

Reološka svojstva koloidnih suspenzija koje sadrže mikro/nano Al₂O₃ prah

Družinec, Stjepan

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:535586>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Reološka svojstva koloidnih suspenzija koje sadrže
mikro/nano Al_2O_3 prah

Stjepan Družinec

Zagreb, 2019



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Reološka svojstva koloidnih suspenzija koje sadrže
mikro/nano Al_2O_3 prah

Mentor:

Prof. dr. sc. Lidija Turkovi

Student:

Stjepan Družinec

Zagreb, 2019.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Stjepan Družinec**

Mat. br.: 35203860

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Reološka svojstva koloidnih suspenzija koje sadrže mikro/nano Al_2O_3 prah**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Rheological properties of colloidal suspensions which contain micro/nano Al_2O_3 powder**

Opis zadatka:

Jedan od postupaka oblikovanja tehničke keramike je lijevanje suspenzije. Prva faza je priprava stabilne suspenzije pogodne za lijevanje u porozne upijajuće gipsane oblike. Stabilnost keramičkih suspenzija može se odrediti mjerenjem reoloških svojstava istih. Reologija je znanost o deformacijama i tečenju materijala, a viskoznost je mjera otpora materijala tečenju.

U ovom je završnom radu potrebno:

- prirediti vodene mikro/nano Al_2O_3 suspenzije uz dodatak DOLAPIX-a CE64 kao disperzanta,
- u planetarnom mlinu homogenizirati priređene suspenzije, izmjeriti pH suspenzija, ukloniti mjehuriće zraka iz suspenzije,
- snimiti krivulje tečenja: ovisnost viskoznosti o brzini smicanja te ovisnost smičnog naprezanja o brzini smicanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.


Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Lidija Čurković


Prof. dr. sc. Branko Bauer

IZJAVA I ZAHVALA

Izjavljujem da sam završni rad “Reološka svojstva koloidnih suspenzija koje sadrže mikro/nano Al_2O_3 prah“ napisao samostalno, koriste i navedenu literaturu i znanje steeno tijekom studija. Ovom prilikom zahvaljujem se prof. dr. sc. Lidiji Turkovi, i mag. appl. chem. Ivani Sever, na stručnoj pomoći i pri eksperimentalnom dijelu završnog rada te odabiru literature i korisnim savjetima koje su mi pružili.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu uz financijsku potporu Hrvatske zaklade za znanost projektom IP-2016-06-6000 Napredna monolitna i kompozitna keramika za zaštitu od trošenja i korozije (WECOR).

Stjepan Družinec

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	3
2.1. Tehni ka keramika.....	3
2.2. Alumini j oksidna keramika - Al ₂ O ₃	5
2.3 Proizvodnja keramike.....	8
2.4. Lijevanje suspenzija.....	11
2.5 Stablnost suspenzija.....	12
2.5.1. Steri ka stabilizacija.....	13
2.5.2. Elektrostatici ka stabilizacija.....	14
2.5.3. Elektrosteri ka stabilizacija.....	14
2.6. Reologija.....	15
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	19
4. REZULTATI I RASPRAVA.....	27
5. ZAKLJU AK.....	33
LITERATURA.....	34

POPIS SLIKA

Slika 1. Ostaci kerami kog proizvoda stari 20000 godina [2].....	1
Slika 2. Kerami ki laboratorijski pribor [5].....	2
Slika 3. Vijci proizvedeni od Al_2O_3 keramike [11].....	6
Slika 4. a) grubozrnata Al_2O_3 mikrostruktura, b) sitnozrnata Al_2O_3 struktura [13].....	6
Slika 5. Aluminiij oksidni prah [15].....	7
Slika 6. Tijek proizvodnje keramike [16].....	8
Slika 7. Kugli ni mlin [16].....	9
Slika 8. a) mlin sa okretnom plo om, b) mlin sa valjcima [16].....	9
Slika 9. Proces sinteriranja (sraš ivanja) [7].....	10
Slika 10. Postupak lijevenja suspenzije [16].....	11
Slika 11. Steri ka stabilizacija [21].....	13
Slika 12. Elektrostatika stabilizacija [17].....	14
Slika 13. Elektrosterika stabilizacija [17].....	15
Slika 14. Hookov element [25].....	16
Slika 15. Newtonov element [25].....	17
Slika 16. Saint-Venantov element [25].....	18
Slika 17. Strukturna formula disperzanta Dolapix CE-64.....	19
Slika 18. Vaganje mikro Al_2O_3 praha.....	21
Slika 19. Vaganje nano Al_2O_3 praha.....	21
Slika 20. Korišteni disperzant Dolapix CE-64.....	22
Slika 21. Vaganje disperzanta Dolapix CE-64.....	23

Slika 22. Promiješana smjesa destilirane vode, Al ₂ O ₃ praha i disperzanta.....	24
Slika 23. a) Planetarni kugli ni mlin Retsch PM 100 (pogled iznutra) b) uneseni parametri...25	
Slika 24. Viskozimetar Brookfield DV-III Ultra.....	26
Slika 25. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju bez dodatka nano praha.....	27
Slika 26. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha.....	28
Slika 27. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha.....	28
Slika 28. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju s dodatkom 10% nano praha.....	29
Slika 29. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za sve etiri 70%-tne Al ₂ O ₃ vodene suspenzije.....	29
Slika 30. Dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju bez dodatka nano praha.....	30
Slika 31. Dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha.....	30
Slika 32. Dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha.....	31
Slika 33. Dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o smi noj brzini za 70%-tnu Al ₂ O ₃ vodenu suspenziju sa dodatkom 10% nano praha.....	31
Slika 34. Dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o smi noj brzini za sve etiri 70%-tne Al ₂ O ₃ vodene suspenzije.....	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela keramike prema kemijskom sastavu [7].....	3
Tablica 2. Usporedba svojstava keramike, metala i polimera [8].....	4
Tablica 3. Svojstva aluminij oksidnog praha [14].....	7
Tablica 4. Disperzije krutih tvari u kapljevinama [19].....	12
Tablica 5. Sastav korištenog Al ₂ O ₃ praha.....	20
Tablica 6. Mase mikro i nano Al ₂ O ₃ praha u suspenzijama.....	20
Tablica 7. Sastav 70%-tnih Al ₂ O ₃ vodenih suspenzija.....	23
Tablica 8. Izmjerene pH vrijednosti pripremljenih suspenzija.....	27

