delta \% S$	144
Tabela 92: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=31 šaržu	145
Tabela 93: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu	146
Tabela 94: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=12 šarži	146
Tabela 95: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži	147

Tabela 96: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=19 šarži	147
Tabela 97: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=19 za šarži	148
Tabela 98: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu	149
Tabela 99: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	150
Tabela 100: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=12 šarži	150
Tabela 101: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	151
Tabela 102: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=19 šarži	151
Tabela 103: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	152
Tabela 104: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu	153
Tabela 105: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	154
Tabela 106: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=12 šarži	154
Tabela 107: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	155
Tabela 108: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=19 šarži	155
Tabela 109: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	156
Tabela 110: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu	157
Tabela 111: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	158
Tabela 112: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=12 šarži	158
Tabela 113: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=31 šaržu	159
Tabela 114: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=19 šarži	160

Tabela 115: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu	161
Tabela 116: Odsumporavajući potencijal troske $Cs/[\%S]_p$	161

POPIS SLIKA

Slika 1: Zavisnost optičkog baziciteta i sumpornog kapaciteta za troske različitog hemijskog sastava	12
Slika 2: Izotermalni deo faznog dijagrama sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ pri 1600°C	19
Slika 3: Trojni dijagram sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sa linijom zasićenja krečom i različitim sadržajima $\%\text{MgO}$ pri 1600°C	20
Slika 4: Algoritam toka proračuna završnog sadržaja sumpora prema predloženom modelu	28
Slika 5: Algoritam toka proračuna količine troske u livnom loncu	29
Slika 6: Algoritam toka proračuna polaznog sadržaja sumpora u troski i čeliku	30
Slika 7: Kretanje sadržaja sumpora u gvožđu i čeliku u čeličani Dillinger Hütte	40
Slika 8: Šematski prikaz vakuumskog postrojenja VD postupkom	41
Slika 9: VD Vakuum uređaj za degazaciju	41
Slika 10: Livni lonac u čeličani Dillinger Hütte	42
Slika 11: Šematski prikaz rafinacije čelika u toku sekundarne metalurgije u čeličani Dillinger Hütte	43
Slika 12: Položaj analiziranih troski u trojnom dijagramu sistema $(\text{CaO}+\text{MgO})\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ za $T=1584^\circ\text{C}$	48
Slika 13: Zavisnost izmerenog i izračunatog sumpornog kapaciteta $\log C_s$ (po Young metodologiji) sa različitim izračunatim ravnotežnim aktivitetima kiseonika $[a_o]$	54
Slika 14: Zavisnost $C_{s\text{izmereno}}$ sa $[a_o]_{\text{Al}}$ (Varijanta A) od $C_{s\text{izračunato}}$ prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela	58

Slika 15: Zavisnost $C_{Si\text{mereno}}$ sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) od $C_{Si\text{računato}}$ prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela	58
Slika 16: Zavisnost $C_{Si\text{mereno}}$ sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) od $C_{Si\text{računato}}$ prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela	59
Slika 17: Odnos između optičkog baziciteta i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika u metalu Varijanta A $[a_o]_{Al}$	63
Slika 18: Odnos između optičkog baziciteta i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika u metalu Varijanta B $[a_o]_{Si}$	63
Slika 19: Odnos između optičkog baziciteta i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika u metalu Varijanta C $[a_o]_{Si-Al}$	64
Slika 20: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Si\text{mereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od baziciteta $\%CaO/\%SiO_2$	65
Slika 21: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Si\text{mereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od $\%CaO$	66
Slika 22: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Si\text{mereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od $\%SiO_2$	66
Slika 23: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Si\text{mereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od $\%Al_2O_3$	67
Slika 24: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Si\text{mereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od $\%MgO$	67
Slika 25: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Si\text{mereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od temperature na kraju procesa vakuumiranja	68
Slika 26: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{Si\text{mereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od optičkog baziciteta Λ	68

Slika 27: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od baziciteta $\%CaO / \%SiO_2$	69
Slika 28: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%CaO$	70
Slika 29: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%SiO_2$	70
Slika 30: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%MgO$	71
Slika 31: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%Al_2O_3$	71
Slika 32: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od temperature	72
Slika 33: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od optičkog baziciteta Λ	72
Slika 34: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od baziciteta $\%CaO / \%SiO_2$	73
Slika 35: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%CaO$	73
Slika 36: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%SiO_2$	74

Slika 37: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %MgO	74
Slika 38: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %Al ₂ O ₃	75
Slika 39: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od temperature	75
Slika 40: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od optičkog baziciteta Λ	76
Slika 41: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od baziciteta %CaO/ %SiO ₂	77
Slika 42: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %CaO	77
Slika 43: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %SiO ₂	78
Slika 44: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %MgO	78
Slika 45: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %Al ₂ O ₃	79
Slika 46: Zavisnost C_{Si} izračunato sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od temperature	79

Slika 47: Zavisnost $C_{Sizračunato}$ sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od optičkog baziciteta Λ	80
Slika 48: Zavisnost izmerenog i izračunatog koeficijenta raspodele sumpora L_s za srednji sastav završnog sumpora ($C_{Sizračunato}$ po Young-ovoj metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika)	84
Slika 49: Zavisnost $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ sa $\log C_{Sizračunato}$ po Young originalnim koeficijentima i izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ po Varijanti B i Varijanti C	88
Slika 50: Zavisnost $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ sa $\log C_{Sizračunato}$ po Sosinsky-Sommerville originalnim koeficijentima i izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ po Varijanti B i Varijanti C	91
Slika 51: Zavisnost $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ sa $\log C_{Sizračunato}$ po Taniguchi originalnim koeficijentima i izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ po Varijanti B i Varijanti C	94
Slika 52: Zavisnost $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ sa $\log C_{Sizračunato}$ po KTH modelu i izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ po Varijanti B i Varijanti C	97
Slika 53: Zavisnost Bazicitet- $L_{Sizračunato}$	100
Slika 54: Zavisnost %CaO- $L_{Sizračunato}$	100
Slika 55: Zavisnost %SiO ₂ - $L_{Sizračunato}$	100
Slika 56: Zavisnost %Al ₂ O ₃ - $L_{Sizračunato}$	101
Slika 57: Zavisnost %MgO- $L_{Sizračunato}$	101
Slika 58: Zavisnost %CaO/ %Al ₂ O ₃ - $L_{Sizračunato}$	101
Slika 59: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu (Varijanta A)....	133
Slika 60: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta A)	134
Slika 61: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta A)	135
Slika 62: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu (Varijanta B)	137
Slika 63: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta B)	138
Slika 64: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta B)	139
Slika 65: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu (Varijanta C)	141

Slika 66: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta C)	142
Slika 67: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta C)	143
Slika 68: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu (Cs po Young modelu)	146
Slika 69: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Cs po Young modelu)	147
Slika 70: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Cs po Young modelu)	148
Slika 71: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu (Cs po Sosinsky-Sommerville modelu)	150
Slika 72: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Cs po Sosinsky-Sommerville modelu)	151
Slika 73: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Cs po Sosinsky-Sommerville modelu)	152
Slika 74: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu (Cs po Taniguchi modelu)	154
Slika 75: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Cs po Taniguchi modelu)	155
Slika 76: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Cs po Taniguchi modelu)	156
Slika 77: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=31 šaržu (Cs po KTH modelu)	158
Slika 78: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=12 šarži (Cs po KTH modelu)	159
Slika 79: Zavisnost [%S] _{izmereno} od [%S] _{izračunato} za n=19 šarži (Cs po KTH modelu)	160

1. UVOD

U savremenoj proizvodnji čelika, dva najzastupljenija načina za njegovu masovnu proizvodnju su kiseonični i elektrolučni postupak sa različitim varijantama i modifikacijama.¹⁾ U toku 2012 godine svetska proizvodnja čelika dostigla je rekordan nivo od 1.55 milijardi tona što je u odnosu na 2011 godinu povećanje od 1.2%. Po svetskim regionima dominira Azija sa 1.01 milijardu tona gde samo Kina ostvaruje 716.5 miliona tona. U ukupnoj svetskoj proizvodnji udeo azijskih zemalja je 46.3%. Sve evropske zemlje zajedno proizvele su 169.4 miliona tona, severno američki kontinent 121.9 miliona tona (SAD-88.6 miliona tona), a zemlje južne amerike 46.9 miliona tona od čega samo Brazil 34.7 miliona tona.²⁾

Nivo nečistoća u čeliku, predmet je mnogih istraživanja sa ciljem povećanja čistoće i poboljšanja mehaničkih osobina čelika. Nekada zahtevani nivo sumpora u čeliku od 0.010% danas je uglavnom prevaziđen. Sve strožiji zahtevi ka višim mehaničkim osobinama doprineli su razvoju postupaka sekundarne metalurgije sa posebnim akcentom na rafinaciji čelika u livnom loncu. Tehnološki postupci RH, LF, VD, VOD, VAD, CAS-OB itd. omogućavaju proizvodnju čelika sa sadržajem sumpora i drugih nečistoća na nivou od nekoliko ppm-a.^{1,3,4)}

Tabela 1 predstavlja napredak u smanjenju sadržaja nečistoća u čeliku sa razvojem procesa sekundarne metalurgije uključujući proces vakuumiranja sa različitim modifikacijama kao što su uduvavanje kiseonika ili, dogrevanje čelika u livnom loncu.

Tabela 1: Kretanje ciljanih sadržaja pojedinih elemenata i gasova u čeliku izražen u ppm-a⁵⁾

Godina/Element	1960	1985	2010	Budućnost
Ugljenik	250	50	15	10
Fosfor	300	100	50	30
Sumpor	300	30	10	<10
Kiseonik	30	15	10(6)	3-5
Azot	100	50	30	20
Vodonik	6	3	1	<1

Sve strožiji zahtevi korisnika čelika širom sveta za čelicima sa niskim sadržajima štetnih elemenata, pre svega sumpora, fosfora, kiseonika, azota i vodonika primorale su proizvođače čelika da istražuju alternativne i ne previše skupe načine za njihovo postizanje. Danas se zna koji su maksimalno dozvoljeni nivoi elemenata iz Tabele 1 koji obezbeđuju zadovoljavajuće mehaničke i druge osobine čelika i garantuju bezbednu primenu u gotovo svim uslovima, bilo da se radi o čelicima za automobilsku i industriju bele tehnike, konstrukcije, naftne bušotine, ili odgovorne mašinske delove.

U Tabeli 2 dat je pregled maksimalno dozvoljenih nivoa ugljenika, sumpora i gasova u pojedinim vrstama čelika.

Tabela 2: Maksimalno dozvoljeni sadržaji ugljenika, sumpora i gasova za pojedine vrste čelika⁶⁾

Vrsta čelika	Maximalno dozvoljeni nivoi, ppm
Automobilski lim	[C]≤30; [N]≤30;
Čelici za konzerve	[C]≤30; [N]≤30; [O] _{uk} ≤20;
Čelici za cevi	[S]≤30; [N]≤35; [O] _{uk} ≤20;
Kuglični ležajevi	[O] _{uk} ≤10;
Debeli limovi	[H]≤2; [N]=30÷40; [O] _{uk} ≤20;
Žica	[N]≤60; [O] _{uk} ≤30;

Osim kod čelika za automate (free-cutting steels) kada se želi dobra mašinska obradivost, sumpor je nepoželjan element u mnogim čelicima. Lista negativnog uticaja na osobine čelika je veoma duga: obrazovanje nepoželjnih sulfida, smanjenje međuzrnaste čvrstoće i kohezije čelika, snižavanje tačke topljenja, izazivanje krtosti i porast napona u gotovom proizvodu, niža otpornost ka koroziji, slaba zavarljivost itd.⁷⁻¹³⁾

Negativan uticaj sumpora na kvalitet čelika, njegove fizičke i mehaničke osobine, posebno dolazi do izražaja kada je i sadržaj kiseonika nedovoljno kontrolisan.

Sredinom pedesetih godina prošlog veka, za opšte konstrukcione kvalitete čelika livene u ingotima, maksimalno dozvoljeni sadržaj sumpora iznosio je 0.04%. Kasnije sa razvojem kontinuiranog livenja, sadržaj sumpora je limitirana na 0.02%. Kod specijalnih vrsti čelika, posebno kod ravnih proizvoda uključujući i debele limove, sadržaj sumpora je limitiran na 0.005%. Kod čelika za cevi za gasovode, čelika otpornih na pojavu pukotina (HIC) ili legiranih čelika koji su namenjeni za kovanje završni sadržaj sumpora ograničen je na 10 ppm tj. max 0.001%.¹⁴⁻¹⁶⁾

Zbog svega navedenog, odsumporavanje čelika posebno u toku vanpećne rafinacije u livnom loncu dobija na sve većem značaju u savremenoj metalurgiji. Taj značaj je utoliko veći posebno kod čelika kod kojih, u posledenje dve decenije, postoje sve veći zahtevi ka proizvodnji čelika sa ultraniskim sadržajem sumpora.¹⁷⁾

Opšte je poznata činjenica da troska igra veliku ulogu u procesu proizvodnje čelika. Današnja metalurška nauka ima dovoljno saznanja o njenom uticaju na kvalitet čelika. Stara izreka proizvođača čelika "Brini o troski, a ona će da brine o metalu" važi i danas, stim da se ranije odnosila na trosku primarne

proizvodnje čelika u pećima, a danas na raznovrsne postupke rafinacije u livnom loncu u toku sekundarne metalurgije.¹⁸⁾

U toku procesa u livnom loncu, metalurške reakcije se odvijaju na međufazi čelik-troska, tako da je troska sa dobrim rafinacionim sposobnostima neophodan ali ne i uvek dovoljan uslov da se ukloni sumpor i kiseonik iz metalnog kupatila. Kako je kvalitet čelika i stabilnost tehnoloških parametara u direktnoj vezi sa osobinama troski to je i cilj metalurških inženjera širom sveta da rafinacionu sposobnost troski prilagodi vrsti proizvedenog čelika.¹⁹⁾

Sumporni kapacitet opisuje potencijalnu sposobnost homogene tečne troske za uklanjanje sumpora i služi za upoređivanje desulfuracionih karakteristika različitih sastava troski. Razvijen je veliki broj modela za njegovo izračunavanje. Neki od tih modela su posmatrali samo binarne sisteme troski kao što je model Reddy i Blander-a.²⁰⁻²¹⁾ Pelton je sa saradnicima proširio ovaj model na višekomponentne troske.²²⁾ Gay i saradnici su razvili statistički termodinamički model, poznat kao IRSID model troske koji je sposoban da predvidi hemizam višekomponentnih tečnih troski koje su od izuzetne važnosti u proizvodnji čelika.²³⁾

Posle koncepta optičkog baziciteta koji su predložili Duffy i Ingram²⁴⁻²⁵⁾, model za izračunavanje sumpornog kapaciteta troski predložen od Richardson-a i Fincham-a²⁶⁻²⁸⁾ sredinom prošlog veka privukao je pažnju ne samo metalurga, nego i mnogih drugih istraživača širom sveta. Mada je sumporni kapacitet troski definisan i zasnovan na ravnoteži između troske i gasa, opšte je prihvaćena činjenica da se za opis odsumporavajuće sposobnosti troske primenjuje reakcija između troske i metala, pošto je usko povezan sa sastavom troske i temperaturom procesa. Mnogi modeli zasnovani na empirijskim relacijama između sumpornog kapaciteta, optičkog baziciteta i temperature

razvijeni su sa ciljem predviđanja vrednosti sumpornog kapaciteta različitog hemijskog sastava troski koja je u ravnoteži sa metalom.²⁹⁻³⁷⁾

Sredinom osamdesetih godina prošlog veka, Sosinsky i Sommerville²⁹⁾ su u svom originalnom radu, objavili jednačinu za izračunavanje sumpornog kapaciteta koja je u sebi uključivala ranije pomenut koncept optičkog baziciteta.

Pošto je pomenuta jednačina pokazivala znatna odstupanja između izmerene i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta pri visokim vrednostima optičkog baziciteta posmatrane troske, Young i saradnici³⁰⁾ su predložili novi model za proračun sumpornog kapaciteta. Kao rezultat velikog projekta koji je finansirala Evropska Unija od 1987 do 1989 godine, na osnovu eksperimenta u laboratorijskim uslovima pored predloženih jednačina za proračun sumpornog kapaciteta dali su prave vrednosti optičkog baziciteta za okside tzv. prelaznih metala kao što su Al_2O_3 , Fe_2O_3 i TiO_2 koji do tada nisu mogli precizno da se odrede. Na taj način su pokriveno vrednosti optičkog baziciteta za gotovo sve okside koji ulaze u sastav troski od metalurškog interesa u proizvodnji gvožđa i čelika kao što su visoko pećne, konvertorske i troske sekundarne metalurgije.

U međuvremenu, Shankar i Taniguchi i saradnici, predložili su svoje modele za poboljšanje tačnosti predviđanja sumpornog kapaciteta $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ troski zasnovan na konceptu optičkog baziciteta troski.^{32,36,37)}

Paralelno sa razvojem modela za proračun sumpornog kapaciteta na bazi optičkog baziciteta, razvijani su i modeli gde se optički bazicitet ne uzima kao parameter za njegovo određivanje.

Od strane istraživača sa švedskog Kraljevskog Tehnološkog Instituta KTH³³⁻³⁵⁾ u Stokholmu, razvijen je model KTH nazvan po imenu Instituta zasnovan na interakcionim koeficijentima između oksida koji čine sastav troske. Nedostatak ovog modela leži u činjenici da za pojedine okside u troski jednostavno nije

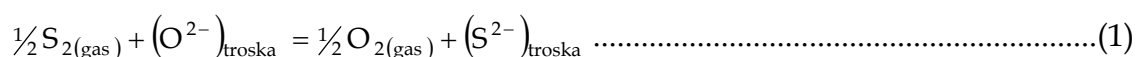
moguće izmeriti interakcione koeficijente. U poslednje vreme Derin i saradnici³⁸⁾ su predložili model za proračun sumpornog kapaciteta zasnovan na principu neuronskih mreža, dok je Shi Cheng-bin²⁸⁾ predložio model zasnovan na IMCT teoriji jonsko-molekularne koegzistencije $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ troski.

Zbog svoje široke primene u proizvodnoj praksi, u ovoj tezi će se za proračun sumpornog kapaciteta koristiti modeli zasnovani na konceptu optičkog baziciteta kao što su modeli Young-a i saradnika, Sosinsky-Sommerille-a (u daljem tekstu S-S), i Taniguchi-a, i KTH model koji se zasniva na unapred definisanim interakcionim koeficijentima posmatranog sastava troske.

2. SUMPORNI KAPACITET

2.1. Definicija i određivanje sumpornog kapaciteta

Fizičko hemijsko ponašanje sumpora u troski važno je zbog činjenice da se troske koriste za uklanjanje sumpora iz metala u toku proizvodnje gvožđa i čelika. Ravnotežna reakcija izmene sumpora između troske i gasne faze sa gledišta sumpora i kiseonika pri parcijalnim pritiscima kiseonika manjim od 0.1 Pa (10^{-6} atm) kakvi vladaju u procesu proizvodnje čelika prikazana je jednačinom (1)³⁹⁻⁴¹



Konstanta ravnoteže za jednačinu (1) je data sledećim izrazom

$$K_1 = \frac{a_{S^{2-}}}{a_{O^{2-}}} \left(\frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right)^{1/2} = \frac{f_{S^{2-}} (\%S)_{troska}}{a_{O^{2-}}} \left(\frac{p_{O_2}}{p_{S_2}} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

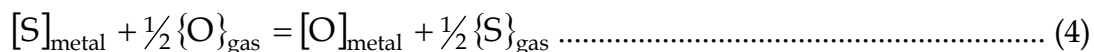
gde su $a_{S^{2-}}$ i $a_{O^{2-}}$ aktiviteti sumpora i kiseonika u troski, p_{O_2} i p_{S_2} parcijalni pritisci $S_{2(gas)}$ i $O_{2(gas)}$, $f_{S^{2-}}$ koeficijent aktiviteta sumpora u troski i $(\%S)_{troska}$ izražen u težinskim procentima (tež. %).

Rastvorljivost sumpora kod niskih pritisaka kiseonika opisuje se pomoću sumpornog kapaciteta C_S koji je originalno definisan od strane Finchama i Richardsona²⁶⁻²⁷ kao:

$$C_S = K \frac{a_{(O^{2-})}}{f_{(S^{2-})}} = (\%S) \times \sqrt{P_{O_2} / P_{S_2}} \dots\dots\dots(3)$$

gde je K_1 konstanta ravnoteže za jednačinu (1).

Analogno jednačini (1), reakcija za opisivanje procesa odsumporavanja čelika u livnom loncu u sistemu metal-gas prikazuje se sledećim izrazom (4):



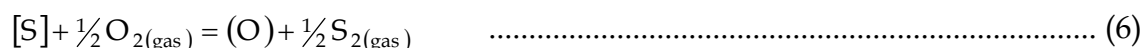
Najjednostavnija definicija sumpornog kapaciteta je da opisuje potencijalnu sposobnost homogene tečne troske za uklanjanje sumpora. Kako zavisi od temperature i sastava posmatrane troske služi za upoređivanje njihovih desulfuracionih karakteristika. Troska sa visokim sumpornim kapacitetom C_s , jače će da veže sumpor od onih sa niskim C_s i biće bolja kao sredstvo za odsumporavanje u metalurškim procesima. Kada se odredi sumporni kapacitet za neki sastav troske, moguće je izračunati ravnotežnu raspodelu sumpora između troske i metala izraženu preko koeficijenta raspodele L_s .^{39,42)}

Turkdogan³⁹⁾ je za jednačinu (4) predložio sledeće relacije prikazane jednačinama

$$C'_s = k_s = L_s [a_0] = (\%S)[a_0]/[a_s] \dots\dots\dots (5)$$

gde su: $[a_0]$ i $[a_s]$ koeficijenti aktiviteta kiseonika odnosno sumpora, L_s - koeficijent raspodele sumpora između troske i metala, a k_s - konstanta ravnoteže.

Jednačina koja se koristi da se izrazi odnos C_s i C'_s proizilazi iz jednačine (6) koja je kombinacija jednačina (1) i (4):



za koju je konstanta ravnoteže:

$$K_{OS} = \frac{[a_O]}{[a_S]} \left(\frac{p_{S_2}}{p_{O_2}} \right)^{1/2} = \frac{(\%S)_{\text{troska}}}{[\%S]_{\text{metal}}} \frac{a_O}{f_S C_S} \dots\dots\dots (7)$$

gde su: $[a_O]$ i $[a_S]$ - aktiviteti kiseonika i sumpora u metalu, f_S - koeficijent aktiviteta sumpora u metalnoj fazi, a $[\%S]_{\text{metal}}$ sadržaj sumpora u metalu izražen u težinskim procentima.

Takođe, konstanta ravnoteže za jednačinu (7) može da se napiše kao što je prikazano izrazom (8):

$$\log K_{OS} = -\frac{935}{T(K)} + 1.375 \dots\dots\dots (8)$$

Koeficijent aktiviteta f_S za čelik izračunava se iz Wagnerovog^{41,43)} izraza

$$\log f_j = \Sigma(e_j^i [\%i]) \dots\dots\dots (9)$$

gde je f_j koeficijent aktiviteta elementa j u tečnom čeliku i predstavlja rastvoreni element u tečnom čeliku, a e_j^i je koeficijent interakcije za element j na i .

Prema tome, C'_S koji se izračunava iz jednačine za troska-metal ravnotežu, može dalje da se pretvori u C_S sledećim odnosom:

$$C_S = \frac{C'_S}{K_{OS}} \dots\dots\dots (10)$$

Sa usvajanjem da je aktivitet sumpora u čeliku $[a_S] \equiv [\%S]^{39)}$ za niskolegirane čelike, pretvaranje C_S u K_1 je tada dato jednačinom (11):

$$K_1 = C_S \cdot K_{OS} \dots\dots\dots (11)$$

Da bi se navedeni proračun izvršio neophodno je da se zna vrednost aktiviteta kiseonika a_o za sisteme troska-metal.

Zbog svega navedenog, modelovanje sumpornog kapaciteta (Cs) je od velikog interesa u metalurškom inženjeringu, pošto je cilj predviđanje desulfuracione sposobnosti troske koji direktno utiče na kvalitet čelika u toku procesa proizvodnje.³⁸⁾ U literaturi postoji veliki broj empirijskih, polu-empirijskih i teoretskih modela sumpornog kapaciteta.^{23,29,44-46)} Takođe, postoji izvestan broj jednačina gde su vrednosti sumpornog kapaciteta određeni regresionom analizom eksperimentalnih šarži kako jednostavnih tako i složenih sistema troski.⁴⁷⁻⁴⁹⁾

Od mnogobrojnih modela objavljenih u literaturi, a koji u sebi uključuju koncept optičkog baziciteta, modeli Sosinsky i Sommerville (S-S)²⁹⁾, Young-a i saradnika^{30,50)} i Taniguchi model³²⁾, se najčešće međusobno upoređuju sa KTH^{33-35,50)} modelom koji u sebi nema parametar optičkog baziciteta (Λ), a koji je definisan na koeficijentima međusobnog dejstva komponenti i do j $\xi_{Interaction}^{i-j}$ u sastavu troski.

2.2. Modeli sumpornog kapaciteta

2.2.1. Model Sosinsky i Sommerville-a

Sosinsky i Sommerville²⁹⁾ odredili su korelacioni izraz između optičkog baziciteta sa sumpornim kapacitetom u temperaturnoj oblasti procesa između 1400 i 1700 °C prikazan jednačinom:

$$\log Cs = (22690 - 54640\Lambda) / T + 43.6\Lambda - 25.2 \dots\dots\dots (12)$$

Jednačina (12) je primenljiva do izvesnog stepena za niske vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_s$, i pokazuje povećanje devijacija pri većim sumpornim kapacitetima. Ona ne daje linearnu zavisnost između optičkog baziciteta i logaritma sumpornog kapaciteta pa nije dovoljno tačna naročito pri visokim vrednostima baziciteta tj. u oblastima visokih vrednosti sumpornog kapaciteta.

2.2.2. Model Young-a i saradnika

Young i saradnici^{30,50} su izvršili određene modifikacije Sosinsky i Sommerville modela kako bi mogao da se koristi u oblastima visokobaznih troski i visokih vrednosti sumpornog kapaciteta posmatrane troske. Oni su u svoj model uključili hemijski sastav i sugerisali sledeće jednačine za određivanje sumpornog kapaciteta u zavisnosti od izračunate vrednosti optičkog baziciteta:

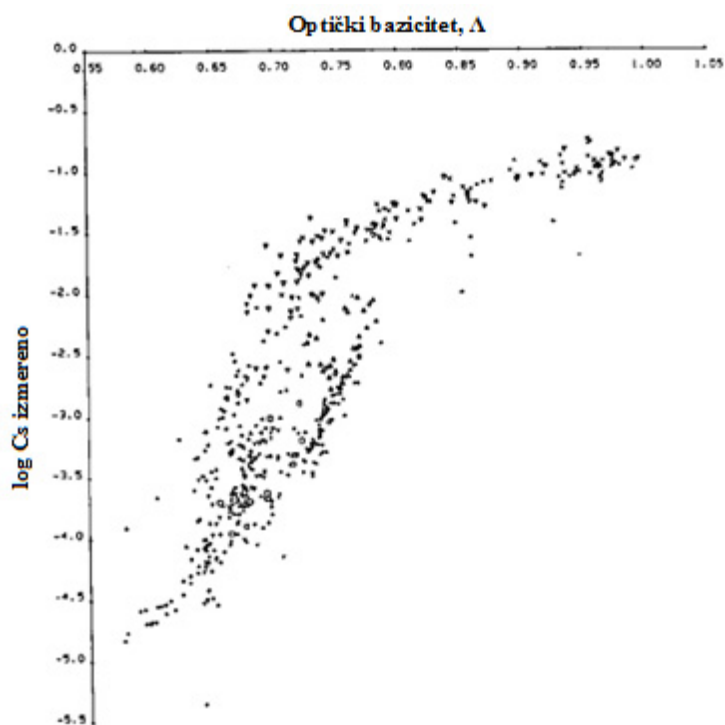
za $\Lambda < 0.8$

$$\log C_s = -13.913 + 42.84\Lambda - 23.82\Lambda^2 - 11710/T - 0.0223(\%SiO_2) - 0.2275(\%Al_2O_3) \dots \dots \dots (13)$$

za $\Lambda \geq 0.8$

$$C_s = -0.6261 + 0.4808\Lambda + 0.7197\Lambda^2 + 1697/T - 2587\Lambda/T + 0.0005144(\%FeO) \dots \dots (14)$$

Na Slici 1 prikazana je zavisnost optičkog baziciteta i sumpornog kapaciteta za različite vrste troski koje su bile predmet ispitivanja u originalnom radu Young-a i saradnika.



Slika 1: Zavisnost optičkog baziciteta i sumpornog kapaciteta za troske različitog hemijskog sastava^{30,50)}

2.2.3. Taniguchi model

Taniguchi³²⁾ je razvio model zasnovan na optičkom bazicitetu na osnovu sopstvenih merenja i merenja koje su obavili drugi istraživači. Prema njegovom originalnom istraživanju, predvidljivost njegovog modela da odredi sumporni kapacitet je veoma primenljiv u širokom opsegu izmerenih vrednosti sumpornog kapaciteta u poređenju sa drugim modelima. Oblast primenljivosti ovog modela je širok, od troski proizvodnje gvožđa, vanpećnog tretiranja gvožđa do troski vanpećne metalurgije čelika. On je predložio empirijsku jednačinu (15) između optičkog baziciteta, temperature i hemijskog sastava troske:

$$\log Cs = 7.350 + 94.89 \log \Lambda - 10051 + \Lambda(-338(\% \text{MgO}) + 287(\% \text{MnO})) / T + 0.2284(\% \text{SiO}_2) + 0.1379(\% \text{Al}_2\text{O}_3) - 0.0587(\% \text{MgO}) + 0.0841(\% \text{MnO}) \quad \text{..... (15)}$$

2.2.4. KTH model

KTH model^[33-35,51] je razvijen u okviru švedskog kraljevskog tehnološko metalurškog instituta (Royal Institute of Technology). U laboratorijskim uslovima na tro-komponentnim, četvero-komponentnim, peto-komponentnim i šesto-komponentnim troskama obavljena su ispitivanja međusobnih odnosa oksida na različitim temperaturama sa ciljem dobijanja izraza za predviđanje sumpornog kapaciteta analizirane troske. Prema ovom modelu sumporni kapacitet je definisan jednačinom (16):

$$C_s = \exp\left(\frac{-\Delta G^0}{RT}\right) \left(\frac{a_{O^{2-}}}{f_{S^{2-}}}\right) = \exp\left(\frac{-\Delta G^0}{RT}\right) \exp\left(\frac{\xi}{RT}\right) \dots\dots\dots (16)$$

gde je $a_{O^{2-}}$ aktivitet jona kiseonika u troski, $f_{S^{2-}}$ je aktivitet sumpornog jona u troski, R je gasna konstanta, T je temperatura izražena u K, i ΔG je standardna Gibbsova energija. U modelu, odnos između aktiviteta kiseonika O^{2-} i sumpora S^{2-} , $a_{O^{2-}} / f_{S^{2-}}$ je izražena jednačinom (17)

$$\frac{a_{O^{2-}}}{f_{S^{2-}}} = \exp\left(-\frac{\xi}{RT}\right) \dots\dots\dots (17)$$

U slučaju jediničnog sistema, ξ je isključivo zavisna od temperature. Kod višekomponentnih sistema, ξ je u funkciji i temperature i hemijskog sastava troske. Odgovarajući izraz je u tom slučaju prikazana jednačinom (18)

$$\xi = \sum(X_i \xi_i + \xi_{mix}) \dots\dots\dots (18)$$

gde u indeksu i predstavlja komponentu i , X_i je molski udeo posmatrane komponente, ξ_i predstavlja linearnu funkciju temperature za svaku komponentu u troski u odsustvu međusobnog dejstva između različitih vrsta,

ξ_{mix} je uzajamna/zajednička interakcija između različitih vrsta. Prema originalnom radu M.M.Nzotta-e za šestokomponentni sistem troski, sumporni kapacitet se izražava jednačinom (19)

$$\begin{aligned} RT(\ln C_s) = & 58.8157 \cdot T - 118535 - \{X_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot 157705.28 - X_{\text{CaO}} \cdot 33099.43 + X_{\text{MgO}} \cdot \\ & 9573.07 - X_{\text{MnO}} \cdot 36626.46 + X_{\text{SiO}_2} \cdot 168872.59\} - \{ \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MnO}} + \\ & \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{CaO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{MgO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{MnO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{CaO}-\text{FeO}} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{MnO}-\text{FeO}} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{FeO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{MgO}} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{MnO}} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MnO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{CaO}-\text{MgO}-\text{MnO}} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{CaO}-\text{MnO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{MgO}-\text{MnO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{Al}_2\text{O}_3-\text{FeO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{CaO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2} + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2} \\ & + \xi_{\text{Interakcija}}^{\text{MnO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2} \} \dots\dots\dots(19)^{33-35} \end{aligned}$$

Iako se KTH model prvenstveno odnosi na reakciju odsumporavanja u sistemu gas-troska, široku praktičnu primenu je našao na sistemima metal - troska koji je i najčešći oblik procesa odsumporavanja u proizvodnji čelika tokom sekundarne metalurgije u livnom loncu.

U Tabeli 3 su zbirno prikazani svi modeli korišćeni za izračunavanje sumpornog kapaciteta u ovoj tezi.

Tabela 3: Modeli sumpornih kapaciteta

Cs model	Jednačina	Ref.
Sosinsky-Sommerville	$\log C_S = (22690 - 54640\Lambda)/T + 43.6\Lambda - 25.2$	29
Young i saradnici	$\Lambda < 0.8$ $\log C_S = -13.913 + 42.84\Lambda - 23.82\Lambda^2 - 11710/T - 0.0223(\%SiO_2) - 0.2275(\%Al_2O_3)$	30,50
Taniguchi	$\log C_S = 7.350 + 94.89\log\Lambda - 10051 + \Lambda(-338(\%MgO) + 287(\%MnO))/T + 0.2284(\%SiO_2) + 0.1379(\%Al_2O_3) - 0.0587(\%MgO) + 0.0841(\%MnO)$	32
KTH	$RT(\ln C_S) = 58.8157 \cdot T - 118535 - \{X_{Al_2O_3} \cdot 157705.28 - X_{CaO} \cdot 33099.43 + X_{MgO} \cdot 9573.07 - X_{MnO} \cdot 36626.46 + X_{SiO_2} \cdot 168872.59\} - \{$ $\xi_{Interaction}^{Al_2O_3-CaO} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-MnO} + \xi_{Interaction}^{CaO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{MgO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{MnO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{CaO-FeO} + \xi_{Interaction}^{MnO-FeO} + \xi_{Interaction}^{FeO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-CaO-MgO} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-CaO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-MgO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-MgO-MnO} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-MnO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{CaO-MgO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{CaO-MgO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{CaO-MnO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{MgO-MnO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{Al_2O_3-FeO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{CaO-FeO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{MgO-FeO-SiO_2} + \xi_{Interaction}^{MnO-FeO-SiO_2} \}$	33-35

3. OPTIČKI BAZICITET TROSKI

Koncept optičkog baziciteta, najpre je razvijen na staklima od strane Duffy-ja i Ingrama²⁴⁾, a u polje metalurgije primenjen udruženim snagama Duffy-ja, Ingram-a i Sommerville-a kasnih sedamdesetih godina prošlog veka.²⁵⁾ Iako nije frekventno korišćen parametar u metalurškoj pogonskoj praksi, predstavlja koristan alat za dizajniranje visoko efikasnih troski ili odgovarajućih topitelja i alternativni prilaz za procenu sumpornog kapaciteta troske. Optički bazicitet (označen sa Λ) odnosi se na meru baziciteta koja je određena spektroskopskim metodama Paulingove elektronegativnosti sa svaki pojedinačni oksid u sastavu troske. Prednost korišćenja koncepta optičkog baziciteta leži u činjenici da je isti moguće da se primeni kako na jednostavnim tako i na višekomponentnim sistemima troski kakve su troske u sekundarnoj metalurgiji. Vrednosti optičkog baziciteta za svaki oksid objavljeni su u literaturi.³⁰⁾ Na osnovu njihovih vrednosti moguće je na jednostavan način da se proceni sumporni kapacitet troske poznavajući hemijski sastav čelika i troske, temperaturu i aktivitet kiseonika.⁵²⁾

3.1. Izračunavanje optičkog baziciteta troski

Jedan od najčešćih načina izračunavanja srednjih vrednosti optičkog baziciteta troski Λ , bilo kog sastava, predložen od strane Duffy-ja i Ingram-a prikazan je jednačinom (20)⁵³⁾:

$$\Lambda = \frac{\sum x_1 n_1 \Lambda_{th1} + x_2 n_2 \Lambda_{th2} + x_3 n_3 \Lambda_{th3} + \dots}{\sum x_1 n_1 + x_2 n_2 + x_3 n_3 + \dots} \quad \dots\dots\dots (20)$$

gde $\underline{n}$ predstavlja broj atoma kiseonika u molekulu, npr. 2 za SiO_2 ili 3 za Al_2O_3 , $\underline{\Lambda_i}$ je vrednost optičkog baziciteta oksida tj. $\Lambda_{th1}, \Lambda_{th2}, \Lambda_{th3}$ itd., a $\underline{x_i}$ molski udeo oksida u troski tj. x_1, x_2, x_3 itd.

Najviše zastupljene tehnike izračunavanja optičkih baziciteta oksida su iz Pauling-ove elektronegativnosti oksida, iz gustine elektrona ili iz entalpije obrazovanja oksida. Iako se u literaturi⁵³⁻⁶²⁾ mogu naći različite vrednosti optičkog baziciteta, za proračun se uglavnom koriste one koje je odredio Young sa saradnicima:³⁰⁾ CaO-1.0, Al₂O₃-0.605, SiO₂-0.48, MnO-0.59, MgO-0.78 i FeO-0.51.

4. TROJNI DIJAGRAM SISTEMA $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

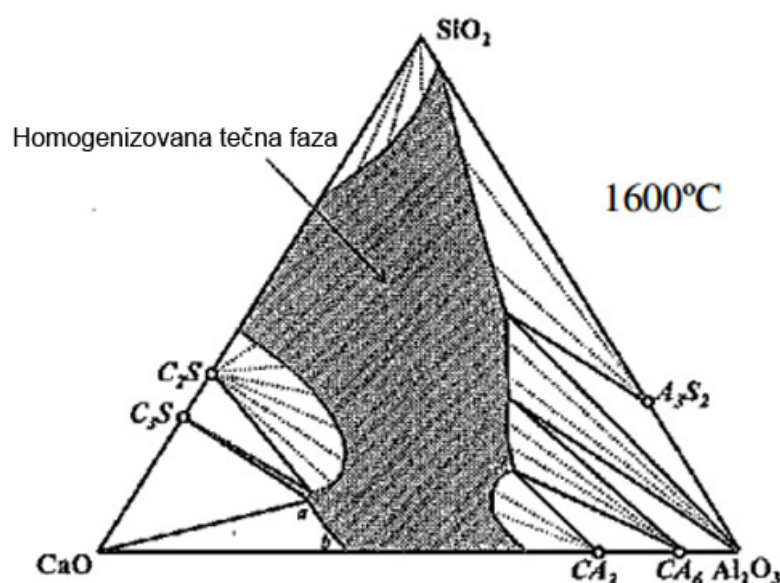
Najvažnija uloga rafinacije čelika u livnom loncu je odsumporavanje, degazacija, smanjenje ili uklanjanje nečistoća u obliku uključaka i odugljičavanje prvenstveno kod čelika sa veoma niskim sadržajem ugljenika. Tokom procesa prerade čelika u livnom loncu različitim postupcima sekundarne metalurgije, sadržaj sumpora je moguće dovesti do sadržaja od 0.0002%.⁶³⁻⁶⁴⁾

U procesu odsumporavanja da bi se olakšala razmena sumpora između čelika i troske u toku rafinacionog procesa, troska treba da bude zasićena sa kalcijum oksidom CaO . Drugim rečima, aktivitet CaO treba da je blizak jedinici kako bi se olakšala razmena sumpora koji je rastvoren u čeliku sa jonom kiseonika.

Uspeh rafinacije čelika sa metalurškog gledišta zavisi od količine i hemijskog sastava troske u toku sekundarne metalurgije. Glavne komponente takve troske su kreč sa oksidom CaO kao glavnim sastojkom, oksidi (Al_2O_3 , SiO_2) kao produkti dezoksidacije i oksid (MgO) kao produkt trošenja vatrostalne obloge. Hemijski sastav troske može da varira u zavisnosti od vrste čelika i primenjenog postupka sekundarne metalurgije za njegovu proizvodnju. Sa druge strane njen mineraloški sastav se generalno svodi na komponente koje u svom sastavu sadrže kreč: dikalcijum silikat ($\text{C}_2\text{S}=\text{2CaO}\times\text{SiO}_2$), trikalcijum silikat ($\text{C}_3\text{S}=\text{3CaO}\times\text{SiO}_2$) i, različite oblike kalcijum aluminata ($\text{CA}=\text{CaO}\times\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CA}_2=\text{CaO}\times\text{2Al}_2\text{O}_3$, $\text{CA}_6=\text{CaO}\times\text{6Al}_2\text{O}_3$, $\text{A}_3\text{S}_2=\text{3Al}_2\text{O}_3\times\text{SiO}_2$).⁶⁵⁻⁶⁷⁾

Trojni dijagram sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ generalno služi kao osnovni sistem troski livnog lonca za predstavljanje pojedinih faza pri ravnotežnim uslovima. Njihov polazaj i međusobni odnos može da pomogne da se odredi optimalan sastav troske na određenoj temperaturi. Na slici 2, osenčeni deo u navedenom trojnom sistemu troski, na temperaturi od 1600°C , pokazuje prihvatljivu oblast

gde je troska homogena i nepoželjno heterogeno područje sa C_3S , C_2S , CA , CA_2 , CA_6 , i A_3S_2 fazama. Poznavanje položaja navedenih faza, je neophodan uslov za optimizaciju sastava troske u cilju efikasnog odsumporavanja. Prema analizi sa dijagrama takva troska mora da ima što je mogući viši aktivitet CaO , bazicitet i tečljivost. Takođe, treba naglasiti da ako je sadržaj CaO kod višekomponentnih troski veći od 60%, takva troska je heterogena, viskozna sa slabom kinetikom što za posledicu ima negativan uticaj na sumporni kapacitet i njenu odsumporavajuću sposobnost.⁶⁸⁾



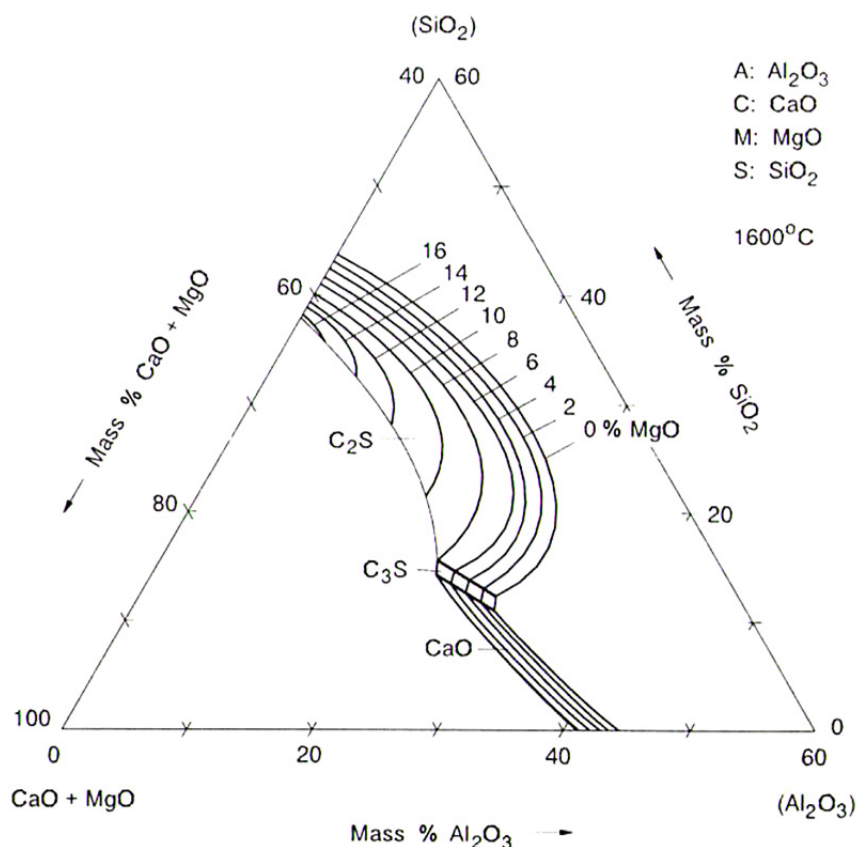
Slika 2: Izotermalni deo faznog dijagrama sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ pri 1600°C ⁶⁹⁾

Osenčena oblast pokazuje prihvatljivu homogenizovanu tečnu oblast na 1600°C . $\text{C}_3\text{S} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{C}_2\text{S} = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CA} = \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CA}_2 = \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CA}_6 = \text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{A}_3\text{S}_2 = 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$.^{69,70)}

Prema Slici 2, da bi se postiglo efektivno odsumporavanje, neophodno je da hemijski sastav troske bude blizak liniji ab ($-\log C_s = 1$). Takav sastav ima visok

bazicitet i aktivitet CaO blizak jedinici što je neophodan preduslov za efikasan proces odsumporavanja.

Na slici 3 prikazan je trojni dijagram sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sa linijom zasićenja krečom i različitim sadržajima $\%\text{MgO}$ pri 1600°C .⁷¹⁾



Slika 3: Trojni dijagram sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ sa linijom zasićenja krečom i različitim sadržajima $\%\text{MgO}$ pri 1600°C .⁷¹⁾

U toku rafinacije čelika u livnom loncu, sa rastvorljivošću oksida MgO kao produkta trošenja vatrostalne obloge, njegova tačka topljenja raste. Istovremeno oksid CaO reaguje sa SiO_2 stvarajući teškotopive kalcijum silikate.⁷²⁾ Prema dijagramu na Slici 3, za efikasno odsumporavanje poželjno je da hemijski sastav troske bude van oblasti stvaranja teškotopivih di-kalcijum (C_2S) i tri-kalcijum (C_3S) silikata.

5. RASPODELA SUMPORA

5.1. Koeficijent raspodele sumpora

Raspodela sumpora između troske i metala L_s je sledeći važan pokazatelj efikasnosti procesa odsumporavanja. Za vreme dok je troska u dodiru sa tečnim metalom, sumpor se raspodeljuje na metal i trosku, a konstanta raspodele $L_s = (\%S)/[\%S]$ određuje stepen prelaza ovog iz jedne u drugu fazu. Ali, pošto mnogi faktori utiču kako na aktivitet rastvorenog sumpora u metalu tako i na aktivitet učesnika i produkata desulfuracije u troski, to termodinamička konstanta ravnoteže odgovarajuće reakcije desulfuracije, pored temperature, zavisi i od sastava metala i troske. Numerička vrednost ove konstante zapravo jako varira u zavisnosti od sastava metala i troske kao i od temperature i kiseoničnog potencijala sistema troska-metal-gas.

Kako je pokazano jednačinom (4) reakcija raspodele sumpora u ravnotežnim uslovima može da se posmatra kao reakcija izmene između metala i troske tj. sumpora u metalu i kiseonika u troski, za koju je konstanta ravnoteže K_4 data sledećim izrazom (21)⁷³⁾

$$K_4 = \frac{[a_o](a_{s^{2-}})}{[a_s](a_{o^{2-}})} \dots\dots\dots (21)$$

Kako u pogonskim uslovima nije realno izmeriti sulfidne i oksidne jone, to je mnogo jednostavnije posmatrati ravnotežne uslove između troske i gasne faze kada je hemijski potencijal svake vrste poznat. Ovakav pristup je doveo do razvoja termina poznatog kao kapacitativnost troske, koji u sistemu troska-metal analogno ranije definisanoj jednačini za sumporni kapacitet u sistemu gas-troska od strane Fincham-a i Richardson-a, za sistem metal-troska glasi kao što je pokazano u Poglavlju 2 jednačinom (3).

Saglasno Wagner-ovom⁴³⁾ izrazu (9), aktivitet sumpora u čeliku je prikazan jednačinom (22) gde je a termodinamički aktivitet povezan sa odgovarajućim standardnim stanjem.

$$[a_s] = (\text{tež. \%S}) \cdot f_s \quad \dots\dots\dots (22)$$

gde f_s predstavlja Henrijev koeficijente aktiviteta sumpora u metalu.

Na osnovu jednačine (5) koeficijent raspodele sumpora L_s je moguće prikazati sledećim izrazom (23) :

$$L_s = \frac{(\text{tež. \%S})_{\text{troska}}}{[\text{tež. \%S}]_{\text{metal}}} = K_1 \frac{(a_{\text{O}^{2-}})}{[a_{\text{O}}]} \frac{f_s}{f_{\text{S}^{2-}}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

Pošto je konstanta raspodele sumpora L_s , mera za efikasnost odsumporavanja, to njena numerička vrednost treba da bude što veća.⁷⁴⁾ Iako u literaturi,^{12,31,73-79)} postoji veliki broj izraza za određivanje koeficijenta raspodele sumpora između troske i čelika, opšte je prihvaćen izraz (24) koji je u svom originalnom radu dala M.T.Andersson.⁵¹⁾ U ovoj tezi za određivanje koeficijenta raspodele sumpora (L_s) koristiće se izraz prikazan jednačinom (24).

$$\log L_s = \log(\text{tež. \%S}) / [\text{tež. \%S}] = -935/T + 1.375 + \log C_s + \log f_s - \log[a_o] \quad \dots\dots (24)$$

gde je: T- temperature čelika u stepenima Kelvina, C_s - sumporni kapacitet troske, f_s - Henrijev koeficijent aktiviteta sumpora u metalnoj fazi i $[a_o]$ - aktivitet kiseonika u čeliku.

Prema jednačini (24), da bi se odredio koeficijent raspodele sumpora između troske i metala L_s , neophodno je da se poznaje hemijskog sastav čelika,

kiseonični potencijal sistema, temperatura i sumporni kapacitet posmatrane troske.

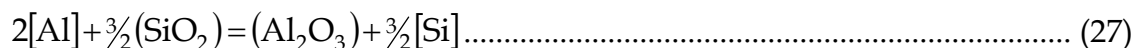
Koeficijent aktiviteta sumpora određuje se korišćenjem interakcionih parametara između sumpora i elemenata iz sastava čelika kao što su: ugljenik, silicijum, mangan, aluminijum itd. U toku rafinacije čelika u livnom loncu aluminijum i/ili aluminijum-silicijum umirenog čelika moguće je istovremeno odvijanje reakcija između troske i metala $[Al]/(Al_2O_3)$, $[Si]/(SiO_2)$, $[Al]/[Si]/(Al_2O_3)/(SiO_2)$ itd. te se kiseonični potencijal između navedenih reakcija izračunava pod pretpostavkom da je najmanje jedna od reakcija u ravnoteži.⁸⁰⁾

6. AKTIVITET KISEONIKA U TROSCI I ČELIKU

Za efikasno duboko odsumporavanje čelika jedan od neophodnih preduslova je da isti mora da bude dezoksidisan sa dobrom kontrolom sadržaja kiseonika u čeliku $[a_o]$.⁵⁸⁾ U tu svrhu za dobru dezoksidaciju, aluminijum je kao najvažniji element pogodan da snizi sadržaj kiseonika do 10 ppm.⁸¹⁻⁸²⁾

Korišćenjem postojećih pogonskih analiza kao što su temperatura i hemijski sastav čelika i troske, moguće je izračunavanje aktiviteta kiseonika u čeliku na kraju procesa vakuumiranja i u uslovima kada pogonska praksa ne uključuje njegovo merenje.

Kod aluminijum umirenog niskougleničnog čelika u kombinaciji sa silicijumom moguće su reakcije dezoksidacije prikazane jednačinama (25), (26) i (27).^{80,83)}



Odgovarajuće slobodne entalpije navedenih reakcija prikazane su jednačinama (28), (29) i (30):

$$\Delta G^0_{Al} = -1205115 + 386.7T \dots\dots\dots (28)$$

$$\Delta G^0_{Si} = -581900 + 221.8T \dots\dots\dots (29)$$

$$\Delta G^0_{Al-Si} = -329300 + 53.6T \dots\dots\dots (30)$$

Konstante ravnoteže za jednačine (25), (26) i (27) su:

$$K_{Al} = \exp \frac{-\Delta G^0_{Al}}{RT} = \frac{a_{(Al_2O_3)}}{[a_o]^3 \cdot [a_{Al}]^2} \dots\dots\dots (31)$$

$$K_{Si} = \exp \frac{-\Delta G^0_{Si}}{RT} = \frac{a_{(SiO_2)}}{[a_o]^2 \cdot [a_{Si}]} \dots\dots\dots (32)$$

$$K_{\text{Al-Si}} = \exp \frac{-\Delta G^0_{\text{Al-Si}}}{RT} = \frac{a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} \cdot [a_{\text{Si}}]^{\frac{3}{2}}}{a_{(\text{SiO}_2)}^{\frac{3}{2}} [a_{\text{Al}}]^2} \dots\dots\dots (33)$$

Aktiviteti oksida Al_2O_3 i SiO_2 u troski u jednačinama (31) i (32) moguće je da se odrede iz jednačine Ohta i Suita (34) i (35)⁸⁴, a za izračunavanje aktiviteta aluminijuma, silicijuma i sumpora u čeliku Wagner-ova⁴³) jednačina (Videti jednačinu (9) u Poglavlju 2.1). Kako su naveli autori⁸⁴), jedini ograničavajući faktor jednačine (35) je važnost za troske sa sadržajem %CaO=10÷60, %SiO₂=10÷50, %Al₂O₃=0÷50 i %MgO=0÷30.