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
	%	osna deformacija
	N/m^2	naprezanje
E	N/m^2	Youngov modul elasti nosti
	Pa	smi no naprezanje
G	Pa	Coulombov modul smi nosti
γ	s^{-1}	brzina smicanja
$\dot{\epsilon}$	N/m^2	brzina deformacije (prva derivacija deformacije)
	$Pa \cdot s$	plasti na viskoznost
	$mPa \cdot s$	dinami ka viskoznost
F	N	sila
m	g	masa
V	l	volumen
w	%	maseni udio

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je utjecaj različitog udjela nano Al_2O_3 praha na reološka svojstva vodenih suspenzija koje sadrže mikro Al_2O_3 prah.

U tu svrhu pripravljene su četiri 70%-tne Al_2O_3 suspenzije s različitim masenim udjelom nano Al_2O_3 praha. Za stabilizaciju svih suspenzija korišteno je 0,4% disperzanta Dolapix CE-64. Pripravljene 70%-tne suspenzije sadržavale su: (i) isti mikro Al_2O_3 prah (0% nano Al_2O_3 prah), (ii) 99 % mikro Al_2O_3 prah i 1 % nano Al_2O_3 praha, (iii) 95 % mikro Al_2O_3 prah i 5 % nano Al_2O_3 praha te (iv) 90 % mikro Al_2O_3 prah i 10 % nano Al_2O_3 praha. Suspenzije su pripravljene homogenizacijom u planetarnom kugličnom mlinu, nakon čega im je izmjerena pH vrijednost i određena reološka svojstva. Viskozimetrom su snimljene krivulje tečenja: ovisnost viskoznosti o brzini smicanja i ovisnost smičnog naprezanja o brzini smicanja.

Ključne riječi: Al_2O_3 suspenzije, reološka svojstva

SUMMARY

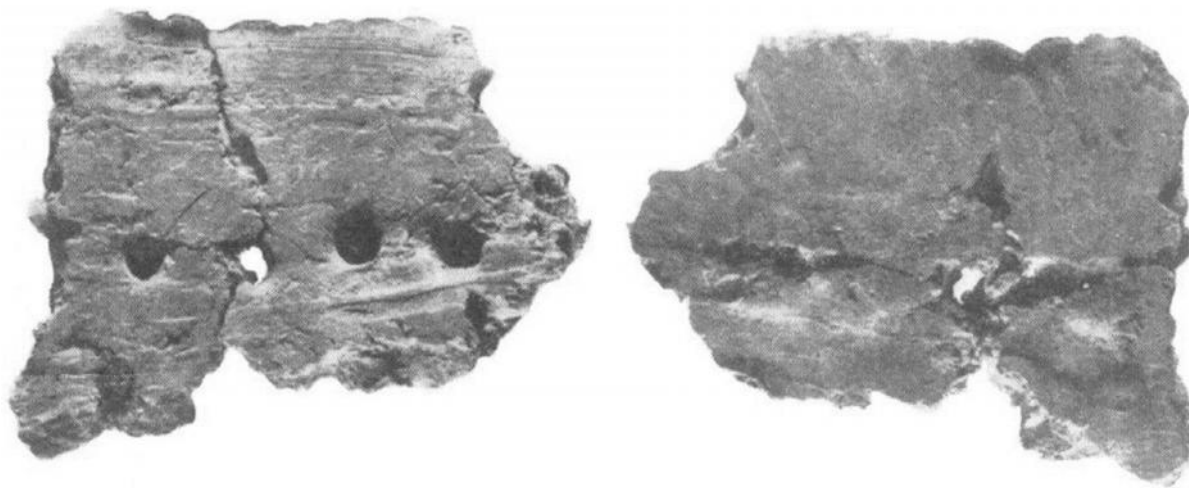
In this paper the influence of varying amounts of nano Al_2O_3 powder on rheological properties of micro Al_2O_3 powder suspensions is described.

For that purpose four 70 wt. % Al_2O_3 suspensions, with varying amounts of nano Al_2O_3 powder, were made. To achieve suspension stability, 0.4 wt. % of Dolaphix CE-64 dispersant was used in each suspension. The first suspension did not contain any nano Al_2O_3 powder, while the rest contained 1 wt. %, 5 wt. % and 10 wt. % of nano Al_2O_3 powder, respectively. The prepared suspensions were homogenized in a planetary ball mill, pH values and rheological properties were measured. Viscosimeter was used to record flow curves: viscosity vs. shear rate curve and shear stress vs. shear rate curve.