Za izračunavanje interakcionih koeficijenta koriste se izrazi objavljeni u literaturi kao što su:^{30,35,76,85)}

$$\begin{aligned} e_{\text{S}}^{\text{S}} &= (-0.153 + 233/T), & e_{\text{S}}^{\text{C}} &= 0.113, & e_{\text{S}}^{\text{Si}} &= 0.063, & e_{\text{S}}^{\text{Al}} &= 0.035, & e_{\text{S}}^{\text{Mn}} &= -0.026, \\ e_{\text{Al}}^{\text{Al}} &= (0.011 + 63/T), & e_{\text{Al}}^{\text{C}} &= 0.091, & e_{\text{Al}}^{\text{Si}} &= 0.056, & e_{\text{Al}}^{\text{S}} &= 0.030, & e_{\text{Al}}^{\text{Mn}} &= 0.030, \\ e_{\text{Si}}^{\text{Si}} &= (0.089 + 34.5/T), & e_{\text{Si}}^{\text{S}} &= 0.056, & e_{\text{Si}}^{\text{Al}} &= 0.058, & e_{\text{Si}}^{\text{Mn}} &= 0.002. \end{aligned}$$

$$\log a_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \{-0.275(\% \text{CaO}) + 0.167(\% \text{MgO})\} / (\% \text{SiO}_2) + 0.033(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.560 \dots\dots (34)$$

$$\log a_{\text{SiO}_2} = 0.036(\% \text{MgO}) + 0.061(\text{Al}_2\text{O}_3) + 0.123(\% \text{SiO}_2) - (\% \text{SiO}_2) / (\% \text{CaO}) - 6.456 \dots (35)$$

Iz jednačina (31) i (32) izračunavanje aktiviteta kiseonika u čeliku je pokazano izrazima (36) i (37).⁸⁶⁻⁸⁸⁾

$$[a_0] = \sqrt[3]{\frac{a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}}{[a_{\text{Al}}]^2 \cdot e^{\frac{-\Delta G^0}{RT}}}} \dots\dots\dots (36)$$

$$[a_0] = \sqrt{\frac{a_{(\text{SiO}_2)}}{[a_{\text{Si}}] \cdot e^{\frac{-\Delta G^0}{RT}}}} \dots\dots\dots (37)$$

7. MODELOVANJE ZAVRŠNOG SADRŽAJA SUMPORA U ČELIKU

7.1. Uvod

Današnja proizvodnja čelika je sve više usko specijalizovana, zbog sve većih i strožih zahteva za boljim mehaničkim osobinama. Kako su mehaničke osobine čelika usko povezane sa sadržajem pojedinih elemenata kao što su sumpor, fosfor, kiseonik, vodonik, azot itd., njihova kontrola u sve užim granicama, čini izazov mnogim inženjerima za usavršavanje postojeće i razvijanje novih postupaka proizvodnje. Takva proizvodnja je izuzetno zahtevna i traži dobro poznavanje kinetike i termodinamike procesa koja se odvija u toku rafinacije čelika u livnom loncu.⁸⁹⁾

Dobro je poznato da metalurški procesi pripadaju složenim fizičko-hemijskim procesima koji su teoretski opisani uz pomoć višedimenzionalnih, uglavnom, nelinearnih, međusobno zavisnih parametara. Određivanje ovih parametara modelovanjem uz pomoć empirijskih, statističkih jednačina i regresionih analiza ili neuronskih mreža koje su primenjene na izmerenim podacima su neophodan postupak u savremenoj metalurgiji.⁹⁰⁾ Proces modelovanja nisu jednostavni, posebno u proizvodnim-pogonskim uslovima. Veliki broj ograničavajućih faktora koji su u većoj ili manjoj meri međusobno uslovljeni, je ono što modelovanje čini složenim ali izazovnim i zanimljivim postupkom za postizanje željenog cilja. Numerička analiza zbog preciznosti, brzine i niskih troškova, je široko zastupljen pomoćni alat izrade modela sa ciljem izučavanja uticaja pojedinih parametara u mnogim sferama simulacije procesa proizvodnje čelika. U dužem periodu predstavlja dobru osnovu za optimizaciju i procesnu kontrolu onoga što se događa tokom proizvodnje čelika kako u primarnoj proizvodnji u konvertoru ili EAF pećima tako i tokom sekundarne rafinacije u livnom loncu.^{89,91)}

Kako je sumpor ključni element za kvalitet gotovog proizvoda, modelovanje procesa odsumporavanja i kontrola sadržaja sumpora preko predviđanja njegovog završnog sadržaja u pojedinim fazama izrade gvožđa i čelika je od ključnog značaja za izradu tzv. clean steel (čistog čelika).⁹²⁻⁹⁴ Da bi se dobila dobra reprezentivnost uticajnih parametara na tok rafinacije čelika neophodna je dobra tehnološka stabilnost i pouzdanost podataka za dalju obradu. U većini slučajeva njihova međusobna zavisnost nije linearna što za posledicu ima uticaj na uspešnost predviđanja predloženog modela.

7.2. Opis predloženog modela

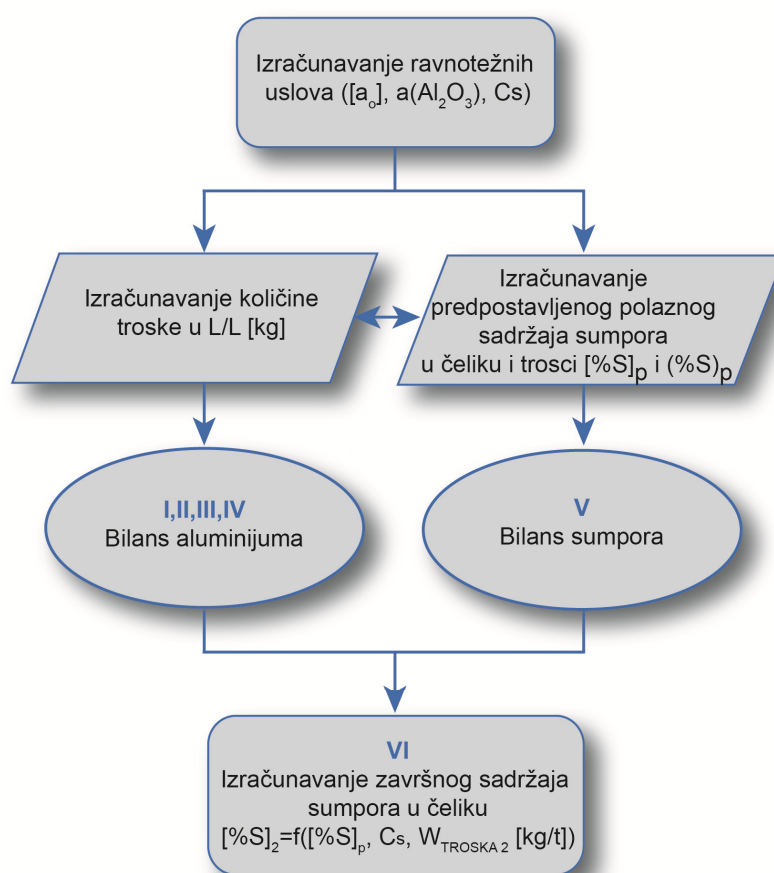
U zavisnosti od načina ispitivanja, mnogi od objavljenih modela, polaze od termodinamičke analize procesa odsumporavanja koja se odvija na međufazi troska-metal-gas.^{16, 30-41, 44, 91-97} Za proizvodne uslove kakva je rafinacija čelika u livnom loncu reakcije koje se odvijaju na međufazi troska - metal su od krucijalnog značaja za proces modelovanja. Iako temperatura i sastav troske veoma utiču na tačnost predviđanja završnog sadržaja sumpora tokom rafinacije u livnom loncu, mnogi modeli u sebi ne sadrže teško fizički merljiv parametar kakav je količina prisutne troske.

Pored sumpornog kapaciteta i kiseoničnog potencijala metala i troske kao najčešćih činilaca koji se koriste u objavljenim modelima, uticaj i značaj količine troske je gotovo zanemaren. Zbog svega navedenog, u ovoj disertaciji, količina troske biće razmatrana kao parametar na kome će da se zasniva predloženi model za kontrolu završnog sadržaja sumpora.

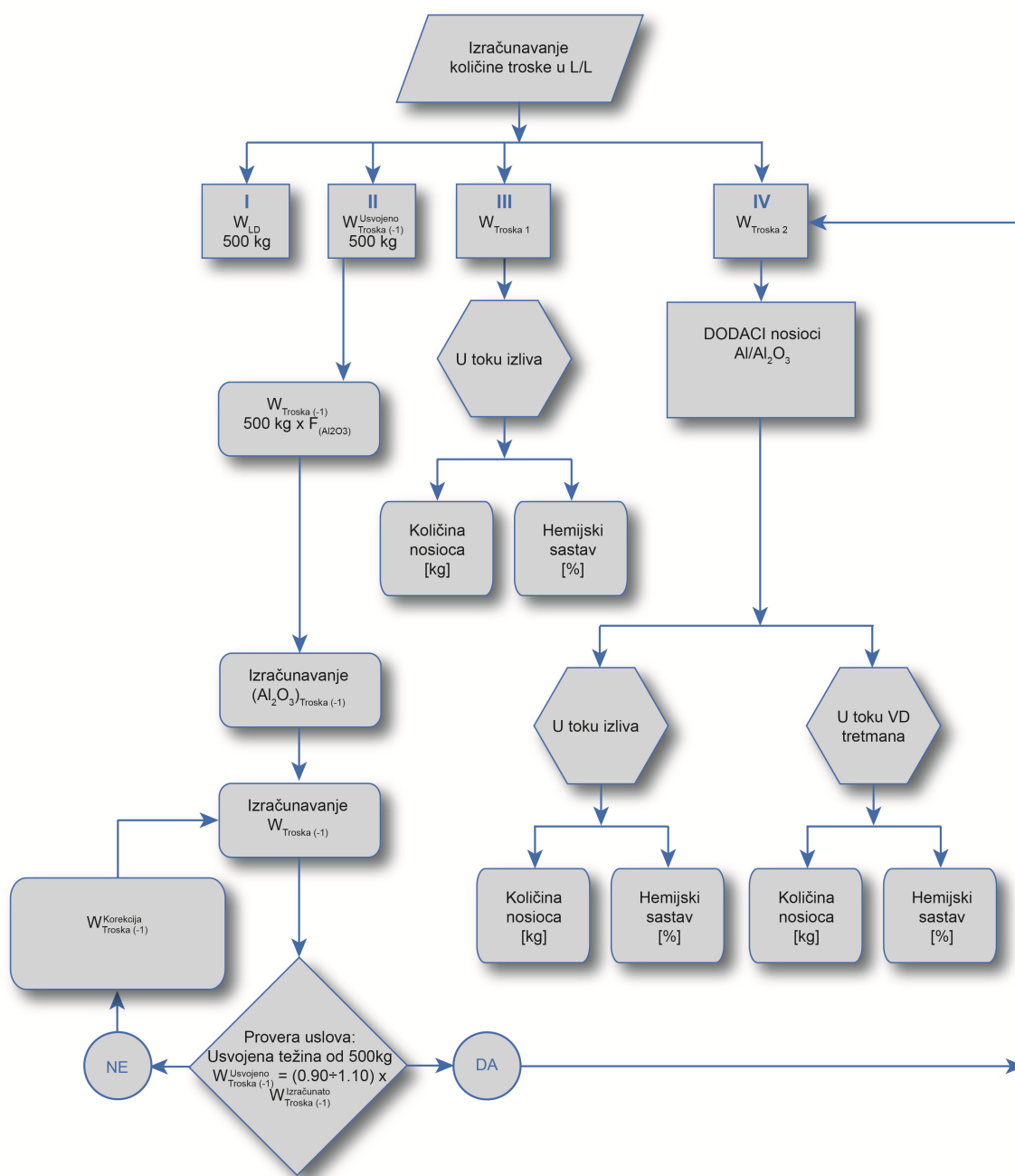
U Tabeli 4 i Slikama 4-6 dat je šematski prikaz predloženog modela.

Tabela 4: Šematski prikaz modela

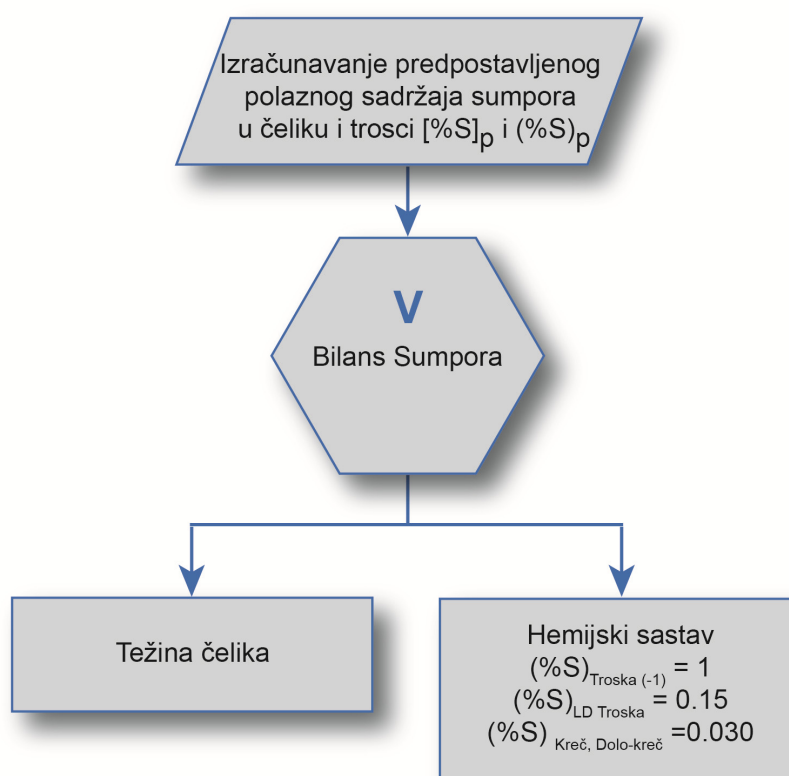
Prvikorak	Procena količine troske u livnom loncu: $TROSKA_{LD}$, $TROSKA_{(-1)}$, $TROSKA_1$, $TROSKA_2$;
Drugi korak	Izračunavanje polazne koncentracije sumpora u čeliku i troski: $[\%S]_p$, $(\%S)_p$;
Trećikorak	Procena završnog sumpora na osnovu analize uticajnih faktora $[\%S]_2$



Slika 4: Algoritam toka proračuna završnog sadržaja sumpora prema predloženom modelu



Slika 5: Algoritam toka proračuna količine troske u livnom loncu



Slika 6: Algoritam toka proračuna polaznog sadržaja sumpora u troski i čeliku

Kao što pokazuju Tabela 4 i Slike 4-6, predloženi model predviđa da se u prvom koraku izračuna procenjena količina troske kako one koja dospe sa izlivanjem čelika iz konvertora, tako i troske zaostale na zidovima livnog lonca predhodno odlivenih šarži i količina troske nastale kao produkt dezoksidacije. Iako su navedene količine troske teško fizički merljive, ovakav pristup njihovog približnog određivanja nije nepoznat u literaturi.^{89,98)} U proizvodnoj praksi, zbog unapred definisanog ciklusa livenja često se događa da se proba troske i metala u toku sekundarne metalurgije ne uzima pre samog početka procesa rafinacije nego tek nakon kratkog intezivnog mešanja metalnog kupatila argonom. Iz navedenog razloga, polazni sadržaj sumpora je nepoznat. Da bi se odredio, u drugom koraku predloženog modela, poslužiće materijalni bilans svih dodataka u livni lonac koji u sebi sadrže sumpor i aluminijum kao glavnog

nosioca produkata dezoksidacije. U trećem koraku na osnovu analize uticajnih faktora preko regresionih jednačina daće se procena očekivanog završnog sadržaja sumpora na kraju procesa vakuumiranja u livnom loncu.

7.3. Usvojene pretpostavke i pojednostavljenja

Opšte je poznatno u praksi modelovanja, da razvijeni model treba da ispuni unapred postavljene ciljeve. Međutim, za praktičnu primenu i postizanje cilja modela, često je potrebno je da se usvoje određene pretpostavke i pojednostavljenja ili da se ispune drugi uslovi koji se u celini odnose na model.⁹⁹⁾

Za uspešnost modelovanja, u uslovima kada svi polazni podaci nisu na raspolaganju, neophodno je da se preko dovoljno pouzdanog alata simulira njihov nedostatak. Proračunom materijalnog bilansa pojedinih elemenata moguće je da se oni približno odrede. Zbog svega navedenog za dalji proračun usvajaju se sledeća pojednostavljenja i pretpostavke:

1. Bilans aluminijuma i sumpora poslužiće za određivanje količine troske i polaznog sadržaja sumpora u troski i čeliku $[\%S]_p$ i $(\%S)_p$
2. Količina troske koja tokom izliva iz konvertora dospe u livni lonac (u daljem tekstu $TROSKA_{LD}$) i količina zaostale troske na zidovima livnog lonca (u daljem tekstu $TROSKA_{(-1)}$) od po 500 kg svaka
3. Procenjeni sadržaj sumpora: 0.15% u $TROSKA_{LD}$ i 1% u $TROSKA_{(-1)}$

7.4. Obrazovanje troske za odsumporavanje čelika u livnom loncu

Konvertorska troska koja dospe u livni lonac u toku izliva čelika ima, zbog svog oksidacionog potencijala, znatan uticaj na proces odsumporavanja u livnom

loncu. Dobro je poznato iz metalurške prakse da se bez merenja, njeno prisustvo teško određuje čak i nakon postupka mehaničkog uklanjanja. Pošto ista nije moguće da se u potpunosti ukloni iz livnog lonca, neophodno je zbog njenog uticaja na konačni sadržaj sumpora u čeliku na kraju procesa rafinacije da se odredi njena približna količina. Zaostala troska ulepljena i penetrirana u ozid livnog lonca kao zaostatak od predhodno odlivene šarže je takođe količina koja se teško procenjuje. Procenjene količine obe navedene troske određen numeričkom analizom, predložen model koristi sa krajnjim ciljem predviđanja očekivanog sadržaja sumpora na kraju procesa rafinacije u livnom loncu.

Kao što je navedeno u Tabeli 4, količina troske koja u toku izliva čelika iz konvertora dospe u livni lonac označena je sa $W_{TROS\text{KALD}}$, a sa $W_{TROS\text{KA}(-1)}$ označeni su oni delovi troske predhodnih šarži koji zaostanu i/ili budu "upijeni" u ozid livnog lonca kao posledica pražnjenja livnog lonca u toku livenja. Obe količine troske su neželjene ali i neminovne komponente troske livnog lonca.

U čeličani Dillingen u dužem periodu rada procenjena je i usvojena težina ove dve komponente troski u količini po 500 kg svaka.

Pored količina troski $W_{TROS\text{KALD}}$ i $W_{TROS\text{KA}(-1)}$, u procesu odsumporavanja učestvuje i troska koja se formira kao produkt dezoksidacije legirajućih elemenata i drugih dodataka koji se u toku rafinacije dodaju u livni lonac. Prema jednačinama (38) i (39) odrediće se njihova približna količina. Količina troske za odsumporavanje označena sa $W_{TROS\text{KA}1}$ predstavlja procenjenu količinu troske posle intenzivnog mešanja argonom dok je sa $W_{TROS\text{KA}2}$ označena procenjena količina troske u livnom loncu posle vakuum degazacije. Obe troske dobijene su sabiranjem svih dodataka u livni lonac koje učestvuju u obrazovanju troske i dodavanjem 1000 kg kao količine $W_{TROS\text{KALD}}$ i $W_{TROS\text{KA}(-1)}$, t.j. ($W_{TROS\text{KALD}} + W_{TROS\text{KA}(-1)} = 1000 \text{ kg}$).

$$W_{TROSKA\ 1}^{Dodaci} = W_{Kreč}^{Izliv} + W_{Dolo\ kreč}^{Izliv} + \Delta[\%Al_2O_3]_1 + W_{TROSKA\ LD}^{Usvojeno} + W_{TROSKA\ (-1)}^{Usvojeno} \dots\dots\dots (38)$$

$$W_{TROSKA\ 2}^{Dodaci} = W_{Kreč}^{Izliv} + W_{Dolo\ kreč}^{Izliv} + W_{Kreč}^{VD} + W_{ŠamotVD}^{VD} \cdot 0.4 + \Delta[\%Al_2O_3]_2 + W_{TROSKA\ LD}^{Usvojeno} + W_{TROSKA\ (-1)}^{Usvojeno} \dots\dots (39)$$

Članovi jednačina (38) i (39) $\Delta[\%Al_2O_3]_1$ i $\Delta[\%Al_2O_3]_2$ odrediće se preko bilansa aluminijuma korišćenjem jednačina (40) i (41).

Usvojene procenjene količine troski $W_{TROSKALD}$ i $W_{TROSKA(-1)}$ i koncentracija sumpora u istim od 0.15% u $W_{TROSKALD}$ i 1% u $W_{TROSKA(-1)}$ su prva aproksimacija koje ove parametre čine konstantnim za sve analizirane šarže. U ovoj tezi za proračun neophodnih parametara za određivanje njihove količine pokazaće se postupak preko bilansa aluminijuma tj. preko produkata dezoksidacije $[Al] \rightarrow (Al_2O_3)$ i bilansa ulaza i izlaza svih količina dodataka koji u sebi sadrže aluminijum Al ili oksid aluminijuma Al_2O_3 .

Potencijalna razlika između procenjene i stvarne količine $W_{TROSKALD}$ i $W_{TROSKA(-1)}$ na kojima numerička analiza treba da se zasniva, mogu da imaju nepovoljan uticaj na pouzdanost predviđanja. Iz ovog razloga neophodna je detaljnija analiza da bi se što približnije odredile njihove količine za svaku šaržu. U tom smislu, u daljim proračunima sprovedeće se postupak procene ovih količina korišćenjem bilansa aluminijuma.

7.5. Bilans aluminijuma

Formula za izračunavanje bilansa aluminijuma za trosku livnog lonca data je jednačinom (40) i glasi:

$$\sum_{i=1}^n W_{\text{Dodato}}^{(i)} \cdot F_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}^{(i)} = W_{\text{TROSKA}}^{\text{Izlaz}} \cdot \frac{(\% \text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{TROSKA}}^{\text{Izmereno}}}{100} \dots\dots\dots (40)$$

gde je:

W: količina troske u kilogramima

$F_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}$: korektivni faktor za izračunavanje količine Al_2O_3 u kilogramima za svaki dodatak u livni lonac

Leva ulazna strana bilansne formule uzima u obzir količinu svih komponenti troski tj. ono što od dodataka u livni lonac formira (Al_2O_3) kao što je prikazano jednačinom (41):

$$\begin{aligned} \sum_{i=4}^n W_{\text{Dodato}} \cdot F_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} = \\ = W_{[\text{Al}] \rightarrow (\% \text{Al}_2\text{O}_3)} \cdot \frac{102}{54} + W_{\text{CaAl}_4\text{O}_7} \cdot \frac{204}{260} + W_{\text{Samot}} \cdot 0.4 + W_{\text{TROSKA}(-1)} \cdot \frac{(\% \text{Al}_2\text{O}_3)}{100} \dots (41) \end{aligned}$$

Na desnoj strani jednačine (41) za prva dva člana uključujući i korektivni faktor $F_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}$ uzeti su stehiometrijski odnosi, a za druga dva, težinski sadržaji aluminijuma i/ili aluminijum oksida u svakom od njih. Desna strana bilansne jednačine aluminijuma u jednačini (40) tada postaje

$$W_{\text{TROSKA}}^{\text{Izlaz}} \times \frac{(\% \text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{TROSKA}}^{\text{Izlaz}}}{100} = W_{\text{TROSKA}2} \cdot \frac{(\% \text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{TROSKA}2}^{\text{Izmereno}}}{100} \dots\dots\dots (42)$$

7.6. Određivanje korektivnog faktora za proračun Al_2O_3 u kg, $F(\text{Al}_2\text{O}_3)$

Za izračunavanje korektivnog faktora $F(\text{Al}_2\text{O}_3)$ za proračun Al_2O_3 u kg svih dodataka u livni lonac koji sadrže aluminijum ili Al_2O_3 , poslužiće statistička obrada izmerenih srednjih vrednosti Al_2O_3 u troski. Korektivni faktor F se uvodi u proračun zbog činjenice postojanja razlike između stvarne i računskim

putem određene količine prisutne troske u livnom loncu. Takođe, na ovaj način će moći da se predvidi koja je to količina troske $W_{TROSKA(-1)}$ koja ostane upijena na zidovima livnog lonca.

Količina Al_2O_3 u troski zaostaloj na zidovima livnog lonca odrediće se prema jednačinama (43)÷(45):

$$(Al_2O_3)_{TROSKA(-1)} = W_{TROSKA(-1)}^{Izrač.} \times Prosek (\%Al_2O_3)_{2(\text{šarže } 1\div 6)}^{Izmereno} \dots\dots\dots (43)$$

$$(Al_2O_3)_{TROSKA(-1)} = W_{TROSKA(-1)}^{Izrač.} \times Prosek (\%Al_2O_3)_{2(\text{šarže } 7\div 12)}^{Izmereno} \dots\dots\dots (44)$$

$$(Al_2O_3)_{TROSKA(-1)} = W_{TROSKA(-1)}^{Izrač.} \times Prosek (\%Al_2O_3)_{2(\text{šarže } 13\div 31)}^{Izmereno} \dots\dots\dots (45)$$

7.7. Bilans sumpora

Postojanost bilansa sumpora je od primarne važnosti za tumačenje rezultata odsumporavanja. Za izradu korektnog bilansa sumpora neophodno je da se ispuni uslov dat jednačinom (46):

$$[S] + (S) + \{S\} = "S" = \text{const} \dots\dots\dots (46)$$

Međutim, u postupku odsumporavanja koji se u ovoj doktorskoj tezi razmatra, pošto je vreme operativnih postupaka veoma kratko, prelaz sumpora u gasnu fazu smatraće se da je zanemarljiv. Iz ovog razloga uslov dat jednačinom (51) se redukuje do

$$[S] + (S) = "S" = \text{const} \dots\dots\dots (47)$$

tako da bilansna jednačina sumpora između bilo kog polaznog i krajnjeg stanja postaje

$$[S]_{\text{p}} + (S)_{\text{p}} = [S]_{\text{z}} + (S)_{\text{z}} = \text{const} \dots\dots\dots (48)$$

Proračun polaznih vrednosti sadržaja sumpora u čeliku $[S]_{\text{p}}$ i troski $(S)_{\text{p}}$ urađeni su prema jednačini (49):

$$W_{\text{ČELIK}} \cdot \frac{[\%S]_1}{100} + W_{\text{TROSKA(-1)}} \cdot \frac{(\%S)}{100} = W_{\text{ČELIK}} \cdot \frac{[\%S]_2}{100} + W_{\text{TROSKA2}} \cdot \frac{(\%S)_2}{100} \dots\dots\dots (49)$$

Ako se leva, ulazna, strana jednačine (49) označi sa " S''_1 ", a desna, izlazna strana sa " S''_2 ", tada se jednačina (49) transformiše u nejednakost (50):

$$[S]_1 + (S)_1 = S''_1 \neq S''_2 = [S]_2 + (S)_2 \dots\dots\dots (50)$$

7.8. Polazni sadržaj sumpora

Nedostatak polaznog sadržaja sumpora, $[\%S]_{\text{p}}$, može da se na jednostavan način izračuna iz bilansne jednačine (48) uvođenjem vrednosti $[\%S]_2$ i $(\%S)_2$ na izlaznoj strani i $[\%S]_{\text{LD}} + (\%S)_{\text{LD}} = (\%S)_{\text{p}}$ na ulaznoj strani. Tada nedostatak polaznog sadržaja sumpora se procenjuje prema jednačini (51):

$$[S]_{\text{p}} = [S]_2 + (S)_2 - (S)_{\text{p}} \dots\dots\dots (51)$$

gde je:

$$(S)_{\text{p}} = (S)_{\text{TROSKA(-1)}} + (S)_{\text{LD}} + \sum (S)_{\text{LD}}^{\text{Dodaci}} \dots\dots\dots (52)$$

i

$$\Sigma(S)_{LD}^{Dodaci} = (W_{Kreč} + W_{Dolo-kreč}) \cdot \frac{0.03}{100} \dots\dots\dots (53)$$

Oba polazna podatka, $[S]_p$ i $(S)_p$, su usvojeni pod pretpostavkom da se u toku izliva šarže iz kiseoničnog konvertora, u livni lonac ne dodaju sredstva za obrazovanje troske, legiranje i dezoksidaciju. Kako u metalurškoj praksi to često nije slučaj, njihove vrednosti moraju da se uporede sa $[S]_1$ i $(S)_1$ za istu šaržu.

Vrednosti $[S]_p$ i $(S)_p$ su povezane sa pretpostavljenom tačkom na kojoj bi proces odsumporavanja mogao da počne, i oni su određeni iz završnog sadržaja sumpora, $[S]_2$ i $(S)_2$, dok su $[S]_1$ i $(S)_1$ povezani sa procesom odsumporavanja posle intenzivnog mešanja metalnog kupatila za koje vreme se odvija samo jedan deo prelaza sumpora iz metala u trosku i u tom slučaju, $[S]_p$ treba da bude veći od $[S]_1$.

7.9. Regresiona analiza

Regresiona analiza je metod kojim se ispituje i utvrđuje zavisnost između dve ili više promjenljivih, tj. sagledava uticaj promene jedne ili više promenljivih na promenu drugih promenljivih.¹⁰⁰ Ako se ispituje zavisnost jedne pojave od dve ili više nezavisnih pojava, onda se govori o višestrukoj ili multiploj regresiji.¹⁰¹ Koliko je jaka međuzavisnost zavisne promenljive sa svim nezavisnim promenljivima izražava se preko koeficijenta višestruke korelacije **R**. Podaci višestruke korelacije, kod koje se razmatra međusobni uticaj promenljivih, prikazuju se dijagramom raspršavanja tzv. scatter diagram.^{100, 102-103}

Tumačenje stepena povezanosti između promenljivih izražen preko koeficijenta višestruke korelacije **R** je često različito u zavisnosti od oblasti primene, prirode i sadržaja posmatranih pojava. U literaturi se navode okvirne granice tako da za korelaciju:¹⁰⁴⁻¹⁰⁶

- 1) ispod 0.30 – se smatra da postoji slaba korelacija;
- 2) od 0.30 do 0.50 da postoji osrednja korelacija;
- 3) od 0.50 do 0.70 da postoji dosta visoka korelacija;
- 4) preko 0.70 postoji visoka korelacija;

Parametri koji će biti uključeni u višestruku regresionu jednačinu su izabrani korišćenjem bivarijatne regresije.¹⁰⁷⁾ U svim jednačinama $[\%S]_2^{\text{Izračunato}}$ je zavisna promenljiva. Kao nezavisna promenljiva u svakoj bivarijatnoj regresiji koristiće se jedan ili više parametara koji su na raspolaganju: pretpostavljeni polazni sadržaj sumpora - $[\%S]_p$, sumporni kapacitet - C_s , količina troske u livnom loncu na kraju procesa rafinacije - W_{TROSKA2} , temperatura procesa - T , i aktivitet kiseonika - a_o .

8. EKSPERIMENTALNI DEO

8.1. Uvod

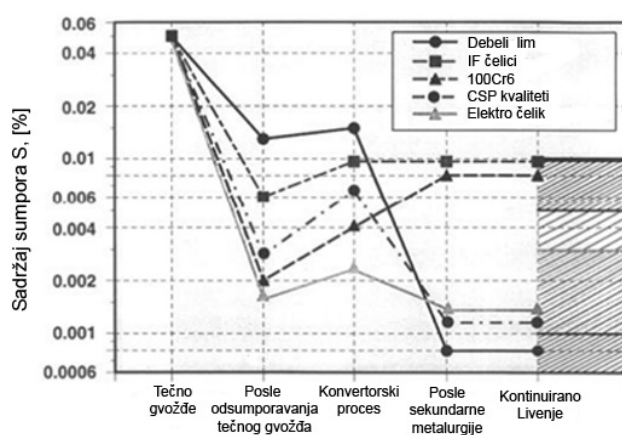
U modernim čeličanama agregati za primarnu proizvodnju čelika kao što su konvertori i elektrolučne peći, koriste se za preradu tečnog gvožđa i čeličnog otpatka u čelik. Svi ostali metalurški ciljevi kao što su legiranje, dezoksidacija, podešavanje hemijskog sastava i temperature metalnog kupatila, ostvaruju se u livnom loncu za vreme procesa sekundarne metalurgije.⁸⁰⁾ Metalurška prednost ovakvog tretmana je postizanje izuzetno niskih koncentracija sumpora i odlična kontrola nemetalnih uključaka uz fino podešavanje temperature i hemijskog sastava za optimalno livenje posebno na mašinama za kontinuirano livenje slabova.¹⁰⁸⁾

U čeličani Dillinger Hütte u Dillingenu (Nemačka), proizvodnja čistog čelika sa kontrolisanim sastavom sumpora i drugih nečistoća počinje vanpećnim odsumporavanjem tečnog gvožđa. Tokom vanpećnog tretiranja tečnog gvožđa, sadržaj sumpora se sa prosečne početne vrednosti 570 ± 160 ppm pre tretmana, svede na sadržaj od 95 ± 45 ppm pre ulivanja istog u konvertor. Treba napomenuti da su navedene vrednosti promenljive u zavisnosti od dnevnog proizvodnog programa čeličane. Tokom izrade tečnog čelika u dva 185 tonska kiseonična konvertora sa prođuvavanjem argona i/ili azota kroz porozne vatrostalne opeke smeštene u podu, sadržaj sumpora se neznatno smanji na nivo 90 ± 30 ppm. Sa navedenom koncentracijom sumpora tečan čelik se izliva u livni lonac koji se zatim transportuje do uređaja za sekundarnu metalurgiju.

Početno legiranje i dezoksidacija čelika se vrši za vreme izlivanja u livni lonac. Sekundarnu metalurgiju čini tri vakuum postrojenja tzv. VTD (Vacuum Tank Degasser) u daljem tekstu VD jedinica. Degazacija u vakuum komori je jedan od najstarijih tehnika degazacije u cilju poboljšanja kvaliteta čelika. Tokom

vakuum tretmana sadržaji ugljenika, kiseonika, azota, vodonika i sumpora se smanjuju u različitim fazama procesa u zavisnosti od hemijskog sastava metalnog kupatila. Metalurške reakcije kao što su degazacija, dezoksidacija, dekarburizacija, desulfurizacija i legiranje odvija pod vakuum uslovima.¹⁰⁹⁾

Na Slici 7 dat je prikaz kretanja sumpora u pojedinim vrstama čelika od izliva tečnog gvožđa na visokoj peći do odlivenog slaba u čeličani Dillingen.

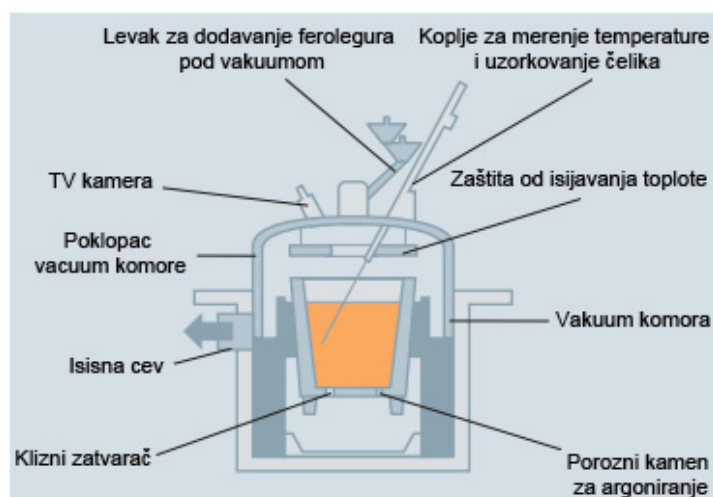


Slika 7: Kretanje sadržaja sumpora u gvožđu i čeliku u čeličani Dillinger Hütte⁸⁰⁾

Proces kontrole sadržaja sumpora u čeliku počinje u toku izliva čelika iz konvertora, a nastavlja se u toku sekundarne metalurgije. Dodaci za obrazovanje visokobazne reaktivne troske, sredstava za dezoksidaciju se delimično dodaju na dno livnog lonca pre početka izliva ili u sam mlaz metala tokom izliva tečnog čelika iz konvertora. Nakon završetka izliva čelika, livni lonac se transportuje do VD-vakuum jedinice gde se u cilju homogenizacije metalnog kupatila i smanjenja sadržaja kiseonika intenzivno meša argonom kroz porozne blokove smeštene u podu livnog lonca u trajanju od 2 min. Zatim se uzima proba metala i troske i meri temperatura. Nakon navedenih operacija počinje proces vakuumiranja, gde se pod vakuumom nastavlja intenzivno

mešanje argonom uz povremeno dodavanje sredstava za dezoksidaciju FeSi i Al, legirajućih elemenata FeMn itd., za finu korekciju hemijskog sastava. Sam process vakuumiranja traje narednih 20 min, nakon čega se ponovo uzimaju probe metala i troske i meri temperatura. Nakon vakuumske obrade čelika sadržaj sumpora se dovede na nivo manji ili jednak 10 ppm. Po završetku tretiranja vakuumom i uzimanja probe i merenja temperature, livni lonac se šalje na livnu mašinu.¹¹⁰⁾

Na Slikama 8 i 9, dat je šematski opis VD postupka, i aktuelna slika VD jedinice.^{108,111)}

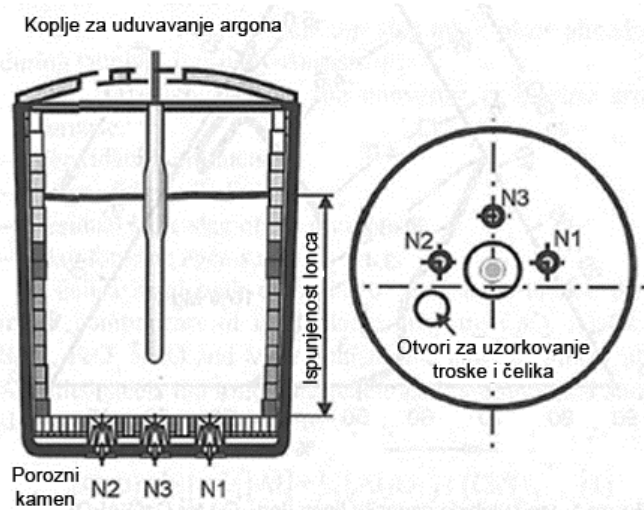


Slika 8: Šematski prikaz vakuumskog postrojenja VD postupkom¹¹¹⁾



Slika 9: VD Vakuum uređaj za degazaciju¹⁰⁸⁾

Livni lonac kapaciteta 185t ozidan je dolomitnim vatrostalnim ozidom u donjem delu i magnezitnom opekom u gornjem delu tj. u zoni troske. Na slici 10 je šematski prikazan izgled livnog lonca u čeličani Dillingen.⁸⁰⁾

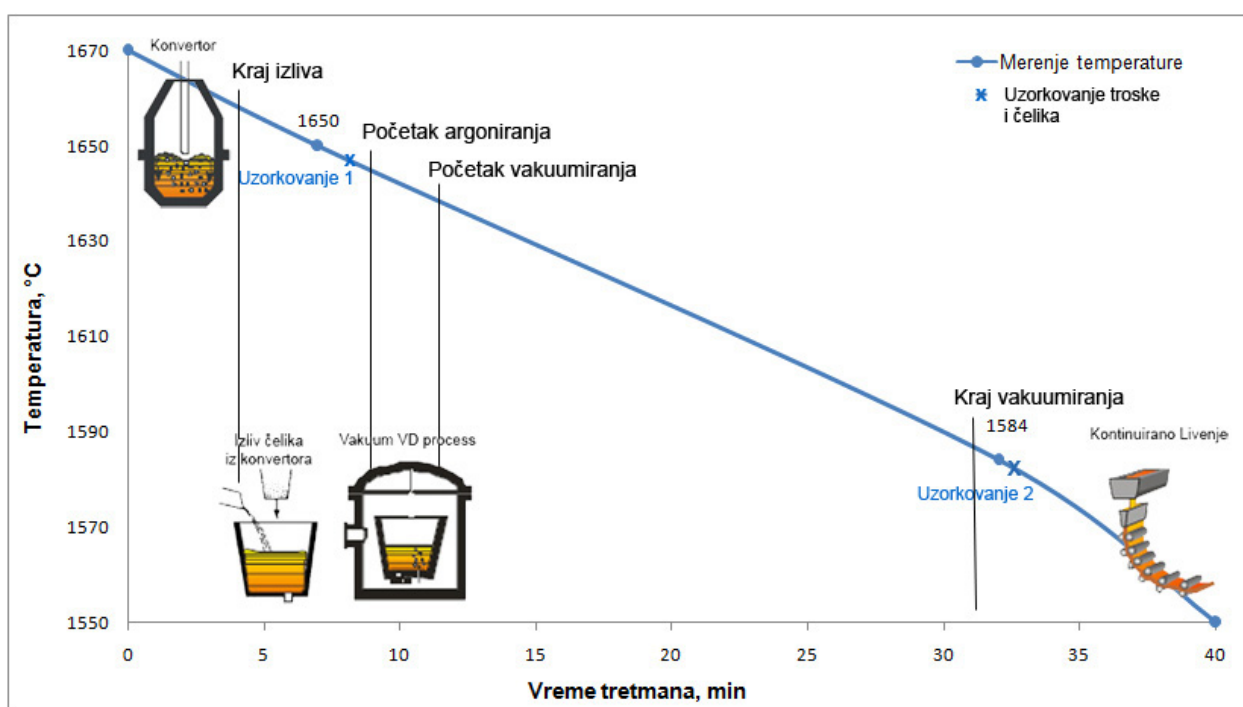


Slika 10: Livni lonac u čeličani Dillinger Hütte⁸⁰⁾

8.2. Opis eksperimentalnog toka tretmana u livnom loncu

Eksperimentalni deo disertacije obavljen je na uzorku od 31 šarže iz redovnog proizvodnog programa čeličane Dillinger Hüttewerke u Dillingenu (Nemačka) na aluminijum-silicijum umirenom niskougljeničnom čeliku.

Prikaz eksperimentalnog dela toka rafinacije čelika u toku sekundarne metalurgije u čeličani Dillingen dat je na Slici 11.



Slika 11: Šematski prikaz rafinacije čelika u toku sekundarne metalurgije u čeličani Dillinger Hütte

U tabelama 5, 6 i 7 prikazani su dodaci u livnom loncu za vreme izliva tečnog čelika iz konvertora, u toku sekundarne metalurgije, hemijski sastavi čelika i troske i temperature nakon 2 min intenzivnog mešanja argonom i posle tretmana u vakuumu. Šarže označene sa (1) predstavljaju dodatke u livni lonac i analize troske, metala i temperature posle 2 minuta intezivnog mešanja argonom dok oznaka (2) predstavlja podatke posle vakuum degazacije.

Pošto je pogonska praksa pokazala da su aktiviteti kiseonika veoma niski, te se zbog te činjenice i ne mere, cilj disertacije je da se izračunaju pod pretpostavkom da se najmanje jedna od, u Poglavlju 6, opisanih reakcija dezoksidacije čelika u toku sekundarne metalurgije nalazi u ravnoteži: **Varijanta A** kada je aluminijum sredstvo za dezoksidaciju (jednačina 25), **Varijanta B** kada je silicijum sredstvo za dezoksidaciju (jednačina 26) i

Varijanta C kada se koristi kombinacija aluminijum i silicijuma za duboku dezoksidaciju čelika (jednačina 27).

Iz jednačina (31)-Varijanta A i (32)-Varijanta B izračunati su aktiviteti kiseonika u čeliku kako je pokazano izrazima (36) i (37). U Varijanti C, aktivitet Al_2O_3 u trosici $a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}$ određen je prema jednačini (33) jednostavnom matematičkom operacijom, a zatim zamenom u jednačini (31) izracunat je aktivitet kiseonika.

Tabela 5: Dodaci u livni lonac u toku izliva iz konvertora, za vreme mešanja argonom i u toku vakuumiranja

Broj šarže	Težina čelika, [t]	Pri izlivu iz konvertora			U toku sekundarne metalurgije				
		Kreč, [kg]	Al, [kg]	Dolomitni-kreč, [kg]	Kreč, [kg]	Šamot, [kg]	Ca-Aluminat, [kg]	Pesak, [kg]	Al, [kg]
1	183.9	1020	348	499	-	60	-	-	111
2	189.5	1010	242	-	299	-	300	-	-
3	182.3	1300	267	-	-	-	49	-	178
4	194.4	1180	403	501	-	-	-	-	122
5	190.4	1040	326	499	700	-	-	-	309
6	178.2	1010	331	501	252	80	-	-	179
7	188.9	980	364	499	150	99	-	-	47
8	189.4	1130	389	499	199	-	-	-	173
9	183.9	1000	310	500	300	-	-	120	182
10	190.7	1030	293	500	150	-	-	-	141
11	178.7	1030	308	498	497	259	-	59	202
12	180.4	1010	342	499	397	150	-	-	251
13	183.3	970	484	500	-	-	-	-	72
14	181.7	1200	437	502	100	111	-	-	50
15	188.2	1500	364	-	-	-	50	-	185
16	178.9	1000	349	500	-	120	-	-	109
17	177.5	1020	367	499	-	-	-	-	201
18	184.8	1160	394	499	-	69	-	-	149
19	181.1	980	479	501	-	120	-	-	132
20	182.6	1320	367	-	-	-	301	-	80
21	191.0	1250	452	-	-	-	140	-	-
22	193.5	1320	339	-	-	-	120	-	110
23	185.8	1140	367	499	151	61	-	-	197
24	193.7	1310	325	-	-	-	150	-	26
25	185.6	1330	383	-	-	-	130	-	64
26	188.3	1250	303	-	-	-	138	-	38
27	175.4	1210	315	498	-	-	-	-	279
28	181.4	1310	366	-	150	-	79	-	149
29	178.2	1000	356	500	100	-	-	-	169
30	197.1	1270	232	-	-	-	179	-	129
31	182.5	1040	339	501	-	-	-	-	139

Tabela 6: Hemijski sastav i temperature analiziranog čelika

Broj šarže		%C	%Si	%Mn	%S	%Al	T, [°C]
1	1	0.135	0.334	1.386	0.0076	0.085	1631
	2	0.136	0.411	1.455	0.0002	0.024	1578
2	1	0.128	0.005	1.307	0.0123	0.025	1619
	2	0.160	0.320	1.599	0.0003	0.011	1578
3	1	0.080	0.205	1.446	0.0091	0.052	1628
	2	0.082	0.326	1.559	0.0003	0.037	1592
4	1	0.036	0.208	1.210	0.0060	0.070	1631
	2	0.034	0.310	1.365	0.0003	0.033	1596
5	1	0.127	0.319	1.330	0.0072	0.063	1617
	2	0.133	0.407	1.491	0.0003	0.037	1581
6	1	0.073	0.153	1.519	0.0047	0.056	1633
	2	0.076	0.223	1.525	0.0003	0.018	1584
7	1	0.057	0.391	1.283	0.0106	0.105	1593
	2	0.176	0.456	1.451	0.0005	0.034	1572
8	1	0.057	0.255	1.354	0.0125	0.084	1628
	2	0.056	0.335	1.541	0.0005	0.034	1577
9	1	0.083	0.149	1.454	0.0107	0.067	1600
	2	0.082	0.257	1.608	0.0005	0.016	1587
10	1	0.100	0.325	1.318	0.0090	0.066	1614
	2	0.124	0.411	1.547	0.0005	0.026	1565
11	1	0.111	0.353	1.444	0.0099	0.086	1602
	2	0.126	0.429	1.534	0.0005	0.030	1578
12	1	0.064	0.170	1.354	0.0076	0.055	1665
	2	0.073	0.264	1.501	0.0005	0.018	1593
13	1	0.134	0.203	1.236	0.0110	0.135	1632
	2	0.152	0.249	1.302	0.0006	0.063	1592
14	1	0.026	0.244	1.290	0.0095	0.103	1640
	2	0.038	0.310	1.364	0.0006	0.032	1578
15	1	0.077	0.193	1.430	0.0103	0.065	1632
	2	0.081	0.317	1.532	0.0006	0.035	1597
16	1	0.071	0.242	1.306	0.0088	0.086	1627
	2	0.075	0.333	1.525	0.0006	0.013	1579
17	1	0.058	0.175	1.433	0.0182	0.059	1627
	2	0.059	0.256	1.521	0.0007	0.029	1580
18	1	0.059	0.293	1.412	0.0141	0.088	1641
	2	0.061	0.352	1.530	0.0007	0.028	1611
19	1	0.137	0.191	1.191	0.0115	0.133	1641
	2	0.154	0.264	1.275	0.0007	0.066	1574
20	1	0.115	0.281	1.281	0.0104	0.084	1620
	2	0.151	0.371	1.541	0.0007	0.044	1582
21	1	0.120	0.272	1.367	0.0160	0.125	1638
	2	0.161	0.394	1.574	0.0008	0.048	1592
22	1	0.157	0.377	1.280	0.0143	0.072	1621
	2	0.189	0.472	1.442	0.0008	0.038	1555
23	1	0.064	0.177	1.429	0.0130	0.070	1655
	2	0.074	0.276	1.526	0.0008	0.031	1589
24	1	0.065	0.308	1.308	0.0133	0.080	1626
	2	0.090	0.424	1.566	0.0008	0.035	1596
25	1	0.119	0.285	1.414	0.0101	0.095	1636
	2	0.167	0.368	1.548	0.0008	0.037	1595
26	1	0.161	0.373	1.355	0.0162	0.081	1607
	2	0.187	0.000	1.474	0.0009	0.037	1571
27	1	0.050	0.153	1.429	0.0142	0.041	1639
	2	0.062	0.256	1.522	0.0009	0.023	1584
28	1	0.127	0.176	1.172	0.0153	0.101	1625
	2	0.165	0.275	1.339	0.0009	0.075	1585
29	1	0.069	0.190	1.539	0.0065	0.062	1606
	2	0.079	0.256	1.608	0.0009	0.035	1571
30	1	0.137	0.276	1.369	0.0184	0.040	1636
	2	0.172	0.339	1.514	0.0010	0.032	1595
31	1	0.064	0.189	1.402	0.0168	0.087	1637
	2	0.066	0.252	1.535	0.0010	0.021	1599

Tabela 7: Hemijski sastav analiziranih troski

Broj šarže		%CaO	%SiO ₂	%Fe uk.	%MnO	%S	%Al ₂ O ₃	%MgO
1	1	58.959	8.122	1.646	0.761	0.270	17.920	9.091
	2	54.319	4.822	0.199	0.062	0.658	30.500	7.811
2	1	55.120	4.152	3.669	7.336	0.192	21.596	2.680
	2	57.000	8.200	0.690	0.090	0.890	27.700	4.100
3	1	59.053	9.573	1.879	1.034	0.218	18.710	3.223
	2	55.030	3.690	4.040	0.240	0.670	31.880	4.400
4	1	53.910	8.517	0.501	0.873	0.295	22.764	8.809
	2	55.195	2.895	0.167	0.029	0.560	34.210	8.884
5	1	56.569	6.761	1.120	0.610	0.322	21.370	9.331
	2	53.802	2.961	0.335	0.024	0.517	34.377	8.551
6	1	56.845	10.406	0.495	0.429	0.259	20.513	10.131
	2	52.485	3.845	1.400	0.126	0.458	32.513	9.051
7	1	56.812	7.392	1.375	1.850	0.417	18.490	12.004
	2	54.370	4.379	0.284	0.044	1.030	30.007	7.735
8	1	60.403	13.858	1.502	0.891	0.446	14.470	5.999
	2	56.723	5.654	0.416	0.067	0.992	27.510	5.219
9	1	55.665	9.126	1.534	2.279	0.221	17.443	10.041
	2	54.602	5.009	0.509	0.106	0.760	29.707	5.059
10	1	58.002	5.322	1.969	1.366	0.344	18.537	8.741
	2	54.622	3.707	0.332	0.055	0.715	29.827	8.191
11	1	58.059	4.700	2.271	0.876	0.264	17.590	9.691
	2	52.632	4.070	0.695	0.510	0.614	30.487	12.161
12	1	58.981	11.568	0.982	0.986	0.286	15.340	7.154
	2	54.850	3.377	0.052	0.083	0.547	28.920	8.305
13	1	61.072	4.511	0.812	1.542	0.408	27.693	12.094
	2	58.052	1.770	0.286	0.052	1.039	38.803	7.054
14	1	56.345	5.697	1.391	2.070	0.260	21.480	10.884
	2	54.635	2.377	0.396	0.080	0.798	31.050	9.284
15	1	61.033	11.913	1.784	0.830	0.286	17.460	1.847
	2	57.930	4.290	1.990	0.130	0.740	31.180	3.790
16	1	58.993	12.995	2.717	3.067	0.197	12.417	6.745
	2	57.092	8.456	0.724	0.100	0.569	25.430	7.764
17	1	54.713	9.180	0.585	1.481	0.466	22.260	9.239
	2	54.233	2.468	0.739	0.078	1.217	32.731	5.709
18	1	58.843	9.695	1.479	0.929	0.429	16.720	7.839
	2	53.343	3.875	0.158	0.057	1.130	33.361	6.329
19	1	61.732	5.725	1.229	1.273	0.455	25.113	11.724
	2	55.767	1.090	0.590	0.065	1.073	40.674	10.355
20	1	58.230	5.377	2.954	2.392	0.347	24.325	2.435
	2	58.240	3.570	1.330	0.180	0.750	33.310	3.320
21	1	58.067	5.526	2.224	3.924	0.495	21.425	2.865
	2	57.900	2.240	0.690	0.080	1.610	34.120	4.030
22	1	58.510	4.876	0.893	0.902	0.365	24.567	3.185
	2	57.780	5.000	1.390	0.110	1.300	30.720	4.240
23	1	59.175	8.967	1.329	0.909	0.641	18.473	6.494
	2	55.145	3.592	1.426	0.134	1.093	31.133	5.434
24	1	58.837	8.818	11.840	3.873	0.221	11.305	1.913
	2	58.320	4.490	0.900	0.080	0.990	32.120	3.530
25	1	57.873	6.626	2.387	3.228	0.316	19.160	5.580
	2	57.380	4.260	0.670	0.110	0.880	31.710	5.220
26	1	59.687	6.987	0.921	2.515	0.472	18.940	3.065
	2	60.370	4.440	0.790	0.110	1.510	29.920	3.580
27	1	57.895	12.008	0.568	0.969	0.553	17.943	7.384
	2	53.233	3.189	0.321	0.052	1.107	33.261	6.919
28	1	59.210	6.992	1.185	1.542	0.321	22.147	2.575
	2	59.580	3.020	0.990	0.120	1.080	31.520	3.920
29	1	55.231	7.259	0.121	0.308	0.618	24.790	8.964
	2	52.120	2.171	0.223	0.059	0.821	35.281	7.705
30	1	58.427	5.078	1.846	2.088	0.526	20.875	3.005
	2	58.010	3.720	0.730	0.130	1.610	31.740	4.430
31	1	57.499	8.789	3.487	2.362	0.327	18.437	11.657
	2	56.109	3.490	0.518	0.066	1.115	28.447	7.367

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

9.1. Optički bazicitet

U Tabeli 8 prikazane su izmerene vrednosti optičkog baziciteta za analizirane šarže. Kao što se vidi, vrednosti optičkog baziciteta za analizirane završne višekomponentne troske tipa CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO niže su od 0.8 i nalaze se u veoma uskim granicama $\Lambda=0.780 \div 0.799$. Srednja vrednost iznosi $\Lambda=0.788$. Ako se sve analizirane šarže, na osnovu sadržaja završnog sumpora podele u dve grupe i međusobno uporede rezultati optičkog baziciteta Λ , rezultati su sledeći: za n=12 šarži sa završnim sadržajem sumpora na kraju procesa vakuumiranja $[\%S]_2 \leq 0.0005$, vrednosti optičkog baziciteta su u granicama $\Lambda=0.780 \div 0.795$ i srednja vrednost $\Lambda=0.786$ dok je za n=19 šarži sa završnim sumporom $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.001$ optički bazicitet u rasponu $\Lambda=0.780 \div 0.799$ i srednja vrednost $\Lambda=0.789$.

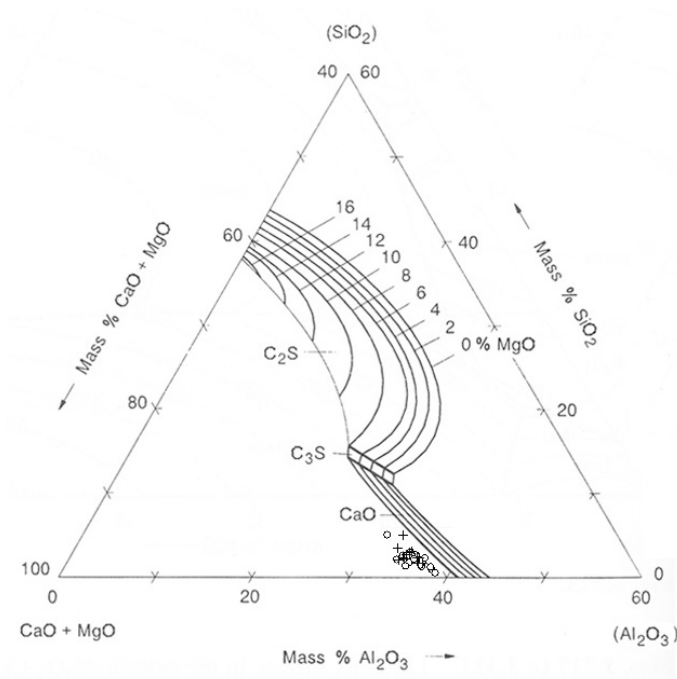
Tabela 8: Izračunate vrednosti optičkog baziciteta

Broj šarže	$\Lambda_{FeO=0.51}$
1	0,784
2	0,780
3	0,787
4	0,785
5	0,782
6	0,780
7	0,787
8	0,792
9	0,785
10	0,791
11	0,784
12	0,795
13	0,784
14	0,794
15	0,791
16	0,784
17	0,789
18	0,780
19	0,780
20	0,790
21	0,793
22	0,789
23	0,789
24	0,788
25	0,789
26	0,798
27	0,783
28	0,799
29	0,781
30	0,792
31	0,798

9.2. Trojni dijagram

Na slici 12 prikazan je položaj analiziranih troski u trojnom dijagramu $(\text{CaO}+\text{MgO})\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, na kraju procesa vakuumiranja. Trojni dijagram je preuzet iz literature.⁷⁰⁾ Troske u trojnom dijagramu su prethodno normalizovane do 100%, pošto zbirni sastav svih oksida koji ulaze u njen sastav, određen analitičkim putem u laboratoriji, nije uvek bio 100%. Prisutna varijacija u hemijskom sastavu troske je posledica dodataka za dezoksidaciju i produkata dezoksidacije, dodataka ferolegura za legiranje kao i starosti livnog lonca, odnosno zaostale troske upijene u ozid livnog lonca od prethodnih šarži.