Key words: Al_2O_3 suspensions, rheological properties

1.UVOD

Rije keramika proizašla je iz imena gradi a smještenog u blizini Atene, zvanog Cerami, u kojemu su lonari izrađivali keramičke predmete. Starogrčka rije "keramos" je isprva označavala rog za piće, a kasnije i glinu, a zatim i lonarske proizvode. Predmeti od keramike ubrajaju se u najstarije proizvode izrađene ljudskom rukom. Ostaci najstarijeg keramičkog proizvoda pronađeni su u Kini, a stari su 20000 godina, mogu se vidjeti na slici 1. Najstarije opeke, prema mnogim mišljenjima, stare su i do 15.000 godina. U dolini Nila u Egiptu pronađeni su predmeti od pešene gline kojima se pripisuje starost od 13.000 godina. U Engleskoj, Belgiji i Njemačkoj pronađene su posude od pešene gline, izrađene još u ledeno doba. [1], [2]



Slika 1. Ostaci keramičkog proizvoda stari 20000 godina [2]

U Hrvatskoj se prvi keramički proizvodi pojavljuju u neolitik na sjevernim područjima te na jadranskoj obali i u njezinu zaleđu. Od 15. st. postojali su podatci o lonarskim obrtima u Zagrebu i Ivani – Gradu. Posebice moderne hrvatske keramike vezani su uz Obrtnu školu u Zagrebu, gdje je 1884. bio otvoren Odjel za lonariju i pešariju. Keramika je imala veliku ulogu u pokretanju industrijskog razvoja, a primjena keramike u tehnici, koju danas poznajemo, započela je između 19. i 20. st. [3]

Uporaba keramike danas vrlo je široka i raznolika, od elektronike, elektrotehnike, strojarstva, medicine, bijele tehnike do građevine, tekstilne industrije i umjetnosti. Neki od keramičkih proizvoda su: dijelovi za vruće i vruće žice, dijelovi pumpi i ventila, visokotemperaturni zaštitni i izolacijski dijelovi, laboratorijski pribor, kojeg je primjer pokazan na slici 2, umjetni kukovi, keramički kondenzatori, posuđe u kućanstvu, i mnogi drugi. [4]



Slika 2. Keramički laboratorijski pribor [5]

Povoljna svojstva i jednostavnost proizvodnje glavni su razlozi primjene keramike. Povoljna svojstva keramike su: visoka tvrdoća, tlačna i savajna svojstva, visoka krutost, otpornost na trošenje i korozijska postojanost, mala gustoća, visoko talište, niska provodnost (električna i toplinska) te niska toplinska rastezljivost. Kao i svi materijali keramika ima i nedostatke, a on je visoka krhkost, koja je uzrokovana visokom tvrdoćom te niskom vlažnom tvrdoćom i otpornosti na toplinski šok. Također, velik nedostatak je i sama cijena sirovine i postupka oblikovanja koja je visoka. Unatoč nedostacima, uporaba keramike sve je više zastupljena u inženjerskom području, također se sve češće koristi i u konstrukcijama. U inženjerske svrhe upotrebljavaju sve dvije vrste keramike: tradicionalna i tehnička keramika [6].

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Tehni ka keramika

Keramika je anorganski i nemetalni materijal iji su atomi povezani mješavinom ionskih i kovalentnih veza. U anglosaksonskim jezicima pojam “ceramics“ obuhva a i staklo, emajl, staklokeramiku i anorganska vezivna sredstva (cement, vapno, gips). Tehni ka keramika dijeli se prema: veli ini zrna, namjeni i kemijskom sastavu.[7], [8]

Podjela prema veli ini zrna:

- 1) gruba keramika (veli ine zrna od 0,1 mm do 0,2 mm) – tradicionalna keramika
- 2) fina keramika (veli ine zrna manje od 0,1 mm) – tehni ka keramika

Podjela prema namjeni:

- 1) visokokvalitetna keramika
- 2) konstrukcijska keramika
- 3) industrijska keramika
- 4) inženjerska keramika
- 5) funkcionalna keramika
- 6) elektrokeramika
- 7) rezna keramika
- 8) biokeramika

Tablica 1. Podjela keramike prema kemijskom sastavu [7]

Silikatna keramika	Oksidna keramika	Neoksidna keramika
porculan steatit kordierit mulit	aluminijev oksid – Al_2O_3 magnezijev oksid – MgO cirkonijev oksid – ZrO_2 aluminijev titanat olovni cirkonat titanat (piezokeramika)	silicijev karbid – SiC silicijev nitrid – Si_3N_4 aluminijev nitrid – AlN borov karbid – B_4C borov nitrid – BN

Najveći dio proizvoda od keramike su proizvedeni od silikatne keramike. Materijali od oksidne keramike podrazumijevaju metale koji su sastavljeni od jednofaznih i jednokomponentnih metalnih oksida čiji udjel prelazi 90% te uglavnom ne sadrži staklenu fazu. Visok udio karbida koji osiguravaju električnu vodljivost te velik udio kovalentnih veza koje osiguravaju dobra svojstva pri visokim temperaturama karakteriziraju neoksidnu keramiku.[9]

Kako bi se bolje predložila svojstva keramičkih materijala u tablici 2 dana je usporedba svojstava keramičkih, metalnih i polimernih materijala. Iz tablice se može istaknuti da su svojstva keramičkih materijala većinom bolja ili jednaka metalnim materijalima dok su bolja od gotovo svih svojstava polimernih materijala.

Tablica 2. Usporedba svojstava keramike, metala i polimera [7]

Svojstva	Keramika	Metali	Polimeri
Tvrdoća			
Modul elastičnosti			
Otpornost na visoke temperature			
Toplinska istezljivost			
Duktilnost			
Otpornost na koroziju			
Otpornost na trošenje			
Električna vodljivost			
Gustoća			
Toplinska vodljivost			

2.2. Aluminijska oksidna keramika – Al_2O_3

Aluminijska oksidna keramika vrlo je važan tehnički materijal kojeg karakterizira kombinacija dobrih mehaničkih i električnih svojstava, što ju čini pogodnom za uporabu u širokom području primjena. Različite iste mogu se postići dodavanjem aditiva prilikom proizvodnje kako bi se dobila tražena svojstva keramike. Prilikom proizvodnje aluminijske oksidne keramike širok spektar proizvodnih postupaka je primjenjiv, a oni uključuju strojnu obradu i proizvodnju na konačni oblik. Dodatno Al_2O_3 keramika se može spajati sa metalnim materijalima i drugim keramičkim materijalima postupcima metalizacije i lemljenja. [10]

Svojstva aluminijske oksidne keramike:

- 1) visoka vrstoća
- 2) visoka tvrdoća
- 3) temperaturna stabilnost
- 4) visoka otpornost abrazivskom trošenju
- 5) otpornost koroziji pri povišenim temperaturama
- 6) dobra električna izolacija
- 7) otpornost na utjecaj agresivne okoline (ograničena otpornost samo na utjecaj lužina)
- 8) niska žilavost
- 9) niska cijena sirovine

Zbog svojih svojstava aluminijska oksidna keramika koristi se za proizvodnju:

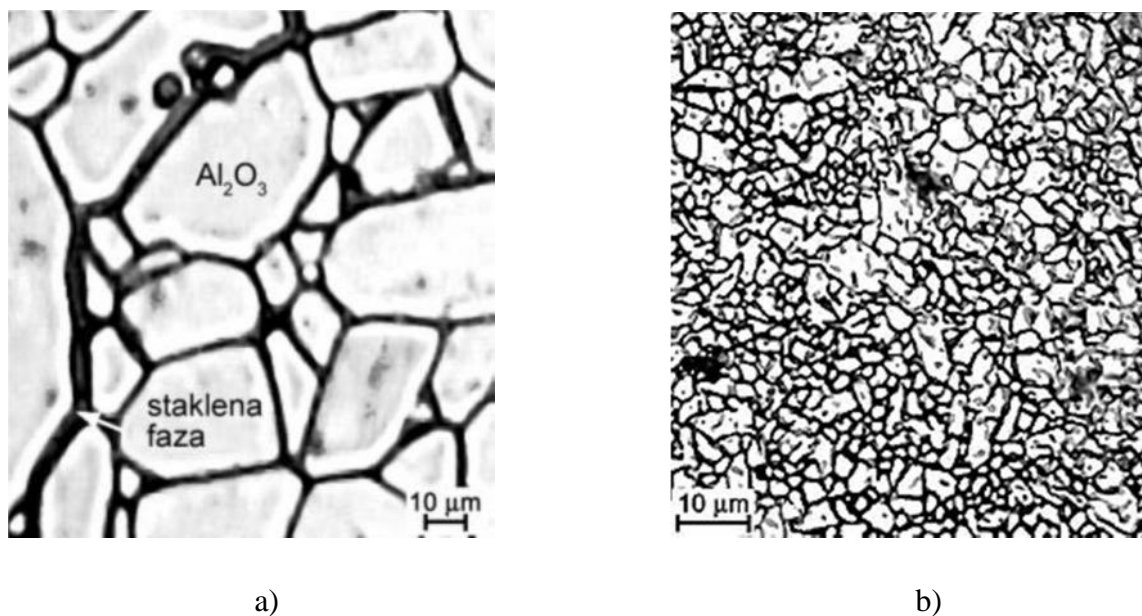
- 1) brtvenih elemenata u industriji sanitarija
- 2) proizvoda koji su u kontaktu sa visokim temperaturama, parom, talinom i troskom
- 3) supstrata u elektrotehnici
- 4) dijelova otpornih na koroziju
- 5) dijelova otpornih na trošenje
- 6) implantata u medicini

Kao primjer proizvoda od aluminijske oksidne keramike na slici 3 prikazani su vijci proizvedeni od Al_2O_3 keramike, koji se koriste za rastavljive spojeve u uvjetima visoke radne temperature i/ili visoke korozivnosti okoline u kojoj standardni čelični vijci ne pružaju zadovoljavajuća svojstva.



Slika 3. Vijci proizvedeni od Al_2O_3 keramike [11]

Mikrostruktura kao i kod drugih skupina materijala utječe na svojstva keramičkih materija. Mikrostruktura keramike, koje su primjeri pokazani na slici 4, tako utječe na: mehanička, električna, tribološka, toplinska, korozivna i druga svojstva.[12]



Slika 4. a) grubozrnata Al_2O_3 mikrostruktura, b) sitnozrnata Al_2O_3 struktura [13]

Sirovina za proizvodnju aluminij oksidne keramike je aluminij oksidni prah prikazan na slici 5. Aluminijev oksid je amfoterni kristalni prah bijele boje, bez mirisa i netopiv u vodi. Ostala svojstva navedena su u tablici 3. [14]

Tablica 3. Svojstva aluminij oksidnog praha [14]

Svojstvo	Vrijednost svojstva
gusto a	$3,97 \text{ g/cm}^2$
molarna masa	$101,961 \text{ g/mol}$
talište	$2030 \text{ }^{\circ}\text{C}$
to ka vrenja	$2977 \text{ }^{\circ}\text{C}$
tvrdo a po Knoopu	21 kN/m^2



Slika 5. Aluminij oksidni prah [15]

Osim za proizvodnju keramike aluminijev oksid koristi se kao:

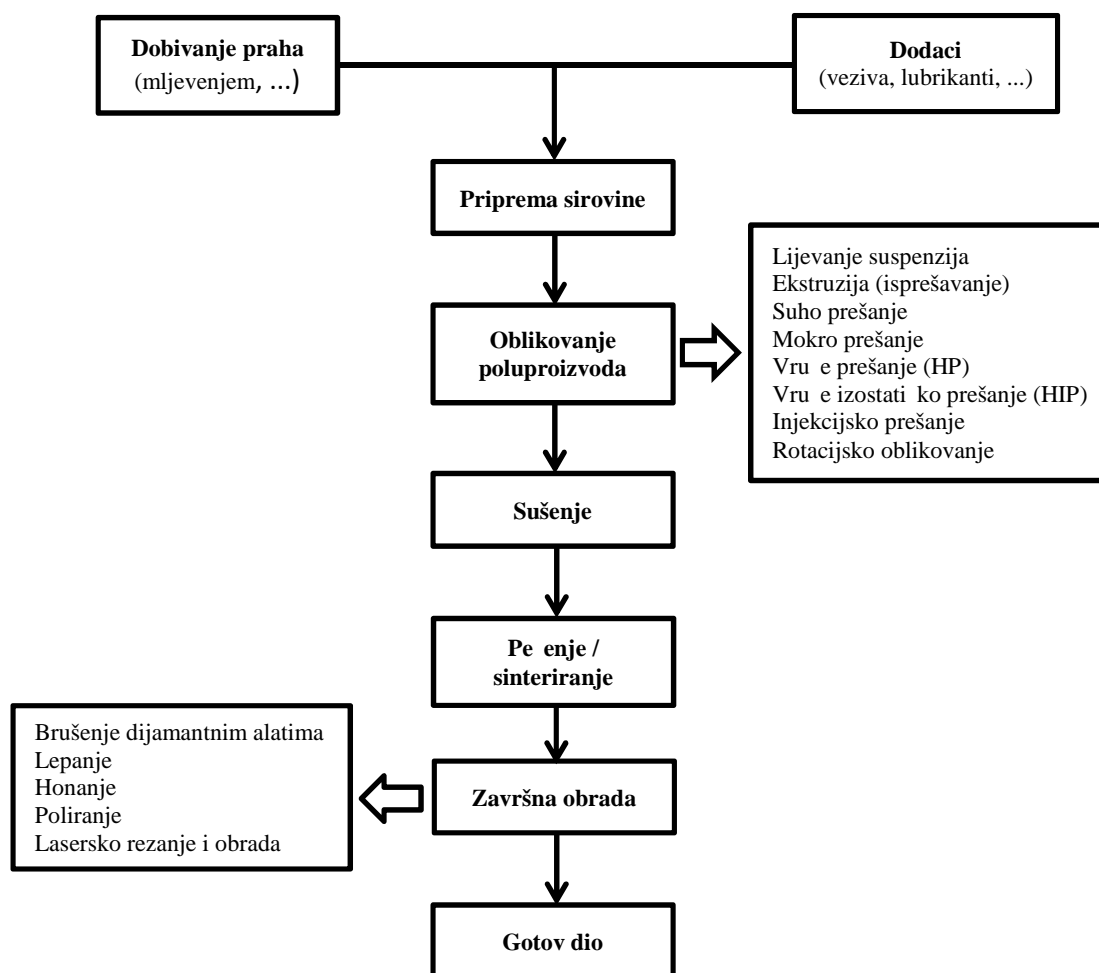
- 1) katalizator i nosa katalizatora
- 2) prašak za poliranje
- 3) abraziv
- 4) reagens u analizama
- 5) sirovina u taljenju aluminija
- 6) upijaju i materijal
- 7) vatrostalan materijal [15]

2.3 Proizvodnja keramike

Tehnološki proces proizvodnje keramike tipično se sastoji od sljedećih koraka:

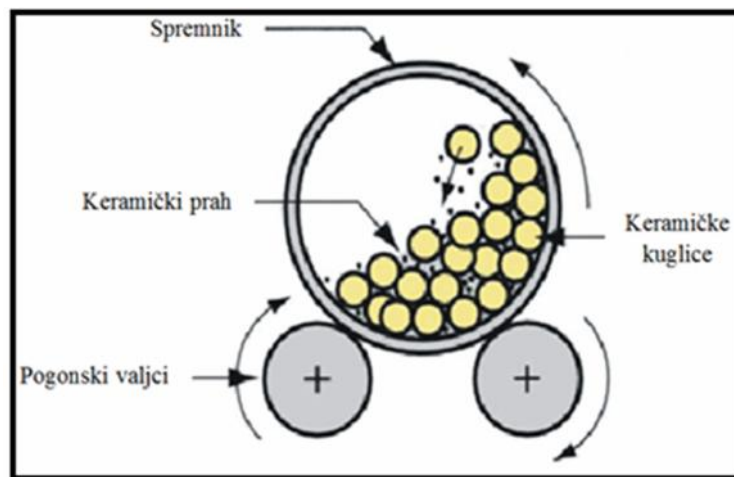
- 1) sinteza keramičkog praha
- 2) mljevenje u mlinu s kuglicama, miješanje, sušenje
- 3) formiranje potrebnih oblika komada (zelena keramika)
- 4) sjedinjavanje u gust monolitan komad sinteriranjem ili žarenjem
- 5) dodatni procesi (rezanje, brušenje, oblaganje)
- 6) završno sinteriranje

Tijek proizvodnje i različiti postupci oblikovanja poluproizvoda te završne obrade dani su na slici 6.

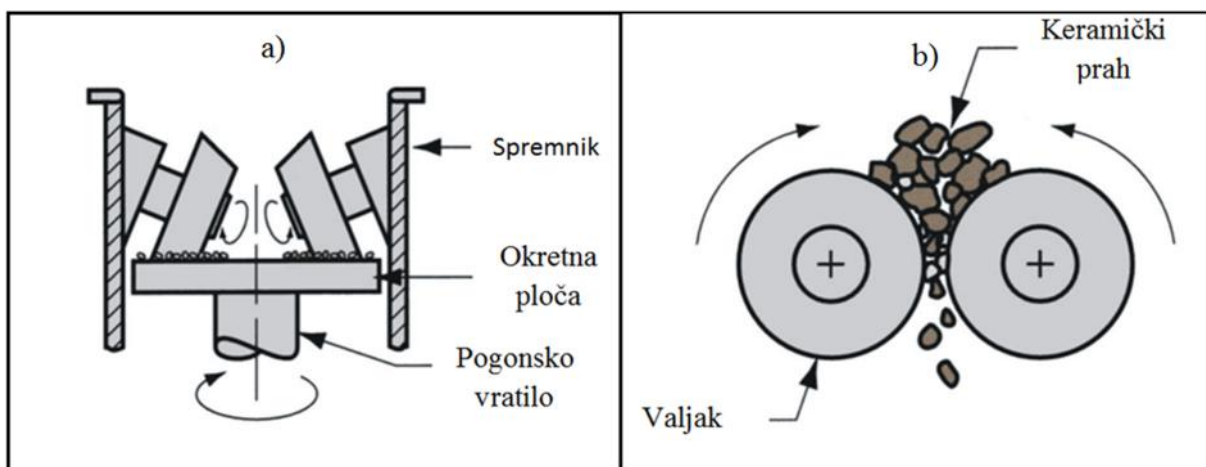


Slika 6. Tijek proizvodnje keramike [16]