Krstićima su prikazane troske sa završnim sadržajem sumpora nakon procesa vakuumiranja $[\%S] \leq 0.0005$, dok su kružićima prikazane šarže sa završnim sadržajem sumpora $[\%S] = 0.0006\text{-}0.0010$.



Slika 12: Položaj analiziranih troski u trojnom dijagramu sistema $(\text{CaO}+\text{MgO})\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ za $T=1584^\circ\text{C}$

Na osnovu položaja troski uočljivo je da one ne dostižu ravnotežu, ali su veoma bliske liniji zasićenja krečom za troske sa sadržajem %MgO=6 koliki je i prosečni sadržaj u analiziranim troskama. Najbliža liniji zasićenja CaO je šarža N°2 sa sledećim karakteristikama: troska sa %CaO=58.76, i %SiO₂=8.45, sadržajem sumpora u čeliku [%S₂]=0.0003, sumpornim kapacitetom log C_{Sizmeren} (Varijanta A)=1.53; 1.40 (Varijanta B) i 1.43 (Varijanta C) i koeficijent raspodele sumpora L_{Sizmereno} =2967. Svi ovi parametri su dovoljno ubedljivi da opravdaju njen položaj u trojnom dijagramu.

9.3. Sumporni kapacitet

9.3.1. Uvodne napomene

Kao što je već objašnjeno, u ovoj disertaciji, sumporni kapacitet je izmeren na način kako je to u svom originalnom radu predložio Young^{29,49)} a opisan u poglavlju 2.2. Aktivitet kiseonika izračunat je prema opisanim jednačinama u Poglavlju 6. Svi dobijeni rezultati za Varijantu A, za Varijantu B i za Varijantu C su zatim, upoređeni sa izračunatim vrednostima sumpornog kapaciteta prema KTH modelu i sa originalnim parametrima i koeficijentima svakog od ranije pomenutih modela koji su zasnovani na konceptu optičkog baziciteta (videti Tabelu 1 u Poglavlju 2.3).

9.3.2. Sumporni kapacitet po Young metodologiji

U Tabelama 9 i 10 prikazani su rezultati izmerenog i izračunatog sumpornog kapaciteta log C_{Sizmereno} i log C_{Sizračunato} za svaki analizirani slučaj ponaosob, primenon Young-ove metodologije. U Tabeli 11 dat je uporedni pregled izmerenih vrednosti sumpornog kapaciteta sa izračunatim vrednostima sumpornog kapaciteta preko originalnih jednačina gore navedenih modela, dok Tabela 12 prikazuje samo rezultate izračunatih vrednosti za svaki analizirani

slučaj ponaosob u poređenju sa izračunatim vrednostima sa originalnim parametrima i jednačinama analiziranih modela.

Analizom rezultata iz Tabele 9 i 10 odmah je uočljivo je da se vrednosti izmerenog sumpornog kapaciteta u Varijanti A nalaze dalje od ravnoteže (osim šarže N°2 koja ima vrednost -1.53 kod svih drugih šarži vrednosti $\log C_{Sizmereno}$ se kreću od -2.02 do -5.81) u odnosu na Varijante B i C gde su vrednosti $\log C_{Sizmereno}$ uravnotežene i ravnomernije i kreću se ispod vrednosti -2.01 tj. u opsegu -1.40 do 2.01.

Prvi zaključak koji se nameće kada se uporede rezultati $\log C_{Sizmereno}$ i $\log C_{Sizračunato}$ u Tabeli 11 i 12 je da su vrednosti u Varijanti A najniže tj. najdalje od ravnotežnih uslova u poređenju sa vrednostima za Varijante B i C i svih analiziranih modela. Takođe, uočljivo je da su rezultati izračunatog sumpornog kapaciteta $\log C_{Sizračunato}$ koje daje S-S model najviši u poređenju sa drugim modelima i da su rezultati koje daju Varijanta B i Varijanta C u dobroj saglasnosti sa Sosinsky-Sommerville modelom. Sa druge strane, svi analizirani modeli osim Sosinsky-Sommerville modela daju približno iste rezultate izračunatog sumpornog kapaciteta.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 9: Izmerene vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{S\text{izmereno}}$ i $C_{S\text{izmereno}}$ po Young metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika $[a_o]$

Br. šarže	$\log C_S$ izmereno Varijanta A	C_S izmereno Varijanta A	$\log C_S$ izmereno Varijanta B	C_S izmereno Varijanta B	$\log C_S$ izmereno Varijanta C	C_S izmereno Varijanta C
1	-2.02	0.00959	-1.46	0.03434	-1.49	0.03267
2	-1.53	0.02938	-1.40	0.03939	-1.43	0.03749
3	-2.56	0.00277	-1.57	0.02714	-1.59	0.02584
4	-2.85	0.00141	-1.59	0.02583	-1.61	0.02461
5	-2.93	0.00116	-1.73	0.01842	-1.76	0.01753
6	-2.38	0.00418	-1.60	0.02498	-1.62	0.02380
7	-2.46	0.00346	-1.75	0.01778	-1.77	0.01690
8	-2.29	0.00514	-1.69	0.02029	-1.71	0.01931
9	-2.17	0.00671	-1.67	0.02145	-1.69	0.02043
10	-2.77	0.00171	-1.94	0.01141	-1.96	0.01085
11	-2.59	0.00254	-1.89	0.01278	-1.92	0.01216
12	-2.74	0.00183	-1.87	0.01356	-1.89	0.01292
13	-4.27	0.00005	-1.61	0.02437	-1.63	0.02322
14	-3.43	0.00038	-1.88	0.01326	-1.90	0.01262
15	-2.67	0.00212	-1.82	0.01497	-1.85	0.01426
16	-2.05	0.00882	-1.91	0.01225	-1.93	0.01166
17	-3.24	0.00058	-1.69	0.02047	-1.71	0.01949
18	-2.37	0.00427	-1.58	0.02630	-1.60	0.02506
19	-5.81	0.00000	-1.71	0.01953	-1.73	0.01859
20	-3.13	0.00074	-1.99	0.01019	-2.01	0.00970
21	-3.64	0.00023	-1.73	0.01869	-1.75	0.01779
22	-2.67	0.00215	-1.96	0.01104	-1.98	0.01049
23	-2.77	0.00171	-1.77	0.01710	-1.79	0.01629
24	-2.64	0.00231	-1.88	0.01324	-1.90	0.01261
25	-2.74	0.00184	-1.90	0.01249	-1.92	0.01189
26	-2.75	0.00180	-1.85	0.01405	-1.87	0.01337
27	-2.82	0.00151	-1.76	0.01731	-1.78	0.01649
28	-3.53	0.00030	-1.93	0.01167	-1.95	0.01112
29	-3.72	0.00019	-1.94	0.01153	-1.96	0.01097
30	-2.72	0.00190	-1.75	0.01761	-1.78	0.01677
31	-2.75	0.00179	-1.85	0.01416	-1.87	0.01349

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 10: Izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{\text{Sizrač.}}$ i $C_{\text{Sizrač.}}$ po Young metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika $[a_o]$

Br. šarže	$\log C_{\text{Sizrač.}}$ Varijanta A	$C_{\text{Sizrač.}}$ Varijanta A	$\log C_{\text{Sizrač.}}$ Varijanta B	$C_{\text{Sizrač.}}$ Varijanta B	$\log C_{\text{Sizrač.}}$ Varijanta C	$C_{\text{Sizrač.}}$ Varijanta C
1	-2.53	0.00297	-1.77	0.01685	-1.79	0.01636
2	-1.45	0.03569	-1.59	0.02554	-1.61	0.02482
3	-2.91	0.00123	-1.58	0.02659	-1.59	0.02585
4	-3.04	0.00091	-1.76	0.01726	-1.78	0.01678
5	-3.33	0.00047	-1.75	0.01797	-1.76	0.01746
6	-2.96	0.00111	-1.63	0.02345	-1.64	0.02279
7	-2.71	0.00193	-1.85	0.01413	-1.86	0.01372
8	-2.16	0.00699	-1.84	0.01441	-1.85	0.01399
9	-2.35	0.00450	-1.73	0.01865	-1.74	0.01813
10	-3.04	0.00090	-1.93	0.01177	-1.94	0.01143
11	-2.60	0.00252	-1.81	0.01548	-1.82	0.01503
12	-2.79	0.00161	-1.86	0.01392	-1.87	0.01354
13	-3.75	0.00018	-1.74	0.01805	-1.76	0.01755
14	-3.37	0.00043	-1.93	0.01184	-1.94	0.01150
15	-2.47	0.00336	-1.74	0.01833	-1.75	0.01782
16	-0.98	0.10432	-1.73	0.01859	-1.74	0.01806
17	-3.47	0.00034	-1.83	0.01467	-1.85	0.01425
18	-2.66	0.00217	-1.56	0.02741	-1.57	0.02668
19	-4.32	0.00005	-1.72	0.01913	-1.73	0.01859
20	-3.13	0.00075	-1.78	0.01648	-1.80	0.01601
21	-3.51	0.00031	-1.82	0.01530	-1.83	0.01488
22	-2.89	0.00128	-1.86	0.01390	-1.87	0.01348
23	-2.81	0.00155	-1.78	0.01664	-1.79	0.01617
24	-2.55	0.00282	-1.72	0.01885	-1.74	0.01833
25	-2.56	0.00272	-1.76	0.01744	-1.77	0.01696
26	-2.97	0.00107	-1.88	0.01319	-1.89	0.01282
27	-3.21	0.00062	-1.73	0.01862	-1.74	0.01810
28	-3.32	0.00048	-1.85	0.01407	-1.86	0.01368
29	-3.90	0.00013	-1.75	0.01793	-1.76	0.01742
30	-2.80	0.00159	-1.79	0.01617	-1.80	0.01572
31	-2.70	0.00200	-1.83	0.01473	-1.84	0.01433

Radi bolje preglednosti rezultata, nadalje će svi da se prikazuju za srednji završni sadržaj sumpora [%S₂].

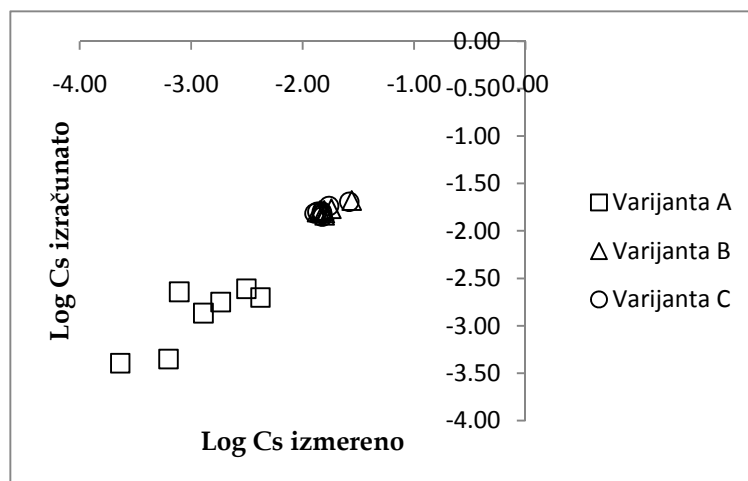
Tabela 11: Po Young metodologiji određeni sumporni kapacitet $\log C_{S_{izmereno}}$ i $\log C_{S_{izračunato}}$ za različite vrednosti aktiviteta kiseonika

$[\%S]_2$	$\log C_{S_{izmer.}}$ Varijanta A	$\log C_{S_{izrač.}}$ Varijanta A	$\log C_{S_{izmer.}}$ Varijanta B	$\log C_{S_{izrač.}}$ Varijanta B	$\log C_{S_{izmer.}}$ Varijanta C	$\log C_{S_{izrač.}}$ Varijanta C
0.0003	-2.38	-2.70	-1.56	-1.68	-1.58	-1.69
0.0005	-2.50	-2.61	-1.80	-1.84	-1.82	-1.85
0.0006	-3.11	-2.64	-1.81	-1.78	-1.83	-1.80
0.0007	-3.64	-3.39	-1.74	-1.77	-1.76	-1.74
0.0008	-2.89	-2.87	-1.85	-1.79	-1.87	-1.80
0.0009	-3.20	-3.35	-1.87	-1.80	-1.89	-1.81
0.0010	-2.73	-2.75	-1.80	-1.81	-1.82	-1.82

Tabela 12: Koeficijent korelacije između izmerene i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{S_{izmereno}}$ - $\log C_{S_{izračunato}}$ po Young metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika

$\log C_{S_{izmereno}}$ - $\log C_{S_{izračunato}}$	Linearna	R	Polinomska	R
Varijanta A	$y=0.6116x-1.1145$	0.799	$y=-0.3736x^2-1.6229x-4.393$	0.82
Varijanta B	$y=0.4216x-1.0324$	0.876	$y=1.5119x^2+5.5839x+3.3533$	0.92
Varijanta C	$y=0.4439x-0.9895$	0.846	$y=0.3981x^2+1.8201x+0.1943$	0.85

Kako pokazuje Tabela 12 najniže vrednosti korelacije polinomskih jednačina imaju šarže preko ravnotežnog kiseonika $[a_o]_{Al}$ $R=0.82$ (Varijanta A), zatim vrednosti $[a_o]_{Si-Al}$ $R=0.85$ (Varijanta C) i na kraju najvišu vrednost $[a_o]_{Si}$ $R=0.92$ (Varijanta B).



Slika 13: Zavisnost izmerenog i izračunatog sumpornog kapaciteta $\log C_s$ (po Young metodologiji) sa različitim izračunatim ravnotežnim aktivitetima kiseonika $[a_o]$

Tabela 13: Po Young metodologiji određeni sumporni kapacitet $C_{S\text{izmereno}}$ i $C_{S\text{izračunato}}$ za različite vrednosti aktiviteta kiseonika

$[\%S]_2$	$C_{S\text{izmereno}}$ Varijanta A	$C_{S\text{izračunato}}$ Varijanta A	$C_{S\text{izmereno}}$ Varijanta B	$C_{S\text{izračunato}}$ Varijanta B	$C_{S\text{izmereno}}$ Varijanta C	$C_{S\text{izračunato}}$ Varijanta C
0.0003	0.0042	0.0020	0.0275	0.0209	0.0262	0.0203
0.0005	0.0031	0.0025	0.0158	0.0146	0.0150	0.0142
0.0006	0.0008	0.0023	0.0156	0.0164	0.0149	0.0160
0.0007	0.0002	0.0004	0.0181	0.0171	0.0172	0.0183
0.0008	0.0013	0.0014	0.0142	0.0163	0.0135	0.0159
0.0009	0.0006	0.0004	0.0135	0.0158	0.0128	0.0153
0.0010	0.0018	0.0018	0.0158	0.0154	0.0150	0.0150

9.3.3. Sumporni kapacitet po modelima

U Tabeli 14 prikazane su prosečne vrednosti izmerenog sumpornog kapaciteta $\log C_{S\text{izmereno}}$ prema Varijanti A, Varijanti B i Varijanti C i izračunatog sumpornog kapaciteta $\log C_{S\text{izračunato}}$ prema originalnim jednačinama i koeficijentima zasnovanim na konceptu optičkog baziciteta predloženim od strane Sosinsky-Sommervill-a (S-S)²⁹, Younga³⁰, Taniguchi-a³² i KTH

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

modelu³³⁻³⁵⁾ za srednje vrednosti završnog sumpora na kraju procesa vakuumiranja.

Tabela 14: Izmerene vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{S_{izmereno}}$ po Young metodologiji sa parametrima Dillingen šarži u poređenju sa izračunatim $\log C_s$ sa originalnim koeficijentima Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH modela

Br.šarže	$\log C_{S_{izmereno}}$			$\log C_{S_{izračunato}}$			
	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C	Young	S-S	Taniguchi	KTH
1	-2.02	-1.46	-1.49	-2.13	-1.94	-2.15	-2.25
2	-1.53	-1.40	-1.43	-2.18	-2.02	-2.32	-2.10
3	-2.56	-1.57	-1.59	-2.16	-1.97	-2.75	-2.02
4	-2.85	-1.59	-1.61	-2.07	-1.82	-2.10	-2.23
5	-2.93	-1.73	-1.76	-2.16	-1.96	-2.22	-2.33
6	-2.38	-1.60	-1.62	-2.17	-2.01	-2.38	-2.35
7	-2.46	-1.75	-1.77	-2.12	-1.94	-2.12	-2.22
8	-2.29	-1.69	-1.71	-2.06	-1.85	-2.07	-2.00
9	-2.17	-1.67	-1.69	-2.11	-1.88	-2.21	-2.08
10	-2.77	-1.94	-1.96	-2.11	-1.92	-2.06	-2.20
11	-2.59	-1.89	-1.92	-2.11	-1.96	-2.17	-2.37
12	-2.74	-1.87	-1.89	-1.96	-1.69	-1.87	-2.05
13	-4.27	-1.61	-1.63	-2.13	-1.86	-2.22	-2.20
14	-3.43	-1.88	-1.90	-2.04	-1.81	-1.98	-2.16
15	-2.67	-1.82	-1.85	-2.06	-1.80	-2.35	-1.90
16	-2.05	-1.91	-1.93	-2.09	-1.95	-2.15	-2.18
17	-3.24	-1.69	-1.71	-2.12	-1.88	-2.22	-2.11
18	-2.37	-1.58	-1.60	-2.10	-1.82	-2.20	-2.19
19	-5.81	-1.71	-1.73	-2.24	-2.04	-2.34	-2.47
20	-3.13	-1.99	-2.01	-2.13	-1.89	-2.35	-1.94
21	-3.64	-1.73	-1.75	-2.06	-1.75	-2.16	-1.92
22	-2.67	-1.96	-1.98	-2.21	-2.06	-2.39	-2.06
23	-2.77	-1.77	-1.79	-2.09	-1.85	-2.29	-2.05
24	-2.64	-1.88	-1.90	-2.08	-1.80	-2.24	-1.93
25	-2.74	-1.90	-1.92	-2.06	-1.79	-2.16	-2.01
26	-2.75	-1.85	-1.87	-2.06	-1.82	-2.11	-1.84
27	-2.82	-1.76	-1.78	-2.15	-1.93	-2.23	-2.25
28	-3.53	-1.93	-1.95	-2.02	-1.72	-2.10	-1.82
29	-3.72	-1.94	-1.96	-2.23	-2.03	-2.29	-2.37
30	-2.72	-1.75	-1.78	-2.04	-1.75	-2.14	-1.92
31	-2.75	-1.85	-1.87	-1.93	-1.63	-1.89	-1.95

Kao i u Poglavlju 9.3.2. rezultati se prikazuju za srednji završni sadržaj sumpora [%S₂]. Takođe, u daljim analizama razmatraće se antilogaritamske vrednosti sumpornog kapaciteta Cs.

U Tabeli 15 dat je uporedni pregled izmerene (po Young metodologiji) i izračunate prosečne vrednosti sumpornog kapaciteta Cs prema modelima Young, S-S, Taniguchi i KTH

Tabela 15: Izmerene po Young metodologiji i izračunate prosečne vrednosti sumpornog kapaciteta Cs prema modelima Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH.

[%S] ₂	C _{Sizmereno} Varijanta A	C _{Sizmereno} Varijanta B	C _{Sizmereno} Varijanta C	C _{Sizračunato} Young	C _{Sizračunato} S-S	C _{Sizračunato} Taniguchi	C _{Sizračunato} KTH
0.0003	0.0042	0.0275	0.0262	0.0077	0.0135	0.0095	0.0063
0.0005	0.0031	0.0158	0.0150	0.0087	0.0152	0.0128	0.0073
0.0006	0.0008	0.0156	0.0149	0.0088	0.0164	0.0121	0.0081
0.0007	0.0002	0.0181	0.0172	0.0076	0.0145	0.0091	0.0073
0.0008	0.0013	0.0142	0.0135	0.0085	0.0171	0.0108	0.0103
0.0009	0.0006	0.0135	0.0128	0.0082	0.0158	0.0112	0.0098
0.0010	0.0018	0.0158	0.0150	0.01101	0.02370	0.01637	0.0116

Odmah je uočljivo da su vrednosti izmerenog sumpornog kapaciteta (Varijanta A) u poređenju sa vrednostima dobijenim preko predloženih modela sa originalnim koeficijentima najniži u odnosu na vrednosti sumpornog kapaciteta dobijenog preko ravnotežnog aktiviteta kiseonika u Varijanti B i Varijanti C. Takođe, Young i KTH model daju približne rezultate po Varijanti A (vrednosti su stabilne na potenciji 10⁻³), dok Sosinsky-Sommerville model daje najviše vrednosti koji su veoma bliske vrednostima po Varijanti B i C (vrednosti su na potenciji 10⁻²). Sa druge strane, kako raste sadržaj sumpora tako su i vrednosti kod svih modela bliske vrednostima koje daju Varijante B i C.

U Tabeli 16 prikazane su vrednosti koeficijenta korelacije R između izmerene C_{Sizmereno} po Young metodologiji sumpornog kapaciteta i izračunate vrednosti

$C_{Sizračunato}$ sa originalnim koeficijentima Younga, S-S, Taniguchi-a i KTH modela. Očigledno je da KTH model daje bolje vrednosti korelacije između izmerene i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta u poređenju sa modelima koji se zasnivaju na konceptu optičkog baziciteta. Sa druge strane, modeli optičkog baziciteta daju ujednačene vrednosti koeficijenta korelacije R sa neznatnim varijacijama. Relativno niske vrednosti koeficijenta korelacije R posledica su malog broja analiziranih uzoraka za isti sadržaj završnog sumpora.

Tabela 16: Koeficijent korelacije između izmerene i izračunate vrednosti $C_{Sizmereno}$ - $C_{Sizračunato}$ sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika

$C_{Sizmereno} - C_{Sizračunato}$	Young	S-S	Taniguchi	KTH
	R	R	R	R
Varijanta A	0.80	0.75	0.76	0.87
Varijanta B	0.43	0.45	0.43	0.74
Varijanta C	0.43	0.45	0.43	0.69

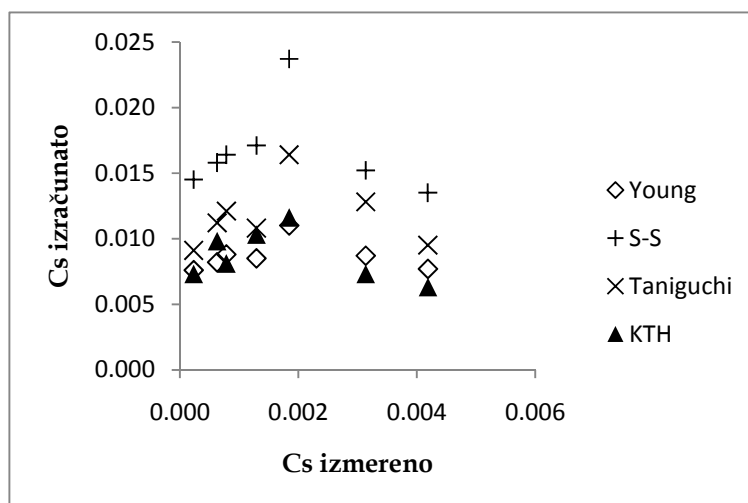
U Tabeli 17 prikazane su polinomske jednačine zavisnosti izmerenog (po Varijantama A, B i C) i izračunatog (po ranije pomenutim modelima) sumpornog kapaciteta $C_{Sizmereno} - C_{Sizračunato}$

Tabela 17: Polinomske jednačine zavisnosti $C_{Sizmereno} - C_{Sizračunato}$

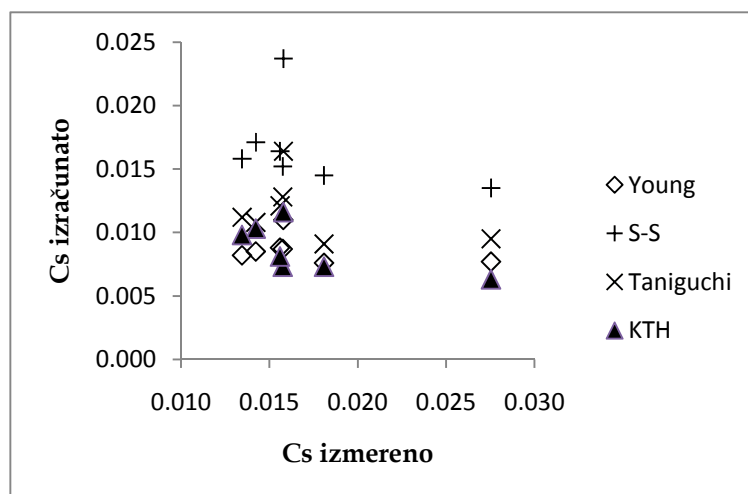
$C_{Sizmereno} - C_{Sizračunato}$	Young	S-S	Taniguchi	KTH
	Polinomska	Polinomska	Polinomska	Polinomska
Varijanta A	$y = -608.48x^2 + 2.6827x + 0.0069$	$y = -1655x^2 + 6.9174x + 0.0126$	$y = -1346.2x^2 + 6.0263x + 0.0077$	$y = -909.52x^2 - 3.4705x + 0.007$
Varijanta B	$y = -8.7367x^2 + 0.276x + 0.0067$	$y = -21.475x^2 + 0.6057x + 0.013$	$y = -14.616x^2 + 0.397x + 0.0095$	$y = 29.291x^2 - 1.4873x + 0.025$
Varijanta C	$y = -9.805x^2 - 0.2966x + 0.0066$	$y = -24.243x^2 + 0.6586x + 0.0127$	$y = -16.444x^2 + 0.4299x + 0.0094$	$y = -32.019x^2 - 1.5501x + 0.0249$

Na slikama 10÷12 prikazani su dijagrami zavisnosti izmerenog sumpornog kapaciteta C_s prema Varijanta A, Varijanti B i Varijanti C od izračunatih

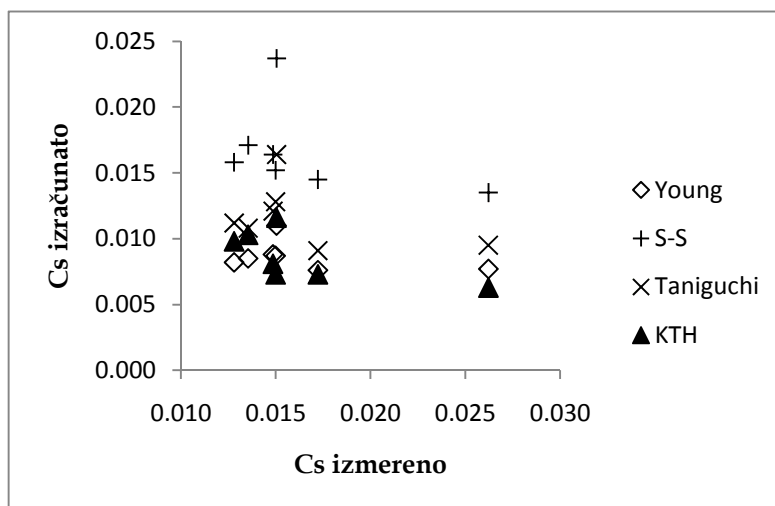
vrednosti sumpornog kapaciteta C_s po modelima Younga, Sosinski-Sommervill-a, Taniguchi-a i KTH modela.



Slika 14: Zavisnost $C_{s\text{izmereno}}$ sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) od $C_{s\text{izračunato}}$ prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela



Slika 15: Zavisnost $C_{s\text{izmereno}}$ sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) od $C_{s\text{izračunato}}$ prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela



Slika 16: Zavisnost $C_{S\text{izmereno}}$ sa $[a_o]_{\text{Si-Al}}$ (Varijanta C) od $C_{S\text{izračunato}}$ prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela

9.3.4. Razlike u vrednostima sumpornog kapaciteta Cs

9.3.4.1. Razlike između izmerenih vrednosti sumpornog kapaciteta Cs izmereno u odnosu na Cs izračunate prema modelima

U Tabelama 18, 19, i 20 prikazane su razlike ΔC_s između izmerenih vrednosti sumpornog kapaciteta $C_{S\text{izmereno}}$ u odnosu na $C_{S\text{izračunate}}$ vrednosti prema modelima Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH.

Tabela 18: Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti sumpornog kapaciteta $\Delta C_s = C_{S\text{izmereno}} (\text{Varijanta A}) - C_{S\text{izračunate}}$ (Young, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi, KTH) za srednje vrednosti završnog sumpora

[%S] ₂	$\Delta C_s (\text{Varijanta A})$			
	Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	-0.0035	-0.0093	-0.0053	-0.0021
0.0005	-0.0056	-0.0121	-0.0097	-0.0042
0.0006	-0.0080	-0.0156	-0.0113	-0.0073
0.0007	-0.0074	-0.0143	-0.0089	-0.0071
0.0008	-0.0072	-0.0158	-0.0095	-0.0090
0.0009	-0.0076	-0.0152	-0.0106	-0.0092
0.001	-0.0092	-0.0219	-0.0146	-0.0098

Tabela 19: Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti sumpornog kapaciteta $\Delta C_s = C_{Sizmereno}(\text{Varijanta B}) - C_{Sizračunato}(\text{Young, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi, KTH})$ za srednje vrednosti završnog sumpora

[%S] ₂	$\Delta C_s(\text{Varijanta B})$			
	Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	0.0198	0.0140	0.0180	0.0212
0.0005	0.0071	0.0006	0.0030	0.0085
0.0006	0.0068	-0.0008	0.0035	0.0075
0.0007	0.0105	0.0036	0.0090	0.0108
0.0008	0.0057	-0.0029	0.0034	0.0039
0.0009	0.0053	-0.0023	0.0023	0.0037
0.001	0.0048	-0.0079	-0.0006	0.0042

Tabela 20: Razlika između izmerenih i izračunatih vrednosti sumpornog kapaciteta $\Delta C_s = C_{Sizmereno}(\text{Varijanta C}) - C_{Sizračunato}(\text{Young, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi, KTH})$ za srednje vrednosti završnog sumpora

[%S] ₂	$\Delta C_s(\text{Varijanta C})$			
	Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	0.0185	0.0127	0.0167	0.0199
0.0005	0.0063	-0.0002	0.0022	0.0077
0.0006	0.0061	-0.0015	0.0028	0.0068
0.0007	0.0096	0.0027	0.0081	0.0099
0.0008	0.0050	-0.0036	0.0027	0.0032
0.0009	0.0046	-0.0030	0.0016	0.0030
0.001	0.0040	-0.0087	-0.0014	0.0034

Takođe, radi upoređenja rezultata u Tabelama 21, 22 i 23 date su razlike izračunatih vrednosti sumpornog kapaciteta $C_{Sizračunato}$ prema Varijantama A, B i C u odnosu na izračunate vrednosti prema modelima Younga, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH. Znak „-“ ispred vrednosti ukazuje da je sumporni kapacitet po Varijantama A, B ili C viši od onih koje daju modeli Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 21: Razlika izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta Cs po Varijanti A i po modelima Young-a, Sosinsky-Sommervill-a, Taniguchi-a i KTH, $[\Delta C_s = C_{Sizračunato}(\text{Varijanta A}) - C_{Sizračunato}(\text{Young, S-S, Taniguchi, KTH})]$

[%S] ₂	ΔC_s (Varijanta A)			
	Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	-0.0057	-0.0115	-0.0075	-0.0043
0.0005	-0.0062	-0.0127	-0.0103	-0.0048
0.0006	-0.0065	-0.0141	-0.0098	-0.0058
0.0007	-0.0072	-0.0141	-0.0087	-0.0069
0.0008	-0.0071	-0.0157	-0.0094	-0.0089
0.0009	-0.0078	-0.0154	-0.0108	-0.0094
0.001	-0.0092	-0.0219	-0.0146	-0.0098

Tabela 22: Razlika izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta Cs po Varijanti B i po modelima Young-a, Sosinsky-Sommervill-a, Taniguchi-a i KTH $[\Delta C_s = C_{Sizračunato}(\text{Varijanta B}) - C_{Sizračunato}(\text{Young, S-S, Taniguchi, KTH})]$

[%S] ₂	ΔC_s (Varijanta B)			
	Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	0.0132	0.0074	0.0114	0.0146
0.0005	0.0059	-0.0006	0.0018	0.0073
0.0006	0.0076	0.0000	0.0043	0.0083
0.0007	0.0095	0.0026	0.0080	0.0098
0.0008	0.0078	-0.0008	0.0055	0.0060
0.0009	0.0076	0.0000	0.0046	0.0060
0.001	0.0044	-0.0083	-0.0010	0.0038

Tabela 23: Razlika izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta Cs po Varijanti C i po modelima Young-a, S-S, Taniguchi-a i KTH $[\Delta C_s = C_{Sizračunato}(\text{Varijanta C}) - C_{Sizračunato}(\text{Young, S-S, Taniguchi, KTH})]$

[%S] ₂	ΔC_s (Varijanta C)			
	Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	0.0126	0.0068	0.0108	0.0140
0.0005	0.0055	-0.0010	0.0014	0.0069
0.0006	0.0072	-0.0004	0.0039	0.0079
0.0007	0.0107	0.0038	0.0092	0.0110
0.0008	0.0074	-0.0012	0.0051	0.0056
0.0009	0.0071	-0.0005	0.0041	0.0055
0.001	0.0040	-0.0087	-0.0014	0.0034

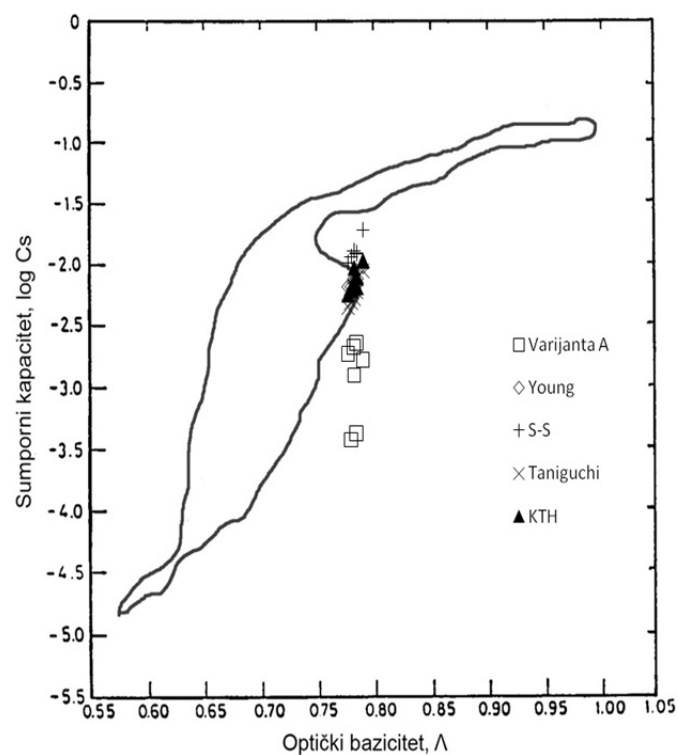
Na osnovu rezultata u Tabelama 21, 22 i 23 jasno je da su najveće razlike sumpornog kapaciteta C_s kod Varijante A u poređenju sa Varijantama B i C gde su bliske ili identične sa onim koje daju modeli.

9.3.5. Zavisnost optičkog baziciteta Λ i sumpornog kapaciteta $\log C_s$

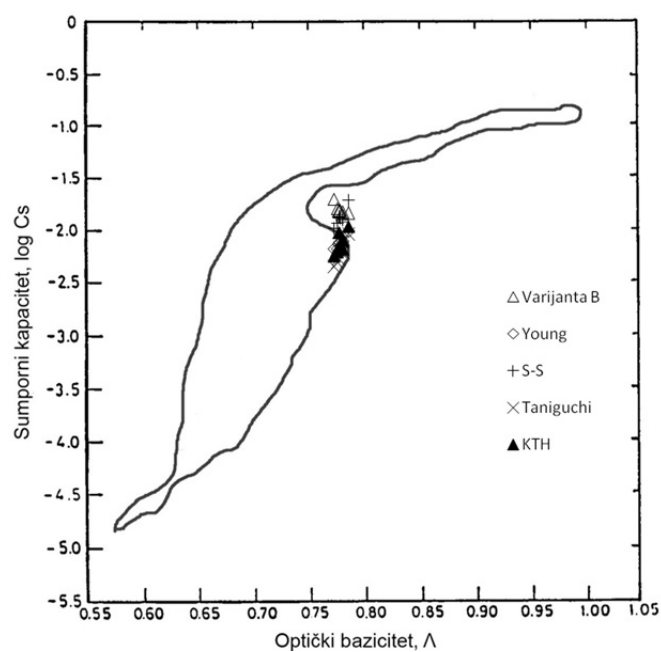
Kao što je pokazano na Slici 1 (Videti Poglavlje 2.2.2.), Young je u svom originalnom radu na troskama koje je analizirao u laboratorijskim uslovima „napravio“ tzv. „S“ krivu zavisnosti sumpornog kapaciteta od optičkog baziciteta. Radi bolje preglednosti rezultata, u ovoj disertaciji nisu predstavljene vrednosti koje je dobio Young. U konture tzv. „S“ krive (Slike 14-16) prikazane su, uporedno, zavisnosti optičkog baziciteta i izračunatog sumpornog kapaciteta prema Varijantama A, B, i C i originalnih modela Younga, Sosinsky-Sommervill-a (S-S), Taniguchi-a i KTH modela.

Svi rezultati prikazani su za srednji završni sadržaj sumpora [%S₂]. Izračunata vrednost optičkog baziciteta za sve analizirane šarže nalazi se u uskim granicama $\Lambda=0.77-0.79$.

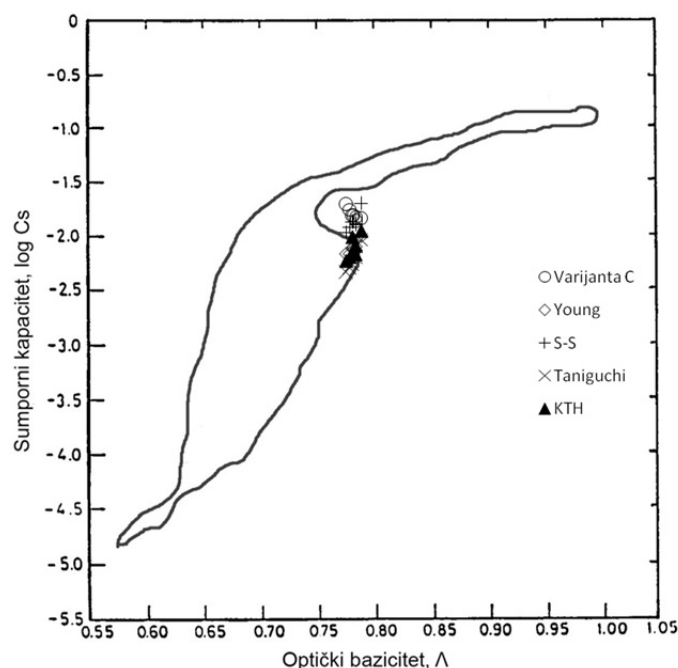
Upoređenjem rezultata uočava se da se vrednosti po Varijanti A nalaze izvan konture pomenutog dela u donjem delu nisko reaktivnih troski. Položaj analiziranih vrednosti po Varijantama B i C nalaze se neznatno izvan kontura ali u gornjem delu krive gde su smeštene visoke vrednosti sumpornog kapaciteta sa troskama visoko reaktivnih sposobnosti. U tom delu su smeštene i vrednosti koje daju, bez izuzetaka svi u ovoj tezi analizirani modeli, za izračunavanje sumpornog kapaciteta.



Slika 17: Odnos između optičkog baziciteta i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika u metalu Varijanta A $[a_o]_{Al}$



Slika 18: Odnos između optičkog baziciteta i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika u metalu Varijanta B $[a_o]_{Si}$



Slika 19: Odnos između optičkog baziciteta i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta za različite vrednosti aktiviteta kiseonika u metalu

Varijanta C $[a_o]_{\text{Si-Al}}$

9.3.6. Analiza uticajnih parametara

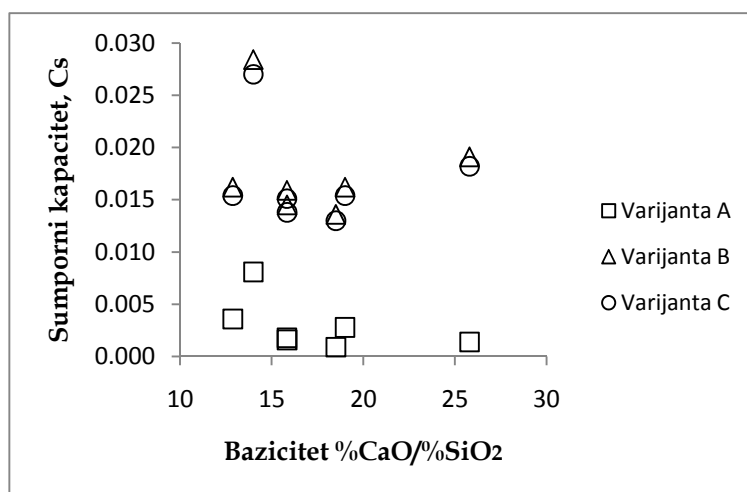
U Tabeli 24 i Slikama 17-44 prikazani su dijagrami zavisnosti pojedinih uticajnih faktora na vrednost izmerenog sumpornog kapaciteta u zavisnosti od izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]$ po Varijantama A, B i C za 31 analiziranu šaržu. Radi bolje preglednosti rezultata, na osnovu srednjih vrednosti završnog sumpora u čeliku, iz Tabele 7 u Poglavlju 8, izračunate su i srednje vrednosti pojedinih elemenata kao što su $\% \text{CaO}$, $\% \text{SiO}_2$, $\% \text{Al}_2\text{O}_3$, $\% \text{MgO}$, bazicitet ($B = \% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2$), optički bazicitet - Λ , temperatura T - izražena u stepenima Kelvina.

Tabela 24: Uticajni parametri za vrednosti izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{S_{izmereno}}$ u zavisnosti od izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]$ po Varijantama A, B i C

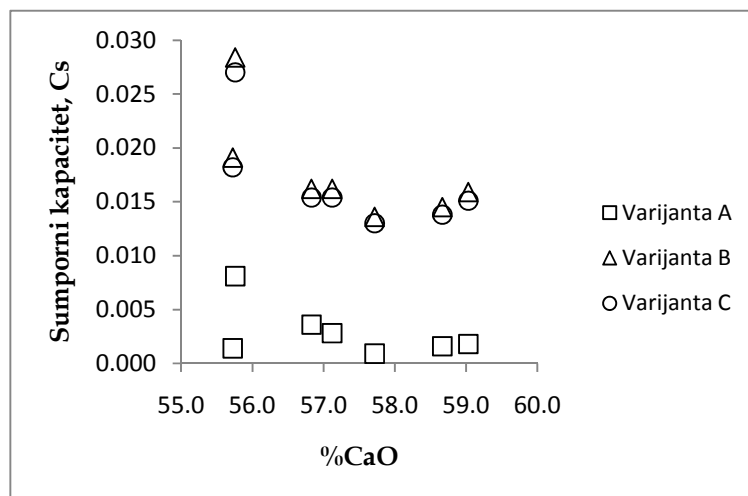
B	%CaO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%MgO	T, °K	Λ	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
14	55.76	4.51	32.49	7.25	1858	0.783	0.0042	0.0275	0.0262
13	56.83	4.55	30.57	8.05	1852	0.789	0.0031	0.0158	0.0150
19	57.12	4.27	31.61	6.99	1860	0.788	0.0008	0.0156	0.0149
26	55.73	2.81	35.09	6.38	1860	0.785	0.0002	0.0181	0.0172
16	58.67	4.01	32.72	4.60	1858	0.790	0.0013	0.0142	0.0135
19	57.72	3.28	33.32	5.68	1851	0.790	0.0006	0.0135	0.0128
16	59.03	3.73	31.12	6.12	1870	0.795	0.0018	0.0158	0.0150

9.3.6.1. Uticajni faktori na vrednosti C_s prema varijantama A, B i C

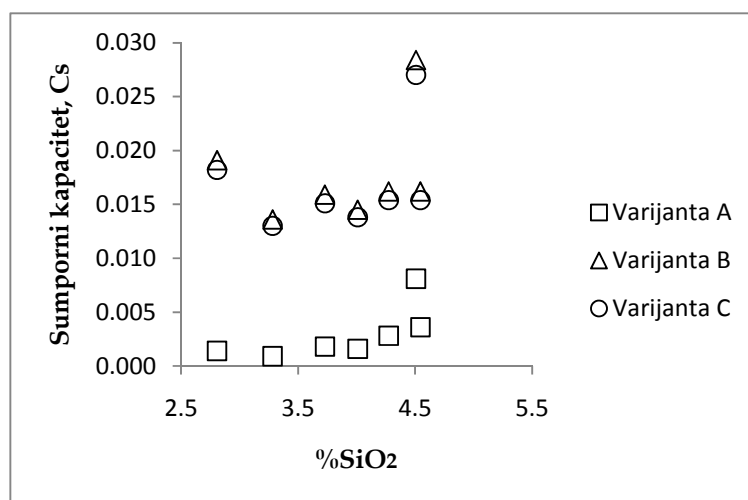
Na dijagramima sa Slika 20÷26 prikazani su uticajni parametri iz Tabele 24 na izmerene vrednosti sumpornog kapaciteta prema Varijantama A, B i C dok dijagrami na Slikama 27÷47 prikazuju uticaj baziciteta $B = \%CaO/\%SiO_2$, kalcijum oksida $\%CaO$, silicijum dioksida $\%SiO_2$, aluminijum trioksida $\%Al_2O_3$, magnezijum oksida $\%MgO$, temperature T i optičkog baziciteta Λ na izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta prema navedenim varijantama i analiziranim modelima.



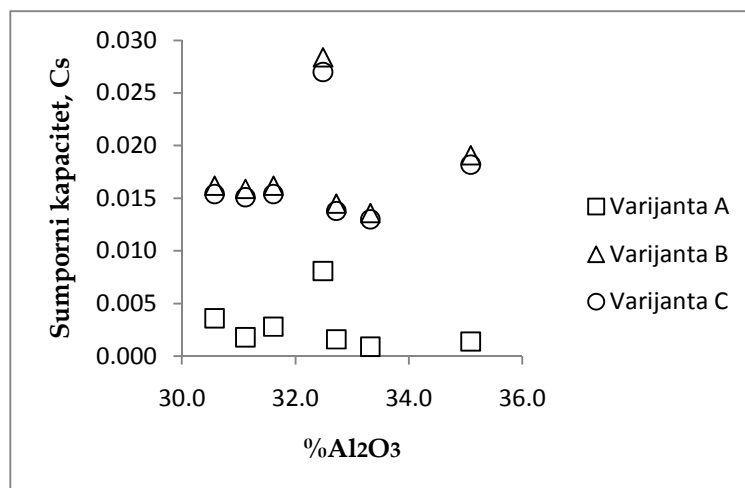
Slika 20: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{S_{izmereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od baziciteta $\%CaO/\%SiO_2$



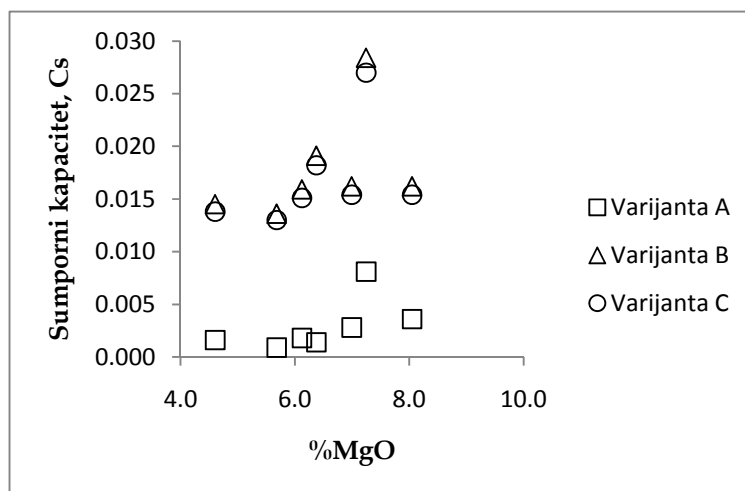
Slika 21: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{s\text{izmereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od %CaO



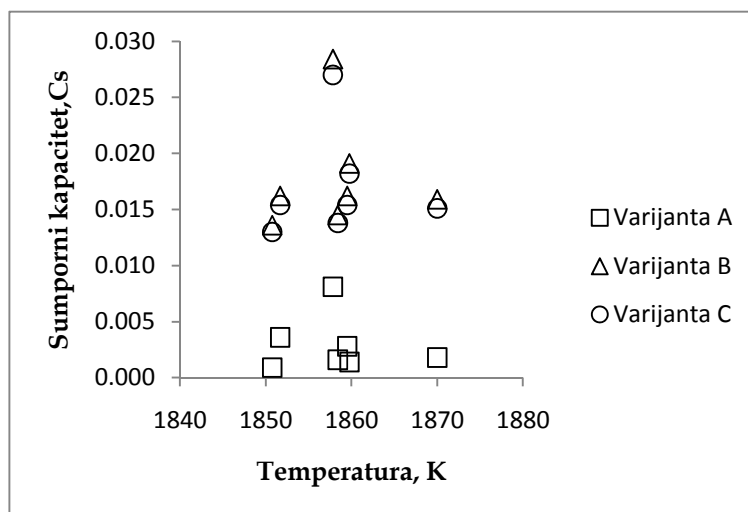
Slika 22: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{s\text{izmereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od %SiO₂



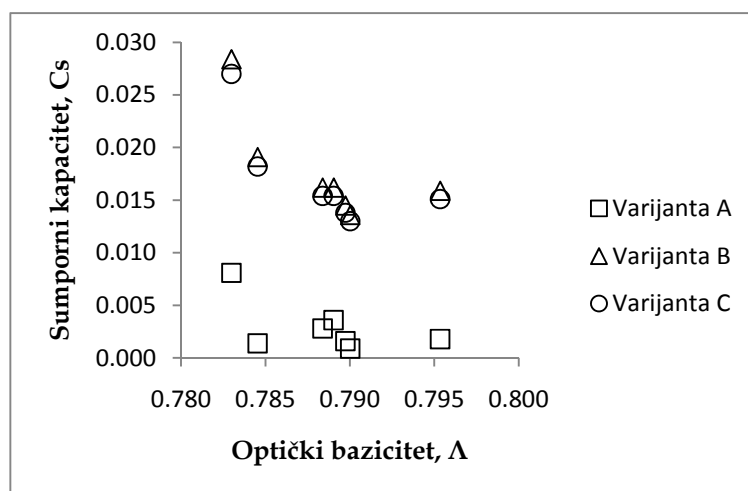
Slika 23: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{s\text{izmereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od % Al_2O_3



Slika 24: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{s\text{izmereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od % MgO



Slika 25: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{S_{izmereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od temperature na kraju procesa vakuumiranja



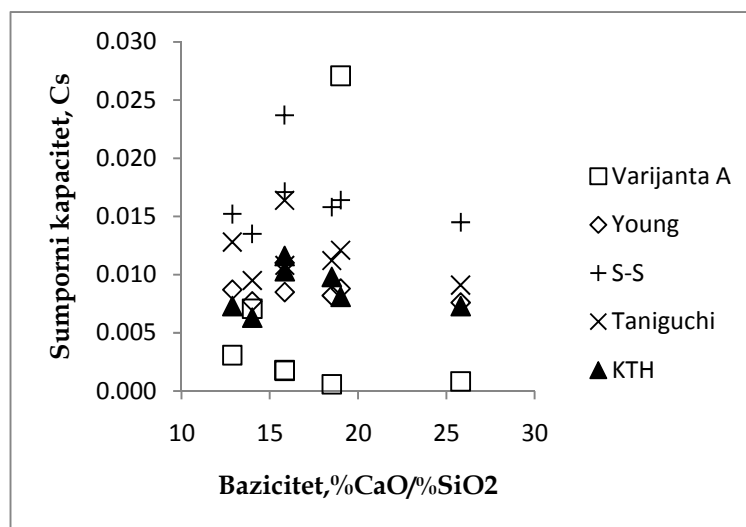
Slika 26: Zavisnost izmerenog sumpornog kapaciteta $C_{S_{izmereno}}$ sa različitim izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ od optičkog baziciteta Λ

Sa Slika 20÷26 je uočljivo da izmerena vrednost sumpornog kapaciteta C_s po Varijanti A daje najniže vrednosti u poređenju sa vrednostima koje su dobijene po Varijantama B i C. Uticaj baziciteta $B = \%CaO/SiO_2$, kalcijum oksida $\%CaO$, silicijum dioksida $\%SiO_2$, aluminijum trioksida $\%Al_2O_3$, magnezijum

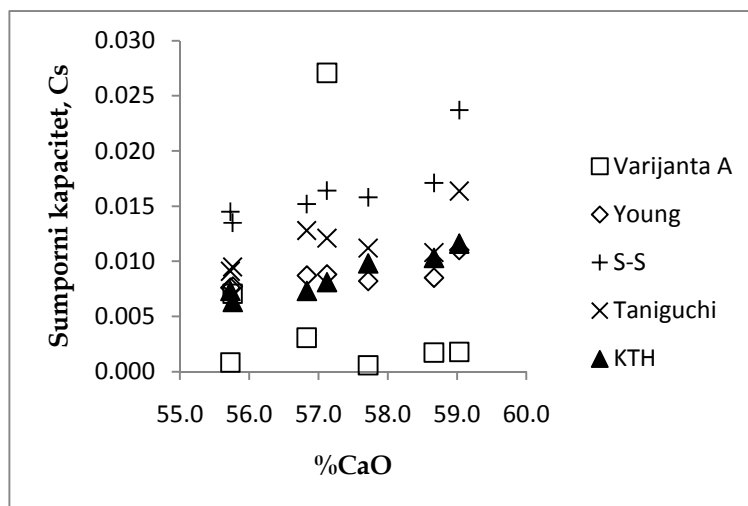
oksida %MgO, temperature T i optičkog baziciteta Λ je najmanji kod Varijante A. Jedan od razloga niskih vrednosti sumpornog kapaciteta C_s , mogao bi da bude i netačna vrednost aktiviteta $a(\text{Al}_2\text{O}_3)$ kao posledica ograničenja koje ima jednačina Ohta i Suita. Sa druge strane ne treba isključiti i mogućnost da su izračunate vrednosti aktiviteta kiseonika verovatno mnogo niže od stvarnih na kraju procesa vakuumiranja. Takođe, kriterijum koji je uzet u razmatranje tj. analiza svih parametara za srednji sadržaj sumpora je očigledno nedovoljan, zbog malog broja šarži, da se stekne realnija slika u kojoj meri navedeni parametri utiču na vrednosti sumpornog kapaciteta.

9.3.6.2. Uticajni faktori na vrednosti C_s prema modelima

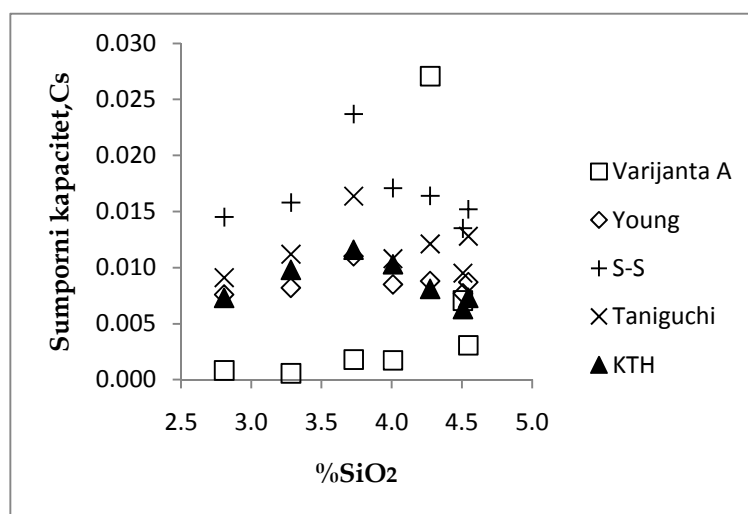
9.3.6.2.1. Varijanta A



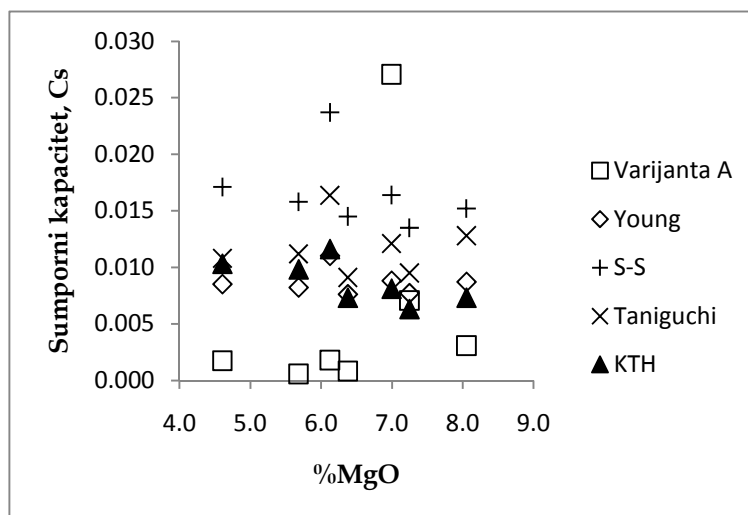
Slika 27: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{\text{Al}}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od baziciteta %CaO/ %SiO₂



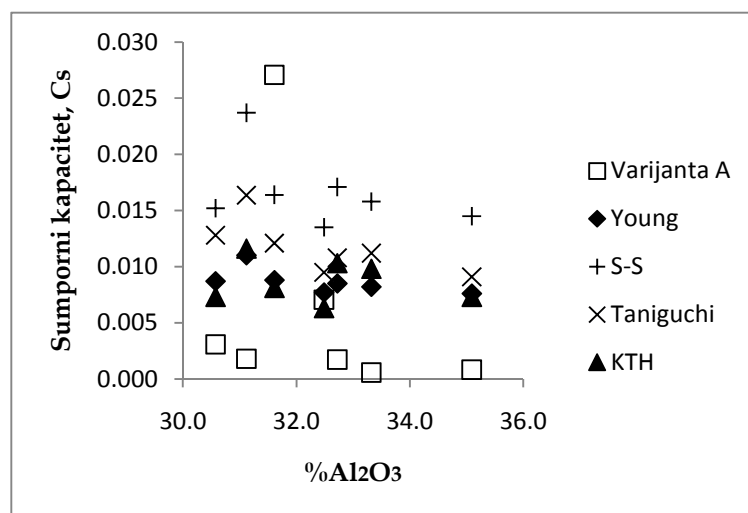
Slika 28: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %CaO



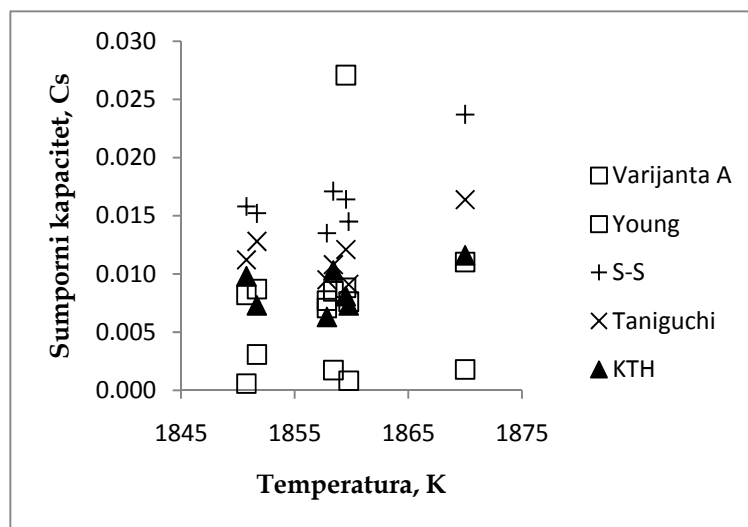
Slika 29: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %SiO₂



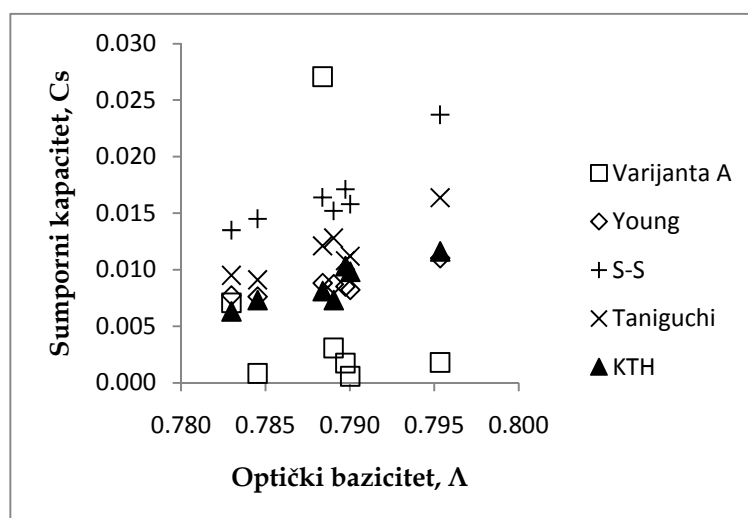
Slika 30: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %MgO



Slika 31: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %Al₂O₃



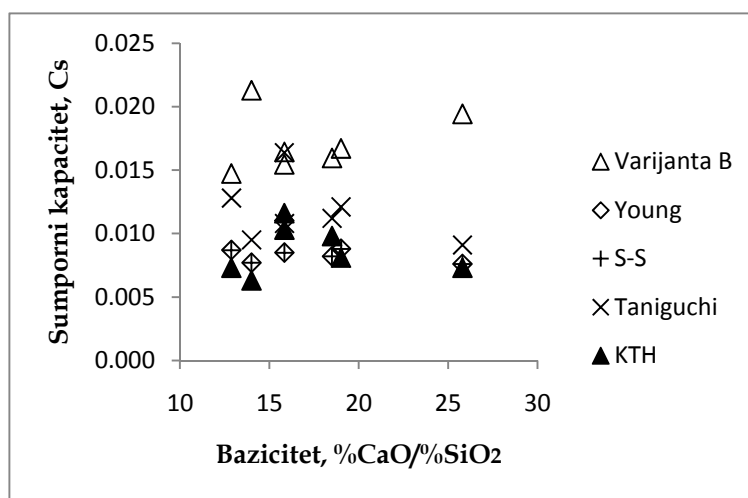
Slika 32: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od temperature



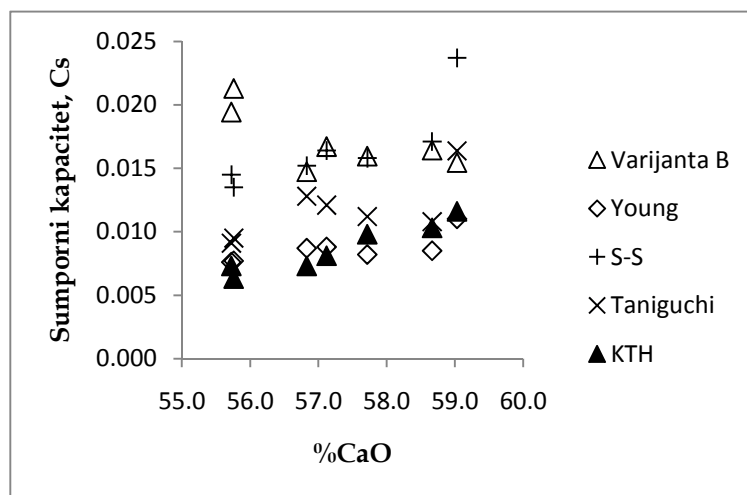
Slika 33: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Al}$ (Varijanta A) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od optičkog baziciteta Λ

Na osnovu dijagrama sa Slika 27÷33, vrednosti sumpornog kapaciteta C_s određeni po Varijanti A, su najniži u poređenju sa vrednostima koje daju modeli KTH, Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, i Taniguchi-a.

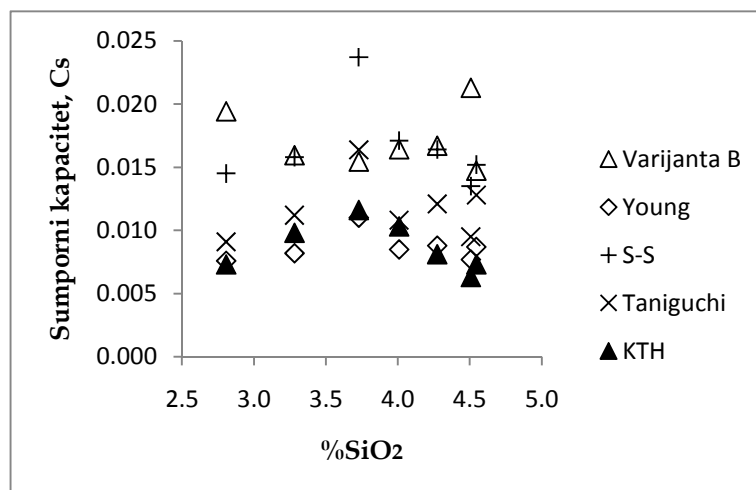
9.3.6.2.2. Varijanta B



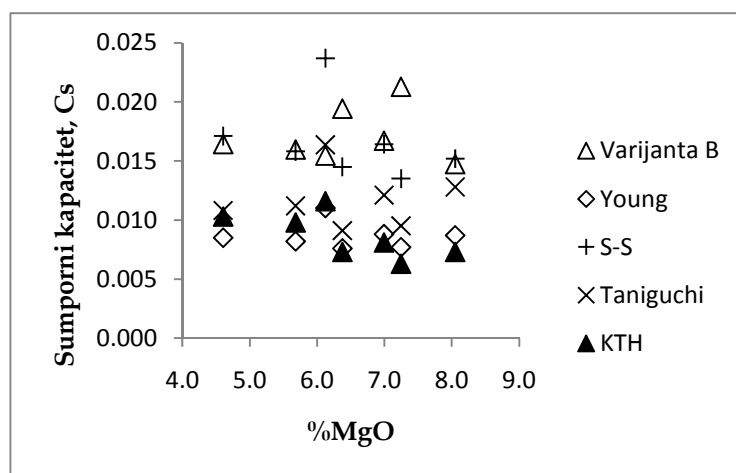
Slika 34: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od baziciteta $\%CaO/\%SiO_2$



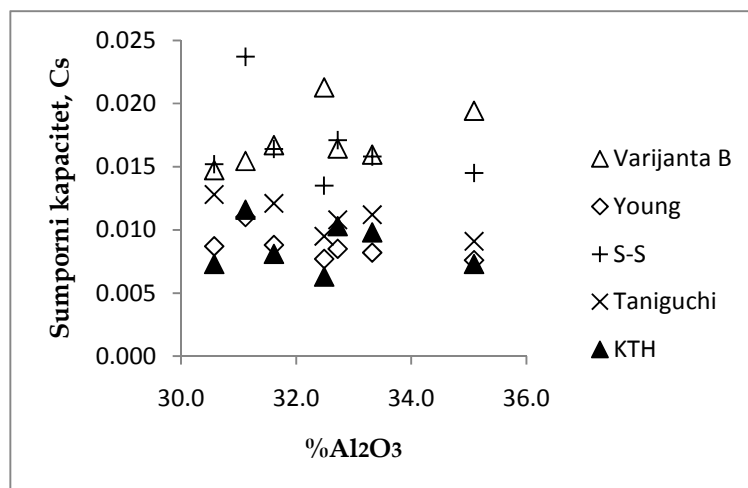
Slika 35: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%CaO$



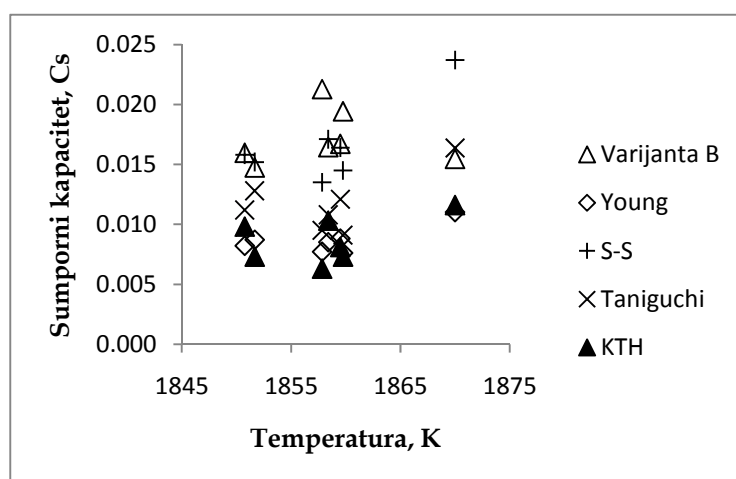
Slika 36: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %SiO₂



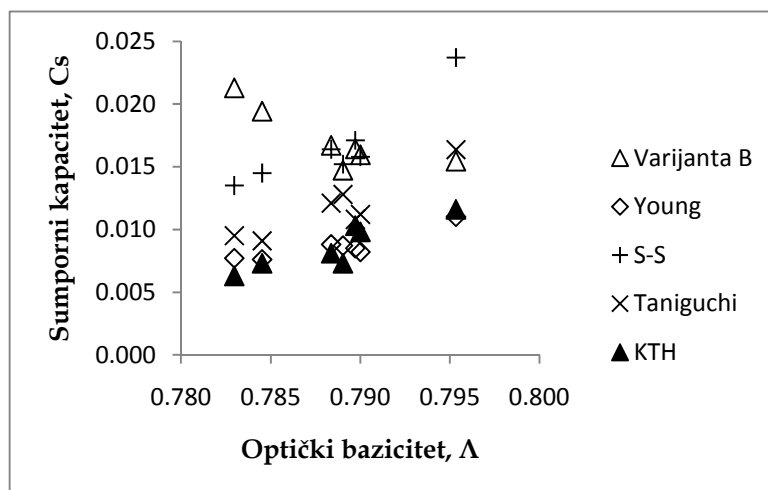
Slika 37: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %MgO



Slika 38: Zavisnost $C_{s\text{izračunato sa } [a_o]_{\text{Si}}}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja % Al_2O_3



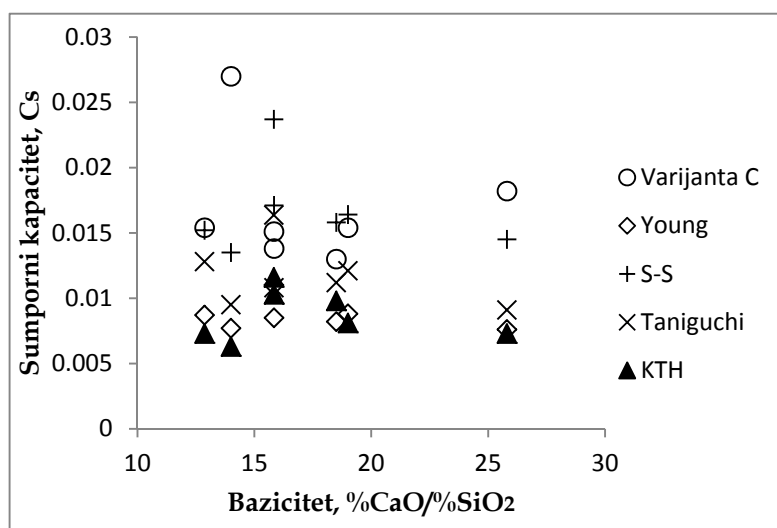
Slika 39: Zavisnost $C_{s\text{izračunato sa } [a_o]_{\text{Si}}}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od temperature



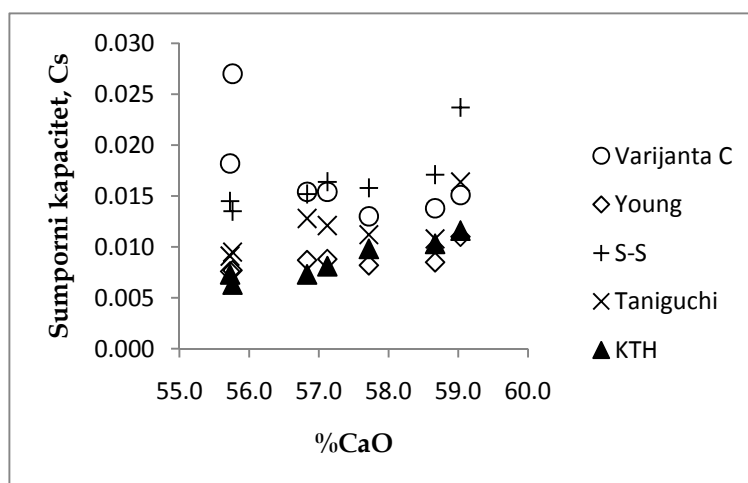
Slika 40: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od optičkog baziciteta Δ

Za razliku od Varijante A, na osnovu dijagrama sa Slika 34÷40, vrednosti sumpornog kapaciteta C_s određeni po Varijanti B, generalno su u boljoj saglasnosti sa vrednostima koje daju modeli KTH, Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, i Taniguchi-a. U poređenju sa vrednostima koje daju modeli uočljivo je da su vrednosti sumpornog kapaciteta po Varijanti B najpribližniji vrednostima koje daje model Sosinsky-Sommerville-a.

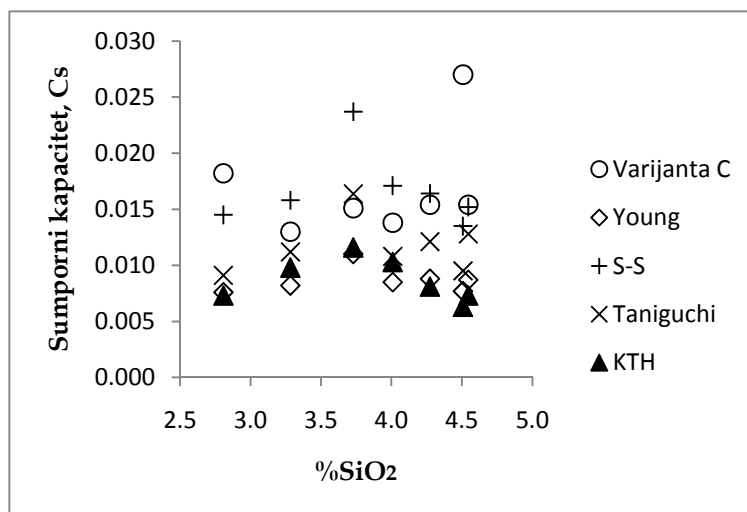
9.3.6.2.3. Varijanta C



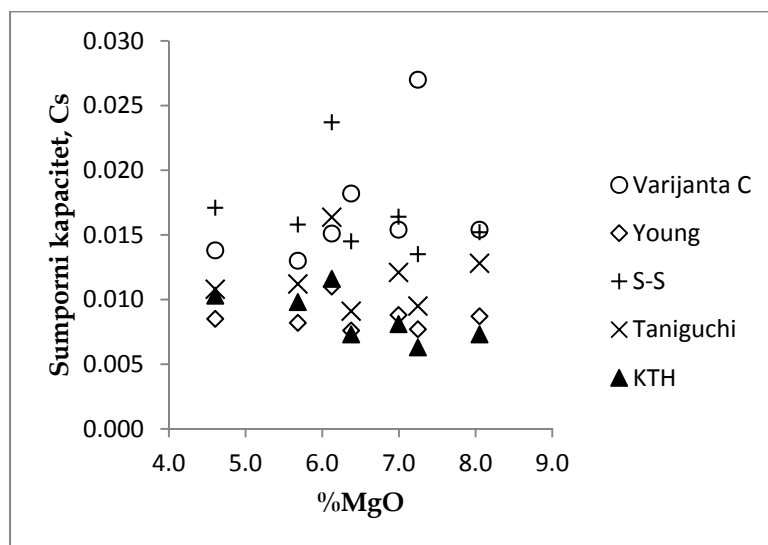
Slika 41: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od baziciteta $\%CaO/\%SiO_2$



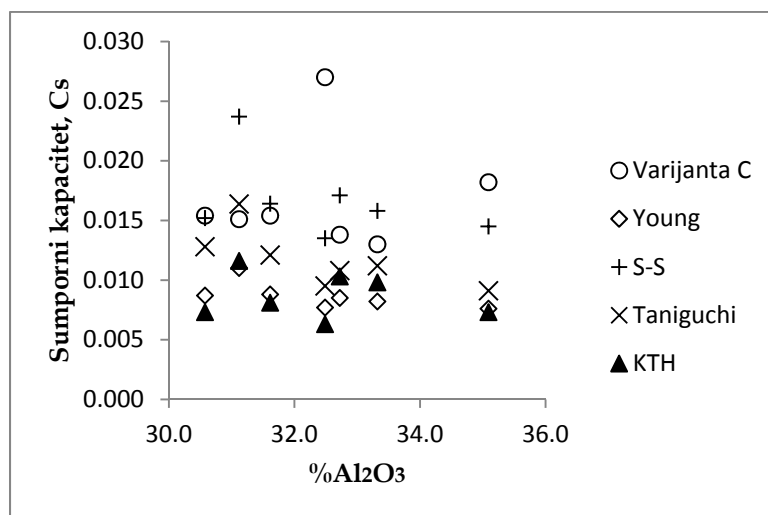
Slika 42: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja $\%CaO$



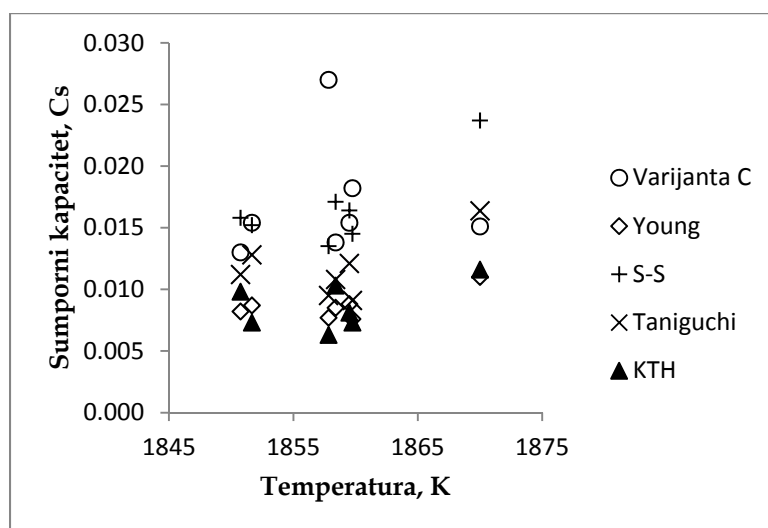
Slika 43: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_0]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %SiO₂



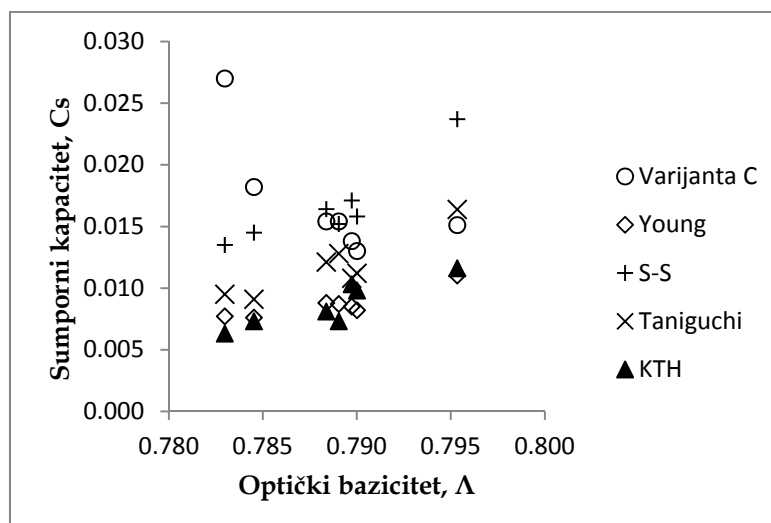
Slika 44: Zavisnost $C_{S_{izračunato}}$ sa $[a_0]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja %MgO



Slika 45: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{\text{Si-Al}}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od sadržaja % Al_2O_3



Slika 46: Zavisnost $C_{s\text{izračunato}}$ sa $[a_o]_{\text{Si-Al}}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od temperature



Slika 47: Zavisnost $C_{Sizračunato}$ sa $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C) izračunat prema originalnim koeficijentima modela sa konceptom optičkog baziciteta i KTH modela od optičkog baziciteta Δ

Kao i kod Varijante B, sa dijagrama koji su dati na Slikama 41÷47 može da se zaključi da se nastavlja trend dobre saglasnosti rezultata sumpornog kapaciteta po Varijanti C sa modelom Sosinsky-Sommerville-a.

Iz Tabele 24 i navedenih dijagrama uočljivo je da su opsezi uticajnih parametara u veoma uskim granicama što ukazuje na dobru pogonsku praksu i tehnološku disciplinu bez većih varijacija u ciklusu izrade od šarže do šarže. Mali broj šarži je dodatni i otežavajući činilac za donošenje zaključaka da li i u kojoj meri navedeni parametri utiču na vrednosti sumpornog kapaciteta. Ipak, očigledno je da su vrednosti sumpornog kapaciteta najniže u Varijanti A u poređenju sa Varijantama B i C što ukazuje na činjenicu manje osetljivosti promena navedenih parametara na vrednosti sumpornog kapaciteta.

9.4. Koeficijent raspodele sumpora

Pored sumpornog kapaciteta C_s , drugi važan parametar preko koga se prati uspešnost odsumporavanja čelika je koeficijent raspodele sumpora definisan

jednačinom (23) kako je pokazano u poglavlju 5.1. Radi upoređenja rezultata, u jednačini (23) su korišćene izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta prema Young metodologiji za vrednost optičkog kapaciteta koji je jednak ili niži od 0.8 ($\Lambda \leq 0.8$) i izračunate vrednosti aktiviteta kiseonika prema Varijantama A, B i C. Da bi se procenilo koji je prilaz efikasniji: modeli koji u sebi uključuju koncept optičkog baziciteta (Young, Sosinsky-Sommerville i Taniguchi) ili KTH model, ista jednačina (24) data u Poglavlju 5.1 je korišćena sa vrednostima sumpornog kapaciteta koji su određeni prema originalnim jednačinama u ovoj tezi analiziranih modela Young-a, Sosinsky-Sommerville-a, Taniguchi-a i KTH modela i izračunatim vrednostima aktiviteta kiseonika prema navedenim varijantama (videti Tabelu 58 u Poglavlju 9.6.2).

U Tabelama 25÷46 i Slikama 48÷52 prikazani su dobijeni rezultati. Takođe, u Tabelama 25, 27, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42 i 44 su navedene i razlike između merenih i izračunatih vrednosti koeficijenta raspodele sumpora L_s . Znak minus “-” označava da je izračunata vrednost viša u odnosu na izmerenu vrednost.

9.4.1. Young metodologija za izračunavanje C_s

Kao što je već ranije pomenuto, po Young metodologiji (videti Poglavlje 2.1) određen je najpre izmereni sumporni kapacitet $\log C_{s\text{izmereno}}$, a zatim je za analizirane šarže određen $\log C_{s\text{izračunato}}$. Na ovaj način određena vrednost $\log C_{s\text{izračunato}}$ korišćena je u jednačini 13 za izračunavanje $L_{s\text{izračunato}}$. Uz odgovarajuću zamenu vrednosti aktiviteta kiseonika izračunat je koeficijent raspodele sumpora $L_{s\text{izračunato}}$ za Varijante A, B i C i upoređivan sa izmerenim vrednostima $L_{s\text{izmereno}}$. U Tabeli 25 date su uporedno izmerene i izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora L_s za različite vrednosti aktiviteta kiseonika $[a_o]$ sa $\log C_{s\text{izračunato}}$ koji je određen po Young metodologiji za različite aktivitete kiseonika $[a_o]$ po Varijanti A, B i C.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 25: Vrednosti koeficijenta raspodele sumpora Ls za različite vrednosti aktiviteta kiseonika [a_o] po Varijanti A, B i C.

Broj šarže	L _S izmereno	L _S izračunato			ΔLs		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
1	3290	1031	1630	1664	2259	1660	1626
2	2967	3579	1911	1950	-612	1056	1017
3	2233	974	2141	2186	1259	92	47
4	1867	1175	1216	1241	691	650	625
5	1723	700	1693	1729	1023	30	-6
6	1527	390	1380	1408	1137	147	118
7	2060	1183	1683	1719	877	377	341
8	1984	2627	1372	1400	-643	612	584
9	1520	983	1274	1300	537	246	220
10	1430	758	1477	1508	672	-47	-78
11	1228	1221	1495	1526	7	-267	-298
12	1094	932	1089	1111	162	5	-17
13	1732	5829	1286	1312	-4097	446	419
14	1330	1491	1159	1183	-161	171	147
15	1233	1917	1478	1508	-683	-244	-275
16	948	10965	1408	1436	-10017	-459	-488
17	1739	985	1201	1226	753	537	513
18	1614	804	1646	1680	811	-31	-66
19	1533	47782	1513	1544	-46249	20	-11
20	1071	1086	1740	1776	-15	-668	-705
21	2013	2728	1662	1698	-715	350	315
22	1625	1000	2117	2162	625	-492	-537
23	1366	1201	1291	1317	165	76	49
24	1238	1500	1751	1789	-262	-514	-551
25	1100	1643	1547	1580	-543	-447	-480
26	1678	1004	1589	1622	674	89	56
27	1230	485	1276	1303	745	-46	-73
28	1200	1952	1459	1489	-752	-259	-289
29	912	588	1369	1397	324	-457	-485
30	1610	1359	1487	1518	251	123	92
31	1115	1204	1118	1142	-89	-3	-27

Kao što se vidi iz Tabele 25, stabilnost rezultata izražena razlikom između izmerene i izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora ΔLs je bolja u Varijantama B i C u poređenju sa Varijantom A. Osim kod šarži N°1 i N°2, razlika između izmerene i izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora u Varijantama B i C je za pogonske uslove, u prihvatljivim granicama. Kada se pogledaju rezultati dobijeni u Varijanti A, sedam šarži ima razliku veću od 1000 jedinica s tim da šarže N°1, N°13, N°16 i N°19 pokazuju razliku veću od 2000 jedinica, a šarže N°16 i N°19 izuzetno veliku i u proizvodnim uslovima nerealnu razliku (-10017 odnosno -46249). Tabele 26 i 27 prikazuju prosečne

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

vrednosti koeficijenta raspodele sumpora i razliku koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ za srednje vrednosti završnog sumpora. Lako je uočljivo da su vrednosti $L_{s\text{izračunato}}$ i ΔL_s stabilnije i bliske izmerenim vrednostima u Varijantama B i C u poređenju sa rezultatima u Varijanti A. Rezultati u Varijanti A osim za završni sumpor $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.0007$ su prihvatljivi za pogonske uslove. Tabela 26 i dijagram na Slici 48 pokazuje zavisnost $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ i bolji koeficijent korelacije u Varijanti B i C ($R=0.66$) u poređenju sa Varijantom A ($R=0.34$).

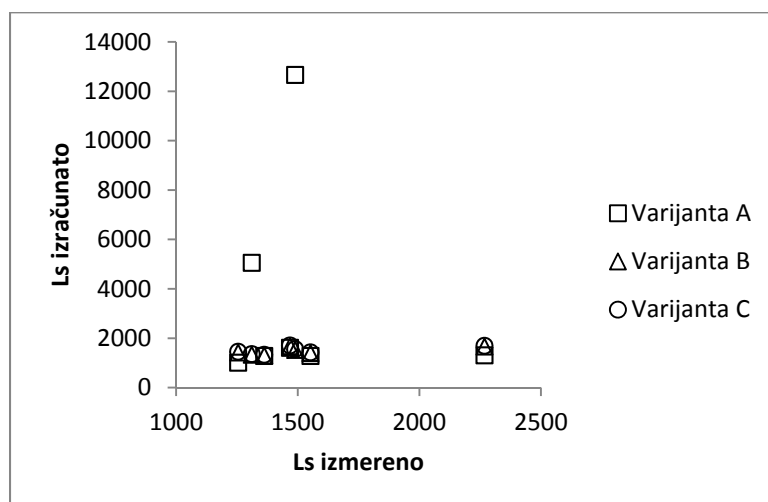
Tabela 26: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{s\text{izmereno}}$ i $L_{s\text{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($C_{s\text{izračunato}}$ po Young-ovoj metodologiji)

[%S] ₂	$L_{s\text{izmereno}}$	$L_{s\text{izračunato}}$		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	1308	1662	1697
0.0005	1553	1284	1398	1428
0.0006	1311	5050	1333	1360
0.0007	1489	12664	1525	1525
0.0008	1468	1614	1674	1709
0.0009	1255	1007	1423	1453
0.0010	1363	1281	1303	1330

Tabela 27: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($C_{s\text{izračunato}}$ prema Young-voj metodologiji)

[%S] ₂	$\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$		
	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	960	606	571
0.0005	269	154	125
0.0006	-3740	-22	-49
0.0007	-11175	-36	-67
0.0008	-146	-205	-241
0.0009	248	-168	-198
0.0010	81	60	33

Na Slici 48 prikazan je dijagram zavisnosti koeficijenta raspodele $L_{S_{izmereno}}$ i $L_{S_{izračunato}}$ za srednji sastav završnog sumpora. Sumporni kapacitet $C_{S_{izračunato}}$ je određen Young metodologijom, sa različitim vrednostima aktiviteta kiseonika (videti Tabelu 12).



Slika 48: Zavisnost izmerenog i izračunatog koeficijenta raspodele sumpora L_S za srednji sastav završnog sumpora ($C_{S_{izračunato}}$ po Young-ovoj metodologiji za različite vrednosti aktiviteta kiseonika)

Tabela 28: Uticajni parametri na vrednost $L_{S_{izračunato}}$ (Varijanta A)

$[\%S]_2$	$[a_o], \text{ppm}$ Varijanta A	$\%CaO/\%Al_2O_3$	$a(Al_2O_3)$	$\log C_s \text{ izračunato}$	$\%SiO_2$
0.0003	0.23	1.72	7.06E-04	-2.70	4,51
0.0005	0.17	1.86	2.69E-04	-2.61	4,55
0.0006	0.21	1.81	9.86E-04	-2.64	4,27
0.0007	0.07	1.59	3.33E-05	-3.39	2,81
0.0008	0.09	1.79	1.06E-04	-2.87	4,01
0.0009	0.05	1.73	2.34E-05	-3.35	3,28
0.0010	0.10	1.90	2.45E-05	-2.75	3,73

Tabela 29 pokazuje korelacione koeficijente za izmerene i izračunate vrednosti koeficijente raspodele L_S sa izračunatim vrednostima sumpornog kapaciteta $\log C_{S_{izračunato}}$ prema Varijantama A, B i C. Iako se koeficijent korelacije R , prema

kriterijumu objašnjenom u Poglavlju 7.9, kreće od osrednje do visoke vrednosti, nameće se zaključak da šarže nisu bliske ravnoteži.

Tabela 29: Korelacioni koeficijenti za $L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$

L_S izmereno – L_S izračunato	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
Polinomska	$y = -0.0159x^2 + 55.295x - 42271$	$y = -0.0003x^2 + 1.4497x + 53.885$	$y = -0.0003x^2 + 1.4863x + 49.465$
R	0.35	0.66	0.66

9.4.2. Young originalni koeficijenti

Tabela 30 prikazuje rezultate koeficijenta raspodele sumpora L_S za svaku analiziranu varijantu posebno. Vrednosti sumpornog kapaciteta $\log C_{Sizračunato}$ određeni su prema Young originalnoj jednačini (videti jednačinu 13 u poglavlju 2.2.2.). Takođe, prikazana je i razlika izmerene i izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_S = L_{Sizmereno} - L_{Sizračunato}$ za svaku varijantu posebno.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 30: Koeficijenti raspodele sumpora sa log $C_{Sizračunato}$ iz Young-ove originalne jednačine

Broj šarže	$L_{Sizmereno}$	L_S izračunato			ΔL_s		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
1	3290	2643	738	776	647	2552	2514
2	2967	701	523	549	2266	2444	2417
3	2233	6571	670	704	-4338	1563	1529
4	1867	11213	614	645	-9347	1253	1222
5	1723	10694	675	710	-8971	1048	1013
6	1527	2564	429	450	-1037	1098	1077
7	2060	4797	932	980	-2737	1128	1080
8	1984	3370	854	897	-1386	1130	1087
9	1520	1775	556	583	-255	964	937
10	1430	6806	1017	1070	-5376	413	360
11	1228	4009	798	839	-2781	430	389
12	1094	6464	873	917	-5370	221	177
13	1732	249244	545	572	-247512	1187	1160
14	1330	32995	933	981	-31665	397	349
15	1233	5446	770	808	-4213	463	425
16	948	901	649	682	48	300	267
17	1739	23020	652	684	-21281	1087	1054
18	1614	3078	500	524	-1464	1115	1090
19	1533	6126481	484	509	-6124948	1048	1024
20	1071	11556	839	881	-10484	233	190
21	2013	81587	996	1046	-79574	1017	967
22	1625	5200	1012	1065	-3575	613	560
23	1366	6849	685	719	-5483	681	647
24	1238	4713	824	865	-3475	414	372
25	1100	5519	812	853	-4419	288	247
26	1678	8584	1098	1154	-6906	580	524
27	1230	5721	500	525	-4491	730	705
28	1200	41489	1054	1107	-40289	146	93
29	912	28576	469	493	-27664	443	419
30	1610	8257	891	935	-6647	719	675
31	1115	7417	936	983	-6302	179	132

Rezultati u Varijantama B i C pokazuju niže vrednosti u odnosu na izmerene vrednosti, ali ujednačene vrednosti L_s u poređenju sa Varijantom A. Trinaest šarži ($N^{\circ}1 \div N^{\circ}8$, $N^{\circ}13$, $N^{\circ}17$, $N^{\circ}18$, $N^{\circ}19$) sa razlikom većom od 1000 jedinica u Varijantama B i C. Ta razlika je intezivnija kod šarži sa nižim sadržajem završnog sumpora $[\%S]_2 \leq 0.0005$ (ukupno 8 šarži) u poređenju sa šaržama sa završnim sumporom $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.0010$ (samo 4 šarže). Kada se pogledaju rezultati u Varijanti A rezultati su daleko neujednačeniji i nerealni za pogonske

uslove, osim kod šarže N°16 gde je rezultat izmerene vrednosti koeficijenta raspodele sumpora gotovo identičan sa izračunatom vrednošću.

Tabele 31 i 32 prikazuju prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora i razliku koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ za srednje vrednosti završnog sumpora. Evidentno je da su vrednosti $L_{S_{izračunato}}$ i ΔL_s stabilnije u Varijantama B i C u poređenju sa rezultatima u Varijanti A. Tabela 30 i dijagram na Slici 49 pokazuje zavisnost $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ i stepen korelacije u Varijanta B i C ($R=0.58$). Kako su u Varijanti A izračunate vrednosti L_s nerazumljivo visoki, (verovatno kao posledica nepokrivanja Ohta-Suito-a jednačine za proračun aktiviteta $a(\text{Al}_2\text{O}_3)$ sa troskama sa sadržajem SiO_2 nižim od 10%-videti Poglavlje 6, jednačina 34), to je na Slici 49 prikazana samo zavisnost u Varijanti B i Varijanti C. Rezultati koeficijenta raspodele sumpora za Varijantu A su potpuno nerealni i neupotrebljivi za pogonske uslove.

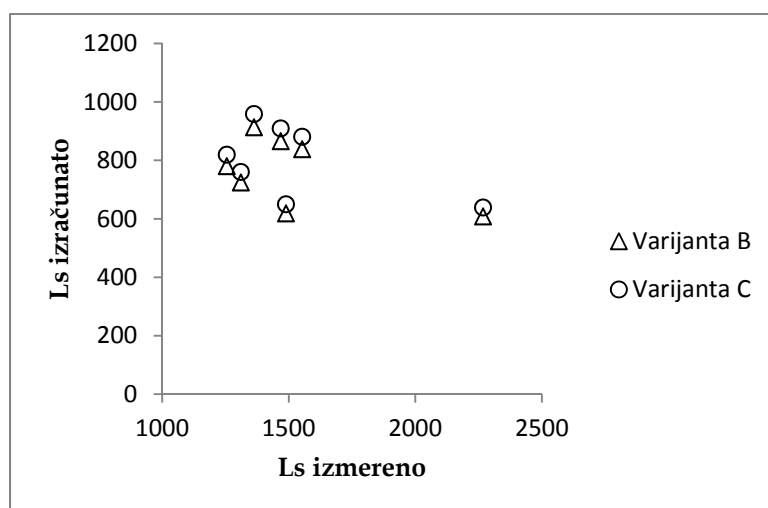
Tabela 31: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{S_{izmereno}}$ i $L_{S_{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_s$ izračunato iz Young-ove originalne jednačine)

[%S] ₂	$L_{S_{izmereno}}$	$L_{S_{izračunato}}$		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	1308	1662	1697
0.0005	1553	1284	1398	1428
0.0006	1311	5050	1333	1360
0.0007	1489	12664	1525	1525
0.0008	1468	1614	1674	1709
0.0009	1255	1007	1423	1453
0.0010	1363	1281	1303	1330

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 32: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora (C_s izračunato iz Young-ove originalne jednačine)

[%S] ₂	L _{sizmereno}	$\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	-3463	1659	1629
0.0005	1553	-2984	714	672
0.0006	1311	-70836	587	550
0.0007	1489	-1539544	871	840
0.0008	1468	-19305	603	559
0.0009	1255	-19838	475	435
0.0010	1363	-6475	449	404



Slika 49: Zavisnost $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ sa $\log C_{s\text{izračunato}}$ po Young originalnim koeficijentima i izračunatim aktivitetima kiseonika [a_o] po Varijanti B i Varijanti C

Tabela 33: Korelacioni koeficijenti za $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ ($\log C_{s\text{izračunato}}$ iz Young-ove originalne jednačine)

$L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$	Varijanta B	Varijanta C
Polinomska	$y = -0.0003x^2 + 0.7125x + 290.17$	$y = -0.0003x^2 + 0.7548x + 299.17$
R	0.58	0.58

9.4.3. Sosinsky - Sommerville originalni koeficijenti

Tabela 34: Koeficijenti raspodele sumpora sa log $C_{Sizračunato}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine

Broj šarže	$L_{Sizmereno}$	$L_{Sizračunato}$			ΔLs		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
1	3290	4293	1199	1260	-1003	2091	2030
2	2967	1093	815	856	1874	2152	2111
3	2233	13192	1346	1413	-10959	887	820
4	1867	21269	1165	1223	-19402	702	644
5	1723	18292	1155	1214	-16568	568	509
6	1527	4218	705	740	-2692	822	786
7	2060	7793	1515	1593	-5733	545	467
8	1984	5928	1501	1578	-3944	483	406
9	1520	3228	1010	1061	-1708	510	459
10	1430	11010	1646	1731	-9580	-216	-301
11	1228	6080	1210	1272	-4852	18	-44
12	1094	12857	1737	1823	-11763	-643	-729
13	1732	499428	1091	1145	-497697	640	586
14	1330	60138	1701	1787	-58808	-371	-457
15	1233	11634	1645	1727	-10401	-411	-493
16	948	1331	959	1007	-383	-11	-59
17	1739	44115	1249	1311	-42377	490	427
18	1614	6194	1005	1055	-4580	609	559
19	1533	10264125	812	853	-10262592	721	680
20	1071	23175	1682	1768	-22104	-611	-696
21	2013	182714	2230	2342	-180702	-217	-330
22	1625	8255	1606	1690	-6630	19	-65
23	1366	13486	1349	1416	-12119	17	-50
24	1238	9830	1718	1804	-8592	-480	-567
25	1100	11111	1635	1716	-10011	-535	-616
26	1678	16629	2127	2235	-14951	-449	-557
27	1230	10220	893	937	-8990	337	293
28	1200	91719	2330	2446	-90519	-1130	-1246
29	912	47507	780	820	-46595	132	92
30	1610	17697	1909	2005	-16087	-299	-395
31	1115	16022	2023	2122	-14907	-908	-1007

Tabela 34 prikazuje rezultate koeficijenta raspodele sumpora L_s sa sumpornim kapacitetom prema Sosinsky-Sommerville originalnom jednačinom i koeficijentima (videti jednačinu 12 u poglavlju 2.2.1.) za svaki analizirani slučaj posebno. Rezultati u Varijantama B i C pokazuju razliku veću od 1000 jedinica samo u tri slučaja (šarže N°1, N°2 i N°28), a u Varijanti C i kod šarže N°31.

Kada se pogledaju vrednosti prema Varijanti A rezultati su kao i u prethodnim slučajevima neujednačeni i nerealni za pogonske uslove. Tabele 35 i 36 prikazuju prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora i razliku koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ za srednje vrednosti završnog sumpora.

Kao i u prethodno analiziranim slučajevima, vrednosti $L_{S_{izračunato}}$ i ΔL_s su stabilniji u Varijantama B i C u poređenju sa rezultatima u Varijanti A. Tabela 35 i dijagram na Slici 50 pokazuje zavisnost $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ i stepen korelacije u Varijanti B i C ($R=0.59$). Rezultati koeficijenta raspodele sumpora za Varijantu A su potpuno nerealni i neupotrebljivi za pogonske uslove.

Tabela 35: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{S_{izmereno}}$ i $L_{S_{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine)

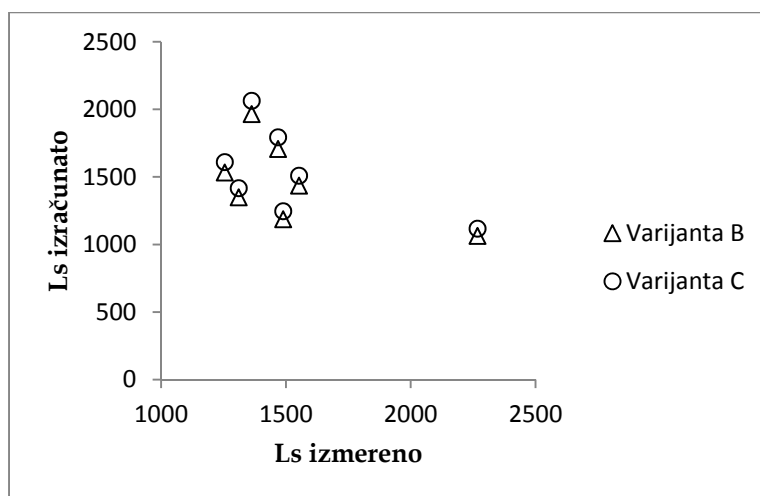
[%S] ₂	$L_{S_{izmereno}}$	$L_{S_{izračunato}}$		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	10393	1064	1118
0.0005	1553	7816	1437	1510
0.0006	1311	143133	1349	1417
0.0007	1489	2584402	1187	1247
0.0008	1468	45079	1707	1794
0.0009	1255	41518	1533	1610
0.0010	1363	16859	1966	2064

Tabela 36: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine)

[%S] ₂	$L_{S_{izmereno}}$	$\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	-8125	1204	1150
0.0005	1553	-6263	116	43
0.0006	1311	-141822	-38	-106
0.0007	1489	-2582913	302	243
0.0008	1468	-43611	-239	-326
0.0009	1255	-40263	-278	-355
0.0010	1363	-15497	-603	-701

Tabela 37: Korelacioni koeficijenti za $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz Sosinsky-Sommerville-ove originalne jednačine)

L_S izmereno – L_S izračunato	Varijanta B	Varijanta C
Polinomska	$y = -0.0001x^2 - 0.0112x + 1838.6$	$y = -0.0002x^2 - 0.0009x + 1921.6$
R	0.59	0.60



Slika 50: Zavisnost $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ sa $\log C_{S_{izračunato}}$ po Sosinsky-Sommerville originalnim koeficijentima i izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ po Varijanti B i Varijanti C

9.4.4. Taniguchi originalni koeficijenti

Tabela 38: Koeficijenti raspodele sumpora sa log $C_{Sizračunato}$ iz Taniguchi originalne jednačine

Broj šarže	$L_{Sizmereno}$	L_S izračunato			ΔL_s		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
1	3290	3445	962	1011	-155	2328	2279
2	2967	775	578	607	2192	2389	2360
3	2233	7829	799	839	-5595	1435	1395
4	1867	14410	789	829	-12543	1077	1038
5	1723	13421	848	891	-11697	876	832
6	1527	3173	530	557	-1647	996	970
7	2060	6749	1312	1379	-4689	748	681
8	1984	4746	1202	1263	-2762	782	721
9	1520	2150	673	706	-630	847	814
10	1430	10694	1599	1681	-9264	-169	-251
11	1228	6024	1199	1260	-4796	29	-32
12	1094	10360	1400	1469	-9266	-306	-375
13	1732	295260	645	677	-293528	1086	1054
14	1330	54741	1549	1627	-53411	-219	-297
15	1233	6805	962	1010	-5571	271	223
16	948	1213	874	918	-265	75	30
17	1739	30288	857	900	-28550	881	838
18	1614	3260	529	555	-1645	1085	1059
19	1533	7580743	600	630	-7579210	933	903
20	1071	14087	1023	1074	-13015	49	-3
21	2013	105776	1291	1356	-103764	722	657
22	1625	6854	1334	1403	-5229	291	222
23	1366	8899	890	934	-7533	476	432
24	1238	5571	974	1023	-4334	264	215
25	1100	6932	1020	1071	-5832	80	29
26	1678	12694	1624	1706	-11016	54	-28
27	1230	6907	603	634	-5677	627	596
28	1200	61379	1559	1637	-60179	-359	-437
29	912	34790	571	600	-33877	341	312
30	1610	10783	1163	1221	-9173	447	389
31	1115	12085	1526	1601	-10970	-411	-486

U Tabeli 38 prikazane su srednje vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{Sizračunato}$ sa log $C_{Sizračunato}$ sa originalnim Taniguchi koeficijentima (jednačina 15 u Poglavlju 2.2.3.) i različitim izračunatim aktivitetima kiseonika. Rezultati u Varijantama B i C pokazuju razliku veću od 1000 jedinica u 6 slučajeva (šarže N°1÷ N°4, N°13 i N°18). Kao i kod prethodnih modela tako i Taniguchi-jev

model u Varijanti A daje rezultate koji su neujednačeniji i nerealni za pogonske uslove. Tabele 39 i 40 prikazuju prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora i razliku koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ za srednje vrednosti završnog sumpora.

Kao i u prethodno analiziranim slučajevima, vrednosti $L_{S_{izračunato}}$ i ΔL_s su stabilniji u Varijantama B i C u poređenju sa rezultatima u Varijanti A. Nije pravilo, ali prosečne vrednosti $L_{S_{izračunato}}$ za prosečni sadržaj sumpora su bliži izmerenim vrednostima kako raste vrednost sumpora. Razlika ΔL_s je manja sa porastom srednje vrednosti završnog sumpora [%S]. U Varijanti A, rezultat je kao i kod prethodnih modela: neupotrebljivi, nerealni i nerazumljivo visoki. Tabela 41 i dijagram na Slici 51 pokazuje zavisnost $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ i stepen korelacije u Varijantama B i C ($R=0.57$). Kako su u Varijanti A vrednosti L_s nerazumljivo visoki, to je na Slici 51 kao i kod prethodno pomenutih modela prikazana samo zavisnost u Varijanti B i Varijanti C. Rezultati koeficijenta raspodele sumpora za Varijantu A su potpuno nerealni i neupotrebljivi za pogonske uslove.

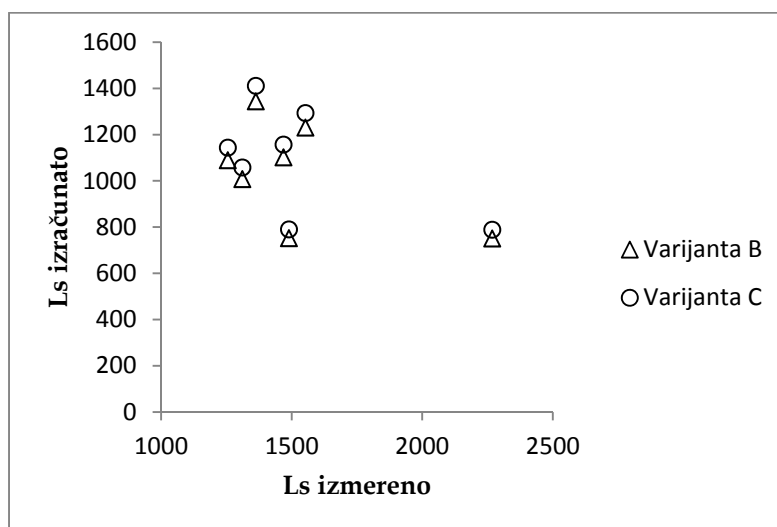
Tabela 39: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz Taniguchi originalne jednačine)

[%S] ₂	$L_{S_{izmereno}}$	L_s izračunato		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	7175	751	789
0.0005	1553	6787	1231	1293
0.0006	1311	89505	1007	1058
0.0007	1489	1907094	752	790
0.0008	1468	26807	1102	1157
0.0009	1255	28942	1089	1144
0.0010	1363	11434	1344	1411

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 40: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_s$ izračunato iz Taniguchi originalne jednačine)

[%S] ₂	L _{sizmereno}	$\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	-4908	1517	1479
0.0005	1553	-5235	322	259
0.0006	1311	-88194	303	253
0.0007	1489	-1905605	737	699
0.0008	1468	-25338	367	311
0.0009	1255	-27687	166	111
0.0010	1363	-10071	18	-49



Slika 51: Zavisnost $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ sa $\log C_{s\text{izračunato}}$ po Taniguchi originalnim koeficijentima i izračunatim aktivitetima kiseonika [a_o] po Varijanti B i Varijanti C

Tabela 41: Korelacioni koeficijenti za $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ ($\log C_{s\text{izračunato}}$ iz Taniguchi originalne jednačine)

$L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$	Varijanta B	Varijanta C
Polinomska	$y = -0.0003x^2 + 0.587x + 792.4$	$y = -0.0003x^2 + 0.6258x + 824.28$
R	0.57	0.57

9.4.5. KTH model - originalni koeficijenti

Tabela 42: Koeficijenti raspodele sumpora sa $\log C_{Siz}$ računato iz KTH modela

Broj šarže	L _{Siz} mereno	L _S izračunato			ΔL_s		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C	Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
1	3290	1945	543	571	1345	2747	2719
2	2967	801	597	627	2166	2370	2339
3	2233	7454	760	799	-5220	1473	1435
4	1867	7491	410	431	-5624	1456	1436
5	1723	7049	445	468	-5326	1278	1255
6	1527	1555	260	273	-29	1267	1254
7	2060	3723	724	761	-1663	1336	1299
8	1984	3766	954	1002	-1782	1030	982
9	1520	1813	567	596	-293	953	924
10	1430	5356	801	842	-3926	629	588
11	1228	2066	411	432	-838	817	796
12	1094	5167	698	733	-4073	396	361
13	1732	204058	446	468	-202326	1286	1264
14	1330	24010	679	714	-22680	651	616
15	1233	7190	1016	1067	-5957	217	166
16	948	702	505	531	247	443	417
17	1739	22556	639	671	-20817	1100	1068
18	1614	2405	390	410	-791	1224	1205
19	1533	3416539	270	284	-3415006	1263	1249
20	1071	16617	1206	1267	-15546	-135	-196
21	2013	107393	1311	1377	-105381	702	636
22	1625	6752	1314	1382	-5127	311	243
23	1366	6987	699	734	-5621	667	633
24	1238	6316	1104	1159	-5079	134	78
25	1100	5844	860	903	-4744	240	197
26	1678	13551	1733	1821	-11873	-56	-144
27	1230	4442	388	408	-3212	842	822
28	1200	61177	1554	1632	-59977	-354	-432
29	912	19653	323	339	-18741	589	573
30	1610	10154	1095	1150	-8544	515	460
31	1115	6796	858	900	-5681	257	215

Tabela 42 prikazuje rezultate koeficijenta raspodele sumpora L_s sa sumpornim kapacitetom prema KTH originalnom modelu (videti jednačinu 16 u Poglavlju 2.2.4.) za svaki analizirani slučaj posebno. Rezultati u Varijantama B i C pokazuju razliku veću od 1000 jedinica kod jedanaest šarži (šarže N°1÷ N°7, N°13, N°17, N°18 i N°19).