Sirovina u proizvodnji keramike su prahovi istih prirodnih minerala (oksida, karbida, nitrida,...) ili kemijski sintetiziranih elemenata metala sa kisikom, ugljikom, dušikom, silicijem i borom. Prema zahtjevima proizvodnje bira se određena istota, veličina zrna i specifična površina praha. Kako bi se postigla zadovoljavajuća svojstva tijekom i nakon postupka proizvodnje prahu se dodaju aditivi kao što su: sredstva za tečenje, plastifikatori, ovršivači i pomoćna sredstva za sinteriranje. Nakon odabira praha i aditiva, prah se melje kako bi se dobila željena veličina zrna praha. Za mljevenje praha uglavnom se koristi kuglični mlin, prikazan na slici 7, gdje kuglice moraju biti od istog materijala kao i prah kako ga ne bi kontaminirale tijekom procesa mljevenja. Na slici 8, prikazani su mlin sa valjcima i mlin sa okretnom pločom, dvije vrste mlinova koje se također koriste za usitnjavanje keramičkog praha na željenu veličinu.

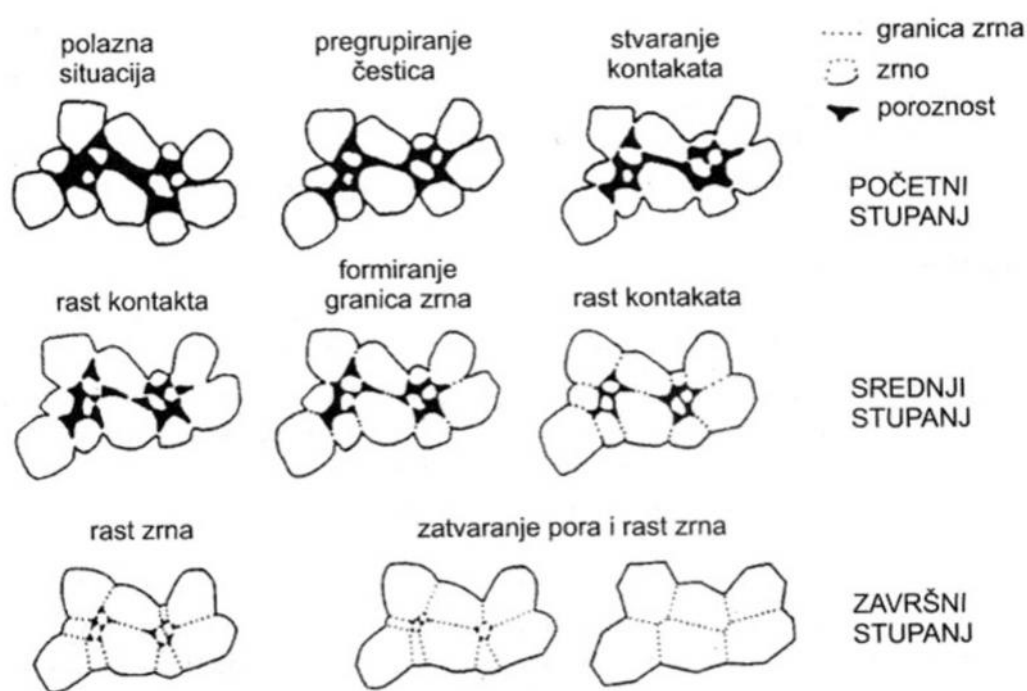


Slika 7. Kuglični mlin [16]



Slika 8. a) mlin sa okretnom pločom, b) mlin sa valjcima [16]

Nakon mljevenja smjesa praha i aditiva se homogenizira. Potom se spravlja smjesa u obliku suspenzije, granulata ili kerami kog tijesta, ovisno o postupku oblikovanja poluproizvoda koji je odabran. Sinteriranje (srašivanje), prikazano na slici 9, je postupak kojim se estice spajaju pri visokim temperaturama kako bi se smanjila poroznost. Prije sinteriranja se me utim treba provesti postupak sušenja kako bi se uklonila voda iz oblikovanog poluproizvoda te također uklonili svi aditivi i pomoćna sredstva koja bi zbog visokih temperatura sinteriranja mogla izgorjeti ili ishlapiti i time uzrokovati deformaciju kerami kog proizvoda.



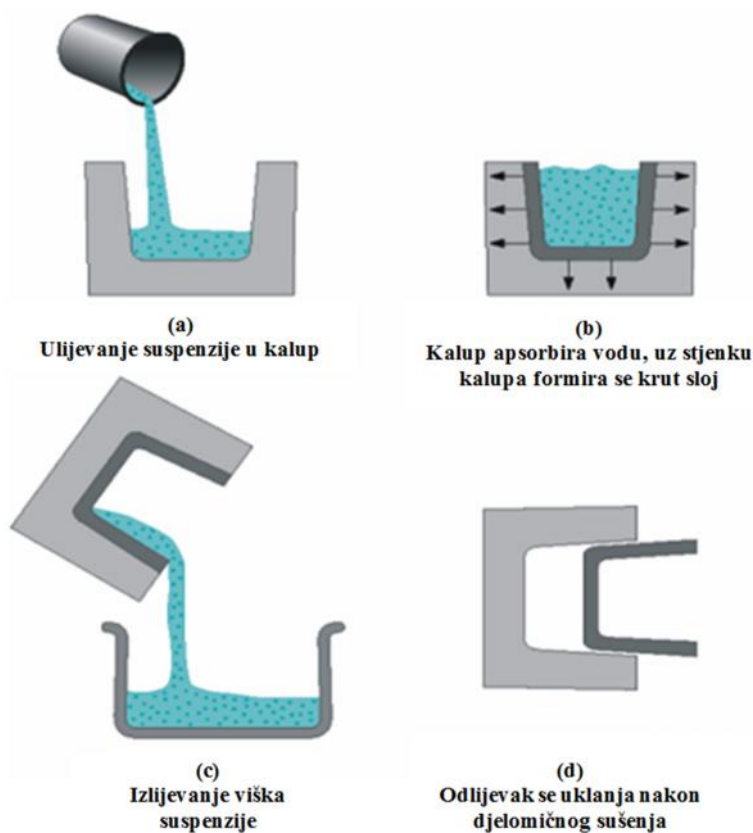
Slika 9. Proces sinteriranja (srašivanja) [7]