Kada se pogledaju rezultati u Varijanti A rezultati su kao i u prethodnim slučajevima neujednačeniji i nerealni za pogonske uslove. Za razliku od gore pomenutih modela koji uključuju koncept optičkog baziciteta, kod pojedinih šarži KTH model za proračun sumpornog kapaciteta čak i u Varijanti A, daje $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ razliku koja je jako mala i približna izmerenoj $L_{s_{izmereno}}$ ili vrednostima koje se dobijaju kod Varijanti B i C (šarže N°1, N°2, N°6, N°7, N°8, N°9, N°11, N°16). Tabele 43 i 44 prikazuju prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora i razliku koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ za srednje vrednosti završnog sumpora.

Tabela 45 i dijagram na Slici 52 pokazuju zavisnost $L_{S_{izmereno}} - L_{S_{izračunato}}$ i stepen korelacije u Varijantama B i C ($R=0.64$). Korelacioni koeficijent je najviši u poređenju sa prethodno analiziranim modelima. Iz razloga koji su već pomenuti kod analize gore pomenutih modela, na Slici 52 je prikazana samo zavisnost u Varijanti B i Varijanti C. Rezultati koeficijenta raspodele sumpora za Varijantu A su potpuno nerealni i neupotrebljivi za pogonske uslove.

Tabela 43: Prosečne vrednosti koeficijenta raspodele sumpora prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{S_{izračunato}}$ iz KTH modela)

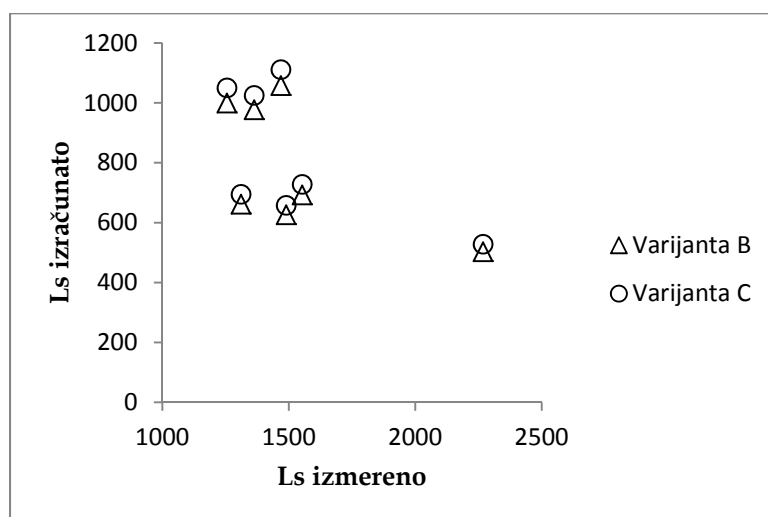
[%S] ₂	L _{S_{izmereno}}	L _{S_{izračunato}}		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	4382	503	528
0.0005	1553	3648	692	728
0.0006	1311	58990	662	695
0.0007	1489	864529	626	658
0.0008	1468	26658	1057	1111
0.0009	1255	24706	1000	1050
0.0010	1363	8475	977	1025

Tabela 44: Prosečne vrednosti razlike koeficijenta raspodele sumpora $\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ prema srednjim vrednostima završnog sumpora ($\log C_{s\text{izračunato}}$ iz KTH modela)

[%S] ₂	L _{sizmereno}	$\Delta L_s = L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$		
		Varijanta A	Varijanta B	Varijanta C
0.0003	2268	-2115	1617	1740
0.0005	1553	-2096	860	825
0.0006	1311	-57679	649	616
0.0007	1489	-863040	863	831
0.0008	1468	-25190	411	357
0.0009	1255	-23451	255	205
0.0010	1363	-7113	386	337

Tabela 45: Korelacioni koeficijenti za $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ ($\log C_{s\text{izračunato}}$ iz KTH modela)

$L_s \text{ izmereno} - L_s \text{ izračunato}$	Varijanta B	Varijanta C
Polinomska	$y = 0.0002x^2 - 1.1766x + 2115.9$	$y = 0.0002x^2 - 1.1261x + 2019.6$
R	0.64	0.64



Slika 52: Zavisnost $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ sa $\log C_{s\text{izračunato}}$ po KTH modelu i izračunatim aktivitetima kiseonika $[a_o]$ po Varijanti B i Varijanti C

U Tabeli 46 zbirno je dat pregled korelacionih koeficijenata R između koeficijenta raspodele sumpora $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$ za sve analizirane modele.

Kao i kod određivanja sumpornog kapaciteta Cs tako i kod vrednosti koeficijenta raspodele sumpora L_s izračunato, očigledno je da KTH model pokazuje bolji rezultat u poređenju sa modelima koji u sebi uključuju koncept optičkog baziciteta.

Tabela 46: Korelacioni koeficijent R za $L_{s\text{izmereno}} - L_{s\text{izračunato}}$

R	Young	S-S	Taniguchi	KTH
Varijanta A	-	-	-	-
Varijanta B	0.58	0.60	0.57	0.64
Varijanta C	0.58	0.60	0.57	0.64

9.5. Analiza uticajnih parametara

9.5.1. Koeficijent raspodele sumpora L_s sa sumpornim kapacitetom prema Young metodologiji

U Tabeli 47 prikazani su parametri koji bi mogli da utiču na ostvarene vrednosti. Radi preglednosti, sve vrednosti parametara su izračunate za srednji završni sumpor $[\%S]_2$ u čeliku iz Tabela 6 i 7 u Poglavlju 8, Tabele 10 u Poglavlju 9.3 i Tabele 57 u Poglavlju 9.6,

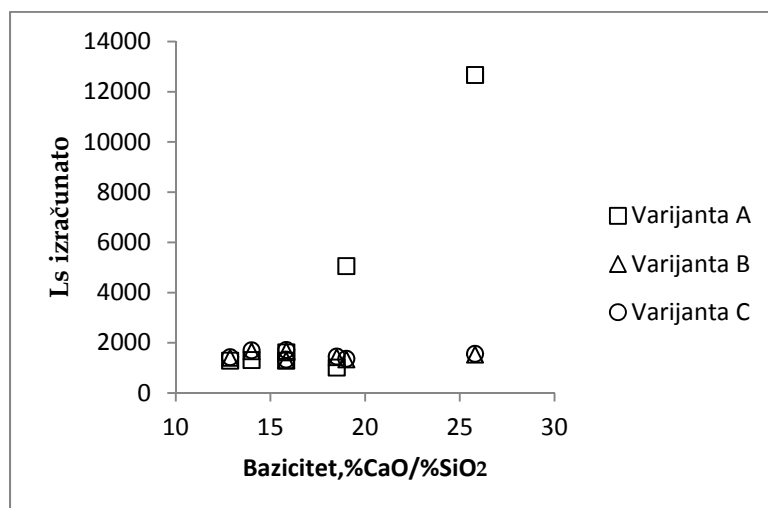
Tabela 47: Prosečne vrednosti baziciteta, hemijskog sastava troske i temperature metalnog kupatila na kraju procesa rafinacije čelika u livnom loncu

$[\%S]_2$	Hemijski sastav, [tež. %]						T, °K	$a(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\log C_{s\text{izrač.}}$
	B	%CaO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%MgO	%CaO/ %Al ₂ O ₃			
0.0003	14	55.76	4.51	32.49	7.25	1.72	1858	7.06E-04	-2.70
0.0005	13	56.83	4.55	30.57	8.05	1.86	1852	2.69E-04	-2.61
0.0006	19	57.12	4.27	31.61	6.99	1.81	1860	9.86E-04	-2.64
0.0007	26	55.73	2.81	35.09	6.38	1.59	1860	3.33E-05	-3.39
0.0008	16	58.67	4.01	32.72	4.60	1.79	1858	1.06E-04	-2.87
0.0009	19	57.72	3.28	33.32	5.68	1.73	1851	2.34E-05	-3.35
0.0010	16	59.03	3.73	31.12	6.12	1.90	1870	2.45E-05	2.75

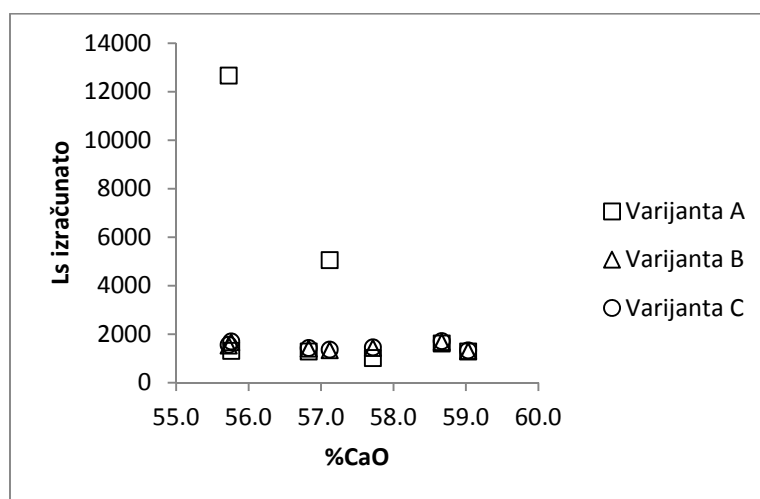
Iz Tabele 26 (videti Poglavlje 9.4.6), očigledno je da su srednje vrednosti izmerenog i izračunatog koeficijenta raspodele sumpora L_s za Varijante B i C bliske u poređenju sa Varijantom A, gde su vrednosti $L_{s\text{izračunato}}$ za završni sadržaj sumpora od $[\%S]_2 = 0.0007$ nerealno visoke. Kako pokazuje Tabela 47, racionalno objašnjenje bi moglo da bude uticaj odnosa $\%CaO/\%Al_2O_3 = 1.59$ koji je za ovu grupu šarži (šarže N°17÷ N°20) najniži. Iz literature je poznato da je odnos $\%CaO/\%Al_2O_3$ povezan sa sumpornim kapacitetom. Sa porastom vrednosti odnosa raste i vrednost sumpornog kapaciteta i aktiviteta CaO .¹¹⁷⁾ što kao posledicu ima nižu vrednost sumpora u čeliku. Za srednji sastav završnog sumpora $[\%S]_2 = 0.0007$ vrednost odnosa i izračunatog sumpornog kapaciteta je najniža u poređenju sa drugim grupama analiziranih šarži. Takođe, u ovoj grupi su šarže, nakon normalizacije oksida, sa najnižim vrednostima $\%SiO_2$ (N°17- 2.59; N°18-4.00; N°19-1.01 i N°20-3.63) i nerealno niskim vrednostima aktiviteta kiseonika 8.29×10^{-7} i 1.6×10^{-13} što je posledica nepokrivenosti jednačine Ohta i Suita za proračun aktiviteta Al_2O_3 u trosci za sadržaj SiO_2 nižim od 10%. Detaljnija objašnjenja su data u Poglavlju 6.

Na dijagramima 53 do 58 prikazane su zavisnosti parametara koji su dati u Tabeli 47 i izračunatih vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{s\text{izračunato}}$. Rasipanje rezultata kod Varijante A je izrazito u poređenju sa Varijantama B i C. Mali broj šarži za isti sadržaj sumpora i uzak interval analiziranih parametara su ograničavajući faktori da se dâ tačan razlog velikog rasipanja rezultata kod Varijante A. Takođe, uticaj baziciteta $\%CaO/\%SiO_2$, $\%CaO$ ili MgO se međusobno preklapaju te dodatno otežavaju donošenje ispravnog zaključka. Na osnovu svega iznetog moguće je da se zaključi da šarže sa sadržajem $\%SiO_2$ oko i/ili nižim od 3% i odnos $\%CaO/Al_2O_3 \leq 1.7$ imaju dominantan uticaj na izračunatu vrednost koeficijenta raspodele sumpora.

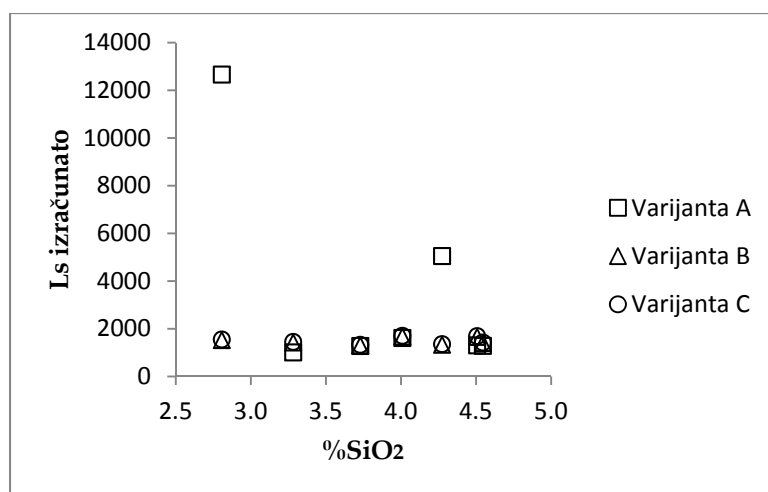
9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



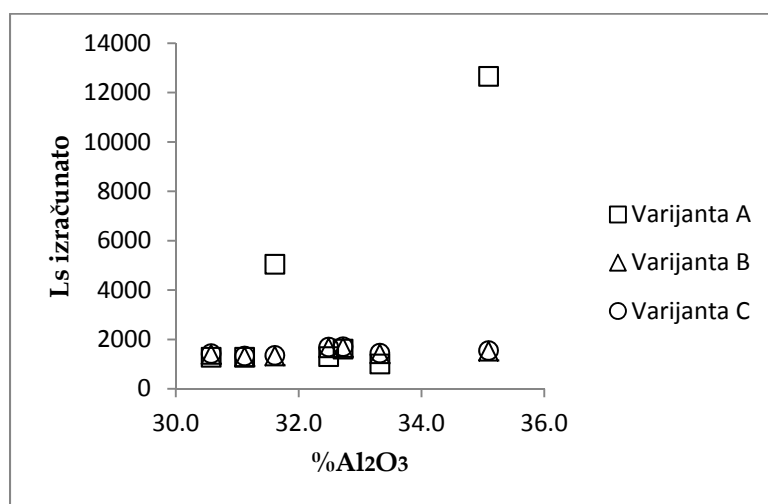
Slika 53: Zavisnost Bazicitet- Ls_{izračunato}



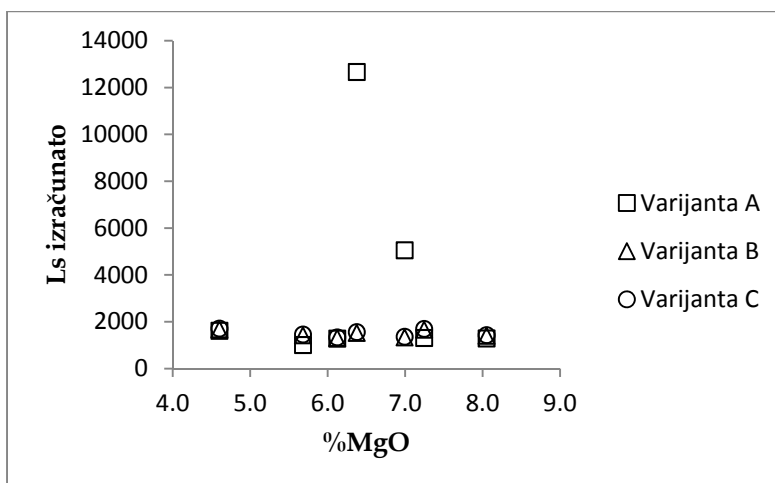
Slika 54: Zavisnost %CaO- Ls_{izračunato}



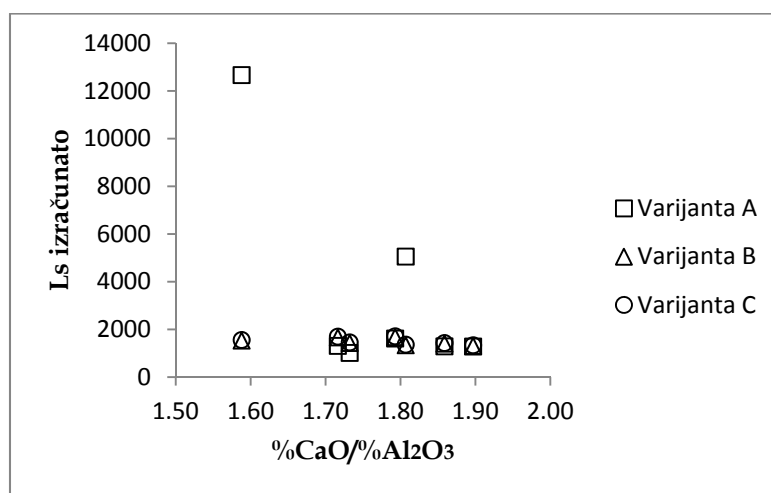
Slika 55: Zavisnost %SiO₂ - Ls_{izračunato}



Slika 56: Zavisnost $\%Al_2O_3$ - $L_{Sizračunato}$



Slika 57: Zavisnost $\%MgO$ - $L_{Sizračunato}$



Slika 58: Zavisnost $\%CaO/\%Al_2O_3$ - $L_{Sizračunato}$

9.5.2. Koeficijent raspodele sumpora L_s sa sumpornim kapacitetom određenim prema modelima

Kada se međusobno uporede dobijeni rezultati izmerenog koeficijenta raspodele sumpora $L_{s\text{izmereno}}$ sa sumpornim kapacitetima koji su određeni prema analiziranim modelima (videti Tabele 31, 35, 39 i 43) očigledno je da za grupe šarži sa istim završnim sadržajem sumpora na kraju procesa vakuumiranja, u većoj ili manjoj meri svi modeli daju približne rezultate. Kao i kod rezultata sa primenom Youngove metodologije za proračun sumpornog kapaciteta i primene u izračunavanju koeficijenta raspodele sumpora opisane u prethodnom poglavlju tako i kod primene sumpornog kapaciteta koji je određen preko modela, rezultati u Varijanti A pokazuju velika odstupanja u poređenju sa rezultatima dobijenim preko Varijante B i Varijante C. Zajedničko za sve modele je da su rezultati L_s u Varijanti A kod pojedinih šarži ili grupe šarži nerealno visoke. Zbog svega navedenog, detaljnija analiza uticajnih faktora u ovoj tezi biće usmerena na rezultate dobijene po Varijanti A.

9.5.2.1. Varijanta A

U Tabeli 48 za Varijantu A prikazan je uticaj vrednosti $\%SiO_2$, odnosa $\%CaO/Al_2O_3$ i aktiviteta $a_{(Al_2O_3)}$ u završnoj troski na izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora za svaki model pojedinačno. Tabela 49 prikazuje uticaj sadržaja $\%SiO_2$ na izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora prema analiziranim modelima. Radi bolje preglednosti date su prosečne vrednosti prema gradaciji sadržaja $\%SiO_2$ u završnoj troski.

Sa ciljem upoređenja dobijenih rezultata, u Tabeli 50 je dat zbirni pregled srednjih vrednosti navedenih parametara prema završnom sadržaju $\%SiO_2$ u troski na kraju procesa vakuumiranja.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 48 : Uticaj vrednosti %SiO₂, odnosa %CaO/Al₂O₃ i aktiviteta $a_{(Al_2O_3)}$ na izračunate vrednosti $L_{S_{izračunato}}$ i izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]_{Al}$ po

Varijanti A

Br.šarže	%SiO ₂	$a_{(Al_2O_3)}$	%CaO/Al ₂ O ₃	LS izračunato			
				Young	S-S	Taniguchi	KTH
1	4,95	4.42E-04	1.78	2643	4293	3445	1945
2	8,45	3.58E-03	2.06	701	1093	775	801
3	3,88	4.42E-05	1.73	6571	13192	7829	7454
4	2,86	6.68E-06	1.61	11213	21269	14410	7491
5	2,97	1.16E-05	1.57	10694	18292	13421	7049
6	3,93	1.49E-04	1.61	2564	4218	3173	1555
7	4,54	2.22E-04	1.81	4797	7793	6749	3723
8	5,94	6.16E-04	2.06	3370	5928	4746	3766
9	5,31	4.46E-04	1.84	1775	3228	2150	1813
10	3,85	6.00E-05	1.83	6806	11010	10694	5356
11	4,10	2.48E-04	1.73	4009	6080	6024	2066
12	3,54	2.42E-05	1.90	6464	12857	10360	5167
13	1,67	1.98E-09	1.50	249244	499428	295260	204058
14	2,44	6.67E-07	1.76	32995	60138	54741	24010
15	4,41	8.56E-05	1.86	5446	11634	6805	7190
16	8,56	3.86E-03	2.25	901	1331	1213	702
17	2,59	8.29E-07	1.66	23020	44115	30288	22556
18	4,00	1.16E-04	1.60	3078	6194	3260	2405
19	1,01	1.6E-13	1.37	6126481	10264125	7580743	3416539
20	3,63	1.68E-05	1.75	11556	23175	14087	16617
21	2,28	5.99E-08	1.70	81587	182714	105776	107393
22	5,12	2.76E-04	1.88	5200	8255	6854	6752
23	3,77	3.53E-05	1.77	6849	13486	8899	6987
24	4,56	1.19E-04	1.82	4713	9830	5571	6316
25	4,32	1.00E-04	1.81	5519	11111	6932	5844
26	4,52	6.92E-05	2.02	8584	16629	12694	13551
27	3,30	2.23E-05	1.60	5721	10220	6907	4442
28	3,08	1.96E-06	1.89	41489	91719	61379	61177
29	2,23	4.24E-07	1.48	28576	47507	34790	19653
30	3,80	2.63E-05	1.83	8257	17697	10783	10154
31	3,66	2.26E-05	1.97	7417	16022	12085	6796

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 49: Uticaj sadržaja %SiO₂ na vrednosti L_S izračunato prema analiziranim modelima

Broj šarže	%SiO ₂	a(Al ₂ O ₃)	%CaO/Al ₂ O ₃	Ls izmereno	Ls izračunato			
					Young	S-S	Taniguchi	KTH
max 3.00								
4	2,86	6.68E-06	1.61	1867	11213	21269	14410	7491
5	2,97	1.16E-05	1.57	1723	10694	18292	13421	7049
13	1,67	1.98E-09	1.50	1732	249244	499428	295260	204058
14	2,44	6.67E-07	1.76	1330	32995	60138	54741	24010
17	2,59	8.29E-07	1.66	1739	23020	44115	30288	22556
19	1,01	1.60E-13	1.37	1533	6126481	10264125	7580743	3416539
21	2,28	5.99E-08	1.70	2013	81587	182714	105776	107393
29	2,23	4.24E-07	1.48	912	28576	47507	34790	19653
4	2,86	6.68E-06	1.61	1867	11213	21269	14410	7491
5	2,97	1.16E-05	1.57	1723	10694	18292	13421	7049
13	1,67	1.98E-09	1.50	1732	249244	499428	295260	204058
14	2,44	6.67E-07	1.76	1330	32995	60138	54741	24010
17	2,59	8.29E-07	1.66	1739	23020	44115	30288	22556
19	1,01	1.60E-13	1.37	1533	6126481	10264125	7580743	3416539
3.01-4.00								
3	3,88	4.42E-05	1.73	2233	6571	13192	7829	7454
6	3,93	1.49E-04	1.61	1527	2564	4218	3173	1555
10	3,85	6.00E-05	1.83	1430	6806	11010	10694	5356
12	3,54	2.42E-05	1.90	1094	6464	12857	10360	5167
20	3,63	1.68E-05	1.75	1071	11556	23175	14087	16617
23	3,77	3.53E-05	1.77	1366	6849	13486	8899	6987
27	3,30	2.23E-05	1.60	1230	5721	10220	6907	4442
28	3,08	1.96E-06	1.89	1200	41489	91719	61379	61177
30	3,80	2.63E-05	1.83	1610	8257	17697	10783	10154
31	3,66	2.26E-05	1.97	1115	7417	16022	12085	6796
18	4,00	1.16E-04	1.60	1614	3078	6194	3260	2405
3	3,88	4.42E-05	1.73	2233	6571	13192	7829	7454
6	3,93	1.49E-04	1.61	1527	2564	4218	3173	1555
10	3,85	6.00E-05	1.83	1430	6806	11010	10694	5356
4.01-5.00								
1	4,95	4.42E-04	1.78	3290	2643	4293	3445	1945
7	4,54	2.22E-04	1.81	2060	4797	7793	6749	3723
11	4,10	2.48E-04	1.73	1228	4009	6080	6024	2066
15	4,41	8.56E-05	1.86	1233	5446	11634	6805	7190
24	4,56	1.19E-04	1.82	1238	4713	9830	5571	6316
25	4,32	1.00E-04	1.81	1100	5519	11111	6932	5844
26	4,52	6.92E-05	2.02	1678	8584	16629	12694	13551
1	4,95	4.42E-04	1.78	3290	2643	4293	3445	1945
5.01-6.00								
8	5,94	6.16E-04	2.06	1984	3370	5928	4746	3766
9	5,31	4.46E-04	1.84	1520	1775	3228	2150	1813
22	5,12	2.76E-04	1.88	1625	5200	8255	6854	6752
8	5,94	6.16E-04	2.06	1984	3370	5928	4746	3766
≥ 8.01%								
2	8,45	3.58E-03	2.06	2967	701	1093	775	801
16	8,56	3.86E-03	2.25	948	901	1331	1213	702

Tabela 50: Uticajni parametri na vrednost $L_{Sizračunato}$ za Varijantu A

%SiO ₂	%CaO/Al ₂ O ₃	a(Al ₂ O ₃)	L _{Sizmereno}	L _s izračunato			
				Young	S-S	Taniguchi	KTH
max 3%	1.58	2.53E-06	1606	820476	1392199	1016179	476094
3.01-4.00	1.77	4.72E-05	1408	9707	19981	13587	11646
4.01-5.00	1.83	1.84E-04	1690	5102	9624	6889	5805
5.01-6.00	1.93	4.46E-04	1710	3448	5804	4583	4110
8	2.15	3.72E-03	1958	801	1212	994	752

Iz Tabela 49 i 50 lako se uočava da kod šarži koje imaju vrednosti %SiO₂ u završnoj troski nižoj od 4%, izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora, kod svih modela su nerealno visoke u odnosu na izmerene vrednosti. Sa druge strane, kod šarži kod kojih je sadržaj %SiO₂ viši od 4% razlike između izmerene i izračunate vrednosti koeficijenta raspodele su manje, kod pojedinih šarži veoma bliske izmerenim vrednostima. Iako razlike postoje, one su daleko prihvatljivije nego vrednosti kod šarži sa sadržajem %SiO₂ < 4.00. Drugi veoma važan činilac za konačan sud o navedenim rezultatima je nejednak-mali broj uzoraka za analizirani raspon sadržaja SiO₂ u troski.

9.5.2.2. Varijanta B

Iz Tabele 51 uočljivo je da su vrednosti aktiviteta $a_{(SiO_2)}$ bez varijacija i na potenciji 10⁻⁴. Ova stabilnost kao posledicu ima i činjenicu prikazanu u Tabeli 52, da su razlike između izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora $L_{Sizračunato}$ sa izračunatim vrednostima sumpornog kapaciteta $C_{Sizračunato}$ kod svih modela bliske sa izmerenim vrednostima $L_{Sizmereno}$.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 51: Zavisnost izračunatog koeficijenta raspodele sumpora L_{Si} izračunato od izračunatog aktiviteta $a_{(SiO_2)}$ u troski i izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]_{Si}$ po Varijanti B

Br.šarže	$a_{(SiO_2)}$	Ls izračunato			
		Young	S-S	Taniguchi	KTH
1	0.000198	738	1199	962	543
2	0.000247	523	815	578	597
3	0.000157	670	1346	799	760
4	0.000175	614	1165	789	410
5	0.000194	675	1155	848	445
6	0.000220	429	705	530	260
7	0.000174	932	1515	1312	724
8	0.000151	854	1501	1202	954
9	0.000180	556	1010	673	567
10	0.000148	1017	1646	1599	801
11	0.000206	798	1210	1199	411
12	0.000127	873	1737	1400	698
13	0.000163	545	1091	645	446
14	0.000128	933	1701	1549	679
15	0.000138	770	1645	962	1016
16	0.000231	649	959	874	505
17	0.000141	652	1249	857	639
18	0.000213	500	1005	529	390
19	0.000200	484	812	600	270
20	0.000138	839	1682	1023	1206
21	0.000117	996	2230	1291	1311
22	0.000157	1012	1606	1334	1314
23	0.000147	685	1349	890	699
24	0.000151	824	1718	974	1104
25	0.000153	812	1635	1020	860
26	0.000110	1098	2127	1624	1733
27	0.000187	500	893	603	388
28	0.000100	1054	2330	1559	1554
29	0.000196	469	780	571	323
30	0.000130	891	1909	1163	1095
31	0.000113	936	2023	1526	858

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 52: Zavisnost L_s od $\%SiO_2$ za različite C_s i $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B)

$[\%S]_2$	$\%SiO_2$	$L_{Sizmereno}$	L_s izračunato			
			Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	4.51	2268	608	1064	751	503
0.0005	4.55	1553	838	1437	1231	692
0.0006	4.27	1311	724	1349	1007	662
0.0007	2.81	1489	619	1187	752	626
0.0008	4.01	1468	866	1707	1102	1057
0.0009	3.28	1255	780	1533	1089	1000
0.0010	3.73	1363	914	1966	1344	977

Tabela 53: Uticajni faktori na prosečne vrednosti $L_{Sizračunato}$ za različite C_s i $[a_o]_{Si}$ (Varijanta B)

$[\%S]_2$	B	$\%CaO$	$\%SiO_2$	$\%Al_2O_3$	$\%MgO$	$T, ^\circ K$	$L_{Sizmereno}$	L_s izračunato			
								Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	14	55.76	4.51	32.49	7.25	1858	2268	608	1064	751	503
0.0005	13	56.83	4.55	30.57	8.05	1852	1553	838	1437	1231	692
0.0006	19	57.12	4.27	31.61	6.99	1860	1311	724	1349	1007	662
0.0007	26	55.73	2.81	35.09	6.38	1860	1489	619	1187	752	626
0.0008	16	58.67	4.01	32.72	4.60	1858	1468	866	1707	1102	1057
0.0009	19	57.72	3.28	33.32	5.68	1851	1255	780	1533	1089	1000
0.0010	16	59.03	3.73	31.12	6.12	1870	1363	914	1966	1344	977

9.5.2.3. Varijanta C

Vrednosti aktiviteta Al_2O_3 određen po ovoj varijanti je na potenciji 10^{-2} , sa zanemarljivim brojem šarži sa varijacijama na potenciji $10^0 \div 10^{-3}$. Kao i kod Varijante B, stabilnost u vrednostima oksidacionog potencijala troske izražen preko aktiviteta Al_2O_3 kao posledicu ima razumnju razliku između izmerene i izračunate vrednosti koeficijenta raspodele sumpora L_s . U odnosu na Varijantu A, dobijeni rezultati po Varijanti C su prihvatljivi za pogonske uslove.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 54: Zavisnost izračunatog koeficijenta raspodele sumpora $L_{Sizračunato}$ od izračunatog aktiviteta $a_{(Al_2O_3)}$ u trosi i izračunatog aktiviteta kiseonika $[a_o]_{Si-Al}$ po Varijanti C

Br.šarže	$a_{(Al_2O_3)}$	$L_{Sizračunato}$			
		Young	S-S	Taniguchi	KTH
1	0.0175	776	1260	1011	571
2	0.0074	549	856	607	627
3	0.0359	704	1413	839	799
4	0.0352	645	1223	829	431
5	0.0396	710	1214	891	468
6	0.0277	450	740	557	273
7	0.0260	980	1593	1379	761
8	0.0327	897	1578	1263	1002
9	0.0126	583	1061	706	596
10	0.0155	1070	1731	1681	842
11	0.0271	839	1272	1260	432
12	0.0085	917	1823	1469	733
13	0.1646	572	1145	677	468
14	0.0254	981	1787	1627	714
15	0.0262	808	1727	1010	1067
16	0.0089	682	1007	918	531
17	0.0316	684	1311	900	671
18	0.0234	524	1055	555	410
19	0.2771	509	853	630	284
20	0.0379	881	1768	1074	1267
21	0.0285	1046	2342	1356	1377
22	0.0321	1065	1690	1403	1382
23	0.0306	719	1416	934	734
24	0.0193	865	1804	1023	1159
25	0.0273	853	1716	1071	903
26	0.0285	1154	2235	1706	1821
27	0.0289	525	937	634	408
28	0.1033	1107	2446	1637	1632
29	0.0826	493	820	600	339
30	0.0181	935	2005	1221	1150
31	0.0097	983	2122	1601	900

Tabela 55: Zavisnost L_s od $\%SiO_2$ za različite C_s i $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C)

$[\%S]_2$	$\%SiO_2$	$L_{Sizmereno}$	$L_{Sizračunato}$			
			Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	4.51	2268	639	1118	789	528
0.0005	4.55	1553	881	1510	1293	728
0.0006	4.27	1311	761	1417	1058	695
0.0007	2.81	1489	650	1247	790	658
0.0008	4.01	1468	909	1794	1157	1111
0.0009	3.28	1255	820	1610	1144	1050
0.0010	3.73	1363	959	2064	1411	1025

Tabela 56: Uticajni faktori na prosečne vrednosti L_{Si} izračunato za različite Cs i $[a_o]_{Si-Al}$ (Varijanta C)

[%S] ₂	B	%CaO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%MgO	T, °K	Ls izmereno	Ls izračunato			
								Young	S-S	Taniguchi	KTH
0.0003	14	55.76	4.51	32.49	7.25	1858	2268	639	1118	789	528
0.0005	13	56.83	4.55	30.57	8.05	1852	1553	881	1510	1293	728
0.0006	19	57.12	4.27	31.61	6.99	1860	1311	761	1417	1058	695
0.0007	26	55.73	2.81	35.09	6.38	1860	1489	650	1247	790	658
0.0008	16	58.67	4.01	32.72	4.60	1858	1468	909	1794	1157	1111
0.0009	19	57.72	3.28	33.32	5.68	1851	1255	820	1610	1144	1050
0.0010	16	59.03	3.73	31.12	6.12	1870	1363	959	2064	1411	1025

9.6. Aktiviteti kiseonika

9.6.1 Aktivitet kiseonika u troski

U Tabelama 57 i 58 prikazani su rezultati proračuna aktiviteta kiseonika u troski i čeliku za sve analizirane šarže. Svi proračuni izvedeni su prema jednačinama 25÷37, koje su detaljno objašnjene u Poglavlju 6. Kao što je već napomenuto ranije (videti Poglavlje 8 - Eksperimentalni deo), pogonska praksa u Dillingen čeličani je da se aktiviteti kiseonika u čeliku ne mere jer je višegodišnje iskustvo pri izradi čelika koji se podvrgavaju vakuumiranju u VD vakuum uređaju, pokazalo da su oni izuzetno niski i da ne mogu da se pouzdano izmere i koriste. Iz ovog razloga, aktiviteti kiseonika za sve analizirane šarže računati su prema raspoloživim u literaturi objavljenim jednačinama. U Tabeli 57 prikazane su vrednosti aktiviteta oksida $a(Al_2O_3)$ koji je izračunat preko jednačine (34) Ohta-Suito-a i jednačine (33). Takođe, radi upoređenja rezultata dati su i rezultati aktiviteta $a(SiO_2)$ koji je određen preko jednačine (35).

Tabela 57: Vrednosti izračunatog aktivitetu kiseonika u troski

Br.šarže	$a_{(Al_2O_3)}^*$	$a_{(SiO_2)}$	$a_{(Al_2O_3)}^{**}$
1	4.42×10^{-4}	1.98×10^{-4}	1.75×10^{-2}
2	3.58×10^{-3}	2.47×10^{-4}	7.4×10^{-3}
3	4.42×10^{-5}	1.57×10^{-4}	3.59×10^{-2}
4	6.69×10^{-6}	1.75×10^{-4}	3.52×10^{-2}
5	1.16×10^{-5}	1.94×10^{-4}	3.96×10^{-2}
6	1.50×10^{-4}	2.20×10^{-4}	2.77×10^{-2}
7	2.22×10^{-4}	1.74×10^{-4}	2.60×10^{-2}
8	6.16×10^{-4}	1.51×10^{-4}	3.27×10^{-2}
9	4.46×10^{-4}	1.80×10^{-4}	1.26×10^{-2}
10	6.01×10^{-5}	1.48×10^{-4}	1.55×10^{-2}
11	2.49×10^{-4}	2.06×10^{-4}	2.71×10^{-2}
12	2.42×10^{-5}	1.27×10^{-4}	8.5×10^{-3}
13	1.99×10^{-9}	1.63×10^{-4}	1.65×10^{-1}
14	6.67×10^{-7}	1.28×10^{-4}	2.54×10^{-2}
15	8.56×10^{-5}	1.38×10^{-4}	2.62×10^{-2}
16	3.86×10^{-3}	2.31×10^{-4}	8.9×10^{-3}
17	8.29×10^{-7}	1.41×10^{-4}	3.16×10^{-2}
18	1.16×10^{-4}	2.13×10^{-4}	2.34×10^{-2}
19	1.60×10^{-13}	2.00×10^{-4}	2.77×10^{-1}
20	1.68×10^{-5}	1.38×10^{-4}	3.79×10^{-2}
21	5.99×10^{-8}	1.17×10^{-4}	2.85×10^{-2}
22	2.76×10^{-4}	1.57×10^{-4}	3.21×10^{-2}
23	3.54×10^{-5}	1.47×10^{-4}	3.06×10^{-2}
24	1.19×10^{-4}	1.51×10^{-4}	1.93×10^{-2}
25	1.00×10^{-4}	1.53×10^{-4}	2.73×10^{-2}
26	6.92×10^{-5}	1.10×10^{-4}	2.85×10^{-2}
27	2.23×10^{-5}	1.87×10^{-4}	2.89×10^{-2}
28	1.96×10^{-6}	1.00×10^{-4}	1.03×10^{-1}
29	4.24×10^{-7}	1.96×10^{-4}	8.26×10^{-2}
30	2.63×10^{-5}	1.30×10^{-4}	1.81×10^{-2}
31	2.26×10^{-5}	1.13×10^{-4}	9.7×10^{-3}

Napomene: * $a_{(Al_2O_3)}$ iz jednačine (34) ** $a_{(Al_2O_3)}$ iz jednačina (33)

Kao što se može videti iz Tabele 57 izračunate vrednosti aktivitetu $a_{(Al_2O_3)}$ određeni po jednačini (34) Ohte i Suita su generalno veoma niski t.j. ispod 10^{-3} i 10^{-4} (wt.%), a samo poneka vrednost je niža od 10^{-5} (šarže N° 4, N°13, N°14, N°17, N°19, N°21, N°28 i N°29). U slučaju proračuna aktivitetu prema jednačinini (33) vrednosti aktivitetu Al_2O_3 su više sa stabilnim vrednostima na nivou $10^{-1} \div 10^{-3}$ (tež.%).

Pošto sadržaj SiO_2 na kraju procesa vakuumiranja varira između 1.09 i 8.46 (tež.%) i činjenice da je jednačina (34) važeća samo za sadržaj u granicama 10 do 50 (tež.%) to je moguća greška u izračunavanju aktiviteta $a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}$ u trosici.⁵⁰⁾ (Videti jednačinu 34 u Poglavlju 6).

Posle vakuum VD tretmana izračunata vrednost aktiviteta SiO_2 u trosici je stabilna na nivou 10^{-4} (tež.%) koji odgovara sadržaju SiO_2 od nekoliko procenata što je u saglasnosti sa, ranije u literaturi, objavljenim podacima.¹¹²⁻¹¹⁴⁾

9.6.2. Aktivitet kiseonika u čeliku

Vrednosti aktiviteta kiseonika u čeliku, određene su na tri načina pod pretpostavkom da se najmanje jedna reakcija opisana u Poglavlju 6 jednačinama (25÷27) u toku VD procesa nalazi u ravnoteži. Najpre je određen aktivitet kiseonika u čeliku preko jednačine (25) za Varijanta A, pa preko jednačina (26) za Varijantu B i na kraju kombinacijom jednačina (33) i (36) za Varijantu C. Dobijeni rezultati prikazani su u Tabeli 58.

Tabela 58: Vrednosti izračunatog aktiviteta kiseonika u čeliku

Broj šarže	Varijanta A [a _o] _{Al} [*] , [%]	Varijanta B [a _o] _{Si} [%]	Varijanta C [a _o] _{Si-Al} ^{**} , [%]
1	2.16x10 ⁻⁵	7.74 x10 ⁻⁵	7.36 x10 ⁻⁵
2	7.34 x10 ⁻⁵	9.84 x10 ⁻⁵	9.37 x10 ⁻⁵
3	9.27 x10 ⁻⁶	9.08 x10 ⁻⁵	8.65 x10 ⁻⁵
4	5.68 x10 ⁻⁶	1.04 x10 ⁻⁴	9.88 x10 ⁻⁵
5	5.01 x10 ⁻⁶	7.94 x10 ⁻⁵	7.55 x10 ⁻⁵
6	2.03 x10 ⁻⁵	1.22 x10 ⁻⁴	1.16 x10 ⁻⁴
7	1.24x10 ⁻⁵	6.37 x10 ⁻⁵	6.06 x10 ⁻⁵
8	1.92 x10 ⁻⁵	7.58 x10 ⁻⁵	7.21 x10 ⁻⁵
9	3.29 x10 ⁻⁵	1.05 x10 ⁻⁴	1.00 x10 ⁻⁴
10	8.77 x10 ⁻⁶	5.86 x10 ⁻⁵	5.58 x10 ⁻⁵
11	1.54 x10 ⁻⁵	7.72 x10 ⁻⁵	7.34 x10 ⁻⁵
12	1.25 x10 ⁻⁵	9.27 x10 ⁻⁵	8.83 x10 ⁻⁵
13	2.3x10 ⁻⁷	1.05 x10 ⁻⁴	1.00 x10 ⁻⁴
14	2.09 x10 ⁻⁶	7.39 x10 ⁻⁵	7.03 x10 ⁻⁵
15	1.29 x10 ⁻⁵	9.1 x10 ⁻⁵	8.67 x10 ⁻⁵
16	6.9 x10 ⁻⁵	9.58 x10 ⁻⁵	9.12 x10 ⁻⁵
17	2.47 x10 ⁻⁶	8.74 x10 ⁻⁵	8.32 x10 ⁻⁵
18	2.00 x10 ⁻⁵	1.23 x10 ⁻⁴	1.17 x10 ⁻⁴
19	7.45 x10 ⁻⁹	9.42 x10 ⁻⁵	8.97 x10 ⁻⁵
20	5.13 x10 ⁻⁶	7.07 x10 ⁻⁵	6.73 x10 ⁻⁵
21	8.47 x10 ⁻⁷	6.94 x10 ⁻⁵	6.61 x10 ⁻⁵
22	9.65 x10 ⁻⁶	4.96 x10 ⁻⁵	4.71 x10 ⁻⁵
23	9.34 x10 ⁻⁶	9.34 x10 ⁻⁵	8.90 x10 ⁻⁵
24	1.4 x10 ⁻⁵	8.02 x10 ⁻⁵	7.63 x10 ⁻⁵
25	1.25 x10 ⁻⁵	8.5 x10 ⁻⁵	8.10 x10 ⁻⁵
26	7.9 x10 ⁻⁶	6.18 x10 ⁻⁵	5.88 x10 ⁻⁵
27	9.15 x10 ⁻⁶	1.05 x10 ⁻⁴	9.97 x10 ⁻⁵
28	1.84 x10 ⁻⁶	7.24 x10 ⁻⁵	6.90 x10 ⁻⁵
29	1.53 x10 ⁻⁶	9.32 x10 ⁻⁵	8.88 x10 ⁻⁵
30	8.84 x10 ⁻⁶	8.19 x10 ⁻⁵	7.80 x10 ⁻⁵
31	1.2 x10 ⁻⁵	9.53 x10 ⁻⁵	9.09 x10 ⁻⁵

Napomene: * a_(Al₂O₃) iz jednačine (38) **a_(Al₂O₃) iz jednačina (37) i (40)

Vrednosti aktiviteta kiseonika u čeliku, u Varijanti A su na nivou 10⁻⁵ ÷ 10⁻⁷, što je u saglasnosti sa literaturnim podacima.¹¹⁵⁾ Izuzetak je šarža N°19 sa neobjašnjivo niskom vrednošću na potenci 10⁻⁹. Vrednosti aktiviteta kiseonika u Varijantama B i C identični tj. na nivou 10⁻⁴ ÷ 10⁻⁵. Osim navedenog iskakanja za Varijantu A, generalno se može reći da je bez varijacija što pokazuje stabilnost vođenja procesa vakuumiranja VD postupkom. Ako se uporede vrednosti za šarže sa sadržajem sumpora lako je uočljivo da vrednosti u Slučaju

A više za šarže N°1÷N°12 kod kojih je završni sadržaj sumpora $[\%S]_2 \leq 0.0005$ u poređenju sa šaržama N°13÷N°31 sa sadržajem sumpora $[\%S]_2 = 0.0006 \pm 0.001$. U Slučaju B i C stabilnost rezultata je očigledna.

9.7. Numerička analiza

9.7.1. Obrazovanje desulfuracione troske

9.7.1.1. Određivanje količina TROSKE₁ i TROSKA₂

Rezultati proračuna količine $W_{TROSKE1}$ i $W_{TROSKA2}$ prikazani su u Tabeli 59. Navedene količine su određene iz jednačina (38) i (39) sabiranjem svih dodataka u livni lonac koje učestvuju u obrazovanju troske, a koje su prikazane u Tabeli 5 /videti Poglavlje 8/ i dodavanjem 1000 kg kao usvojene količine $W_{TROSKALD}$ i $W_{TROSKA(-1)}$, t.j. $(W_{TROSKALD} + W_{TROSKA(-1)}) = 1000$ kg). Dodavanje količine troski od 1000 kg je usvojena pretpostavka njihovog prisustva za svaku šaržu do koje se došlo u proizvodnoj praksi čeličane u Dillingenu. U proizvodnoj praksi je nemoguće obezbediti čak i u uslovima korišćenja mehaničke blokade, da se tokom izlivanja čelika iz konvertora u potpunosti eliminiše njeno prisustvo u livnom loncu. Na isti način se tretira i količina troske ulepljena u zidove livnog lonca od prethodno odlivenih šarži. Obe troske su uvek prisutne uz napomenu da količine nisu iste i variraju od čeličane do čeličane. U ovoj tezi, navedene vrednosti $W_{TROSKALD} + W_{TROSKA(-1)} = 1000$ kg biće korišćene u daljim proračunima.

Tabela 59: Izračunate količine $W_{TROSKA1}$ i $W_{TROSKA2}$

Br.šarže	$W_{TROSKA1}$ [kg]	$W_{TROSKA2}$ [kg]
1	2880,9	3362,7
2	2377,6	3026,6
3	2625,5	3062,1
4	3185,1	3551,6
5	2928,1	4305,3
6	2947,5	3745,7
7	2792,0	3324,0
8	3063,3	3767,0
9	2852,8	3793,6
10	2845,6	3406,3
11	2819,6	4205,1
12	2967,6	4114,7
13	2916,7	3302,1
14	3173,8	3723,0
15	2956,4	3462,5
16	2888,7	3441,1
17	3016,5	3495,6
18	3096,1	3655,8
19	2930,7	3529,4
20	2723,5	3313,7
21	2652,7	3070,4
22	2697,2	3149,1
23	3086,5	3807,7
24	2631,3	2962,6
25	2720,6	3167,2
26	2534,3	2900,6
27	3167,2	3753,9
28	2655,5	3254,7
29	2963,9	3473,8
30	2559,2	2972,9
31	2881,6	3371,4

Članovi jednačina (38) i (39) $\Delta[\%Al_2O_3]_1$ i $\Delta[\%Al_2O_3]_2$ određeni su preko bilansa aluminijuma korišćenjem jednačina (40) i (41). Postupak proračuna prikazan je u PRILOGU 1.

9.7.1.2. Količina $W_{TROSKALD}$, $W_{TROSKA(-1)}$

Prisutna količina $W_{TROSKALD}$, $W_{TROSKA(-1)}$, je teško merljiva u pogonskim uslovima te je određena njihova približna vrednost računskim putem.

9.7.1.2.1. Obrazovanje desulfuracione troske preko bilansa aluminijuma

Polazeći od jednačina (40), (41) i (42) prikazanih u Poglavlju 7.5 i zamenom odgovarajućih vrednosti, u Tabelama 61 i 63 prikazani su kao krajnji rezultat proračuna procenjene količine $W_{TROSKA(-1)}$ (Videti kolonu 2 u Tabeli 61) i $W_{TROSKALD}$, i, pri čemu je $W_{TROSKA LD} = 1000 - W_{Izrač. TROSKA (-1)}$ (Videti Tabelu 63, kolona 4).

9.7.1.2.2. Određivanje korektivnog faktora za proračun Al_2O_3 u kg, $F(Al_2O_3)$

Za izračunavanje korektivnog faktora $F(Al_2O_3)$ za proračun Al_2O_3 u kg svih dodataka u livni lonac koji sadrže aluminijum ili Al_2O_3 , poslužiće statistička obrada izmerenih srednjih vrednosti Al_2O_3 u troski. Srednje vrednosti su određene za tri grupe šarži prema izmerenom završnom sadržaju sumpora i to za šarže sa $[\%S]_2 \leq 0.0003$ /nadalje Prosek $(\%Al_2O_3)_2^{Izmereno}$ Šarže 1÷6/, za šarže $[\%S]_2 = 0.0003 \div 0.0005$ /nadalje Prosek $(\%Al_2O_3)_2^{Izmereno}$ Šarže 7÷12/ i za šarže $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.001$ /nadalje Prosek $(\%Al_2O_3)_2^{Izmereno}$ Šarže 13÷31/. Takođe, na ovaj način će moći da se predvidi koja je to količina troske $W_{TROSKA(-1)}$ koja ostane upijena na zidovima livnog lonca.

Količina Al_2O_3 u troski zaostaloj na zidovima livnog lonca odrediće se prema izrazima (43)÷(45) /videti Poglavlje 7.6/. Korektivni faktor F se uvodi u proračun zbog činjenice postojanja razlike između stvarne i računskim putem određene količine prisutne troske u livnom loncu.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 60: Bilans aluminijuma preko produkata dezoksidacije $[Al] \rightarrow (Al_2O_3)_2$

Broj šarže	"Al" ₁ , kg	[Al] ₁ , kg	[%Al] naizlivu	Δ[%Al] ₁	Δ[Al] ₁ , kg	Δ(Al ₂ O ₃) ₁ , kg	"Al", kg	Δ[%Al] ₂	Δ[Al] ₂ , kg	Δ(Al ₂ O ₃) ₂ , kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	348	156	0,1892	0,1042	192	362	0,2496	0,2256	415	784
2	242	47	0,1277	0,1027	195	368	0,1277	0,1167	221	418
3	267	95	0,1465	0,0945	172	325	0,2441	0,2071	378	713
4	403	136	0,2073	0,1373	267	504	0,2701	0,2371	461	870
5	326	120	0,1712	0,1082	206	389	0,3335	0,2965	565	1066
6	331	100	0,1857	0,1297	231	437	0,2862	0,2682	478	903
7	364	198	0,1927	0,0877	166	313	0,2176	0,1836	347	655
8	389	159	0,2054	0,1214	230	434	0,2967	0,2627	498	940
9	310	123	0,1686	0,1016	187	353	0,2675	0,2515	463	874
10	293	126	0,1536	0,0876	167	316	0,2276	0,2016	384	726
11	308	154	0,1724	0,0864	154	291	0,2854	0,2554	456	862
12	342	99	0,1896	0,1346	243	459	0,3287	0,3107	561	1059
13	484	247	0,2640	0,1290	237	447	0,3033	0,2403	441	832
14	437	187	0,2405	0,1375	250	472	0,2680	0,2360	429	810
15	364	122	0,1934	0,1284	242	456	0,2917	0,2567	483	913
16	349	154	0,1951	0,1091	195	369	0,2560	0,2430	435	821
17	367	105	0,2068	0,1478	262	495	0,3200	0,2910	517	976
18	394	163	0,2132	0,1252	231	437	0,2938	0,2658	491	928
19	479	241	0,2645	0,1315	238	450	0,3374	0,2714	491	928
20	367	153	0,2010	0,1170	214	403	0,2448	0,2008	367	693
21	452	239	0,2366	0,1116	213	403	0,2366	0,1886	360	681
22	339	139	0,1752	0,1032	200	377	0,2320	0,1940	375	709
23	367	130	0,1975	0,1275	237	448	0,3036	0,2726	506	957
24	325	155	0,1678	0,0878	170	321	0,1812	0,1462	283	535
25	383	176	0,2064	0,1114	207	390	0,2408	0,2038	378	715
26	303	153	0,1609	0,0799	150	284	0,1811	0,1441	271	513
27	315	72	0,1796	0,1386	243	459	0,3387	0,3157	554	1046
28	366	183	0,2018	0,1008	183	345	0,2839	0,2089	379	716
29	356	110	0,1998	0,1378	246	464	0,2946	0,2596	463	874
30	232	79	0,1177	0,0777	153	289	0,1832	0,1512	298	563
31	339	159	0,1858	0,0988	180	340	0,2619	0,2409	440	830

9.7.1.2.3. Bilans aluminijuma preko Ulaz-Izlaz parametara

U Tabeli 61 prikazani su rezultati proračuna količine troske ulepljene na zidovima livnog lonca preko Ulaz-Izlaz parametara bilansa aluminijuma. U koloni 3 sa „*” označen je korektivni faktor F tj. prosečni izmereni sadržaj $(Al_2O_3)_2$ na kraju procesa vakuumiranja za grupe šarži 1÷6, 7÷12 i 13÷31;

Tabela 61:Ulaz-Izlaz bilansa aluminijuma

ULAZ								IZLAZ			
Br.šarže	$W_{Troska(-1)}^{Izrac.}$ kg	$F(Al_2O_3)^*$ /100	$(\%Al_2O_3)_{Troska(-1)}$ kg	$(Al_2O_3)_{Troska(-1)}^{CaAluminat}$ kg	(Al_2O_3) u šamotu, kg	$\Sigma(Al_2O_3)_{Troska(-1)}^{Ulaz}$ kg	$(\%Al_2O_3)_{Ulaz}^{Izrac.}$	$W_{Troska2}^{Dodaci}$ kg	$(Al_2O_3)_{Troska2,}$ kg	$W_{Troska(-1)}^{Korig}$ kg	$\Delta W_{Troska(-1)}^{Korig}$ kg
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	530	0,319	169	0	24	977	29,05	3363	1026	683	154
2	516	0,319	165	235	0	818	27,02	3027	838	580	63
3	536	0,319	171	38	0	922	30,11	3062	976	705	169
4	590	0,319	188	0	0	1059	29,81	3552	1215	1078	489
5	604	0,319	193	0	0	1259	29,85	4305	1480	1298	693
6	557	0,319	178	0	32	1113	29,71	3746	1217	884	33
7	642	0,294	189	0	40	884	26,13	3383	1015	1088	411
8	469	0,327	153	0	0	1093	29,00	3768	1037	297	-171
9	552	0,294	162	0	0	1036	27,30	3794	1127	961	310
10	580	0,305	172	0	0	898	26,37	3406	1016	973	396
11	563	0,344	171	0	104	1137	27,04	4205	1282	1040	474
12	493	0,294	145	0	60	1264	30,71	4116	1190	242	-252
13	644	0,324	209	0	0	1041	31,53	3302	1286	1386	741
14	564	0,342	193	0	44	1047	28,22	3723	1156	883	319
15	485	0,324	157	39	0	1108	32,00	3462	1079	395	-90
16	435	0,324	141	0	48	1010	29,35	3441	875	19	-386
17	500	0,334	167	0	0	1144	32,72	3496	1144	500	0
18	546	0,324	177	0	28	1133	30,99	3656	1220	815	269
19	608	0,407	247	0	48	1223	34,67	3529	1433	1128	521
20	503	0,324	163	236	0	1092	32,95	3314	1103	537	34
21	550	0,324	178	110	0	968	31,53	3070	1047	793	244
22	501	0,324	162	94	0	965	30,64	3149	967	506	6
23	518	0,324	167	118	24	1148	30,15	3808	1185	630	41
24	590	0,324	191	102	0	844	28,18	2995	961	951	361
25	518	0,324	167	108	0	984	31,00	3174	1006	586	68
26	560	0,307	172	0	0	793	27,33	2901	868	805	244
27	518	0,311	161	0	0	1207	32,15	3754	1249	653	14
28	546	0,324	177	62	0	955	29,34	3255	1026	763	219
29	591	0,324	192	0	0	1068	30,69	3474	1226	1086	494
30	545	0,324	177	140	0	880	29,59	2973	944	744	198
31	483	0,324	156	0	0	986	29,25	3371	959	398	-83

9.7.1.2.4. Provera jednakosti bilansa aluminijuma

Kombinacijom jednačina (40), (41) i (42) dobija se nova bilansna jednačina (54)

$$W_{[Al] \rightarrow (\% Al_2O_3)} \cdot \frac{102}{54} + W_{\text{šamot}} \cdot 0,4 + W_{TROSKA(-1)} \cdot (\% Al_2O_3) \cdot \frac{1}{100} = \\ W_{TROSKA2} \cdot (\% Al_2O_3)_{TROSKA2}^{\text{Izmereno}} \cdot \frac{1}{100} \dots\dots\dots (54)$$

Zamenom podataka za šaržu 1 za produkt dezoksidacije aluminijuma $W_{[Al] \rightarrow (Al_2O_3)}$ (Tabela 60), količinu šamota $W_{\text{šamot}}$, (Tabela 5) koji se dodaje u livni lonac za obrazovanje troske, usvojenu količinu troske nalepljenu u vatrostalni ozid od predhodnih šarži, ($W_{TROSKA(-1)} = 500$ kg), korektivni faktor F za grupu šarži sa prosečnim sadržajem $\% Al_2O_3$ (Tabela 61), procenjene količine troske $W_{TROSKA2}$ (Tabela 59), kao i izmereni sadržaj $\% Al_2O_3$ (Tabela 7), tada se očekivani sadržaj $\% Al_2O_3$ iz jednakosti definisan jednačinom (54) transformiše u nejednakost (55):

$$784_{[Al] \rightarrow (Al_2O_3)} + 24_{\text{šamot}}^{\text{Dodato}} + 159,5_{(Al_2O_3)uTROSKA(-1)} = 967,5 \neq 1026_{(Al_2O_3)uTROSKA2} \dots (55)$$

gde je 159.5 dobijeno kao proizvod $500 \times (31,9/100)$. Vrednost 31.9 je prosečna vrednost sadržaja $\% Al_2O_3$ u šaržama (1÷6) koja je uzeta kao procenjena prosečna vrednost u troskama $TROSKA_{(-1)}$ livnog lonca, u ovoj tezi definisan kao korektivni faktor F za proračun Al_2O_3 , tj. $F(Al_2O_3)$.

Razlika između izlazne i ulazne strane jedne šarže nije veći od (5÷6%), i sa gledišta proizvođača čelika praktično je zanemarljiva. Ali pošto je neophodno da se odredi adekvatna vrednost težine troske $W_{TROSKA(-1)}$ za svaku šaržu sa ciljem određivanja bilansa sumpora i posebno za posmatranu numeričku

analizu, nejednakost (55) treba da, kroz odgovarajući korektivni postupak, bude vraćena u jednakost.

Razlika između ulaza i izlaza je najverovatnije prouzrokovana izvesnom nepostojanošću na ulaznoj strani jednačine (55). Od tri člana na ulaznoj strani, količina dodatog šamota ($W_{\text{šamot}}$) i dodataka za obrazovanje ($\% \text{Al}_2\text{O}_3$) oksida ($W_{[\text{Al}] \rightarrow (\text{Al}_2\text{O}_3)}$) su merene vrednosti, dok je sadržaj Al_2O_3 u šamotu usvojeni stehiometrijski činilac. U trećem članu, $\text{TROSKA}_{(-1)}$, količina $W_{\text{TROSKA}(-1)}$, i sadržaj ($\% \text{Al}_2\text{O}_3$) su takođe merene vrednosti. Prema tome, da bi se napravio postupak za povraćaj nejednakosti u jednakost na najjednostavniji način, ulazno/izlazne razlike kao celina biće dopisane na ulaznoj strani jednačine (55). Ukupna razlika će biti usvojena kao nepostojani sadržaj u članu troske $\text{TROSKA}_{(-1)}$. Sa druge strane, sadržaj ($\% \text{Al}_2\text{O}_3$) neće bitno da se promeni tako da ukupna razlika može da bude izražena kao jedina promena u količini troske $\text{TROSKA}_{(-1)}$ t.j. , ($W_{\text{TROSKA}(-1)}$).

Navedeni osmišljen postupak biće ilustrovan korišćenjem podataka za šaržu br.1. Da bi se udovoljilo bilansnoj jednačini (41), neophodno je da se odredi, nova, korektivna vrednost za $\text{TROSKA}_{(-1)}$, tj. $W_{\text{TROSKA}(-1)}^{\text{Korigovano}}$. U tom slučaju, ponovo će da se koristi bilansna jednačina (40) i u novonastalom obliku prikazanom kroz jednačinu (56) poslužiće za procenu korektivne vrednosti.

$$W_{\text{TROSKA}(-1)}^{\text{Korigovano}} = \frac{\sum_{i=1}^4 W_{\text{Dodato}}^{(1)} \cdot F_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}^{(i)}}{\frac{(\% \text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{TROSKA}(-1)}}{100}} \dots\dots\dots (56)$$

Primenom podataka za šaržu 1 na kraju procesa vakumiranja i odsumporavanja dobijeni su sledeći rezultati:

$$W_{TROSKA(-1)}^{Korigovano} = \frac{1026 - 784 - 24}{\frac{31.9}{100}} = \frac{218}{0.319} = 683 \text{ kg} \dots\dots\dots(57)$$

Količine $W_{TROSKA(-1)}^{Korigovano}$ sve analizirane šarže procenjene su po navedenom postupku i prikazane su u Tabeli 57. Kao što se vidi u poslednje dve kolone Tabele 61 za 12 šarži (Nº2, Nº4, Nº5, Nº7, Nº13, Nº19, Nº20, Nº21, Nº24, Nº26, Nº29, Nº30), premašuju granicu od 1000 kg za troske $TROSKA_{(-1)} + TROSKA_{LD}$. Uzimajući u obzir da pogon čeličana u Dillingenu ovu količinu troski smatra svojim usvojenim standardom, tako će biti tretirana i u numeričkoj analizi.

Kao alternativni metod za ocenu vrednosti člana $W_{TROSKA(-1)}^{Korigovano}$ poslužiće nam postupak neprestanog ponavljanja dok se ne postigne neophodno približavanje vrednosti. Posle izvesnog broja ponavljanja krajnji rezultat je približan traženom. Težina troske $W_{TROSKA(-1)}$ i sadržaj Al_2O_3 u njoj, tj. 500 kg i 31.9 (% Al_2O_3) su upotrebljeni kao polazni sadržaj (% Al_2O_3) u troski $TROSKA_{(-1)}$:

$$500 \times \frac{31.9}{100} = 159.5 \text{ kg}(Al_2O_3) \dots\dots\dots(58)$$

Sabirajući sa $W_{[Al] \rightarrow (Al_2O_3)} = 784 \text{ kg}(Al_2O_3)$ i $W_{\text{šamot}} \times 0.4 = 24 \text{ kg}(Al_2O_3)$.

$$159.5 + 784 + 24 = 967.5 \text{ kg}(Al_2O_3) \dots\dots\dots(59)$$

sva približna količina % Al_2O_3 u troski livnog lonca dobijena je posle prvog koraka proračuna. Sve zajedno se zatim, ponovo preračunava u sadržaj (% Al_2O_3) u troski livnog lonca.

$$\frac{967.5}{3363} \times 100 = 28.77 (\% \text{Al}_2\text{O}_3) \dots\dots\dots (60)$$

Na kraju upotrebom ove koncentracije i analiziranog sadržaja u troski TROSKA₂ (30.5%Al₂O₃), procenjena težina W_{TROSKA(-1)} nakon prvog koraka proračuna je :

$$W_{TROSKA(-1)}^{Izrač.} = \frac{500 \times 30.5}{28.77} = 530 \text{kg} \dots\dots\dots (61)$$

Korigovana količina W^{Korigovano}_{TROSKA (-1)} od (530kg) je zatim ubačena u jednačinu (58) kao polazna količina TROSKA₍₋₁₎ za drugi korak približavanja. Dalje približavanje se nastavlja sve dok prirast sadržaja Al₂O₃ u jednačini (55) ne postane što bliži stvarnoj izmerenoj vrednosti u troski TROSKA₂ (30.5%).

U svim šaržama, u kojima je navedenom analizom dobijen sadržaj Al₂O₃ u izlaznoj troski TROSKA₂ veći od proračunatog sadržaja, kao i u slučaju sa glavninom zaostalih troski od predhodnih šarži, težina izračunate troske W^{Izrač.}_{TROSKA(-1)} leži iznad 500 kg. Međutim, kada se desi da analizirani sadržaj Al₂O₃, kao što je u izlaznoj troski TROSKA₂ kod nekoliko šarži bude niži od izračunatog sadržaja Al₂O₃, korak približavanja se menja iz porasta u opadajuću vrednost pa se izračunata težina W^{Izrač.}_{TROSKA(-1)} približava vrednosti nižoj od 500 kg. Kao što se vidi iz Tabele 61 ovo je slučaj kod osam šarži (N°8, N°12, N°15, N°16, N°20, N°22, N°23, N°31).

Nedostatak prvog korigovanog postupka je da se dobije prihvatljiva procena za količinu W_{TROSKA(-1)} jasno pokazuje da jednaki uslovi u količini ulaza i izlaza W_{TROSKA(-1)} na kraju procesa odsumporavanja pod vakumom ne mogu da

osiguraju zadovoljavajuće približavanje. Da bi se dobila prihvatljiva procena količine $W_{TROSKA(-1)}$ neophodno je da se ispune sledeća dva uslova:

1. Na zadovoljavajući način proceniti stvarnu količinu $W_{TROSKA(-1)}$ i
2. Na što je moguće manju meru svesti razliku u proceni težine troske koja je statističkim putem određena i usvojena kao standardna veličina od 500kg i njene stvarne težine.

Vrednosti dobijene posle prve iteracije su osnova da se dobije zadovoljavajuća procena, kao što će kasnije biti potvrđeno preko analize bilansa sumpora i numeričkom analizom.

9.7.2 Odredjivanje polaznog sadržaja sumpora

Za izračunavanje nepoznatog polaznog sadržaja sumpora $[\%S]_p$ poslužiće jednačine bilansa sumpora date izrazima (46)÷(53). Polazni podaci su dati u Tabelama 5÷7, a rezultati bilansa sumpora su prikazani u Tabelama 62 i 63. Kako je već ranije napomenuto za analizu su na raspolaganju samo podaci o sadržaju sumpora u čeliku i troski posle intezivnog mešanja argonom u trajanju od 2 minuta i na kraju procesa vakuumiranja. Momenat kada počinje sam proces odsumporavanja je nepoznat ali ključni na kome se numerička analiza primenjuje. Detaljniji postupak primene numeričke analize i određivanja polaznog sadržaja sumpora $[\%S]_p$ preko bilansa sumpora je objašnjen u PRILOGU 3.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 62: Bilans sumpora 1

Broj šarže	[S] ₁ , [kg]	(S) ₁ , [kg]	"S" ₁ , [kg]	[S] ₂ , [kg]	(S) ₂ , [kg]	"S" ₂ , [kg]	$\Delta "S"_{2/1} = "S"_{2} - "S"_{1}$, [kg]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	14,0	7,8	21,8	0,37	22,1	22,5	0,7
2	23,3	4,6	27,9	0,57	26,9	27,5	-0,4
3	16,6	5,7	22,3	0,55	20,5	21,1	-1,3
4	11,7	9,4	21,1	0,58	19,9	20,5	-0,6
5	13,7	9,4	23,1	0,57	22,3	22,9	-0,3
6	8,4	7,6	16,0	0,53	17,2	17,7	1,7
7	20,0	11,6	21,6	0,94	34,8	35,7	4,2
8	23,7	13,7	37,4	0,95	37,4	38,4	0,9
9	19,7	6,3	26,0	0,92	28,8	29,7	3,7
10	17,2	9,8	27,0	0,95	24,4	25,4	-1,7
11	17,7	7,4	25,1	0,90	25,8	26,7	1,6
12	13,7	8,5	22,2	0,90	22,5	23,4	1,2
13	20,2	11,9	32,1	1,10	34,3	35,4	3,3
14	17,3	8,3	25,6	1,10	29,7	30,8	5,3
15	19,4	8,5	27,9	1,10	25,6	26,7	-1,0
16	15,7	5,7	21,4	1,10	19,6	20,7	-0,7
17	31,9	14,1	46,0	1,20	42,5	43,7	-2,2
18	26,1	13,3	39,4	1,30	41,3	42,6	3,3
19	20,8	13,1	33,9	1,30	37,9	39,2	4,9
20	19,0	9,5	28,5	1,30	24,9	26,2	-2,3
21	30,6	13,1	43,7	1,50	49,4	50,9	7,3
22	27,7	9,8	37,5	1,50	40,9	42,4	5,1
23	24,2	19,8	44,0	1,50	41,6	43,1	-0,9
24	25,8	5,8	31,6	1,50	29,6	31,1	-0,4
25	18,7	8,6	27,3	1,50	27,9	29,4	2,1
26	30,5	12,0	42,5	1,70	43,8	45,5	2,9
27	24,9	17,5	42,4	1,60	41,6	43,2	0,7
28	27,8	8,5	36,3	1,60	35,2	36,8	0,5
29	11,6	18,3	29,9	1,60	28,3	29,9	0,2
30	36,3	13,5	49,8	2,00	47,9	49,9	0,2
31	30,7	9,4	40,1	1,80	37,6	39,4	-0,7

Kako je prikazano u Tabeli 62, nejednakost prikazana jednačinom (50) u Poglavlju 7.7, pokazuje da postoje odstupanja tako da je "S"₁ veće kod 12 šarži i manje kod 19 šarži od "S"₂. Sa povećanjem sadržaja sumpora u emulgovanoj troski i sa sadržajem nemetalnih uključaka u uzorku čelika posle perioda intenzivnog mešanja argonom, uzorak označen sa [S]₁ se povećava i teži da na ulaznoj strani jednačine (50) napravi veću nejednakost. Nasuprot ovoj činjenici,

sa povećanjem količine kapi čelika u uzorku troske $(\%S)_1$ iste teže da izlaznu stranu $"S''_2$, učine manjom. Kako pokazuje Tabela 62 kod 19 šarži jednakost je približno ostvarena tj. $\Delta''S''_{2/1} < |1 \div 2|$ kg S. Kada jedan od dva navedena efekta prevlada nejednakost $'S''_1 \neq 'S''_2$ može da postane znatna tako da $\Delta''S''_{2/1}$ može da odstupa u minusu ($'S''_1 > 'S''_2$) ili u plusu ($'S''_1 < 'S''_2$). Za 12 šarži razlika $\Delta''S''_{2/1}$ je u plusu tj. ($'S''_1 < 'S''_2$) što je najverovatnije posledica neadekvatnog uzorkovanje posle perioda intezivnog mešanja argonom.

Neadekvatno uzorkovanje može da bude jedan od glavnih razloga za razlike između $'S''_1$ i $'S''_2$ u jednačini (50). Nepodesno uzorkovanje troske i čelika odmah posle prestanka duvanja kiseonika u kiseoničnim LD konvertorima poznata je pojava u kasnim pedesetim i prvoj polovini šezdesetih godina prošlog veka.¹¹⁶⁾ Problem određivanja adekvatne analize s jedne strane leži u činjenici da su kapi čelika raspršene u uzorku troske, a sa druge strane tako emulgovana troska, puna je sulfidnim i oksid-sulfidnim nemetalnim uključcima kao produkata procesa odsumporavanja i reakcije dezoksidacije u čeliku. Turbulentno kretanje strujnica metalnog kupatila u toku prodivavanja argonom i vakumiranja u loncu VD postupkom može da bude usvojeno da je dovoljno intezivno za pojavu jednostavnih fenomena. Umereni mehurići inertnog gasa obavljaju završni čin na kraju procesa vakuumiranja u loncu pomažući emulgovanoj troski i nemetalnim uključcima da isplivaju i da se kapi čelika upiju u troski na graničnoj površini troska-čelik, i na taj način homogenizuju obe faze. Sve ovo obezbeđuje realnije uzorkovanje troske i čelika tako da analiza $[S]_2$ i $(S)_2$ može da bude usvojena da je veoma bliska njihovim stvarnim sadržajima koji su u jednačini (50) prikazani na desnoj izlaznoj strani.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 63: Bilans sumpora 2

Broj šarže	TROSKA (-1)		TROSKA LD		W_s (Kreč+Dolo- Kreč), [kg]	$[S]_p$, [kg]	$\Sigma W_s^{\text{Dodaci}}$ $= (S)_p$, [kg]	"S" _p , [kg]	$\Delta[S]_p/[S]_1 =$ $[S]_p - [S]_1$
	[kg]	S [kg]	[kg]	S [kg]					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	530	5,30	470	0,705	0,46	16,04	6,46	22,5	2,04
2	516	5,16	484	0,726	0,30	21,32	6,19	27,5	-1,98
3	536	5,36	464	0,696	0,39	14,62	6,45	21,1	-1,98
4	590	5,90	410	0,615	0,50	13,46	7,01	20,5	1,76
5	604	6,04	396	0,594	0,67	15,53	7,30	22,8	1,83
6	557	5,57	443	0,665	0,53	10,78	6,90	17,7	2,38
7	642	6,42	358	0,537	0,44	28,39	7,40	35,8	8,39
8	469	4,69	531	0,797	0,49	32,36	5,98	38,3	8,66
9	552	5,52	448	0,672	0,45	23,11	6,64	29,8	3,41
10	578	5,78	422	0,633	0,46	18,43	6,87	25,3	1,23
11	547	5,47	453	0,680	0,46	20,10	6,61	26,7	2,40
12	493,5	4,94	506,5	0,760	0,45	17,27	6,14	23,4	3,57
13	644	6,44	356	0,534	0,44	28,00	7,41	35,4	7,80
14	564	5,64	436	0,654	0,51	24,00	6,80	30,8	6,70
15	485	4,85	515	0,773	0,36	20,77	5,98	26,8	1,37
16	530	5,30	470	0,705	0,45	14,20	6,46	20,7	-1,50
17	500	5,00	500	0,750	0,46	37,56	6,21	43,8	5,66
18	546	5,46	454	0,681	0,50	35,96	6,64	42,6	9,86
19	608	6,08	392	0,588	0,44	32,03	7,11	39,1	11,23
20	587	5,87	413	0,620	0,40	19,24	6,89	26,1	0,24
21	550	5,50	450	0,675	0,38	44,42	6,54	51,0	13,82
22	501	5,01	499	0,749	0,40	36,33	6,15	42,5	8,63
23	518,5	5,19	481,5	0,722	0,54	36,67	6,44	43,1	12,47
24	590,5	5,91	410	0,615	0,39	24,30	6,90	31,2	-1,50
25	518	5,18	482	0,723	0,40	24,60	6,30	30,9	5,90
26	560	5,60	440	0,660	0,38	38,77	6,63	45,4	8,27
27	518	5,18	482	0,723	0,44	36,82	6,34	43,2	11,92
28	546	5,46	454	0,681	0,44	30,20	6,58	36,8	2,40
29	591,5	5,92	408,5	0,613	0,48	23,12	7,00	30,1	11,52
30	545	5,45	455	0,683	0,38	43,36	6,51	49,9	7,06
31	483	4,83	517	0,776	0,46	33,34	6,07	39,4	2,64

Kao što se vidi iz Tabele 63, kod 27 šarži $[S]_p$ je veći od $[S]_1$, a da je samo kod 4 šarže niži. Sa gledišta malih razlika između vrednosti $[S]_p$ i $[S]_1$, većina šarži gde je $[S]_p > [S]_1$ čini $[S]_p$ u daljem razmatranju prihvatljivim kao polazna tačka procesa odsumporavanja.

9.7.3. Regresiona analiza

Da bi se odredili članovi koji učestvuju u bivarijatnim regresionim jednačinama, urađene su pojedinačne regresije između analitičkim putem izmerenog sadržaja sumpora $[\%S]_2^{\text{Izmereno}}$ kao zavisne promenljive i nezavisno promenljivih parametara kao što su polazni pretpostavljeni sadržaj sumpora $[\%S]_p$, sumporni kapacitet C_s , količina troske u livnom loncu W_{TROSKA2} , aktivitet kiseonika a_o , i temperature T na kraju procesa VD vakuumiranja.

Na osnovu rezultata koji su prikazani u Tabeli 64, u ovoj tezi su izabrani parametri polaznog sadržaja sumpora, sumpornog kapaciteta i količine troske u livnom loncu kao nezavisnih promenljivih koje će da se koriste kod izračunavanja regresionih jednačina. Kao krajnji cilj ove teze, primenjena numerička analiza i predložene regresione jednačine daće procenu završnog sadržaja sumpora nakon procesa vakumiranja u livnom loncu.

Tabela 64: Korelacioni koeficijenti određeni iz regresionih jednačina sa $[\%S]_2^{\text{Izmereno}}$ kao zavisne promenljive i raspoloživih parametara kao nezavisno promenljivih

Koeficijent korelacije	Br.šarži	$[\%S]_p$	C_s	W_{TROSKA2}	$[a_o]$	$T, [K]$
R	12	0.75	0.62	0.38	-	0.10
R	19	0.51	0.24	0.19	-	-

Kako polazni sadržaj sumpora nije poznat, već sadržaj sumpora u troski i čeliku nakon 2 minuta intenzivnog mešanja, to je preko bilansa sumpora primenom numeričke analize određen pretpostavljeni sadržaj polaznog sumpora u troski i čeliku. Količina troske prisutna u livnom loncu određena je preko numeričke analize bilansa aluminijuma. Kada se ovi navedeni parametri odrede u regresionu analizu se uključuje izračunati sumporni kapacitet koji je određen Young metodologijom preko Varijanti A, B i C i originalnih jednačina koje su predložili Young, Sosinsky-Sommerville, Taniguchi i KTH model.

Za svaki izračunati sumporni kapacitet, određene su tri regresione jednačine za sve analizirane šarže tj. $n=31$, za šarže sa završnim sadržajem sumpora $[\%S]_2 \leq 0.0005$ tj. $n=12$ šarži ($N^{\circ}1 \div N^{\circ}12$) i za $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.001$ tj. $n=19$ šarži ($N^{\circ}13 \div N^{\circ}31$), korišćenjem uzoraka za Cs, $[S]_p$, i $W_{TROSKA2}$.

9.7.4. Načini smanjenja negativnog uticaja polaznog sadržaja sumpora u troski livnog lonca na proces odsumporavanja

Potencijal odsumporavanja ne bi mogao u potpunosti da bude iskorišćen za prelazak sumpora iz čelika u trosku, zato što je sumporni kapacitet, C_s , delimično već iscrpljen sadržaj u početnoj troski, $(\%S)_p$. Znatan deo $(\%S)_p$ potiče iz troske predhodnih šarži „upijene“ u vatrostalnu oblogu livnog lonca $W_{TROSKA(-1)}$, a manji deo iz troske $W_{TROSKALD}$ koja se ulije u toku izliva šarže iz kiseoničnog konvertora. Naknadno uneti sadržaj sumpora u troski livnog lonca koji je obrazovan iz dodataka, ubačenih u livni lonac za vreme odsumporavanja, dodatno smanjuju odsumporavajuću raspoloživost troske.

Jasno je da bi izgubljeni deo odsumporavajućeg potencijala troske mogao da se obnovi uklanjanjem dela ili čitave količine prve troske pre početka procesa odsumporavanja korišćenjem nekih od raspoloživih mehaničkih načina i nadoknadom uklonjene troske novododatom količinom dodataka za obrazovanje troske. U nekoj slobodnijoj varijanti, troska livnog lonca bi mogla da bude odsumporavana u konvertoru duvanjem kiseonika odmah po prestanku brzog izlivanja čelika i pre pražnjenja takve odsumporavajuće troske u čašu za trosku. Takođe, mogu se primeniti i mnoge druge metode za obnavljanje potencijala troske. Zajedničko za sve ove načine obnavljanja potencijala troske je da se sa istom količinom troske i njenim niskim sadržajem polaznog sumpora, $(\%S)_p$, mogao da dobije nizak završni sadržaj sumpora u čeliku.

9.7.5. Parametri regresione analize

U Tabeli 65 dati su parametri koji će da se koriste u izradi regresionih jednačina. U izradi regresionih jednačina sumporni kapacitet C_s se menja u zavisnosti od primenjenog načina njihovog izračunavanja dok su vrednosti polaznog zamišljenog sadržaja sumpora $[\%S]_p$ i procenjene količine troske $W_{TROSKA2}$ iste za sve jednačine.

Rezultati višestrukih regresionih jednačina prikazani su u Tabelama i Dijagramima koji slede. Najpre su prikazani rezultati u kojima je sumporni kapacitet određen prema Varijantama A, B i C, a zatim sa originalnim jednačinama iz originalnih modela.

Takođe, dat je pregled razlike izmerene i izračunate vrednosti sumpora na kraju procesa vakuumiranja za sve analizirane šarže ($n=31$), za šarže sa $[\%S]_2 < 0.0005$ ($n=12$) i za šarže sa $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.001$. Znak “-” ukazuje da su izračunate vrednosti više od izmerenih.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 65: Parametri koji učestvuju u izradi regresionih jednačina

Broj šarže	[%S] ₂	Cs							[%S] _p	W _{TROSKA2} [kg/tč]
		A	B	C	Young	S-S	Taniguchi	KTH		
1	0.0002	0.00950	0.01685	0.03236	0.00763	0.01239	0.00994	0.00561	0.00870	18.3
2	0.0003	0.02958	0.02554	0.03715	0.00699	0.01089	0.00772	0.00798	0.01125	16.0
3	0.0003	0.00283	0.02659	0.02512	0.00833	0.01671	0.00992	0.00944	0.00800	16.8
4	0.0003	0.00145	0.01726	0.02455	0.0240872	0.01653	0.01120	0.00582	0.00690	18.3
5	0.0003	0.00116	0.01797	0.01738	0.00717	0.01226	0.00900	0.00472	0.00820	22.1
6	0.0003	0.00434	0.02345	0.02344	0.00728	0.01198	0.00901	0.00442	0.00470	21.0
7	0.0005	0.00336	0.01413	0.01660	0.00782	0.01271	0.01101	0.00607	0.01500	17.9
8	0.0005	0.00528	0.01441	0.01905	0.00896	0.01577	0.01262	0.01002	0.01710	19.9
9	0.0005	0.00696	0.01865	0.01995	0.00813	0.01479	0.00985	0.00830	0.01260	20.6
10	0.0005	0.00170	0.01177	0.01072	0.00811	0.01311	0.01274	0.00638	0.00970	17.9
11	0.0005	0.00253	0.01548	0.01202	0.00826	0.01253	0.01241	0.00426	0.01120	23.5
12	0.0005	0.00189	0.01392	0.01259	0.01117	0.02221	0.01790	0.00893	0.00950	22.8
13	0.0006	0.00005	0.01805	0.02291	0.00764	0.01532	0.00906	0.00626	0.01520	18.2
14	0.0006	0.00038	0.01184	0.01230	0.00953	0.01738	0.01582	0.00694	0.01320	20.5
15	0.0006	0.00216	0.01833	0.01380	0.00955	0.02040	0.01193	0.01261	0.01100	18.4
16	0.0006	0.00902	0.01859	0.01148	0.00857	0.01267	0.01154	0.00667	0.00790	19.2
17	0.0007	0.00060	0.01467	0.01905	0.00796	0.01525	0.01047	0.00780	0.02140	19.9
18	0.0007	0.00436	0.02741	0.02455	0.00832	0.01675	0.00881	0.00650	0.01940	19.8
19	0.0007	0.00000	0.01913	0.01862	0.00613	0.01027	0.00758	0.00342	0.01770	19.5
20	0.0007	0.00074	0.01648	0.00955	0.00795	0.01593	0.00969	0.01143	0.01050	18.1
21	0.0008	0.00023	0.01530	0.01738	0.00917	0.02053	0.01189	0.01207	0.02300	16.1
22	0.0008	0.00208	0.01390	0.01023	0.00664	0.01054	0.00875	0.00862	0.01870	16.3
23	0.0008	0.00176	0.01664	0.01585	0.00883	0.01739	0.01148	0.00901	0.01970	20.5
24	0.0008	0.00233	0.01885	0.01230	0.00887	0.01849	0.01048	0.01188	0.01250	15.5
25	0.0008	0.00182	0.01744	0.01175	0.00915	0.01843	0.01150	0.00969	0.01245	17.1
26	0.0009	0.00178	0.01319	0.01288	0.00912	0.01766	0.01348	0.01439	0.02050	15.4
27	0.0009	0.00157	0.01862	0.01622	0.00729	0.01303	0.00880	0.00566	0.02090	21.4
28	0.0009	0.00029	0.01407	0.01072	0.01017	0.02247	0.01504	0.01499	0.01660	17.9
29	0.0009	0.00020	0.01793	0.01096	0.00615	0.01022	0.00749	0.00423	0.01290	19.5
30	0.001	0.00189	0.01617	0.01622	0.00969	0.02076	0.01265	0.01191	0.02200	15.1
31	0.001	0.00185	0.01473	0.01318	0.01233	0.02664	0.02009	0.01130	0.01820	18.5

9.7.6. Regresione jednačine sa Cs po Varijantama A, B i C

Rezultati numeričke analize za analizirane šarže sa vrednostima sumpornog kapaciteta $Cs_{\text{izračunato}}[a_o]_{Al}$ (Varijanta A), $Cs_{\text{izračunato}}[a_o]_{Si}$ (Varijanta B), i $Cs_{\text{izračunato}}[a_o]_{Al-Si}$ (Varijanta C) koji je određen prema ranije pomenutim jednačinama (Young metodologija) za različite vrednosti aktiviteta kiseonika prikazani su u Tabelama 66÷68. Odmah je uočljivo da je koeficijent korelacije **R** najviši u

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Varijanti C, bez obzira na broj analiziranih šarži tj. za n=31 šaržu R=0.911, za n=12 šarži R=0.928, a za n=19 šarži R=0.764.

Tabela 66: Regresioni koeficijenti za n=31šaržu

Varijanta	Odsečak	Cs	[%S] _p	W _{TROSKA2} , kg/tč	R
A	0.000621	-0.012792	0.028266	-0.000019	0.808
B	0.000587	-0.008924	0.030476	-0.000012	0.770
C	0.000893	-0.018011	0.027441	-0.000018	0.911

Tabela 67: Regresioni koeficijenti za n=12šarži

Varijanta	Odsečak	Cs	[%S] _p	W _{TROSKA2} , kg/tč	R
A	-0.0000805	-0.00421	0.02398	0.0000128	0.806
B	0.000052	-0.006965	0.018555	0.000014	0.803
C	0.000446	-0.009928	0.017244	-0.0000012	0.928

Tabela 68: Regresioni koeficijenti za n=19 šarži

Varijanta	Odsečak	Cs	[%S] _p	W _{TROSKA2} , kg/tč	R
A	0.000931	-0.002796	0.013666	-0.0000204	0.589
B	0.000963	-0.004359	0.013847	-0.0000186	0.597
C	0.000808	-0.018571	0.023307	-0.0000077	0.764

Zamenom parametara iz Tabela 66÷68 dobijaju se višestruke regresione jednačine za izračunavanje završnog sadržaja sumpora na kraju procesa VD tretmana. Radi ilustracije, izgled jednačina, za Varijantu C su:

- Za n=31 šarži i R=0.911

$$[\%S]_2^{lzač} = 0.000893 - 0.018011 \cdot Cs + 0.027441 \cdot [\%S]_p + 1.8 \cdot 10^{-5} \cdot W_{TROSKA2} [kg/t] \dots\dots\dots (62)$$

- Za n=12 šarži i R=0.928

$$[\%S]_2^{lzač} = 0.000446 - 0.009928 \cdot Cs + 0.017244 \cdot [\%S]_p - 1.2 \cdot 10^{-6} \cdot W_{TROSKA2} [kg/t] \dots\dots\dots (63)$$

i

- Za n=19 šarži i R=0.764

$$[\%S]_2^{lzač} = 0.000808 - 0.018571 \cdot Cs + 0.023307 \cdot [\%S]_p - 7.7 \cdot 10^{-6} \cdot W_{TROSKA2} [kg/t] \dots\dots\dots (64)$$

Na isti način moguće je da se prikažu i druge višestruke regresije (Varijanta A i Varijanta B) saglasno podacima iz Tabela 66÷68.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Na osnovu navedenih regresionih jednačina, u Tabeli 69 zbirno je dat prikaz broja i udela šarži sa različitim nivoima razlike u sadržaju sumpora $\Delta\%S = [\%S]_2^{\text{izračunato}} - [\%S]_2^{\text{izmereno}}$.

Tabela 69: Broj i procentni udeo šarži sa različitim nivoima $\Delta\%S$

	Nivo $\Delta\%S$	n=31			n=12			n=19		
		10 ⁻⁴ %	10 ⁻⁵ %	10 ⁻⁶ %	10 ⁻⁴ %	10 ⁻⁵ %	10 ⁻⁶ %	10 ⁻⁴ %	10 ⁻⁵ %	10 ⁻⁶ %
Br.šarži	<i>Varijanta A</i>	20	11	-	2	9	1	8	9	2
	<i>Varijanta B</i>	17	14	-	1	11	-	9	10	-
	<i>Varijanta C</i>	9	22	-	-	12	-	8	11	-
Udeo šarži	<i>Varijanta A</i>	65%	35%	-	17%	75%	8%	42%	47%	11%
	<i>Varijanta B</i>	55%	45%	-	8%	92%	-	47%	53%	-
	<i>Varijanta C</i>	29%	71%	-	-	100%	-	42%	58%	-

Kako pokazuje Tabela 69 za Varijantu C u 78% za n=31 šaržu razlike su na potenciji 10⁻⁵%, 100% za šarže n=12 sa $[\%S]_2 \leq 0.0005$ i 58% za šarže n=19 sa $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.001$. U Varijantama A i B, kod n=31 šarže, u 64% šarži razlika je na potenciji 10⁻⁴% (Varijanta A) i 55% (Varijanti B). Kod šarži sa $[\%S]_2 \leq 0.0005$ razlika $\Delta\%S$ u Varijanti A i B su ujednačene na potenciji 10⁻⁵% i kreću se na nivou 75÷92%, dok je kod šarži sa $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.001$ broj šarži sa potencom razlike na 10⁻⁵% gotovo izjednačen sa onim šaržama gde je razlika 10⁻⁴% i kreće se na nivou 53%: 47%. Treba da se napomene da u Varijanti A neznatan broj šarži ima i razliku $\Delta\%S$ na potenciji 10⁻⁶% i to kod šarži sa $[\%S]_2 \leq 0.0005$ (N°7), a kod šarži $[\%S]_2 = 0.0006 \div 0.001$ (N°20 i (N°26).

U Tabelama 70, 72, 75 (Varijanta A), 76, 78, 80 (Varijanta B) i 82, 84, 86 (Varijanta C) detaljnije su prikazane razlike u sadržaju sumpora $\Delta\%S = [\%S]_2^{\text{izračunato}} - [\%S]_2^{\text{izmereno}}$ pri čemu je $[\%S]_2^{\text{izračunato}}$ pretpostavljena vrednost iz višestrukih regresionih jednačina.

Tabele 74, 76, 78 (Varijanta A), 80, 82, 84 (Varijanta B) i 85, 87, 89 (Varijanta C), pokazuju odgovarajuće jednačine zavisnosti sadržaja sumpora $[\%S]_2^{\text{izmereno}} - [\%S]_2^{\text{izračunato}}$ sa koeficijentima korelacije, dok dijagrami na Slikama

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

56÷58 (Varijanta A), 59÷61 (Varijanta B), i 62÷64 (Varijanta C) ilustruju pomenutu zavisnost.

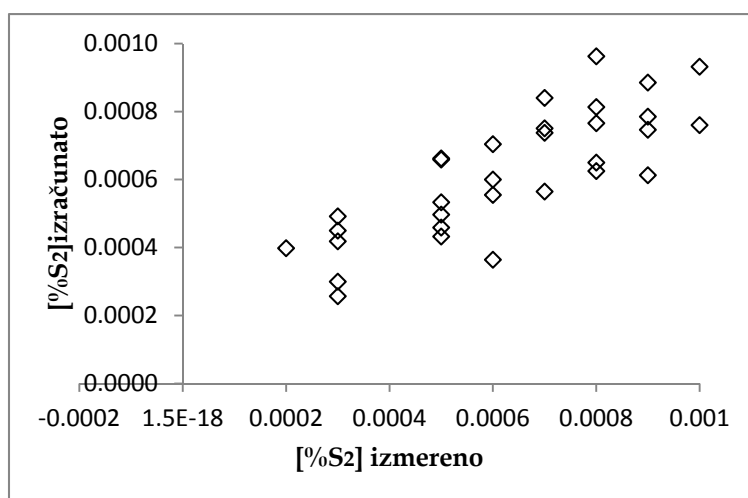
9.7.6.1. Rezultati po Varijanti A

9.7.6.1.1. Prikaz za n=31 šaržu

Tabela 70: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu

Br.šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00040	0.00020
2	0.0003	0.00026	-0.00004
3	0.0003	0.00049	0.00019
4	0.0003	0.00045	0.00015
5	0.0003	0.00042	0.00012
6	0.0003	0.00030	0.00000
7	0.0005	0.00066	0.00016
8	0.0005	0.00066	0.00016
9	0.0005	0.00050	0.00000
10	0.0005	0.00053	0.00003
11	0.0005	0.00046	-0.00004
12	0.0005	0.00043	-0.00007
13	0.0006	0.00070	0.00010
14	0.0006	0.00060	0.00000
15	0.0006	0.00055	-0.00005
16	0.0006	0.00036	-0.00024
17	0.0007	0.00084	0.00014
18	0.0007	0.00074	0.00004
19	0.0007	0.00075	0.00005
20	0.0007	0.00056	-0.00014
21	0.0008	0.00096	0.00016
22	0.0008	0.00081	0.00001
23	0.0008	0.00077	-0.00003
24	0.0008	0.00065	-0.00015
25	0.0008	0.00062	-0.00018
26	0.0009	0.00089	-0.00001
27	0.0009	0.00079	-0.00011
28	0.0009	0.00075	-0.00015
29	0.0009	0.00061	-0.00029
30	0.001	0.00093	-0.00007
31	0.001	0.00076	-0.00024

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 59: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu (Varijanta A)

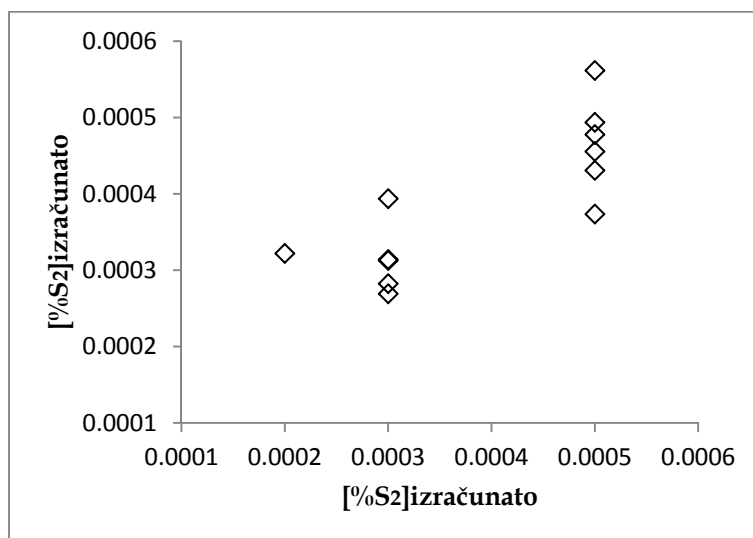
Tabela 71: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu

$[\%S]_{\text{izmereno}} - [\%S]_{\text{izračunato}}$	Linearna jednačina	R
	$y = 0.6538x + 0.0002$	0.81
	Polinomska jednačina	0.81
	$y = -138.83x^2 + 0.823x + 0.0002$	

9.7.6.1.2. Prikaz za $n=12$ šarži

Tabela 72: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za $n=12$ šarži

Br.šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.000322	-0.000122
2	0.0003	0.000269	0.000031
3	0.0003	0.000314	-0.000014
4	0.0003	0.000313	-0.000013
5	0.0003	0.000394	-0.000094
6	0.0003	0.000282	0.000018
7	0.0005	0.000494	0.000006
8	0.0005	0.000562	-0.000062
9	0.0005	0.000456	0.000044
10	0.0005	0.000374	0.000126
11	0.0005	0.000478	0.000022
12	0.0005	0.000431	0.000069

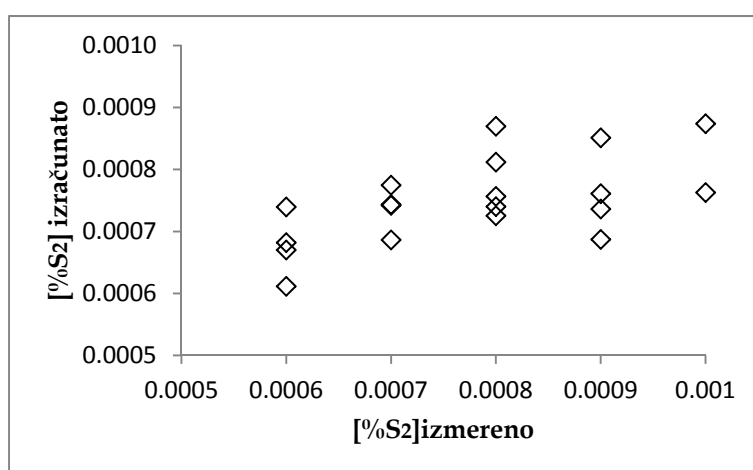
Slika 60: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta A)Tabela 73: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.6489x + 0.0001$	0.805
	Polinomska jednačina	0.835
	$y = 2772x^2 - 1.4619x + 0.0005$	

9.7.6.1.3. Prikaz za n=19 šarži

Tabela 74: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=19 šarži

Br.šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
13	0.0006	0.000767	0.000167
14	0.0006	0.000692	0.000092
15	0.0006	0.000700	0.000100
16	0.0006	0.000622	0.000022
17	0.0007	0.000816	0.000116
18	0.0007	0.000780	0.000080
19	0.0007	0.000775	0.000075
20	0.0007	0.000703	0.000003
21	0.0008	0.000916	0.000116
22	0.0008	0.000848	0.000048
23	0.0008	0.000777	-0.000023
24	0.0008	0.000779	-0.000021
25	0.0008	0.000747	-0.000053
26	0.0009	0.000892	-0.000008
27	0.0009	0.000776	-0.000124
28	0.0009	0.000792	-0.000108
29	0.0009	0.000709	-0.000191
30	0.001	0.000918	-0.000082
31	0.001	0.000797	-0.000203

Slika 61: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=19 šarži (Varijanta A)

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 75: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.305x + 0.0005$	
	Polinomska jednačina	0.611
	$y = -707.32x^2 + 1.4156x + 9E-05$	

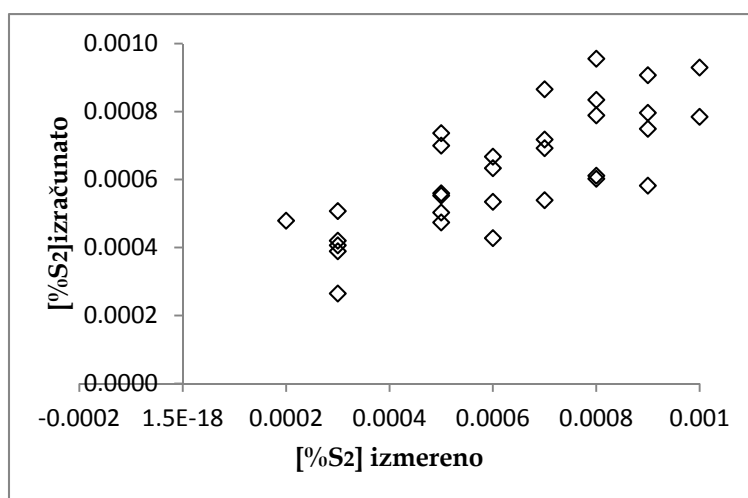
9.7.6.2. Rezultati po Varijanti B

9.7.6.2.1. Prikaz za n=31 šaržu

Tabela 76: Razlika $\Delta S = [\%S]_{izračunato} - [\%S]_{izmereno}$ za n=31 šaržu

Br.šarže	[%S] _{izmereno}	[%S] _{izračunato}	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00048	0.00028
2	0.0003	0.00051	0.00021
3	0.0003	0.00039	0.00009
4	0.0003	0.00042	0.00012
5	0.0003	0.00041	0.00011
6	0.0003	0.00026	-0.00004
7	0.0005	0.00070	0.00020
8	0.0005	0.00074	0.00024
9	0.0005	0.00055	0.00005
10	0.0005	0.00056	0.00006
11	0.0005	0.00050	0.00000
12	0.0005	0.00047	-0.00003
13	0.0006	0.00067	0.00007
14	0.0006	0.00063	0.00003
15	0.0006	0.00053	-0.00007
16	0.0006	0.00043	-0.00017
17	0.0007	0.00087	0.00017
18	0.0007	0.00069	-0.00001
19	0.0007	0.00072	0.00002
20	0.0007	0.00054	-0.00016
21	0.0008	0.00096	0.00016
22	0.0008	0.00083	0.00003
23	0.0008	0.00079	-0.00001
24	0.0008	0.00061	-0.00019
25	0.0008	0.00060	-0.00020
26	0.0009	0.00091	0.00001
27	0.0009	0.00080	-0.00010
28	0.0009	0.00075	-0.00015
29	0.0009	0.00058	-0.00032
30	0.001	0.00093	-0.00007
31	0.001	0.00078	-0.00022

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 62: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šarži (Varijanta B)

Tabela 77: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šarži

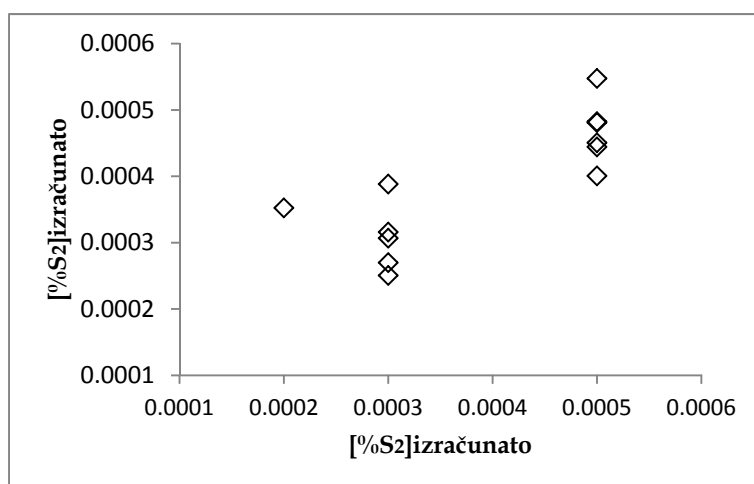
$[\%S]_{\text{izmereno}} - [\%S]_{\text{izračunato}}$	Linearna jednačina	R
	$y = 0.5924x + 0.0003$	0.77
	Polinomska jednačina	0.77
	$y = -64.347x^2 + 0.6708x + 0.0002$	

9.7.6.2.2. Prikaz za $n=12$ šarži

Tabela 78: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za $n=12$ šarži

Br.šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00035	0.00015
2	0.0003	0.00031	0.00001
3	0.0003	0.00025	-0.00005
4	0.0003	0.00032	0.00002
5	0.0003	0.00039	0.00009
6	0.0003	0.00027	-0.00003
7	0.0005	0.00048	-0.00002
8	0.0005	0.00055	0.00005
9	0.0005	0.00044	-0.00006
10	0.0005	0.00040	-0.00010
11	0.0005	0.00048	-0.00002
12	0.0005	0.00045	-0.00005

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 63: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta B)

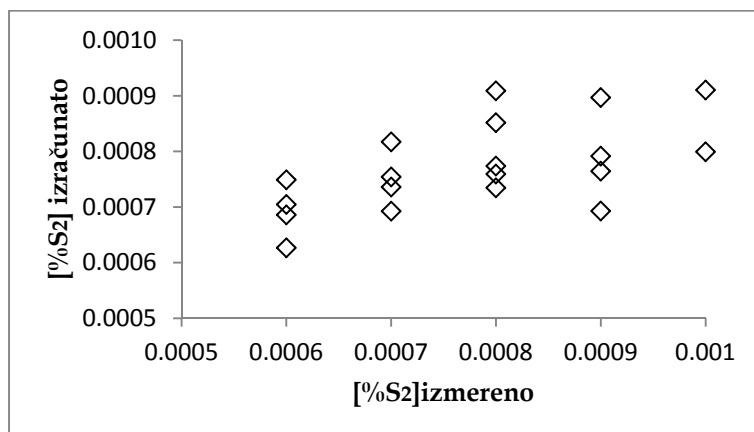
Tabela 79: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.6443x + 0.0001$	0.80
	Polinomska jednačina	0.87
	$y = 4222.9x^2 - 2.5712x + 0.0007$	

9.7.6.2.3. Prikaz za n=19 šarži

Tabela 80: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=19 šarži

Br.šarže	[%S] _{izmereno}	[%S] _{izračunato}	$\Delta S, [\%]$
13	0.0006	0.00075	0.00015
14	0.0006	0.00070	0.00010
15	0.0006	0.00069	0.00009
16	0.0006	0.00063	0.00003
17	0.0007	0.00082	0.00012
18	0.0007	0.00074	0.00004
19	0.0007	0.00075	0.00005
20	0.0007	0.00069	-0.00001
21	0.0008	0.00091	0.00011
22	0.0008	0.00085	0.00005
23	0.0008	0.00077	-0.00003
24	0.0008	0.00076	-0.00004
25	0.0008	0.00073	-0.00007
26	0.0009	0.00090	0.00000
27	0.0009	0.00076	-0.00014
28	0.0009	0.00079	-0.00011
29	0.0009	0.00069	-0.00021
30	0.001	0.00091	-0.00009
31	0.001	0.00080	-0.00020

Slika 64: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta B)Tabela 81: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta B)

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.3585x + 0.0005$	0.60
	Polinomska jednačina	0.61
	$y = -618.21x^2 + 1.3292x + 0.0001$	

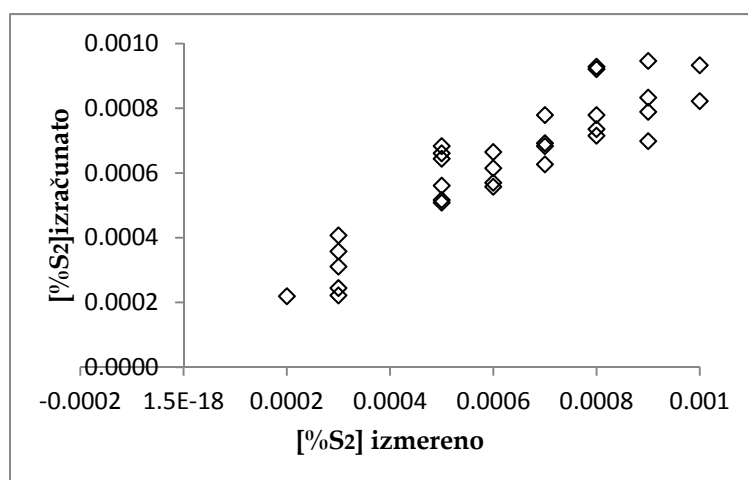
9.7.6.3. Varijanta C

9.7.6.3.1. Prikaz za n=31 šaržu

Tabela 82: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu

Br.šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00022	0.00002
2	0.0003	0.00024	-0.00006
3	0.0003	0.00036	0.00006
4	0.0003	0.00031	0.00001
5	0.0003	0.00041	0.00011
6	0.0003	0.00022	-0.00008
7	0.0005	0.00068	0.00018
8	0.0005	0.00066	0.00016
9	0.0005	0.00051	0.00001
10	0.0005	0.00064	0.00014
11	0.0005	0.00056	0.00006
12	0.0005	0.00052	0.00002
13	0.0006	0.00057	-0.00003
14	0.0006	0.00066	0.00006
15	0.0006	0.00062	0.00002
16	0.0006	0.00056	-0.00004
17	0.0007	0.00078	0.00008
18	0.0007	0.00063	-0.00007
19	0.0007	0.00069	-0.00001
20	0.0007	0.00068	-0.00002
21	0.0008	0.00092	0.00012
22	0.0008	0.00093	0.00013
23	0.0008	0.00078	-0.00002
24	0.0008	0.00074	-0.00006
25	0.0008	0.00072	-0.00008
26	0.0009	0.00095	0.00005
27	0.0009	0.00079	-0.00011
28	0.0009	0.00083	-0.00007
29	0.0009	0.00070	-0.00020
30	0.001	0.00093	-0.00007
31	0.001	0.00082	-0.00018

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 65: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=31 šaržu (Varijanta C)

Tabela 83: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=31 šaržu (Varijanta C)

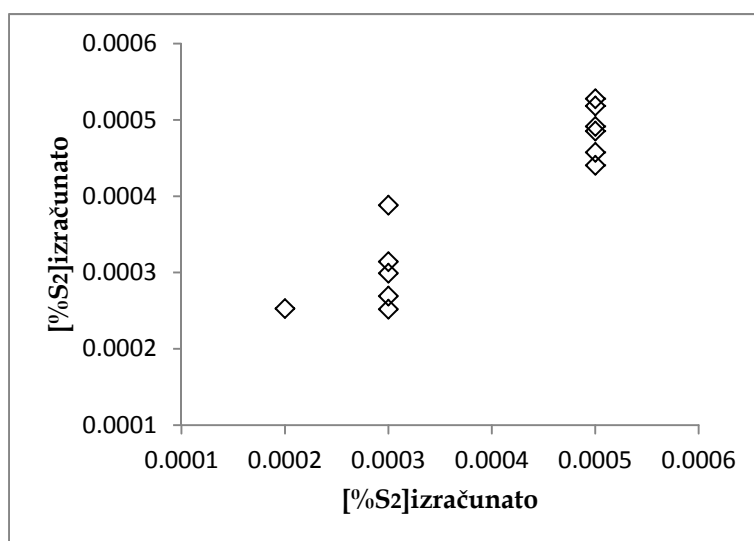
[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	y = 0.8303x + 0.0001	0.91
	Polinomska jednačina	0.93
	y = -719.07x ² + 1.7065x - 0.0001	

9.7.6.3.2. Prikaz za n=12 šarži

Tabela 84: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=12 šarži

Br.šarže	[%S] _{izmereno}	[%S] _{izračunato}	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00025	0.00005
2	0.0003	0.00025	-0.00005
3	0.0003	0.00031	0.00001
4	0.0003	0.00030	0.00000
5	0.0003	0.00039	0.00009
6	0.0003	0.00027	-0.00003
7	0.0005	0.00052	0.00002
8	0.0005	0.00053	0.00003
9	0.0005	0.00044	-0.00006
10	0.0005	0.00049	-0.00001
11	0.0005	0.00049	-0.00001
12	0.0005	0.00046	-0.00004

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 66: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta C)

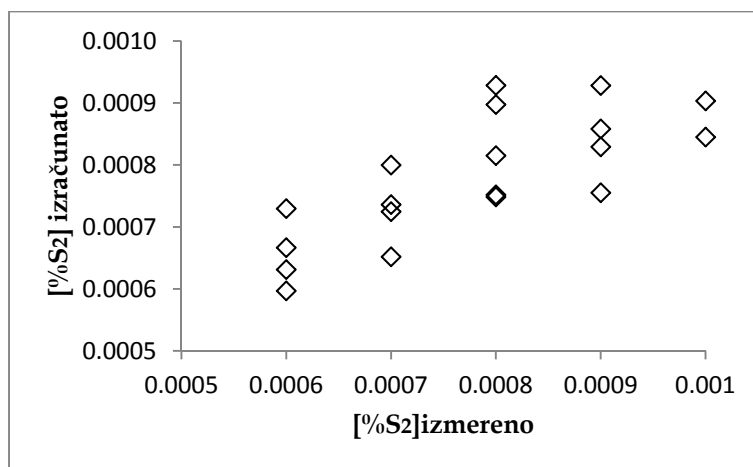
Tabela 85: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži (Varijanta C)

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.8608x + 5E-05$	0.93
	Polinomska jednačina	0.93
	$y = 1309.3x^2 - 0.1362x + 0.0002$	

9.7.6.3.3. Prikaz za n=19 šarži

Tabela 86: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=19 šarži

Br. šarže	[%S] _{izmereno}	[%S] _{izračunato}	$\Delta S, [\%]$
13	0.0006	0.00060	0.00000
14	0.0006	0.00073	0.00013
15	0.0006	0.00067	0.00007
16	0.0006	0.00063	0.00003
17	0.0007	0.00080	0.00010
18	0.0007	0.00065	-0.00005
19	0.0007	0.00072	0.00002
20	0.0007	0.00074	0.00004
21	0.0008	0.00090	0.00010
22	0.0008	0.00093	0.00013
23	0.0008	0.00081	0.00001
24	0.0008	0.00075	-0.00005
25	0.0008	0.00075	-0.00005
26	0.0009	0.00093	0.00003
27	0.0009	0.00083	-0.00007
28	0.0009	0.00086	-0.00004
29	0.0009	0.00075	-0.00015
30	0.001	0.00090	-0.00010
31	0.001	0.00084	-0.00016

Slika 67: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta C)Tabela 87: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži (Varijanta C)

[%S]izmereno - [%S]izračunato	Linearna jednačina	R
	y = 0.5847x + 0.0003	0.76
	Polinomska jednačina	0.79
	y = -1279.8x ² + 2.5944x - 0.0004	

9.7.7. Regresione jednačine sa Cs po modelima

Rezultati numeričke analize za analizirane šarže sa vrednostima sumpornog kapaciteta $Cs_{izračunato}$ koji je određen prema originalnim jednačinama Young-a i saradnika, Sosinsky-Sommervill-a, Taniguchi-ja i KTH modela prikazani su u Tabelama 88÷90. Iz Tabele je uočljivo da su u poređenju sa koeficijentima korelacije R ujednačeni kod svih modela. Minimalne razlike su uočljive kod šarži n=31 i n=19, dok izvesne „veće“ razlike se javljaju kod šarži sa sadržajem završnog sumpora $[%S]_2 \leq 0.0005$ i to kod Young i Taniguchi modela. Takođe, u poređenju sa koeficijentima korelacije za regresione jednačine u Varijantama A, B i C vrednosti R su niže, osim kod šarži sa završnim sumporom $[%S]_2 = 0.0006 - 0.001$.