Završna obrada se izvodi nakon sinteriranja kako bi se uklonile sve nesavršenosti nakon prethodnih postupaka te osigurale uske tolerancije, zahtjevano stanje površine, točnost dimenzija i ostali zahtjevi koje je potrebno zadovoljiti prije eksploatacije proizvoda. [7], [16], [17]

2.4. Lijevanje suspenzija

Lijevanje suspenzija (eng. *Slip Casting*) ili lijevanje u forme je najbolja proizvodna tehnologija za proizvodnju kompleksnih kerami kih proizvoda. Njene najvažnije prednosti su njena jednostavnost, pouzdanost, fleksibilnost, povoljna cijena i ekološka prihvatljivost te mogućnost postizanja visokog stupnja mikrostrukturne homogenosti u poluproizvodu i gotovom proizvodu, no za kvalitetno provođenje procesa važno je imati znanje o ponašanju koloidnih suspenzija. Sam postupak lijevanja suspenzija, prikazan na slici 10, sastoji se od ulijevanja suspenzije kerami kih prahova i vode u porozni kalup od gipsa. Nakon ulijevanja suspenzije porozni gipsani kalup apsorbira vodu i tako formira kruti sloj uz stjenku kalupa. Postoje dvije vrste proizvoda koje se mogu dobiti, a to su:

- 1) šuplji proizvodi – višak suspenzije se izlije iz kalupa nakon što se formira kruti sloj na stjenki
- 2) puni proizvodi – nakon što prođe dovoljno dugo vremena cijela masa unutar kalupa se skruti [16], [18], [19]



Slika 10. Postupak lijevanja suspenzije [16]

2.5. Stabilnost suspenzija

Kako bi se osigurala homogenost svojstava kerami kog poluproizvoda i gotovog proizvoda potrebno je osigurati stabilnost suspenzije. Stabilnost suspenzije ostvaruje se disperzijom estica kerami kog praha, tj. onemogućavanjem interakcija između estica kerami kog praha. Takav disperzni sustav jest koloidna otopina ije su estice manje nego u grubim disperzijama, ali i veće nego u molekularnim otopinama, što se vidi u tablici 4. Na nastajanja koloida su kondenzacijom molekularnih otopina ili disperzijom većih estica. Svojstva koloida određuju se prema interakcijama na površini estice. Većom površinom estica ostvaruje se veća interakcija među esticama.

Tablica 4. Disperzije krutih tvari u kapljevinama [20]

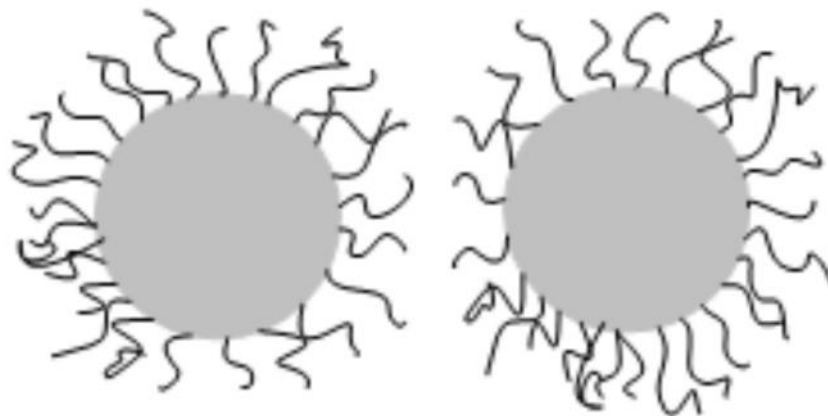
Grube disperzije	Koloidne otopine	Molekularne otopine
estice veće od 0,1 μm estice vidljive mikroskopom estice ne prolaze kroz filter papir Ne difundiraju Ne dijaliziraju Brzo sedimentiraju Mutne su	estice od 0,001 μm do 0,1 μm estice vidljive ultra – mikroskopom estice prolaze kroz filter papir Ne difundiraju Ne dijaliziraju Sporo sedimentiraju Opalziraju ili su bistre	estice su manje od 0,001 μm estice nevidljive ultra – mikroskopom estice prolaze kroz filter papir Dobro difundiraju Dobro dijaliziraju Ne sedimentiraju Bistre su