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 88: Regresioni koeficijenti za n=31 šaržu

Model	Odsečak	Cs	[%S] _p	W _{TROSKA2} , kg/tč	R
<i>Young i sarad.</i>	9.54E-05	0.033827	0.03127	-1.02E-05	0.781
<i>Sosinsky-Sommerville</i>	0.000138	0.013160	0.029889	-7.37E-06	0.788
<i>Taniguchi</i>	0.000254	0.015692	0.031298	-1.3E-05	0.781
<i>KTH</i>	-1.7135E-05	0.01955	0.02961	3.56E-06	0.784

Tabela 89: Regresioni koeficijenti za n=12 šarži

Model	Odsečak	Cs	[%S] _p	W _{TROSKA2} , kg/tč	R
<i>Young i sarad.</i>	-0.00035	0.03033	0.02115	1.42E-05	0.812
<i>Sosinsky-Sommerville</i>	-0.00029	0.008072	0.022625	1.68E-05	0.796
<i>Taniguchi</i>	-0.00021	0.017843	0.019817	1.04E-05	0.844
<i>KTH</i>	-0.00028	0.00650	0.02102	2.09E-05	0.77

Tabela 90: Regresioni koeficijenti za n=19 šarži

Model	Odsečak	Cs	[%S] _p	W _{TROSKA2} , kg/tč	R
<i>Young i sarad.</i>	0.00070	0.01863	0.01403	-1.70E-05	0.622
<i>Sosinsky-Sommerville</i>	0.00075	0.00614	0.01339	-1.6E-05	0.617
<i>Taniguchi</i>	0.000761	0.010419	0.01388	-1.8E-05	0.636
<i>KTH</i>	0.000672	0.008114	0.013963	-0.0000109	0.61

Tabela 91: Broj i procentni udeo šarži sa različitim nivoima Δ%S

	Nivo Δ%S/Modeli	n=31		n=12			n=19	
		10 ⁻⁴ %	10 ⁻⁵ %	10 ⁻⁴ %	10 ⁻⁵ %	10 ⁻⁶ %	10 ⁻⁴ %	10 ⁻⁵ %
Br. šarži	<i>Young i sarad.</i>	16	15	2	10	-	8	11
	<i>Sosinsky-Sommerville</i>	18	13	2	10	-	11	8
	<i>Taniguchi</i>	16	15	12	-	-	8	11
	<i>KTH</i>	14	17	2	8	2	8	11
Udeo šarži	<i>Young i sarad.</i>	52%	48%	17%	32%	-	42%	58%
	<i>Sosinsky-Sommerville</i>	58%	42%	17%	32%	-	58%	42%
	<i>Taniguchi</i>	52%	48%	100%	-	-	42%	58%
	<i>KTH</i>	45%	55%	17%	26%	17%	42%	58%

Razlike $\Delta\%S = [\%S]_2^{\text{Izračunato}} - [\%S]_2^{\text{Izmereno}}$ u potpunosti odslikavaju vrednosti koeficijenta korelacije R. Kod svih modela razlike su na potencijal 10⁻⁴%÷10⁻⁵% na nivou 50% kada su u pitanju šarže sa n=31 i n=19 uzoraka ($[\%S]_2 = 0.0006$ -

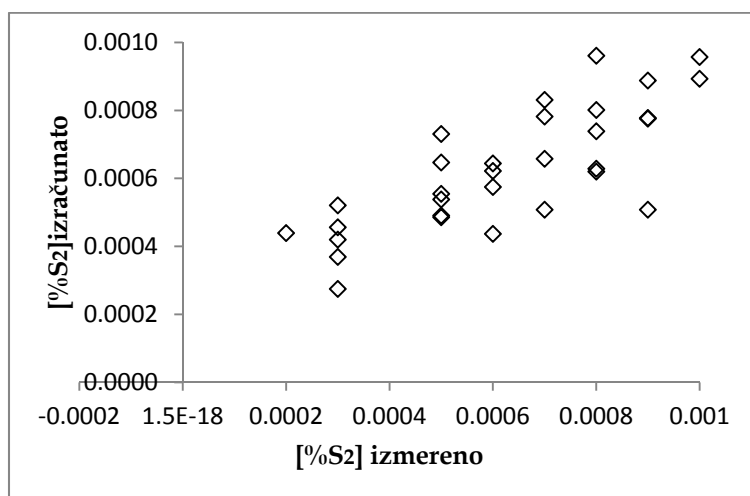
0.001), osim kod šarži n=12 sa $[\%S]_2 \leq 0.0005$ gde je na nivou 83% šarži sa potencom $10^{-5}\%$. Samo kod KTH modela kod šarži sa završnim sumporom $[\%S]_2 \leq 0.0005$ dve šarže pokazuju razliku $\Delta\%S$ na $10^{-6}\%$ potenzi (N°2 i N°8).

9.7.7.1. Model Young-a i saradnika

9.7.7.1.1. Prikaz za n=31 šaržu

Tabela 92: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00044	0.00024
2	0.0003	0.00052	0.00022
3	0.0003	0.00046	0.00016
4	0.0003	0.00042	0.00012
5	0.0003	0.00037	0.00007
6	0.0003	0.00027	-0.00003
7	0.0005	0.00065	0.00015
8	0.0005	0.00073	0.00023
9	0.0005	0.00055	0.00005
10	0.0005	0.00049	-0.00001
11	0.0005	0.00049	-0.00001
12	0.0005	0.00054	0.00004
13	0.0006	0.00064	0.00004
14	0.0006	0.00062	0.00002
15	0.0006	0.00057	-0.00003
16	0.0006	0.00044	-0.00016
17	0.0007	0.00083	0.00013
18	0.0007	0.00078	0.00008
19	0.0007	0.00066	-0.00004
20	0.0007	0.00051	-0.00019
21	0.0008	0.00096	0.00016
22	0.0008	0.00074	-0.00006
23	0.0008	0.00080	0.00000
24	0.0008	0.00063	-0.00017
25	0.0008	0.00062	-0.00018
26	0.0009	0.00089	-0.00001
27	0.0009	0.00078	-0.00012
28	0.0009	0.00078	-0.00012
29	0.0009	0.00051	-0.00039
30	0.001	0.00096	-0.00004
31	0.001	0.00089	-0.00011



Slika 68: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu
(Cs po Young modelu)

Tabela 93: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu

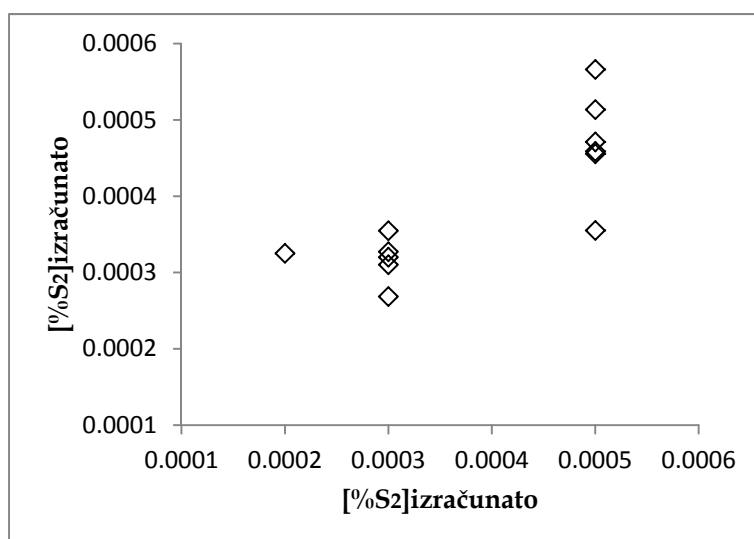
$[\%S]_{\text{izmereno}} - [\%S]_{\text{izračunato}}$	Linearna jednačina	R
	$y = 0.6097x + 0.0002$	0.78
	Polinomska jednačina	0.78
	$y = 108.51x^2 + 0.4775x + 0.0003$	

9.7.7.1.2. Prikaz za $n=12$ šarži

Tabela 94: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za $n=12$ šarži

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00033	0.00013
2	0.0003	0.00033	0.00003
3	0.0003	0.00031	0.00001
4	0.0003	0.00032	0.00002
5	0.0003	0.00035	0.00005
6	0.0003	0.00027	-0.00003
7	0.0005	0.00046	-0.00004
8	0.0005	0.00057	0.00007
9	0.0005	0.00046	-0.00004
10	0.0005	0.00036	-0.00014
11	0.0005	0.00047	-0.00003
12	0.0005	0.00051	0.00001

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 69: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži

(Cs po Young modelu)

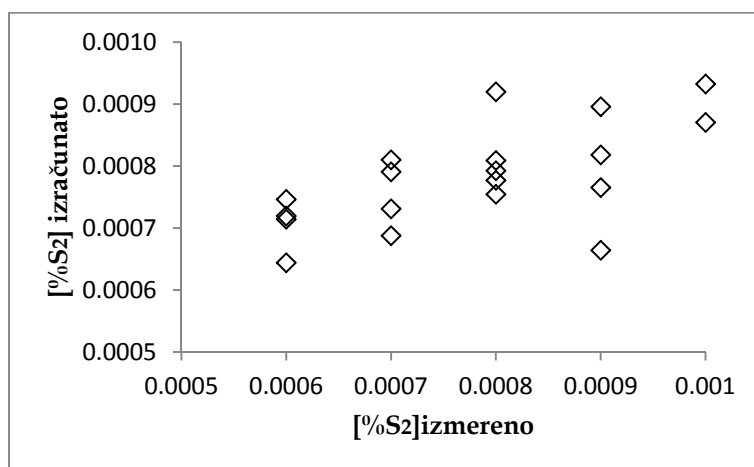
Tabela 95: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.659x + 0.0001$	0.81
	Polinomska jednačina	0.84
	$y = 2866.8x^2 - 1.5239x + 0.0005$	

9.7.7.1.3. Prikaz za n=19 šarži

Tabela 96: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=19 šarži

Br. šarže	[%S] _{izmereno}	[%S] _{izračunato}	ΔS , [%]
13	0.0006	0.00075	0.00015
14	0.0006	0.00071	0.00011
15	0.0006	0.00072	0.00012
16	0.0006	0.00064	0.00004
17	0.0007	0.00081	0.00011
18	0.0007	0.00079	0.00009
19	0.0007	0.00073	0.00003
20	0.0007	0.00069	-0.00001
21	0.0008	0.00092	0.00012
22	0.0008	0.00081	0.00001
23	0.0008	0.00079	-0.00001
24	0.0008	0.00078	-0.00002
25	0.0008	0.00075	-0.00005
26	0.0009	0.00090	0.00000
27	0.0009	0.00077	-0.00013
28	0.0009	0.00082	-0.00008
29	0.0009	0.00066	-0.00024
30	0.001	0.00093	-0.00007
31	0.001	0.00087	-0.00013



Slika 70: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži
(Cs po Young modelu)

Tabela 97: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 za šarži

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.3871x + 0.0005$	0.62
	Polinomska jednačina	0.62
	$y = 67.452x^2 + 0.2812x + 0.0005$	

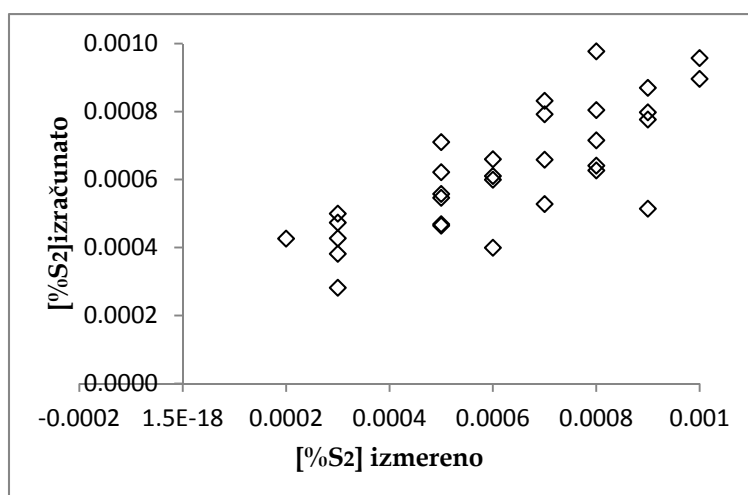
9.7.7.2. Sosinsky-Sommerville model

9.7.7.2.1. Prikaz za n=31 šaržu

Tabela 98: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00043	0.00023
2	0.0003	0.00050	0.00020
3	0.0003	0.00047	0.00017
4	0.0003	0.00043	0.00013
5	0.0003	0.00038	0.00008
6	0.0003	0.00028	-0.00002
7	0.0005	0.00062	0.00012
8	0.0005	0.00071	0.00021
9	0.0005	0.00056	0.00006
10	0.0005	0.00047	-0.00003
11	0.0005	0.00046	-0.00004
12	0.0005	0.00055	0.00005
13	0.0006	0.00066	0.00006
14	0.0006	0.00061	0.00001
15	0.0006	0.00060	0.00000
16	0.0006	0.00040	-0.00020
17	0.0007	0.00083	0.00013
18	0.0007	0.00079	0.00009
19	0.0007	0.00066	-0.00004
20	0.0007	0.00053	-0.00017
21	0.0008	0.00098	0.00018
22	0.0008	0.00072	-0.00008
23	0.0008	0.00080	0.00000
24	0.0008	0.00064	-0.00016
25	0.0008	0.00063	-0.00017
26	0.0009	0.00087	-0.00003
27	0.0009	0.00078	-0.00012
28	0.0009	0.00080	-0.00010
29	0.0009	0.00051	-0.00039
30	0.001	0.00096	-0.00004
31	0.001	0.00090	-0.00010

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 71: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu
(Cs po Sosinsky-Sommerville modelu)

Tabela 99: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu

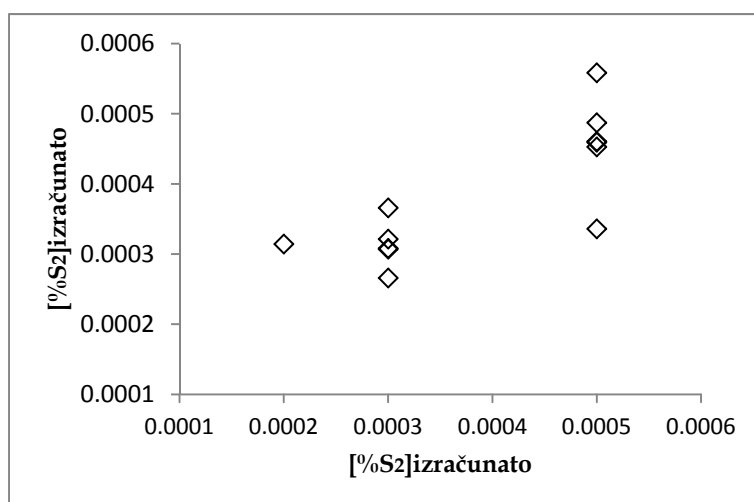
$[\%S]_{\text{izmereno}} - [\%S]_{\text{izračunato}}$	Linearna jednačina	R
	$y = 0.6204x + 0.0002$	0.78
	Polinomska jednačina	0.78
	$y = 134.9x^2 + 0.456x + 0.0003$	

9.7.7.2.2. Prikaz za $n=12$ šarži

Tabela 100: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za $n=12$ šarži

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00031	0.00011
2	0.0003	0.00032	0.00002
3	0.0003	0.00031	0.00001
4	0.0003	0.00031	0.00001
5	0.0003	0.00037	0.00007
6	0.0003	0.00027	-0.00003
7	0.0005	0.00045	-0.00005
8	0.0005	0.00056	0.00006
9	0.0005	0.00046	-0.00004
10	0.0005	0.00034	-0.00016
11	0.0005	0.00046	-0.00004
12	0.0005	0.00049	-0.00001

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA



Slika 72: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=12$ šarži (Cs po Sosinsky-Sommerville modelu)

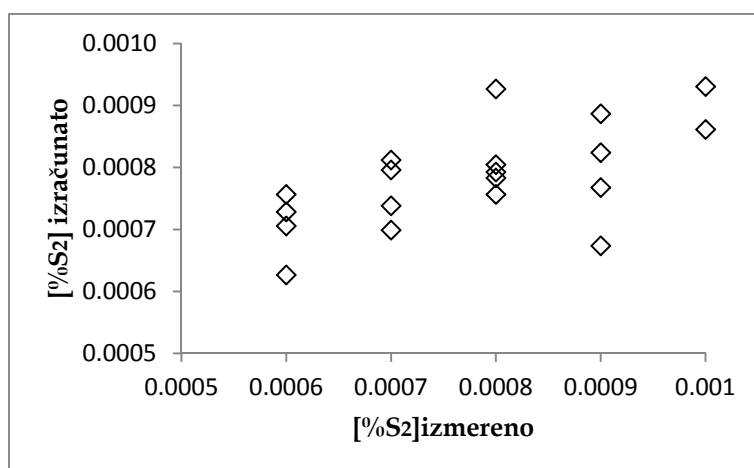
Tabela 101: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu

$[\%S]_{\text{izmereno}} - [\%S]_{\text{izračunato}}$	Linearna jednačina	R
	$y = 0.6329x + 0.0001$	0.79
	Polinomska jednačina	0.82
	$y = 2447.4x^2 - 1.2307x + 0.0005$	

9.7.7.2.3. Prikaz za $n=19$ šarži

Tabela 102: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za $n=19$ šarži

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
13	0.0006	0.00076	0.00016
14	0.0006	0.00071	0.00011
15	0.0006	0.00073	0.00013
16	0.0006	0.00063	0.00003
17	0.0007	0.00081	0.00011
18	0.0007	0.00080	0.00010
19	0.0007	0.00074	0.00004
20	0.0007	0.00070	0.00000
21	0.0008	0.00093	0.00013
22	0.0008	0.00080	0.00000
23	0.0008	0.00079	-0.00001
24	0.0008	0.00078	-0.00002
25	0.0008	0.00076	-0.00004
26	0.0009	0.00089	-0.00001
27	0.0009	0.00077	-0.00013
28	0.0009	0.00082	-0.00008
29	0.0009	0.00067	-0.00023
30	0.001	0.00093	-0.00007
31	0.001	0.00086	-0.00014



Slika 73: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži
(Cs po Sosinsky-Sommerville modelu)

Tabela 103: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=31 šaržu

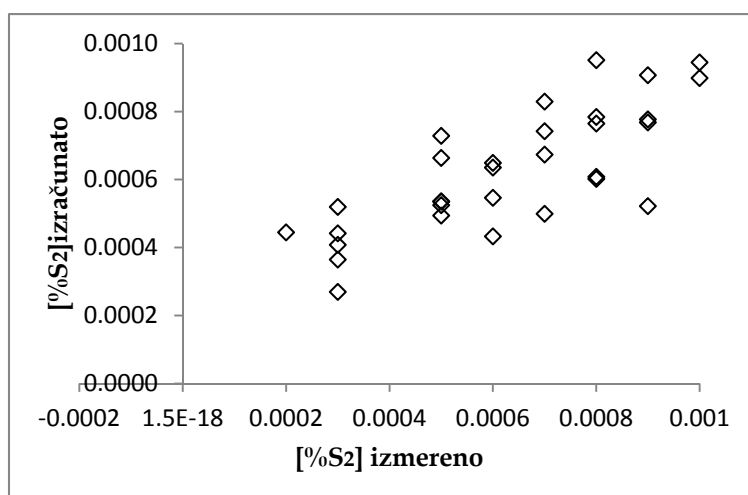
[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	y = 0.3811x + 0.0005	0.62
	Polinomska jednačina	0.62
	y = -120.51x ² + 0.5703x + 0.0004	

9.7.7.3. Taniguchi model

9.7.7.3.1. Prikaz za n=31 šaržu

Tabela 104: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00044	0.00024
2	0.0003	0.00052	0.00022
3	0.0003	0.00044	0.00014
4	0.0003	0.00041	0.00011
5	0.0003	0.00036	0.00006
6	0.0003	0.00027	-0.00003
7	0.0005	0.00066	0.00016
8	0.0005	0.00073	0.00023
9	0.0005	0.00054	0.00004
10	0.0005	0.00052	0.00002
11	0.0005	0.00049	-0.00001
12	0.0005	0.00054	0.00004
13	0.0006	0.00064	0.00004
14	0.0006	0.00065	0.00005
15	0.0006	0.00055	-0.00005
16	0.0006	0.00043	-0.00017
17	0.0007	0.00083	0.00013
18	0.0007	0.00074	0.00004
19	0.0007	0.00067	-0.00003
20	0.0007	0.00050	-0.00020
21	0.0008	0.00095	0.00015
22	0.0008	0.00076	-0.00004
23	0.0008	0.00078	-0.00002
24	0.0008	0.00061	-0.00019
25	0.0008	0.00060	-0.00020
26	0.0009	0.00091	0.00001
27	0.0009	0.00077	-0.00013
28	0.0009	0.00078	-0.00012
29	0.0009	0.00052	-0.00038
30	0.001	0.00094	-0.00006
31	0.001	0.00090	-0.00010



Slika 74: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu
(Cs po Taniguchi modelu)

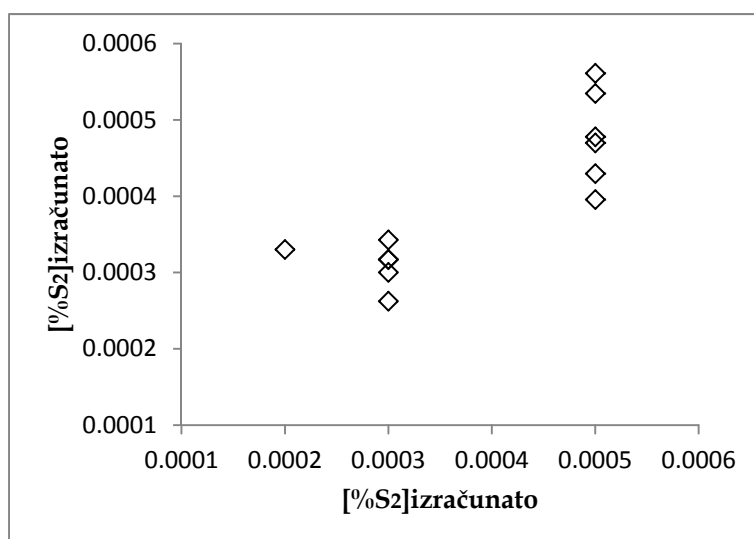
Tabela 105: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu

[%S]izmereno - [%S]izračunato	Linearna jednačina	R
	y = 0.61x + 0.0002	0.78
	Polinomska jednačina	0.78
	y = 113.57x² + 0.4716x + 0.0003	

9.7.7.3.2. Prikaz za $n=12$ šarži

Tabela 106: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za $n=12$ šarži

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.0003	0.0001
2	0.0003	0.0003	0.0000
3	0.0003	0.0003	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0000
5	0.0003	0.0003	0.0000
6	0.0003	0.0003	0.0000
7	0.0005	0.0005	0.0000
8	0.0005	0.0006	0.0001
9	0.0005	0.0004	-0.0001
10	0.0005	0.0004	-0.0001
11	0.0005	0.0005	0.0000
12	0.0005	0.0005	0.0000



Slika 75: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži
(Cs po Taniguchi modelu)

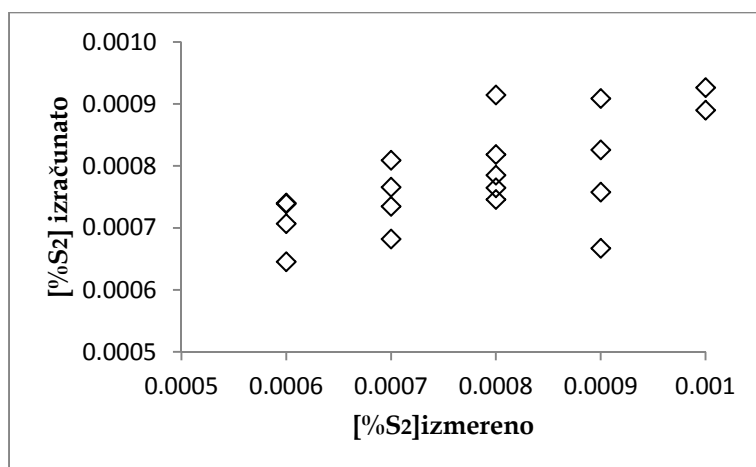
Tabela 107: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=31 šaržu

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.7132x + 0.0001$	0.84
	Polinomska jednačina	0.88
	$y = 3579.5x^2 - 2.0124x + 0.0006$	

9.7.7.3.3. Prikaz za n=19 šarži

Tabela 108: Razlika $\Delta S = [%S]_{izračunato} - [%S]_{izmereno}$ za n=19 šarži

Br. šarže	[%S] _{izmereno}	[%S] _{izračunato}	$\Delta S, [\%]$
13	0.0006	0.00074	0.00014
14	0.0006	0.00074	0.00014
15	0.0006	0.00071	0.00011
16	0.0006	0.00065	0.00005
17	0.0007	0.00081	0.00011
18	0.0007	0.00077	0.00007
19	0.0007	0.00073	0.00003
20	0.0007	0.00068	-0.00002
21	0.0008	0.00091	0.00011
22	0.0008	0.00082	0.00002
23	0.0008	0.00078	-0.00002
24	0.0008	0.00076	-0.00004
25	0.0008	0.00075	-0.00005
26	0.0009	0.00091	0.00001
27	0.0009	0.00076	-0.00014
28	0.0009	0.00083	-0.00007
29	0.0009	0.00067	-0.00023
30	0.001	0.00093	-0.00007
31	0.001	0.00089	-0.00011



Slika 76: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=19 šarži
(Cs po Taniguchi modelu)

Tabela 109: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=31 šaržu

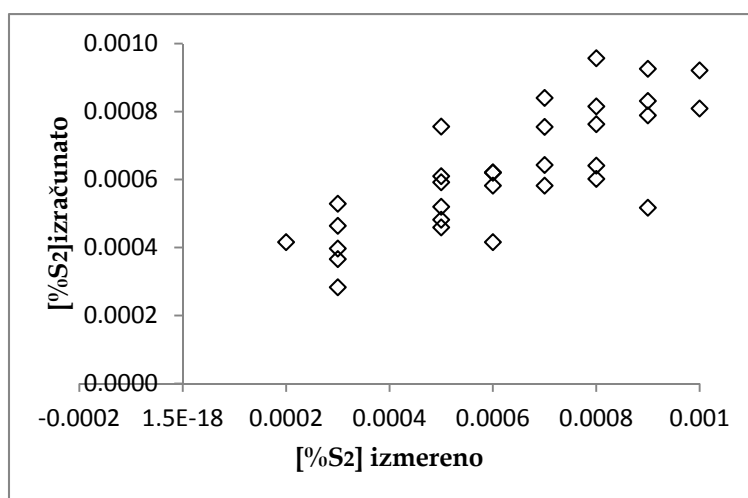
[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	y = 0.4045x + 0.0005	0.63
	Polinomska jednačina	0.64
	y = 304.33x ² - 0.0734x + 0.0006	

9.7.7.4. KTH model

9.7.7.4.1. Prikaz za n=31 šaržu

Tabela 110: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=31 šaržu

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.000416	0.000216
2	0.0003	0.000529	0.000229
3	0.0003	0.000464	0.000164
4	0.0003	0.000366	0.000066
5	0.0003	0.000397	0.000097
6	0.0003	0.000283	-0.000017
7	0.0005	0.000610	0.000110
8	0.0005	0.000756	0.000256
9	0.0005	0.000592	0.000092
10	0.0005	0.000459	-0.000041
11	0.0005	0.000482	-0.000018
12	0.0005	0.000520	0.000020
13	0.0006	0.000620	0.000020
14	0.0006	0.000582	-0.000018
15	0.0006	0.000621	0.000021
16	0.0006	0.000416	-0.000184
17	0.0007	0.000840	0.000140
18	0.0007	0.000755	0.000055
19	0.0007	0.000643	-0.000057
20	0.0007	0.000582	-0.000118
21	0.0008	0.000957	0.000157
22	0.0008	0.000763	-0.000037
23	0.0008	0.000815	0.000015
24	0.0008	0.000641	-0.000159
25	0.0008	0.000602	-0.000198
26	0.0009	0.000926	0.000026
27	0.0009	0.000789	-0.000111
28	0.0009	0.000831	-0.000069
29	0.0009	0.000517	-0.000383
30	0.001	0.000921	-0.000079
31	0.001	0.000809	-0.000191



Slika 77: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu
(Cs po KTH modelu)

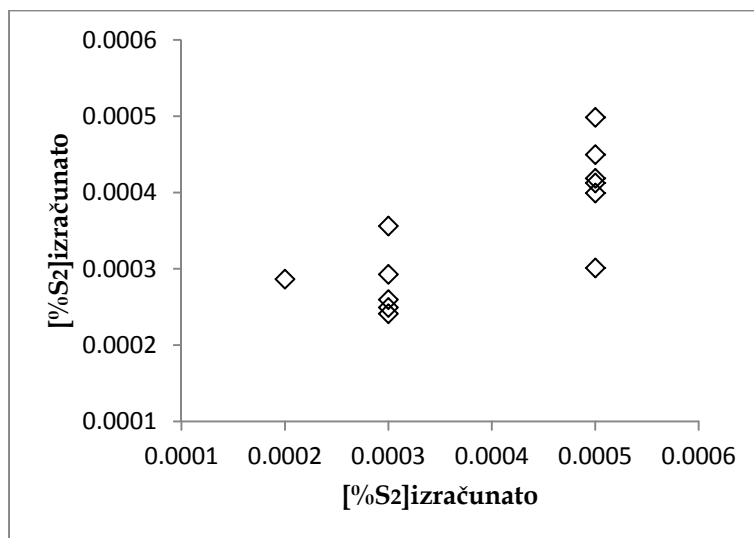
Tabela 111: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za $n=31$ šaržu

$[\%S]_{\text{izmereno}} - [\%S]_{\text{izračunato}}$	Linearna jednačina	R
	$y = 0.6154x + 0.0002$	0.78
	Polinomska jednačina	0.78
	$y = -26.851x^2 + 0.6481x + 0.0002$	

9.7.7.4.2. Prikaz za $n=12$ šarži

Tabela 112: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za $n=12$ šarži

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
1	0.0002	0.00029	0.00009
2	0.0003	0.00029	-0.00001
3	0.0003	0.00024	-0.00006
4	0.0003	0.00025	-0.00005
5	0.0003	0.00036	0.00006
6	0.0003	0.00026	-0.00004
7	0.0005	0.00041	-0.00009
8	0.0005	0.00050	0.00000
9	0.0005	0.00042	-0.00008
10	0.0005	0.00030	-0.00020
11	0.0005	0.00045	-0.00005
12	0.0005	0.00040	-0.00010



Slika 78: Zavisnost [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=12 šarži
(Cs po KTH modelu)

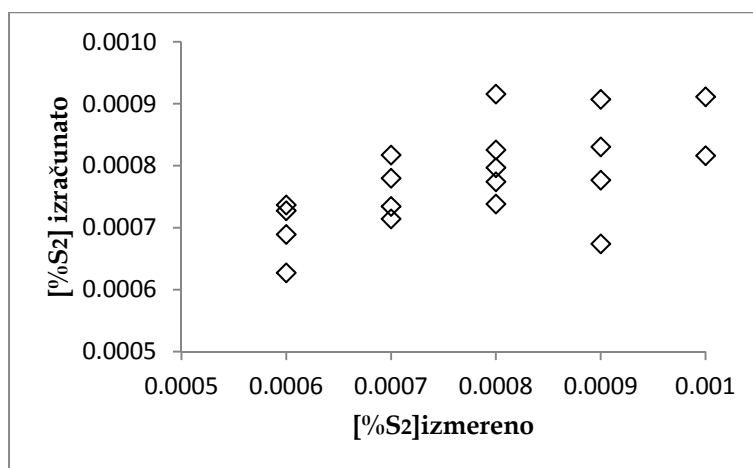
Tabela 113: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=31 šaržu

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.5732x + 0.0001$	0.77
	Polinomska jednačina	0.80
	$y = 2451.3x^2 - 1.2934x + 0.0004$	

9.7.7.4.3. Prikaz za n=19 šarži

Tabela 114: Razlika $\Delta S = [\%S]_{\text{izračunato}} - [\%S]_{\text{izmereno}}$ za n=19 šarži

Br. šarže	$[\%S]_{\text{izmereno}}$	$[\%S]_{\text{izračunato}}$	$\Delta S, [\%]$
13	0.0006	0.00074	0.00014
14	0.0006	0.00069	0.00009
15	0.0006	0.00073	0.00013
16	0.0006	0.00063	0.00003
17	0.0007	0.00082	0.00012
18	0.0007	0.00078	0.00008
19	0.0007	0.00073	0.00003
20	0.0007	0.00071	0.00001
21	0.0008	0.00092	0.00012
22	0.0008	0.00083	0.00003
23	0.0008	0.00080	0.00000
24	0.0008	0.00077	-0.00003
25	0.0008	0.00074	-0.00006
26	0.0009	0.00091	0.00001
27	0.0009	0.00078	-0.00012
28	0.0009	0.00083	-0.00007
29	0.0009	0.00067	-0.00023
30	0.001	0.00091	-0.00009
31	0.001	0.00082	-0.00018

Slika 79: Zavisnost $[\%S]_{\text{izmereno}}$ od $[\%S]_{\text{izračunato}}$ za n=19 šarži
(Cs po KTH modelu)

9. REZULTATI I DISKUSIJA REZULTATA

Tabela 115: Jednačine i koeficijenti regresije zavisnosti [%S]_{izmereno} od [%S]_{izračunato} za n=31 šaržu

[%S] _{izmereno} - [%S] _{izračunato}	Linearna jednačina	R
	$y = 0.3691x + 0.0005$	0.61
	Polinomska jednačina	0.62
	$y = -643.06x^2 + 1.3789x + 0.0001$	

Tabela 116: Odsumporavajući potencijal troskeCs/[%S]_p

Broj šarže	Cs/[%S] _p						
	A	B	C	Young	S-S	Taniguchi	KTH
1	1.09	1.94	3.72	0.88	1.42	1.14	0.65
2	2.63	2.27	3.30	0.62	0.97	0.69	0.71
3	0.35	3.32	3.14	1.04	2.09	1.24	1.18
4	0.21	2.50	3.56	1.26	2.40	1.62	0.84
5	0.14	2.19	2.12	0.87	1.50	1.10	0.58
6	0.92	4.99	4.99	1.55	2.55	1.92	0.94
7	0.22	0.94	1.11	0.52	0.85	0.73	0.40
8	0.31	0.84	1.11	0.52	0.92	0.74	0.59
9	0.55	1.48	1.58	0.65	1.17	0.78	0.66
10	0.18	1.21	1.11	0.84	1.35	1.31	0.66
11	0.23	1.38	1.07	0.74	1.12	1.11	0.38
12	0.20	1.47	1.33	1.18	2.34	1.88	0.94
13	3.5E-3	1.19	1.51	0.50	1.01	0.60	0.41
14	0.03	0.90	0.93	0.72	1.32	1.20	0.53
15	0.20	1.67	1.25	0.87	1.85	1.08	1.15
16	1.14	2.35	1.45	1.08	1.60	1.46	0.84
17	0.03	0.69	0.89	0.37	0.71	0.49	0.36
18	0.22	1.41	1.27	0.43	0.86	0.45	0.34
19	1.0E-4	1.08	1.05	0.35	0.58	0.43	0.19
20	0.07	1.57	0.91	0.76	1.52	0.92	1.09
21	0.01	0.67	0.76	0.40	0.89	0.52	0.52
22	0.11	0.74	0.55	0.36	0.56	0.47	0.46
23	0.09	0.84	0.80	0.45	0.88	0.58	0.46
24	0.19	1.51	0.98	0.71	1.48	0.84	0.95
25	0.15	1.40	0.94	0.74	1.48	0.92	0.78
26	0.09	0.64	0.63	0.44	0.86	0.66	0.70
27	0.08	0.89	0.78	0.35	0.62	0.42	0.27
28	0.02	0.85	0.65	0.61	1.35	0.91	0.90
29	0.02	1.39	0.85	0.48	0.79	0.58	0.33
30	0.09	0.73	0.74	0.44	0.94	0.57	0.54
31	0.10	0.81	0.72	0.68	1.46	1.10	0.62

Osim korišćenja za izračunavanje regresionih jednačina, podaci u Tabeli 65 i 116 pomažu za bolje razumevanje u jednačinama sadržanih parametara kao nezavisnih promenljivih na rezultate procesa odsumporavanja. Očigledno je da za postizanje najnižih vrednosti završnog sumpora na kraju VD vakuumiranja u livnom loncu potrebno je da C_s bude što je moguće viši, a $[\%S]_p$ što je moguće niži. Odnos između sumpornog kapaciteta, C_s , i pretpostavljenog polaznog sadržaja sumpora, $[\%S]_p$, može da se uzme kao efektivni odsumporavajući potencijal. Iz Tabele 116 evidentno je da je odsumporavajući potencijal najniži u Varijanti A, a da je najviši kod Varijante C. Takođe, svi načini proračuna sumpornog kapaciteta pokazuju istu tendenciju tj. da šarže $n=19$ sa završnim sadržajem sumpora $[\%S]_{2^{mer.}}=0.0006\pm 0.001$ imaju niži odsumporavajući potencijal izražen preko odnosa $C_s/[\%S]_p$ u poređenju sa šaržama $n=12$ sa $[\%S]_{2^m} \leq 0.0005$.

10. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I ZAKLJUČCI

Dobro je poznato da količina i vrsta troske tokom rafinacije čelika u livnom loncu igra veoma važnu ulogu u procesu odsumporavanja. Iako kao parametar količina troske ne figuriše u do sada objavljenim modelima u literaturi za proračun sumpornog kapaciteta ili završnog sumpora, u ovoj tezi je predložen model koji kao važan parametar u kontroli sadržaja sumpora uključuje količinu troske na kraju procesa vakuumiranja. Ovaj fizički teško merljiv parametar, bio je izazov da se u ovoj doktorskoj tezi predloži postupak kojim bi se približno odredila. Da bi model bio reprezentativan analizirani su podaci iz jedne dobro organizovane i tehnološki na visokom nivou opremljene čeličane. Ljubaznošću Prof. Dr. N. Bannenberg-a i Dr. H. Lachmund-a iz čeličane Dillinger Hüttewerke u Dillingenu (Nemačka) obezbeđeni su neophodni proizvodni parametri. Njihovom analizom predloženi model omogućava da se preko termodinamičkih ravnotežnih uslova i numeričke analize materijalnog bilansa sumpora i aluminijuma, odrede promenljive koje će nadalje biti uključene u regresione jednačine za predviđanje završnog sadržaja sumpora.

Do sada poznati modeli koji u proračun uzimaju količinu troske u livnom loncu tokom rafinacionog procesa, polaze od činilaca koji obezbeđuju nizak sadržaj kiseonika i sumpora kao što su dodaci u livni lonac. Kod ovih modela podrazumeva se poznavanje polaznog sadržaja kiseonika u čeliku i sumpora u čeliku i troski. Prednost predloženog modela u ovoj disertaciji omogućava da se, na osnovu masenog bilansa aluminijuma i sumpora u čeliku i troski, u uslovima kada se tehnološkim postupkom ne predviđa uzorkovanje čelika i troske pre samog procesa vakuumiranja, računskim putem odredi pretpostavljeni polazni sadržaj sumpora u čeliku od kada praktično počinje proces odsumporavanja. Takođe, model daje i postupak izračunavanja teško fizički merljivog parametra kakva je količina troske ulepljena na zidovima livnog lonca $W_{TROSKA(-1)}^{Izračunato}$.

Korišćenjem predloženog modela i postupka proračuna $W_{TROSKA(-1)}^{Izračunato}$ dolazi se do dovoljno pouzdanih podataka već u drugom ciklusu ponavljanja proračuna kod 95% analiziranih šarži u odnosu na pogonskom praksom usvojenu količinu troske od 500 kg koja ostane na zidovima livnog lonca $W_{TROSKA(-1)}^{Usvojeno}$. Visok procenat predvidljivosti je dovoljan pokazatelj ispravnosti predloženog modela. Dalja poboljšanja za dobijanje dovoljno pouzdanih podataka već u prvom koraku proračuna je moguće sa manjom razlikom između stvarne $W_{TROSKA(-1)}$ i usvojene količine troske $W_{TROSKA(-1)}^{Usvojeno}$.

Mali broj analiziranih šarži je otežavajuća okolnost da se boljom statističkom obradom dođe do pouzdanog podatka težine $W_{TROSKA(-1)}^{Usvojeno}$ već u prvom ciklusu proračuna. Sam proračun bi se u tom slučaju ubrzao što je u proizvodnim pogonskim uslovima izuzetno važan parametar koji utiče na uspešnost i preciznost predviđanja završnog sadržaja sumpora kao krajnjeg cilja predloženog modela.

Kako se pogonska praksa razlikuje od čeličane do čeličane, to usvojene vrednosti težine troski $W_{TROSKA LD}^{Usvojeno}$ i $W_{TROSKA(-1)}^{Usvojeno}$ su veličine koje mogu, u zavisnosti od veličine šarže i kapaciteta livnog lonca, procesa rafinacije i proizvodnog programa da, od čeličane do čeličane, imaju drugačiju vrednost od navedene u čeličani Dillinger Hütte.

Sumporni kapacitet troske je prvi parametar na kome se zasniva predloženi model. Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli 16 u Poglavljju 9.3.3., korelacioni koeficijenti između izmerene i izračunate vrednosti sumpornog kapaciteta ukazuju da KTH model daje bolju predvidljivost sumpornog

kapaciteta u poređenju sa modelima koji u sebi uključuju koncept optičkog baziciteta.

Ravnotežni uslovi opisani Varijantama A, B i C, imali su za cilj da pokažu koja je reakcija koja opisuje oksidacioni potencijal navedenog sistema kao preduslov procesa odsumporavanja, najbliža ravnotežnim uslovima. Generalno može da se zaključi da šarže nisu u ravnoteži bez obzira na polazne ravnotežne postavke. Na osnovu rezultata razlike između izmerenog i izračunatog koeficijenta raspodele sumpora L_s , kao merila da li se reakcija prelaska sumpora iz troske u čelik približila ravnoteži, vidi se da su navedene razlike najmanje u Varijanti C (Videti Poglavlje 9.4, Tabele 23, 28, 32, 36 i 40). Iz navedenog se nameće zaključak da su šarže opisane pod ovim pretpostavkama najbliže ravnoteži.

Aktiviteti kiseonika određeni po Varijanti A sa aluminijumom kao sredstvom dezoksidacije, pokazali su se kao manje korisni što nije u saglasnosti sa literaturnim podacima. Mogući razlozi su višestruki: način uzorkovanja, nedovoljna homogenost metalnog kupatila kao posledica kratkog vremena vakuumiranja, nepokrivenost odgovarajućim jednačinama za proračun aktiviteta oksida Al_2O_3 u troski za sisteme kod kojih je sadržaj $\%SiO_2$ limitiran na max 10%, itd. Proračun aktiviteta Al_2O_3 preko jednačine Ohta-Suito-a (videti Poglavlje 6) ima ograničenje jer ne pokriva troske sa sadržajem $SiO_2 \leq 10\%$. Posledice su vidljive u Varijanti A: nerealne vrednosti sumpornog kapaciteta C_s , koeficijenta raspodele sumpora $L_{Sizračunato}$ i odsumporavajućeg potencijala troske izraženog preko odnosa $C_s/[\%S]_p$.

Upravo činjenica da proračun aktiviteta Al_2O_3 nije pouzdan kod troski sa sadržajem $SiO_2 \leq 10\%$ primorao je mnoge istraživače da usvaja unapred određenu vrednost aktiviteta oksida Al_2O_3 jednak jedinici. Na taj način se izbegava da se dobiju nerazumljivo niske vrednosti aktiviteta Al_2O_3 kakav je

recimo slučaj za šarže N°13, N°14, N°17, N°19, N°21, N°28 i N°29 (Videti Tabelu 57, u Poglavlju 9.6.1).

Posle vakuum VD tretmana izračunata vrednost aktiviteta SiO_2 u trosi prema Varijanti B je stabilna na nivou 10^{-4} (wt.%). Navedena vrednost odgovara sadržaju SiO_2 od nekoliko procenata i u saglasnosti je sa, objavljenim podacima u literaturi.

U uslovima kada postoji samo podatak o sadržaju sumpora u trosi $(\%S)_1$ i čeliku $[\%S]_1$ posle 2 minuta intenzivnog mešanja metalnog kupatila argonom, izračunavanje nepoznatog polaznog sadržaja sumpora $[\%S]_p$ kao ključnog momenta početka procesa odsumporavanja je od krucijalnog značaja za model predviđanja završnog sadržaja sumpora na kraju procesa vakuumiranja čelika. Predložena numerička analiza preko bilansa sumpora je dovoljno pouzdan alat da se u gotovo 90% šarži dobija prihvatljiva razlika između predpostavljene vrednosti sumpora $(\%S)_p, [\%S]_p$ i poznatog sadržaja sumpora $(\%S)_1$ i $[\%S]_1$ čime je dobijen jedan od tri nedostajuća podatka na kojem se zasniva predloženi model za proračun završnog sadržaja sumpora u čeliku.

Sa definisanim parametrima određene su po tri regresione jednačine za svaku Varijantu, prvo za 31 šaržu, a zatim za 12 šarži sa sadržajem završnog sumpora $[\%S] \leq 5$ ppm i za 19 šarži sa sadržajem sumpora u intervalu $5 \text{ ppm} < [\%S] \leq 10$ ppm. U svim regresionim jednačinama, za svaku grupu šarži ($n=31$; $n=12$; $n=19$) nezavisne promenljive su sumporni kapacitet C_s , polazna koncentracija sumpora $[\%S]_p$, i količina troske na kraju vakuumiranja W_{TROSKA2} (videti Poglavlje 9.7.6). Vrednosti sumpornog kapaciteta C_s određene su po varijantama A, B i C i preko originalnih modela. Dobijeni rezultati pokazuju da se najbolja predvidljivost završnog sadržaja sumpora dobija kod šarži sa najnižim izmerenim sadržajem sumpora od $[\%S] \leq 5$ ppm a najmanja kod šarži sa sadržajem sumpora u granicama $5 \text{ ppm} < [\%S] \leq 10$ ppm. Taj trend je

nepromenjen bez obzira da li su vrednosti sumpornog kapaciteta, kao najvažnijeg parametra odsumporavajuće sposobnosti troske, određene po navedenim Varijantama ili prema originalnim, u ovoj tezi, analiziranim modelima. Kada se posmatraju varijante A, B i C, najviši stepen korelacije, a sa time i najbolju predvidljivost sadržaja sumpora na kraju vakuumiranja ima Varijanta C ($R=0.911$ za $n=31$, $R=0.923$ za $n=12$ i $R=0.764$ za $n=19$). U slučaju korišćenja vrednosti sumpornog kapaciteta C_s koji su određeni prema modelima korelacioni koeficijent su niži tj. $R=0.61 \div 0.62$ za $n=31$ šaržu $R=0.77 \div 0.84$ za $n=12$ šarži i $R=0.61 \div 0.64$ za $n=19$ šarži. (Videti Tabele 66-68 u Poglavlju 9.7.6.i Tabele 88-90 u Poglavlju 9.7.7.).

Razlog postojanja vidljive razlike u korelacionim faktorima mogao bi da bude mali broj šarži za isti sadržaj sumpora. Veći broj šarži bi sigurno dao precizniju sliku nastalih razlika. Takođe, ne treba da se gubi iz vida ni postojanje grešaka u proračunu pre svega aktiviteta kiseonika u troski kao i činjenice da su u ovoj tezi korišćeni modeli određivani na uzorcima troske i čelika u laboratorijskim uslovima.

Iako je predvidljivost završnog sumpora predloženim modelom limitirana malim brojem analiziranih uzoraka troske i čelika, dobijeni rezultati koeficijenta korelacije ukazuju da je prihvatljiva za pogonske uslove. Sa većim brojem analiziranih šarži prema predloženom postupku moguća su dalja poboljšanja procesa odsumporavanja, odnosno bolja predvidljivost završnog sadržaja sumpora.

11. PRILOZI

PRILOG 1: Proračun aktiviteta kiseonika u troski i čeliku

1.1. Proračun po Varijanti A:

Ravnotežna jednačina: $2[\text{Al}] + 3[\text{O}] = (\text{Al}_2\text{O}_3)$

$$\Delta G^\circ_{\text{Al}} = -1205115 + 386.7T$$

$$\Delta G^\circ_{\text{Al}} = -1205115 + 386.7 \cdot 1851 = \underline{-489307.39}$$

$$K_{\text{Al}} = \exp(-\Delta G^\circ_{\text{Al}} / RT) = \exp(-(-489307.39) / (8.314 \cdot 1851)) = \underline{6.44E+13}$$

$$K_{\text{Al}} = a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} / [a_o]^3 \cdot [a_{\text{Al}}]^2$$

$$\log f_{\text{Al}} = e_{\text{Al}}^{\text{Al}} [\% \text{Al}] + e_{\text{Al}}^{\text{C}} [\% \text{C}] + e_{\text{Al}}^{\text{Si}} [\% \text{Si}] + e_{\text{Al}}^{\text{S}} [\% \text{S}] + e_{\text{Al}}^{\text{Mn}} [\% \text{Mn}]$$

$$\log f_{\text{Al}} = (0.011 + 63/T) \cdot [\% \text{Al}] + 0.091 \cdot [\% \text{C}] + 0.056 \cdot [\% \text{Si}] + 0.030 \cdot [\% \text{S}] + \emptyset$$

$$\log f_{\text{Al}} = \underline{0.0365}$$

$$[a]_{\text{Al}} = \log f_{\text{Al}} \cdot [\% \text{Al}] = \underline{0.0261}$$

$$[a]_{\text{Al}}^2 = \underline{0.000681}$$

$$K_{\text{Al}} = a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} / [a_o]^3 \cdot [a_{\text{Al}}]^2$$

$$[a_o]^3 = a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} / K_{\text{Al}} \cdot [a_{\text{Al}}]^2$$

$$[a_o]^3 = a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} / K_{\text{Al}} \cdot [a_{\text{Al}}]^2$$

$$[a_o]^3 = [0.000442 / (6.44E+13 \cdot 0.000681)] = \underline{4.01218E-13}$$

$$[a_o]_{\text{Al}} = \underline{0.0000216} [\%]$$

1.2. Proračun po Varijanti B:

Ravnotežna jednačina: $[\text{Si}] + 2[\text{O}] = (\text{SiO}_2)$

$$\Delta G^\circ_{\text{Si}} = -581900 + 221.8 \cdot T$$

$$K_{\text{Si}} = \exp(-\Delta G^\circ_{\text{Si}} / RT) = a_{(\text{SiO}_2)} / [a_o]^2 [a_{\text{Si}}]$$

$$\Delta G^\circ_{\text{Si}} = -581900 + 221.8 \cdot 1851 = \underline{-171348.2}$$

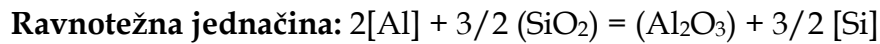
$$K_{\text{Si}} = \exp(-\Delta G^\circ_{\text{Si}} / RT) = \exp(-(-171348.2) / (8.314 \cdot 1851)) = \underline{68480.5}$$

$$K_{Si} = a_{(SiO_2)} / [a_o]^2 [a_{Si}]$$

$$[a_o]^2 = a_{(SiO_2)} / K_{Si} [a_{Si}] = \underline{5.98346E-09}$$

$$[a_o] = \underline{0.00007}$$

1.3. Proračun po Varijanti C:



$$\Delta G^0_{Si-Al} = -329300 + 53.6T = -329300 + 53.6 \cdot 1851 = \underline{-230086.4}$$

$$K_{Si-Al} = \exp(-\Delta G^0_{Si-Al} / RT) = \exp(-(230086.4) / (8.314 \cdot 1851)) = \underline{3113154.107}$$

$$K_{Si-Al} = a_{(Al_2O_3)} [a_{Si}]^{3/2} / a_{(SiO_2)}^{3/2} [a_{Al}]^2$$

$$a_{(Al_2O_3)} = K_{Si-Al} \cdot a_{(SiO_2)}^{3/2} \cdot [a_{Al}]^2 / [a_{Si}]^{3/2}$$

$$\log a_{SiO_2} = 0.036(\%MgO) + 0.061(Al_2O_3) + 0.123(\%SiO_2) - 0.595(\%SiO_2) / (\%CaO) - 6.456$$

$$\log a_{SiO_2} = 0.036 \cdot (8.02) + 0.061 \cdot (31.30) + 0.123 \cdot (4.95) - 0.595 \cdot [(4.95) / (55.74)] - 6.456$$

$$\log a_{SiO_2} = \underline{-3.77}$$

$$a_{SiO_2} = \underline{0.000168}$$

$$a_{SiO_2}^{(3/2)} = \underline{2.183E-06}$$

$$\log f_{Si} = e_{Si}^{Si} [\%Si] + e_{Si}^C [\%C] + e_{Si}^S [\%S] + e_{Si}^{Al} [\%Al] + e_{Si}^{Mn} [\%Mn]$$

$$\log f_{Si} = (0.089 + 34.5/T) \cdot [0.41] + 0.18 \cdot [0.14] + 0.056 \cdot [0.0002] + 0.058 \cdot [0.024] + 0.002 \cdot [1.46]$$

$$\log f_{Si} = \underline{0.07303}$$

$$[a_{Si}] = \log f_{Si} \cdot [\%Si] = \underline{0.4863}$$

$$[a_{Si}]^{(3/2)} = \underline{0.3391}$$

$$a_{(Al_2O_3)} = K_{Si-Al} \cdot a_{(SiO_2)}^{3/2} \cdot [a_{Al}]^2 / [a_{Si}]^{3/2}$$

$$a_{(Al_2O_3)} = (3113154.107 \cdot 2.183E-06 \cdot 0.000681) / 0.3391$$

$$a_{(Al_2O_3)} = \underline{0.0176}$$

$$K_{Al} = a_{(Al_2O_3)} / [a_o]^3 \cdot [a_{Al}]^2$$

$$[a_o]^3 = a_{(Al_2O_3)} / K_{Al} \cdot [a_{Al}]^2$$

$$[a_o]^3 = a_{(Al_2O_3)} / K_{Al} \cdot [a_{Al}]^2$$

$$[a_o]^3 = [0,0176 / (6,44E+13 \cdot 0,000681)] = \underline{4,01 \times 10^{-13}}$$

$$[a_o]_{Al} = \underline{0,00007} \text{ [\%]}$$

1.4. Proračun aktiviteta Al_2O_3

$$\log a_{(Al_2O_3)} = \{-0,275 (\%CaO) + 0,167(\%MgO)/(\%SiO_2)\} + 0,033(\%Al_2O_3) - 1,560$$

Temperatura na kraju procesa vakuumiranja $T = 1851 \text{ K}$

Hemijski sastav čelika:

$\%C=0,14$; $\%Si=0,41$; $\%Mn=1,46$; $\%S=0,0002$; $\%Al=0,024$;

Hemijski sastav troske:

$\%CaO=55,74$; $\%SiO_2=4,95$; $\%Al_2O_3=31,30$; $\%MgO=8,02$;

$$\log a_{(Al_2O_3)} = \{-0,275 \cdot (55,74) + 0,167 \cdot (8,02)/(4,95)\} + 0,033 \cdot (31,30) - 1,560$$

$$\log a_{(Al_2O_3)} = -3,35$$

$$a_{(Al_2O_3)} = a_{(Al_2O_3)} = \underline{0,000442}$$

1.5. Proračun aktiviteta SiO_2

$$\log a_{SiO_2} = 0,036(\%MgO) + 0,061(Al_2O_3) + 0,123(\%SiO_2) - 0,595(\%SiO_2)/(\%CaO) - 6,456$$

$$\log a_{SiO_2} = 0,036 \cdot (8,02) + 0,061 \cdot (31,30) + 0,123 \cdot (4,95) - 0,595 \cdot [(4,95)/(55,74)] - 6,456$$

$$\log a_{SiO_2} = \underline{-3,77}$$

$$a_{SiO_2} = \underline{0,000168}$$

$$a_{SiO_2}^{(3/2)} = \underline{2,183E-06}$$

PRILOG 2: Provera konstanti ravnoteže za ravnotežne reakcije prikazane u Poglavlju 6 - jednačine (31) i (33)

2.1. Provera vrednosti konstante ravnoteže K_{Al-Si} i odgovarajuće slobodne entalpije ΔG_{Al-Si} odnosno provera vrednosti konstante ravnoteže K_{Al} i odgovarajuće slobodne entalpije ΔG_{Al}

POLAZNI PODACI za šaržu 1

$$[a_{Al}] = 0.0261$$

$$[a_{Si}] = 0.4863$$

$$\log a_{SiO_2} = 0.036(\% MgO) + 0.061(\% Al_2O_3) + 0.123(\% SiO_2) - 0.595(\% SiO_2) / (\% CaO) - 6.456$$

$$\log a_{SiO_2} = 0.036 \cdot 7.81 + 0.061 \cdot 30.50 + 0.123 \cdot 4.82 - 0.595 \cdot [4.82 / 54.32] - 6.456 = 0.281 + 1.86 + 0.593 - 0.053 - 6.456 = -3.77$$

$$\log a_{SiO_2} = -3.70; a_{SiO_2} = 0.000189$$

$$(a_{SiO_2})^{3/2} = (0.000189)^{3/2} = 0.00000279$$

$$[a_{Si}]^{3/2} = (0.4863)^{3/2} = 0.3391$$

$$[a_{Al}]^2 = 0.000681$$

$$\Delta G_{Al}^0 = -1205115 + 386.7T = -1205115 + 386.7 \cdot 1851 = -489307.39$$

$$K_{Al} = \exp \frac{-\Delta G_{Al}^0}{RT} = \exp \{ [-(-489307.39)] / 8.314 \cdot 1851 \} =$$

$$\exp(-489307.39/15389.2) = 6.44 E+13$$

$$a_{(Al_2O_3)} = K_{Al-Si} \cdot [a_{Al}]^2 \cdot a_{(SiO_2)}^{3/2} / [a_{Si}]^{3/2} = (3113154.107 \cdot 0.000681 \cdot 0.00000279) / 0.339 = 0.00572 / 0.339 = 0.0175$$

Iz jednačine

$$K_{Al} = \exp \frac{-\Delta G_{Al}^0}{RT} = \frac{a_{(Al_2O_3)}}{[a]_0^3 \cdot [a]_{Al}^2} = \text{izvuče se } [a_0]^3$$

$$\text{t.j. } [a_0]^3 = a_{(Al_2O_3)}_{Al-Si} / K_{Al} \cdot [a_{Al}]^2 = 0.0169 / 6.44E+13 \cdot 0.000681 =$$

$$0.0169 / 4.38E+10 = 3.858 E-13 = 7.279E-5;$$

$$[a_0] = 0.0000736\%$$

2.2. Provera vrednosti konstante ravnoteže K_{Al-Si} i odgovarajuće slobodne entalpije ΔG_{Al-Si}

A) U konstantu ravnoteže K_{Al-Si} ubačene su numeričke vrednosti aktiviteta oksida Al_2O_3 tj. $a_{(Al_2O_3)} = 0.0175$ koji je izračunat iz konstante ravnoteže za reakciju prikazanu jednačinom (33) i vrednost aktiviteta oksida $a_{(SiO_2)} = 0.000189$ koji je izračunat iz jednačine (35).

$$K_{Al-Si} = \exp \frac{-\Delta G^0_{Al-Si}}{RT} = \ln \frac{-\Delta G^0_{Al-Si}}{RT}$$

$$RT \ln K_{Al-Si} = -\Delta G^0_{Al-Si}$$

$$K_{Al-Si} = \frac{a_{(Al_2O_3)} \cdot [a]_{Si}^{3/2}}{a_{(SiO_2)}^{3/2} [a]_{Al}^2} = \frac{0.0175 \times 0.3391}{0.00000279 \times 0.000681} = 5934250; \ln(5934250) = \underline{15.596}$$

$$\Delta G^0_{Al-Si} = RT \ln K_{Al-Si} = 8.314 \times 1851 \times 15.596 = \underline{-240014.15}$$

B) U konstantu ravnoteže K_{Al-Si} ubačene su numeričke vrednosti aktiviteta oksida Al_2O_3 tj. $a_{(Al_2O_3)} = 0.000442$ koji je izračunat iz jednačine (34) i vrednost aktiviteta oksida $a_{(SiO_2)} = 0.000189$ koji je izračunat iz jednačine (35).

$$K_{Al-Si} = \exp \frac{-\Delta G^0_{Al-Si}}{RT} = \ln \frac{-\Delta G^0_{Al-Si}}{RT}$$

$$RT \ln K_{Al-Si} = -\Delta G^0_{Al-Si}$$

$$K_{Al-Si} = \frac{a_{(Al_2O_3)} \cdot [a]_{Si}^{3/2}}{a_{(SiO_2)}^{3/2} [a]_{Al}^2} = \frac{0.000442 \times 0.3391}{0.00000279 \times 0.000681} = 149880; \ln(149880) = \underline{11.917}$$

$$-\Delta G^0_{Al-Si} = RT \ln K_{Al-Si} = 8.314 \times 1851 \times 11.917 = \underline{183393.26}$$

STANDARDNA VREDNOST K_{Al-Si} i ΔG_{Al-Si}

$$\Delta G^0_{Al-Si} = -329300 + 53.6T = -329300 + 53.6 \cdot 1851 = \underline{-230086.4}$$

$$K_{\text{Al-Si}} = \exp \frac{-\Delta G^0_{\text{Al-Si}}}{RT} = \exp \{[-(-230086.4)] / 8.314 \cdot 1851\} =$$

$$\exp(230086.4/15389.2) = \underline{3113154.107}$$

$$K_{\text{Al-Si}} = \underline{3113154.107}$$

2.3. Provera vrednosti konstante ravnoteže K_{Al} i odgovarajuće slobodne entalpije ΔG_{Al}

A) U konstantu ravnoteže K_{Al} ubačene su numeričke vrednosti aktiviteta oksida Al_2O_3 tj. $a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} = 0.0175$ koji je izračunat iz konstante ravnoteže za reakciju prikazanu jednačinom (33) i zamenom u jednačinu ravnoteže (31) dobijene su vrednost aktiviteta kiseonika $[a_o] = 0.0000736\%$

$$K_{\text{Al}} = \exp \frac{-\Delta G^0_{\text{Al}}}{RT} = \frac{a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}}{[a]_0^3 \cdot [a]_{\text{Al}}^2} =$$

$$\frac{0.0175}{(0.0000736)^3 \times 0.000681} = \frac{0.0175}{3.98 \times 10^{-13} \times 0.000681} = \frac{0.0175}{2.71 \times 10^{-16}} = 6.46 \times 10^{13};$$

$$\ln K_{\text{Al}} = \underline{31.79}$$

$$\Delta G^0_{\text{Al}} = RT \ln K_{\text{Al}} = 8.314 \times 1851 \times 31.79 = \underline{-489223.11}$$

B) U konstantu ravnoteže K_{Al} ubačene su numeričke vrednosti aktiviteta oksida Al_2O_3 tj. $a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} = 0.000442$ koji je izračunat iz jednačine (34) i zamenom u jednačinu ravnoteže (31) dobijene su vrednost aktiviteta kiseonika $[a_o] = 0.0000216\%$

$$K_{Al} = \exp \frac{-\Delta G^0_{Al}}{RT} = \frac{a_{(Al_2O_3)}}{[a]_0^3 \cdot [a]_{Al}^2} =$$

$$\frac{0.000442}{(0.0000216)^3 \times 0.000681} = \frac{0.000442}{6.86 \times 10^{-18}} = 6.44 \times 10^{13};$$

$$\ln K_{Al} = \underline{31.79}$$

$$\Delta G^0_{Al} = RT \ln K_{Al} = 8.314 \times 1851 \times 31.79 = \underline{-489223.11}$$

STANDARDNA VREDNOST ΔG_{Al}

$$\Delta G^0_{Al} = -1205115 + 386.7T = -1205115 + 386.7 \cdot 1851 = \underline{-489307.39}$$

PRILOG 3: Bilans aluminijuma

3.1. Postupak proračuna bilansa aluminijuma prema reakciji dezoksidacije $[Al] \rightarrow (Al_2O_3)$: (videti Tabelu60)

Na osnovu prikazanog postupka, odrediće se parametri $W[\%Al_2O_3]_1$ i $W[\%Al_2O_3]_2$ neophodni za proračun predpostavljenih količina $W_{TROSKA1}$ i $W_{TROSKA2}$ /videti poglavlje 7.4, jednačine (38) i (39)/.

Primer: Proračun za šaržu 1

Kolona 2: "Al"₁ = 348 kg (Tabela 3)

Kolona 3: Sadržaj aluminijuma u čeliku u kg, $[Al]_1$, posle 2 minuta intenzivnog mešanja argonom: $[Al]_1 = \{W_{\text{ČELIK}}(\text{Tabela 3}) \times [\%Al]_1(\text{Tabela 4})\}/100$, (tj. $(183900 \times 0.085)/100 = 156 \text{ kg } [Al]$)

Kolona 4: $[\%Al]_{\text{OIZLIV}} = ("Al"_{1} / W_{\text{ČELIK}}) \times 100 = (348 / 183900) \times 100 = 0.1892$

Kolona 5: $\Delta[\%Al]_1 = [\%Al]_{\text{OIZLIV}} - [\%Al]_{1\text{mer}} = 0.1892 - 0.085 = 0.1042$

Kolona 6: Razlika između dodatog aluminijuma za vreme izliva čelika iz konvertora i sadržaja aluminijuma posle 2 minuta intenzivnog mešanja argonom: $(Al)_1 = "Al"_{1}(\text{Tabela 1}) - [Al]_1$, (tj. $348 - 156 = 192 \text{ kg Al}$)

Kolona 7: $\Delta[\%Al_2O_3]_1 = (Al)_1 \times M_{Al_2O_3}/2M_{Al}$ (tj. $192 \times 102/54 = 362 \text{ kg } Al_2O_3$)

Kolona 8: $[\%Al]_{\text{OIZLIV+VD}} = [("Al"_{1} + "Al"_{2}) / W_{\text{ČELIK}}] \times 100 = [(348+111) / 183900] \times 100 = 0.2496$

Kolona 9: $\Delta[\%Al]_2 = [\%Al]_{\text{OIZLIV+VD}} - [\%Al]_{2\text{mer}} = 0.1892 - 0.085 = 0.2256$

Kolona 10: Završni sadržaj $(Al)_2$ koji kao produkt dezoksidacije pređe u trosku: $(Al)_2 = "Al"_{2} - \Delta[Al]_2$, (tj. $459 - 44 = 415 \text{ kg Al}$)

Kolona 11: $\Delta[\%Al_2O_3]_2 = (Al)_2 \times M_{Al_2O_3}/2M_{Al}$, (tj. $415 \times 102/54 = 784 \text{ kg } Al_2O_3$)

3.2. Postupak proračuna Ulaz-Izlaz bilansa aluminijuma (videti Tabelu 61)

Primer: Šarža (1)

Proračun sa predhodno usvojenim vrednostima: $W_{TROSKA(LD)} = 500 \text{ kg}$ i

$$W_{TROSKA(-1)} = 500 \text{ kg}$$

Kolona 2: Korigovana količina nakon prvog koraka proračuna, $W_{TROSKA(-1)}^{Izracunato}$,

korišćenjem jednačina 61÷66, $W_{TROSKA(-1)}^{Usvojeno} = 500 \text{ kg} \times (Al_2O_3)_2^{Izmereno} / (Al_2O_3)_2^{Izracunato}$
(tj. $500 \times 30.5 / 28.77 = 530 \text{ kg}$)

Kolona 3: SREDNJA VRENOT ($\% Al_2O_3$) $_{2mer}^{TROSKA(-1)}$

Prosek ($\% Al_2O_3$) $_2^{Izmereno}$ za šarže (1÷6) = $[(30.50\% + 27.7\% + 31.88\% + 34.21\% + 34.38\% + 32.51\%) / 6] / 100 = (191.18/6) / 100 = 0.319$

Prosek ($\% Al_2O_3$) $_2^{Izmereno}$ za šarže (7÷12) = $[(30.01\% + 27.51\% + 29.71\% + 29.83\% + 30.48\% + 28.92\%) / 6] / 100 = (176.46/6) / 100 = 0.294$

Prosek ($\% Al_2O_3$) $_2^{Izmereno}$ za šarže (13÷31) = 0.324

Kolona 4: $(Al_2O_3)_{TROSKA(-1)} = W_{TROSKA(-1)}^{Izracunato}, \text{ kg} \times \text{Prosek } F(Al_2O_3)_2^{Izmereno} (\text{šarže } 1\div 6) =$

$$530 \times 0.319 = 169 \text{ kg}$$

Kolona 5: $W_{(CaAluminat \times (204/260))VD}, \text{ kg}$

Kolona 6: $W_{(šamot \times 0.4)VD}, (\text{npr. šarža 1: } 60 \times 0.4 = 24 \text{ kg})$

Kolona 7: $(Al_2O_3)^{Izrač. Ulaz} = (Al_2O_3)_2(\text{Tab. 5}) + (Al_2O_3)_{TROSKA(-1)} + (Al_2O_3)_{Caaluminat} + (Al_2O_3)_{šamot} + W_{PESAK}, (\text{npr. šarža 1: } 784 + 169 + 0 + 24 = 977 \text{ kg})$

Kolona 8: Izračunata količina dodataka $W_{TROSKA2}^{Dodaci} : [(Al_2O_3)^{Izrač. Ulaz} / W_{TROSKA2}^{Dodaci}] \times 100, (\text{npr. šarža 1: } 977 / 3363 = 29.05\%)$

Kolona 9: $W_{Troska2}^{Dodaci} = W_{Kreč Izliv} + W_{Dolo-Kreč Izliv} + W_{Kreč VD} + W_{šamot VD} \times 0.4 +$

$$\Delta[\% Al_2O_3]_2 + W_{TROSKA(LD)}^{Usvojeno} + W_{TROSKA(-1)}^{Usvojeno} = 3363 \text{ kg (T-60 Kolona 9)}$$

Kolona 10: $W(\text{Al}_2\text{O}_3)_2 = W_{\text{TROSKA } 2}^{\text{Dodaci}} \times (\% \text{Al}_2\text{O}_3)_2$, (npr. šarža 1: $3363 \times (30.50/100)$
 $= 1026 \text{ kg}$)

Kolona 11: $W_{\text{TROSKA}(-1)}^{\text{Korigovano}} = [(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{TROSKA}2} - \Delta(\text{Al}_2\text{O}_3)_2(\text{videti Tab.5}) -$
 $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{šamot}}] / [(\% \text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{TROSKA}(-1)}/100]$, (Jedn.23), (npr. šarža 1: $(1026-784-$
 $24)/0.319 = 683 \text{ kg}$)

Kolona 12: $\Delta W_{\text{TROSKA}(-1)}^{\text{Korigovano}} = W_{\text{TROSKA}(-1)}^{\text{Korigovano}} - W_{\text{TROSKA}(-1)}^{\text{Izracunato}}$, (npr. šarža 1: $683 -$
 $530 = 153 \text{ kg}$)

PRILOG 4: Proračun polaznog sadržaja sumpora

Primer: Proračun za šaržu 1

4.1. Bilans sumpora 1 (videti Tabelu 62)

Kolona 1: $[S]_1 = W_{\text{ČELIK}} \times [\%S]_1 / 100;$

Kolona 2: $(S)_1 = W_{\text{TROSKA1}} \times (\%S)_1 / 100 ;$

Kolona 3: $"S" _1 = [S]_1 + (S)_1$

Kolona 4: $[S]_2 = W_{\text{ČELIK}} \times [\%S]_2 / 100, \text{ (tj. } 183900 \times 0.0002 / 100 = \underline{0.37 \text{ kg}})$

Kolona 5: $(S)_2 = W_{\text{TROSKA2}} \times (\%S)_2 / 100, \text{ (tj. } W_{\text{TROSKA2}} \times (\%S)_2 / 100 = 3363 \times 0.658 / 100 = \underline{22.1 \text{ kg}})$

Kolona 6: $"S" _2 = [S]_2 + (S)_2, \text{ (tj. } 0.37 + 22.1 = \underline{22.5})$

Kolona 7: $\Delta "S" _{2/1} = "S" _2 - "S" _1;$

4.2. Bilans sumpora 2 (videti Tabelu 63)

Kolona 1: $S_{\text{TROSKA(-1)}} \times 1\% / 100, \text{ (tj. } 530 \times 0.01 = \underline{5.30 \text{ kg}})$

Kolona 2: $W_{\text{TROSKA LD}} = 1000 - W_{\text{Izrač. TROSKA (-1)}}, \text{ (tj. } 1000 - 530 = \underline{470 \text{ kg}})$

Kolona 3: $S_{\text{TROSKA LD}} \times 0.15\% / 100 ; \text{ (tj. } 470 \times 0.15 = \underline{0.705 \text{ kg}})$

Kolona 4: $S_{\text{KREČ+DOLOKREČ}} = (W_{\text{KREČ}} + W_{\text{DOLOKREČ}} + W_{\text{KREČ VD}}) \times 0.03\% S / 100;$
 (tj. $(1020 + 499 + \emptyset) \times 0.03 / 100 = \underline{0.46 \text{ kg}})$

Kolona 5: $[S]_p = W_{\text{ČELIK}} \times [\%S]_i / 100, \text{ (videti Tabele 3 i 64) (tj. } 183900 \times (0.0087 / 100) = \underline{16.04 \text{ kg}})$

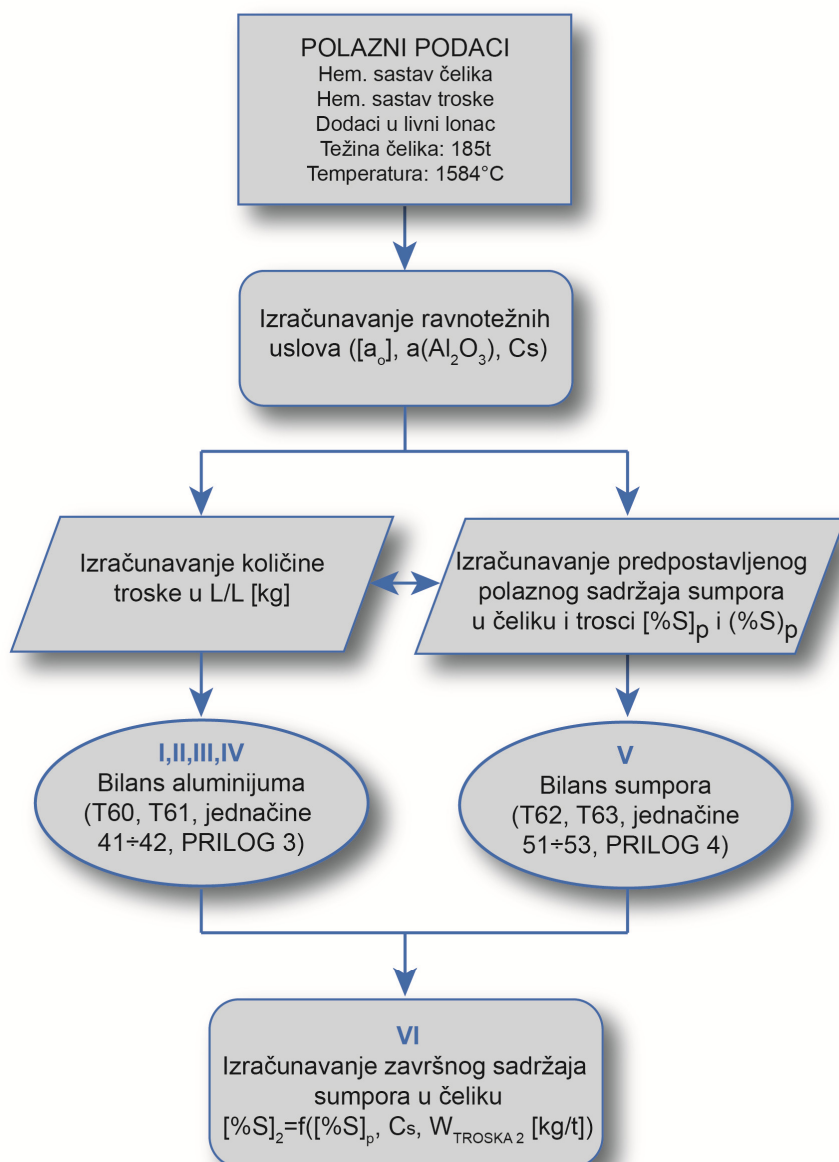
Kolona 6: $(S)_p = (S)_{\text{TROSKA(-1)}} + (S)_{\text{TROSKA LD}} + S_{\text{KREČ+DOLOKREČ}}, \text{ (tj. } 5.30 + 0.71 + 0.46 = \underline{6.46 \text{ kg}})$

Kolona 7: $"S" _p = [S]_p + (S)_p, \text{ (tj. } 16.04 + 6.46 = \underline{22.5 \text{ kg}})$

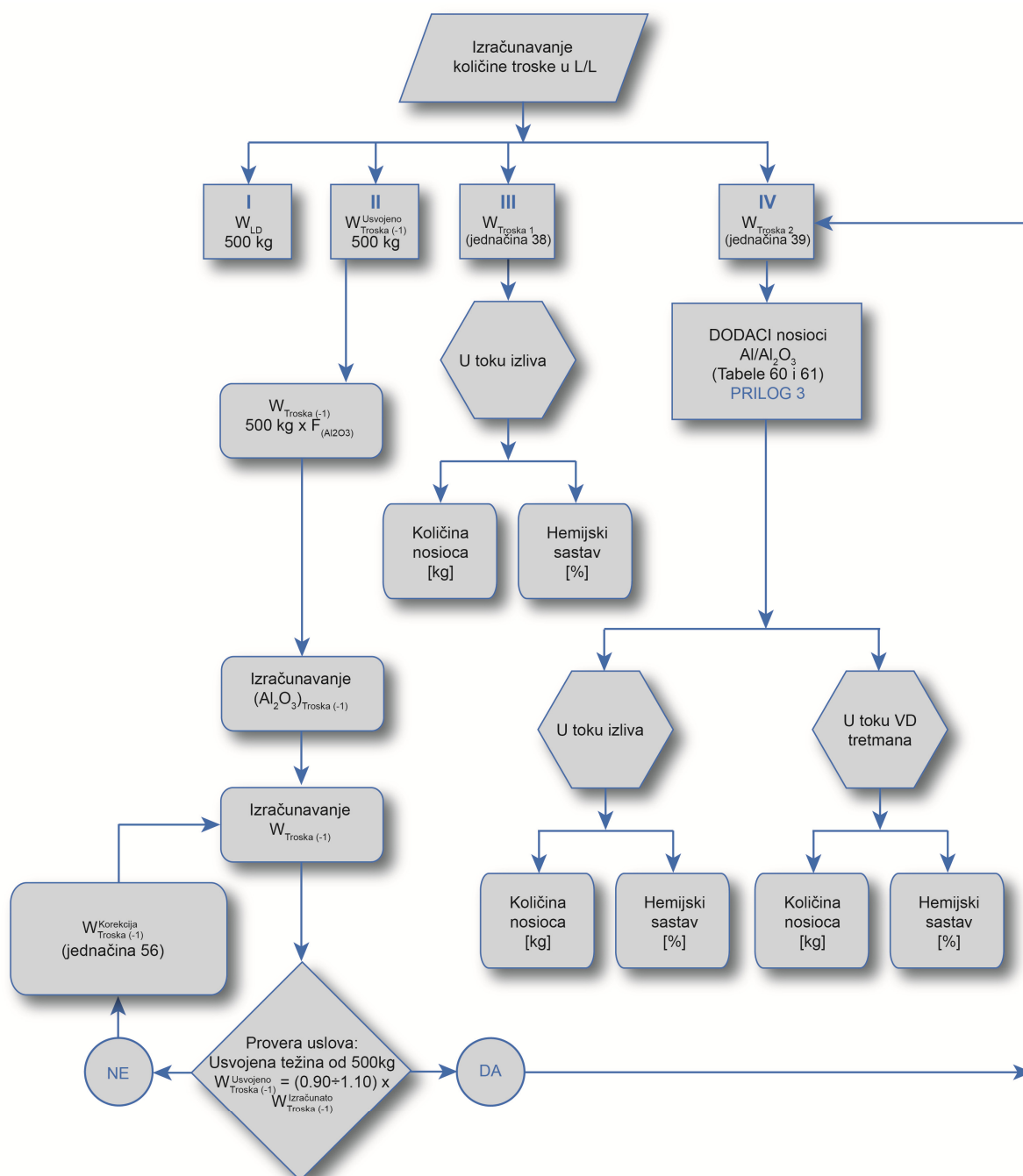
Kolona 8: $\Delta [S]_{p/1} = [S]_p - [S]_1, \text{ (tj. } 16.04 - 14.0 = \underline{2.04 \text{ kg}})$

PRILOG 5: Algoritmi za proračun završnog sadržaja sumpora u čeliku

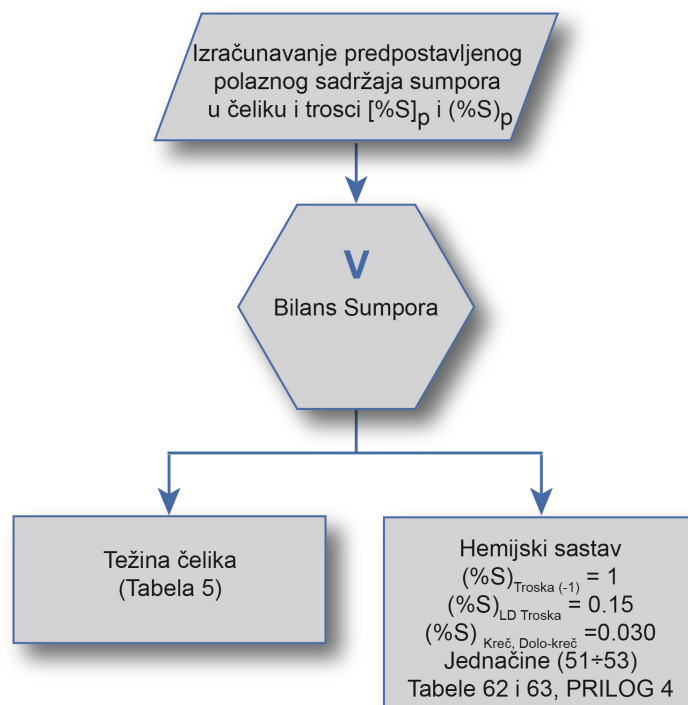
5.1. Algoritam toka proračuna završnog sadržaja sumpora prema predloženom modelu



5.2. Algoritam toka proračuna količine troske u livnom loncu



5.3. Algoritam toka proračuna polaznog sadržaja sumpora u troski i čeliku



LITERATURA:

1. Tundish Technology for Clean steel production,
http://www.asianscientist.com/books/wp-content/uploads/2013/05/6426_chap01.pdf /Poseta 15April2013/;
2. Global steel production reaches record 1.55 bn tons in 2012,
<http://www.engineeringnews.co.za/article/global-steel-production-reaches-record-155bn-tons-in-2012-2013-01-22> /Poseta 01Jun2013/;
3. Wilson A.: Clean steel technology-fundamental to the development of high performance steels.:<http://www3.nd.edu/~rroeder/ame60646/slides/cleansteel.pdf> /Poseta 20Maj2012/
4. Cui J., Zheng Y., Zhu L.: Progress of production technology of clean steel in Baosteel, http://www.baosteel.com/english_n/e07technical_n/021402e.pdf /Poseta 01Jun2013/;
5. Zdonek B., Szypula I., Kozlowsky J., Szczech S.: Secondary steel refining for continuous sequence bloom casting for high oxide cleanliness final products, Archives of Metallurgy and Materials, Vol.57, Issue 1, str.347-353;
DOI:1024/v/10172-012-0033-4;
6. Zhang L.: State of the art in the control of inclusions in Tire Cord steel-a review, Process Metallurgy-Steelmaking, Steel Research Int.,Vol.77, N°3, 2006,str.158-169;
7. Šuman H.: Metalografija, TMF-Beograd, 1981, str. 309;
8. Pehlke R. D., Fuwa, T.: Control of sulphur in liquid iron and steel, International metal reviews, Volume 30, N°3, 1985, str. 125-140;
9. Madias J., Genzano C., Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol.29, 2000, str.121;

-
10. Tang H., Li J., Guo H.: Evaluation of sulfide capacity models and application in steelmaking, *Advanced Materials Research Vols.284-286*, 2011, str.147-152;
 11. Бигеев А.: *Металлургия Стали*, Издательство Metallurgiya, 1998, ISBN5-229-00045-7, str.223-227;
 12. Vorob'ev A.V., Gnedash, Nosochenko A.O.: Developing and mastering a technology for making steel with a sulfur content no greater than 15 ppm, *Metallurgist*, Vol.50, N°3-4, 2006, str.128-133;
 13. Hanus F.: Small cause, large effect – influence of trace elements on the properties and the weldability of structural and pressure vessel steels, *Hydrocarbon Engineering*, May 2003, str. 97-101;
 14. Holappa, L.E.K., *Int. Met. Reviews*, 27, 1982, str. 53;
 15. Gnosh A.: *Secondary Steelmaking, Principles and Applications*, Chapter 7- Desulfurization in Secondary Steelmaking, 2001, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-0264-1;
 16. Wilson A.D.: Clean steel technology-Fundamental to the development of high performance steels, *Advances in the production and use of steel with improved internal cleanliness*, ASTM STP 1361, J.K.Mhaney,Jr., Ed.,American Society for testing and materials, West Conshohocken, PA, 1999,str.79-88;
 17. Keum C. H., Seo S. M., Choi J. H., Park J. M., Hong J. K.: Fluorspar-free Desulfurization Flux in Hot Metal Pretreatment at Kwangyang works, *POSCO Technical Report*, Vol. 10, N° 1, 2007, str.1-6;
 18. Williams M.: *Syntetic slags for steelmaking*, Shieldalloy Metallurgical Corporation, 1995,
<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0712/ML071200058.pdf> /Poseta
[16Nov2012/](#);
 19. Zhang M., Zeng J., Wang Y., Yang S.: Study on Desulphurizing-Model of refining slag used, 2011-08-04, www.anke-

-
- tech.com/pages/ProjectDetail.aspx?SubMenuCode=Nav0044&&ID=615
/Poseta 20Nov2011/;
20. Reddy R.G., Blander M.: Modeling of sulfide capacities of silicate melts, Metall. Trans. B, Vol.18B, 1987, str. 591-596;
 21. Reddy R.G., Blander M.: Sulfide capacities of MnO-SiO₂ slags, Metall. Trans. B, Vol.20B, 1989, str.137-140;
 22. Pelton A., Eriksson G., Romereo-Senarro A.: Metal. Trans. B, 24B, 1993, str.817;
 23. Gaye H., Welfringer J.: Modelling of the thermodynamic properties of complex metallurgical slags, Proc. 2nd Symp. on Molten Slags and fluxes, Met.Soc.AIME, November 11-14, 1984, Lake Tahoe, Nevada, USA, p.357-375;
 24. Duffy J.A., Ingram M.D.: Establishment of Optical Scale for Lewis Basicity in Inorganic Oxyacids, Molten Salts and Glasses, Journal of the American Chemical Society, December, 1971, Vol 93, str.6448-6454;
 25. Duffy J.A., Ingram M.D., Sommerville I.D.: Acid-Base Properties of Molten Oxides and Metallurgical Slags, Journal Chem.Soc.Faraday Transactions I, 1978, Vol.74, str.1410-1419;
 26. Fincham C. J. B., Richardson F. D.: Proc. Royal Soc., London, A223, 1954, str.40-62;
 27. Richardson F. D., Fincham C. J. B.: J. Iron Steel Inst., 178, N° 9, 1954, str.4;
 28. Shi Cheng-bin i dr.: A sulphide capacity prediction model of CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ ironmaking slags based on the ion and molecule coexistence theory, ISIJ International, Vol.50, N°10, 2010, str.1362-1372;
 29. Sosinsky D. J., Sommerville I. D.: The composition and temperature dependence of the sulfide capacity of metallurgical slags, Metall. Mater. Trans. B, 17B, N°6, 1986, str.331-337;

-
30. Young R.W.: Use of The Optical Basicity Concept for Determining Phosphorus and Sulphur slag/metal Partition, ECSC Contract N°7210-CF/802, Report EUR 13176 EN, 1991;
 31. Tsao T., Katayama H.: Sulphur distribution between liquid iron and CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ Slags used for ladle refining, Transactions ISIJ, Vol.26, 1986, str.717-723;
 32. Nzotta M. M., Du S. C., Seetharaman S.: Sulphide Capacities in Some Multi Component Slag Systems, ISIJ Int., Vol.38, N°11, 1998, str. 1170-1179;
 33. Nzotta M. M., Sichen D., Seetharaman S.: Sulphide Capacities of FeO-SiO₂, CaO-FeO and FeO-MnO Slags, ISIJ Int., Vol. 39, N°7, 1999, str. 657-663;
 34. Nzotta M. M., Sichen D., Seetharaman S.: A Study of the Sulfide Capacities of Iron-Oxide Containing Slags, Metall. Mater. Trans. B, Vol.30B, N°6, 1999, str. 909-920;
 35. Shankar A.: Sulphur partition between hot metal and high alumina blast furnace slags, Ironmaking Steelmaking, 33, N°5, 2006, str. 413-418;
 36. Shankar A., Gornierup M., Lahiri A. K., Seetharaman S.: Sulfide capacity of high alumina blast furnace slags, Metall.Mater. Trans. B, Vol.37B, 2006, N°6, str.941-947;
 37. Taniguchi Y., Sano N., Seetharaman S.:Sulphide capacities of CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO-MnO slags in the temperature range 1673-1773 K, ISIJ Int., 49, 2009, N°2, str. 156-163;
 38. Derin B., Suzuki M., Tanaka T.: Sulphide Capacity Prediction of Molten Slags by using a neural network approach, ISIJ International, Vol.50, N°8, 2010, str. 1059-1063;
 39. Turkdogan E.T.: Slags and fluxes for ferrous ladle metallurgy, Ironmaking and Steelmaking 1985, Vol.12, N°2, str. 64-78;

-
40. Nilsson R., Seetharaman S., Jacob K.T.: A Modified Sulphide Capacity, ISIJ International, Vol. 34, N°11,1994, str. 876-882;
 41. Andersson T. M., Jönsson P.G., Hallberg M.: Optimisation of ladle slag composition by application of sulphide capacity model, Ironmaking and Steelmaking ,Vol.27, N°4, 2000, str. 286-293;
 42. Slović Z: Upravljanje procesom uklanjanja sumpora i fosfora iz metala pri izradi čelika, Magistarski rad, TMF Beograd, 2004;
 43. Wagner C.: "The concept of the basicity of Slags", Metallurgical Transactions B, Volume 6B, September, 1975, str. 405-409;
 44. Gaye H.,Riboud P.V., Welfringer J.: Use of a slag model to describe slag-metal reactions and precipitation of inclusions, Ironmaking and Steelmaking, Vol.15, N°6, 1988, str.319-322;
 45. Nilsson R., Sichen D., Seetharaman S.: Proc.Scaninject VII, MEFOS, Luleå, 1985, str.149;
 46. Morreti R., Ottonello G.: A polymeric approach to the sulfide capacity of silicate slags and melts, Metall.Trans. B, Vol.34, 2003, str.399-410;
 47. Kärsrud K.:Scan. J.Metall. 13, 1984, str.144;
 48. Chan H.A., Fruehan J.R.: The sulfur partition ratio with Fe-C_{SAT} melts and the sulfide capacity of CaO-SiO₂-Na₂O-(Al₂O₃) slags, Metall. Trans. B, Vol.20B, 1989, str.71-76;
 49. Kunisada K., Iwai H.: Effects of CaO, MnO, MgO and Al₂O₃ on the sulfide capacities of Na₂O-SiO₂ slags, ISIJ Int.,Vol. 33, N°1, 1983, str.43-47;
 50. Young R. W., Duffy J. A., Hassall G. J., Xu Z.: Use of optical basicity concept for determining phosphorus and sulphur slag metal partitions, Ironmaking Steelmaking, Vol.19, N° 3, 1992, str.201-219;
 51. Andersson T.M., Jönsson G.P, Nzotta M.: Application of Sulphide Capacity Concept on High Basicity Ladle Slags Used in Bearing Steel Production, ISIJ International, Vol.39, N°11, 1999, str. 1140-1149;

-
52. McLean A.: The science and technology of steelmaking –measurements, models, and manufacturing, I&SM, December 2002, str.21-33;
 53. Mills C.K.: “Basicity and optical basicities of slags”, SLAG ATLAS, 2nd Edition, VDEh, 1995, str:10-19; ISBN 3-514-00457-9;
 54. Murali Krishna Y.A.A., Sowmaya T., Raman Sankaranarayanan S.: Application of optical basicity parameter to foaming of slags, La Metalurgia Italiana, Ottobre 2008, str.51-54;
 55. Bordes-Richard E., Courtine P.: Optical basicity: a scale of acidity/basicity of solids and its application to oxidation catalysis, Version du 9/04/04, <http://www.docin.com/p-379585480.html> /Poseta 27April2013/;
 56. Dolan M.D., Johnston R.F.: Multicomponent Diffusion in Molten Slags, Metall. and Materials Transactions B, Vol. 35B, August 2004, str.675-684;
 57. Nakamura T., Yokoyama A., Togur J.M.: Limitations in the Metallurgical Application of Optical Basicity, ISIJ International, Vol. 33, N°1, 1993, str. 201-209;
 58. Mills K.: The estimation of slag properties, Southern African Pyrometallurgy 2011, <http://www.pyrometallurgy.co.za/KenMills/KenMills.pdf> /Poseta 15Dec2012/;
 59. Duffy J.A.: Use of refractory data for obtaining optical basicities of transition metal oxides, Ironmaking and Steelmaking, Vol. 16, N°6, str.426-428;
 60. Sommerville I.D., Yang Y.: Basicity of metallurgical slags, The AusIMM Proceedings, Vol.306, N°1, 2001, str.71-77;
 61. El-Sayed M.: The uncertainties of the calculated optical basicity from the optical band gap and the refractive index for some oxide glass systems, Journal of Applied Sciences Vol. 5, N°10, 2005, ISSN 1812-5654, str.1867-1870;

-
62. Sommerville D.I., Yang Y.: The Concept and quantification of Basicity in metallurgical Slags, The Brimacombe Memorial Symposium, Vancouver, BC, Canada, October 1-4, 2000, str.745-761;
63. Кудрин В.А., Парма В.: Технология получения качественной стали, Металлургия, Москва, 1984, УДК 669.18, str.106-209;
64. Yildirim I.Z., Prezzi M.: Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag, Hindawi Publishing Corporation Advances in Civil Engineering, Volume 2011, Article ID 463638, 13 pages, doi:10.1155/2011/463638/;
65. Adolfsson D.: Cementitious Properties of Steelmaking Slags, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, 2011, ISSN: 1402-1544, ISBN 978-91-7439-236-4, www.ltu.se;
66. Posch W., Preßlinger H., Mayr M., Klepp K., Hiebler H.: Sulphur bonding in solidified ladle slags, VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, str.249-254;
67. Bonetti O., Mapelli C., Guzzon M.: Recycling of ladle slag in the EAF: improvement of the foaming behavior and decrease of the environmental impact, http://www.yuber.com.tr/yeni_pdf/Ladle_Slag_in_EAF.pdf / Poseta 20Maj2013/
68. Phaltankar S.R.: A Study Report On Desulphurization of Liquid Steel, Submitted By Project (Metallurgy) WELSPUN MAX STEEL Ltd., Salavmaharashtra, India, <http://www.scribd.com/doc/79531345/desulphurizationprojectreport-110812232823-phpapp01> / Poseta 06Oktobar 2012/ ili http://dc455.4shared.com/doc/yx9MD_mO/preview.html / Poseta 06Oktobar2012/;

-
69. Kishimoto T., Hasegawa M., Ohnuki K., Sawa. T., Iwase M., The activities of $\text{FeOxCaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FexO}$ slags at 1723K, Steel Research International 76, 2005, №5, str. 341-347;
70. Mayowa S. F.:Improvement of the Desulphurisation Process by Slag Composition Control in the Ladle Furnace, Master Thesis,Luleå University of Technology, 2009, ISSN:1653-0187, ISRN:LTU-PB-EX-09-/065-SE,
http://pure.ltu.se/portal/files/32557575/LTU_PB_EX_09065_SE.pdf
/Poseta 06Oktobar2012/;
71. Kowalski M., Spenser P.J., Neuschütz D.: Phase diagrams, SLAG ATLAS, 2nd Edition, Edited by Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), 1995, str. 160, ISBN 3-514-00457-9;
72. Wang S., Jin Y.,Li G.: Theory and application of magnesia ramming material in ferroalloy refining furnaces, Proceedings: Tenth International Ferroalloys Congress, Cape Town, South Africa, 1-4 February, 2004, ISBN:0-9584663-5-1
73. Bodsworth C., Bell B.H.: Physical Chemistry of Iron and Steel Manufacture, Second Edition, Longman, 1972, London, ISBN 0 582 44116 1;
74. Božić B.: Hemijska metalurgija gvožđa i čelika, Naučna knjiga, Beograd, 1967, str. 331;
75. Mohassab-Ahmed M.Y., Sohn H.Y., Hang Goo Kim: Sulfur Distribution between Liquid Iron and Magnesia saturated Slag in $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ Atmosphere Relevant to a Novel Green Ironmaking Technology, ACS Publications, dx.doi.org/10.1021/ie201970/ Ind. Eng. Chem. Res. 2012, 51, str. 3639-3645;
76. Seo Do J., Suito H.: Sulfur distribution between $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ slags and liquid iron and solubility of MgO, Bulletin of the Inst. for Adv. Materials Processing, Tohoku University (SOZAIKEN IHO), Sendai,

-
- Japan, 52, 1996, str. 23. / in Japanese/,
<http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/34076/1/KJ00000659472.pdf/Poseta> 25Januar2012/;
77. Hayakawa H., Hasegawa M., Oh-nuki K., Sawai T., Iwase M.: Sulphide Capacities of CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO slags, Steel research Int., Vol.77, N°1, 2006, str. 14-20;
78. Yang X., Jiao J., Ding R., Shi C., Guo H.: A Thermodynamic Model for Calculating Sulphur Distribution Ratio between CaO-SiO₂-MgO-Al₂O₃ Ironmaking Slags and Carbon Saturated Hot Metal Based on the Ion and Molecule Coexistence Theory, ISIJ International, Vol. 49, N°12, 2009, str. 1828-1837;
79. Yang X., Shi C., Zhang M., Chai G., Wang F.: A Thermodynamic Model of Sulfur Distribution Ratio between CaO-SiO₂-MgO-FeO-MnO-Al₂O₃ Slags and Molten Steel during LF Refining Process Based on the Ion and Molecule Coexistence Theory, Metall. and Materials Transactions B, Vol. 42B, December 2011, str.1150-1180;
80. Lachmund H., Xie Y., Harste K.: Thermodynamic and kinetic aspects of the desulphurisation reaction in secondary metallurgy, Steel Research 72, N°11, 2001, str.452-459;
81. Winkler O., Bakish R.: Vacuum metallurgy, Elsevier Publishing Company, New York, 1971, str.93;
82. Ahmadi S., Hadavi M.M.S., Shokuhfar A.: Evaluation of deoxidation process in medical grade 316L stainless steel, International Journal of ISSI, Vol.3, N°2, 2006, str.22-28;
83. Zhang X., Subramanian M.: Thermodynamic modeling for deoxidation control of steel in LMF, Proceedings of the 85th Steelmaking Conference, Nashville, Tenn., USA, March 10-13, 2002, str.313-322;

-
84. Ohta H., Suito H.: Activities of SiO_2 and Al_2O_3 and Activity Coefficients of Fe_tO and MnO in $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ Slags, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 29B, 1998, str.119–129;
85. Deo B., Boom R.: *Fundamentals of Steelmaking Metallurgy*, Prentice Hall International, 1993; ISBN 0-13-345380-4;
86. Björklund J.: *A Study of Slag-Steel-Inclusion Interaction During Ladle Treatment*, Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2006, ISBN 91-7178-403-9;
87. Slović Z., Nedeljković Lj., Raić K., Odanović Z.: Relationship between the common optical basicity models and the sulphide capacities of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ slag, *Kovove Mater.* 50, 2012, str. 185–192, DOI: 10.4149/km 2012 3 185;
88. Slović Z., Nedeljković Lj., Raić K., Volkov-Husović T.: Relationship between the calculated oxygen activity and the sulphur partition ratio for $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ slag during ladle refining, *Materiali in tehnologije/Materials and Technology*, Vol.46, N°6, 2012, str.683-688; ISSN 1580-2949;
89. Doostmohammadi H., Andersson M., Karasev A., Jönsson P.G.: Use of Computational Thermodynamic Calculations in Studying the Slag/Steel Equilibrium during Vacuum Degassing, *Steel Research Int.*, N°1, 2010, str. 81, DOI: 10.1002/srin.200900112;
90. Zimný O., Morávka J., Jančíková Z.: Analysis of chemical reheating of steel by means of regression and artificial neural networks, *METAL 2009* 19. – 21. 5. 2009, Hradec nad Moravicí,
http://www.metal2013.com/files/proceedings/metal_09/Lists/Papers/085_e.pdf /Poseta 24Februar2013/;
91. Mavrommatis K. Th: *Mathematical Modelling from First Principles for Secondary Metallurgical Applications*, Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Habana, Cuba, Octubre 8 de 2006, str.240;

-
92. Харламов Д.А., Конорев А.В., Серкин М.А. :Математическое моделирование процесса десульфурации стали при внепечной обработке в АКОС, СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ № 2, 2005, ISSN: 1812-7320, str. 53-54, (Kharlamov D.A., Konorev A.V., Serkin M.A.: Mathematical modeling of process desulfuration from steel at processing in ladle furnace), <http://www.rae.ru/snt/pdf/2005/2/43.pdf> /Poseta 25April2013/
93. Zhang H., Zhan D., Jiang Z.: Final sulfur content prediction model based on improved BP artificial neural network for hot metal pretreatment, Iron and Steel, Vol.42, N°3, March 2007, str.30-32;
94. Pretorius E.B., Marr R.: The effect of slag modeling to improve steelmaking processes, <http://etech.lwbref.com/Downloads/Theory/The%20effect%20of%20slag%20modeling%20to%20improve%20steelmaking%20processes.pdf> /Poseta 25Februar2013/;
95. Gaye H.,Lehmann J., Riboud P.V., Welfringer J.: Thermodynamics of slags: use of a slag model to describe metallurgical reactions, Mémoires et Études Scientifiques Revue de Métallurgie, Avril 1989, str. 237-244;
96. Nita P.S., Butnariu I., Constantin N.: The efficiency at industrial scale of a thermodynamic model for desulphurization of aluminium killed steels using slags in the system CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂, Revista de Metalurgia, 46(1), Enero-Febrero, 5-14, 2010, str.5-14, ISSN: 0034-8570, eISSN 1988-4222;
97. Yu Y., Wen T., Zhan D., Zhang H.: Prediction model of final sulfur content based on artificial neural network for hot metal pretreatment at Ansteel, Metal Materials and Metallurgy Engineering, Vol.37, N°3, June, 2009, str.58-61;
98. Nyssen P., Marique C., Prum C., Bintner P., Savini L.: A new metallurgical model for the control of EAF operations, A new

-
- metallurgical model for the control of EAF operations, http://www.crm-eur.com/F-PUBLICATIONS/media/metec_eaf.pdf /Poseta 25Mart2013/;
99. Logar V., Dovžan D., Škrjanc I.: Modeling and validation of an Electric Arc Furnace: Part 1, Heat and Mass Transfer, ISIJ International, Vol.52, N°3, 2012, str.402-412;
100. <http://people.etf.unsa.ba/~ksokolija/c/ug/pees/definicije.html> /Poseta 12Februar2013/;
101. Višestruka linearna regresije, <http://www.ef.uns.ac.rs/Download/multivarijaciona-statisticka-analiza/2013-02-08-Uvod-Kor-ranga-Prosta-i-vis-regres.pdf> /Poseta 12Februar2013/;
102. Višestruka regresija i korelacija, <http://www.ef.uns.ac.rs/Download/multivarijaciona-statisticka-analiza/2013-02-08-Visestruka-regresija-i-korelacija.pdf> /Poseta 12Februar2013/;
103. Stojković M.: "Statistika", Ekonomski fakultet u Subotici, 2001, str. 823.
104. Statistička obrada podataka, http://www.see-educoop.net/education_in/pdf/iq_i_znanje_eng-pog09i10-bih-rps-srb-t07.pdf /Poseta 12Februar2013/;
105. KORELACIJA, http://161.53.244.3/~oliverap/MetodeIstrazivanjaFT/11_Korelacija.pdf /Poseta 12Februar2013/;
106. Udovičić M. et al.: Što treba znati kada izračunavamo koeficijent korelacije, What we need to know when calculating the coefficient of correlation? Biochemia Medica 2007, 17(1), str.1-138;
107. Johnson R.: Elementary Statistics, Fifth Edition, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1988, ISBN 0-534-91719-4, str.474-512;

-
108. web adresa:
www.dilinger.de/dh/unternehmen/produktion/stahlwerk/index.shtml.en /Poseta 5Maj 2012/;
109. Secondary metallurgy solutions, GB 120430 WS 09122.0 | 09.2012, Siemens AG,
<http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/metals/simetal/en/Secondary-metallurgy-solutions-en.pdf> /Poseta 01Oktobar2012/;
110. Lachmund H., Xie Y.: High purity steels: a challenge to improved steelmaking processes, Ironmaking and Steelmaking, Vol.30, N°2, 2003, str.125-129;
111. Secondary metallurgy solutions, www.siemens-vai.com,
<http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/metals/simetal/en/Secondary-metallurgy-solutions-en.pdf> /Poseta 24Dec2012/;
112. Kang J., Sichen D., Morita K.: Activities of SiO₂ in Some CaO–Al₂O₃–SiO₂(–10%MgO) Melts with Low SiO₂ Contents at 1 873 K, ISIJ International, Vol.47, N°6, 2007, str. 805-810;
113. Jönsson P.G., Jonsson L.T.I.: The use of fundamental process models in studying ladle refining operations, ISIJ International, Vol. 41, N°11, 2001, str. 1289–1302;
114. Ozturk B., Turkdogan E.T.: Equilibrium S distribution between molten calcium aluminate and steel, Part 2 Reaction of Si and Al in steel with calcium aluminate, Metal Science, Vol.18, June 1984, str.306-309;
115. Cheng Z., GuoJ ., Cheng S., Cheng D.: Desulfurization of LF refining process for SPCC in JISCO, Journal of Iron and Steel research, Vol.24, N°9, September 2012, str.10-15;
116. Jackson A.: Oxygen steelmaking for steelmakers, Newnes-Bjutterworts, London, (2nd Edition), 1969, str.6

117. He S., Zhang G., Wang Q.: Desulphurization Process in RH Degasser for Soft-killed Ultra-low-carbon Electrical Steels, *ISIJ International*, Vol.52, N°6, 2012, str.977-983;

BIOGRAFIJA

Mr Zoran M. Slović, dipl.inž. metalurgije, rođen je 06.07.1958. godine u Smederevu, gde je završio osnovnu školu i Gimnaziju. Diplomirao je na Tehnološko-metalurškom fakultetu 1984 godine na Katredri za metalurgiju gvozdā i čelika. Diplomski rad pod nazivom „Ispitivanje režima duvanja u LD-konvertorima čeličane Metalurškog kobinata Smederevo“ odbranio je sa ocenom deset (10). Magistrske studije završio je na Tehnološko-metalurškom fakultetu sa prosečnom ocenom 9.5 a magistarski rad pod nazivom „Upravljanje procesom uklanjanja sumpora i fosfora iz metala pri izradi čelika“ odbranio je na TMF-u 23.04.2004. na Katedri za metalurško inženjerstvo. Mr. Zoran M.Slović se 1983 godine zaposlio u tadašnjem Metalurškom Kombinatoru Smederevo, u Smederevu gde je prošao sve faze od pogonskog inženjera do Zamenika generalnog direktora za tehnička pitanja. Za svoj rad nagrađivan je društvenim priznanjima kao što su:

Prvomajska nagrada za Podunavski region (1991), Oktobarska nagrada grada Smedereva (1994), Nagrada Privredne komore Republike Srbije (1994), Zlatni ključ grada Smedereva (1997) itd. U toku 2001 godine obavljao je dužnost direktora predstavništva SARTID Stahl u Düsseldorfu. Od 2002 do 2006 radio je kao viši stručni saradnik u ALSIMA d.o.o u Beogradu. Sada, zaposlen u Key to Metals d.o.o u Beogradu. Oženjen, otac dve ćerke.

Mr. Zoran M.Slović je u toku svog dosadašnjeg naučno-istraživačkog rada objavio, kao autor ili kao koautor, 90 naučnih radova izloženih na domaćim i na stranim stručnim konferencijama, kao i u domaćim i stranim časopisima.

Od stranih jezika kandidat aktivno govori i piše na engleskom, a poseduje pasivno znanje ruskog, francuskog i italijanskog jezika.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Зоран Сповић

број уписа _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Термодинамички приступ десулфуризацији при
вантентној обради кисеонично-конверторског челика

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 30.10.2013.

З. Сповић

Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора _____

Број уписа _____

Студијски програм Металуршко инжењерство

Наслов рада Термодинамички приступ десулфуризацији при
вангелској обради киселично-консерваторског челика

Ментор Др. Карло Раич, ред. професор

Потписани З. Мовић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 30.10.2013.

Потпис докторанда

З. Мовић

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Термодинамички приступ деауфурацији при ванклетној
обради кисеонично-конверторској челика

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 30.10.2013.

Потпис докторанда

Ј.Сновић

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.