Nestabilnost koloida nastupa zbog njihove velike površine i visoke Gibbsove energije. Srastanjem koloida u nakupine koje padaju na dno u obliku taloga (sedimentacija) ili dizanjem na površinu u obliku uljnog sloja nastoje se te nestabilnosti uravnotežiti, što kao posljedicu ima nehomogena područja u kerami kom materijalu a samim time i heterogena svojstva kona nog proizvoda. Disperzantima se ostvaruje bolja disperzija estica, time se postiže niža viskoznost suspenzije što omogućava bolje popunjavanje kalupa i ujedno smanjuje nakupljanje estica (aglomeracija) i sedimentacija. Disperzanti pravilno raspršuju estice praha u vodi koje se prilikom sušenja pravilno gusto slažu i time ostvaruju dobra svojstva kerami kog proizvoda. Mehanizmi stabilizacije na kojima se temelji djelovanje disperzanata su sterička stabilizacija, elektrostatika stabilizacija i elektrosterička stabilizacija. Za ispitivanje stabilnosti koriste se reološka ispitivanja (mjerjenje viskoznosti i pH vrijednosti) i sedimentacijski testovi (mjerjenje veličine estica i zeta potencijala).[20], [21]

2.5.1. Sterična stabilizacija

Sterična stabilizacija koloidnih otopina, prikazana na slici 11, ostvaruje se polimernim molekulama disperzanta koje se na površinu estica vežu cijepljenjem ili kemisorpcijom. Adsorbirane molekule disperzanta drže koloidne estice na udaljenosti na kojoj Van der Waalsove privlačne sile ne mogu uzrokovati međusobno privlačenje estica, a samim time i stvaranje koagulata. U trenutku kada se estice s adsorbiranim polimernim slojem međusobno približe na udaljenost koja je manja od dvostruke debljine adsorbiranog polimernog disperzantnog sloja, interakcija započinje između ta dva sloja.

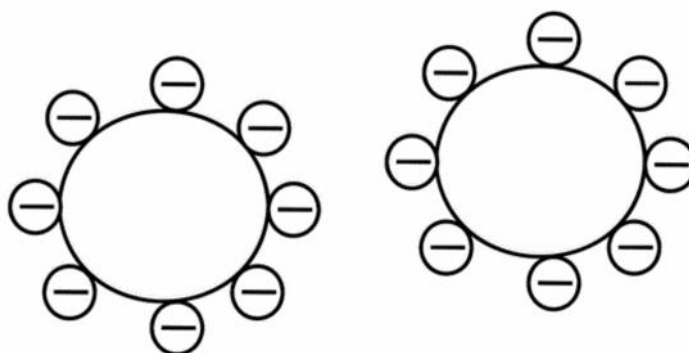
Za postizanje stabilne suspenzije udio disperzanta mora biti optimalan. U slučaju nedovoljne količine disperzanta postoji opasnost od nastajanja aglomerata, a u slučaju previsoke količine disperzanta polimerni lanci se petljaju i time gube svoju funkciju. Glavni nedostaci sterične stabilizacije su sama cijena disperzanta i opasnost od deformacije materijala zbog izgaranja ili hlapljenja disperzanta pri visokim temperaturama sinteriranja. [17], [22]



Slika 11. Sterična stabilizacija [22]

2.5.2. Elektrostatika kao stabilizacija

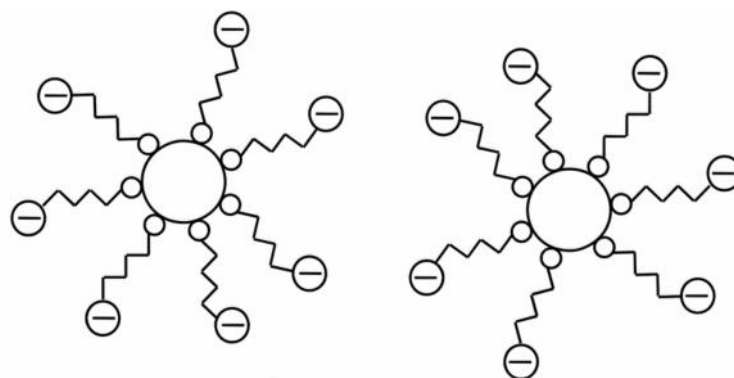
Elektrostatika kao stabilizacija, prikazana na slici 12, temelji se na stvaranju električnog dvosloja. Dodavanjem novih grupa iona formira se nabijeni sloj te se ioni adsorbiraju na površinu estica keramičkog praha. Jednak broj protuiona sa suprotnim nabojem okružuje estice i time osiguravaju njihovu elektroneutralnost i formiraju neutralni dvosloj. Takvi dvosloji međusobno se odbijaju i time osiguravaju stabilnost suspenzije. Nedostatak elektrostatike kao stabilizacije suspenzija je nedugotrajnost djelovanja. [23]



Slika 12. Elektrostatika kao stabilizacija [17]

2.5.3. Elektrosterična stabilizacija

U današnje vrijeme najčešće upotrebljavana metoda stabilizacije je elektrosterična. Elektrosterična stabilizacija, prikazana na slici 13, kao što i samo ime sugerira je kombinacija sterične i elektrostatike metode stabilizacija. Elektrosterični disperzanti uglavnom su polielektroliti koji adsorbiranjem na površinu estica keramičkog praha stvaraju dovoljnu razliku potencijala da omogućuju odbijanje međustica. Polielektrolit korišten kao disperzant u eksperimentalnom dijelu, Dolapix CE-64, je vodena otopina amonijeve soli polimetakrilne kiseline. [23]



Slika 13. Elektrosteri ka stabilizacija [17]

2.6. Reologija

Reologija je dio fizike koji proučava tečenje materijala, tj. deformacije materijala koje se s vremenom neprestano povećavaju zbog naprezanja koja djeluju na materijal. Reologija obuhvaća proučavanje strujanja viskoznih tekućina, te deformacije koloida koje odstupaju od klasičnih zakona hidrodinamike i elastodinamike (plastičnost, tiksotropija itd.). Proučavanje reoloških svojstava ima veliku važnost jer se na osnovu reološkoga ponašanja materijala mogu stvarati zaključci o njegovoj strukturi.[24]

Osnovni pojmovi u reologiji su smično naprezanje [Pa] i kut smicanja [rad], dok su osnovni elementi reoloških modela:

- 1) Hookov element
- 2) Newtonov element
- 3) Saint–Venantov element

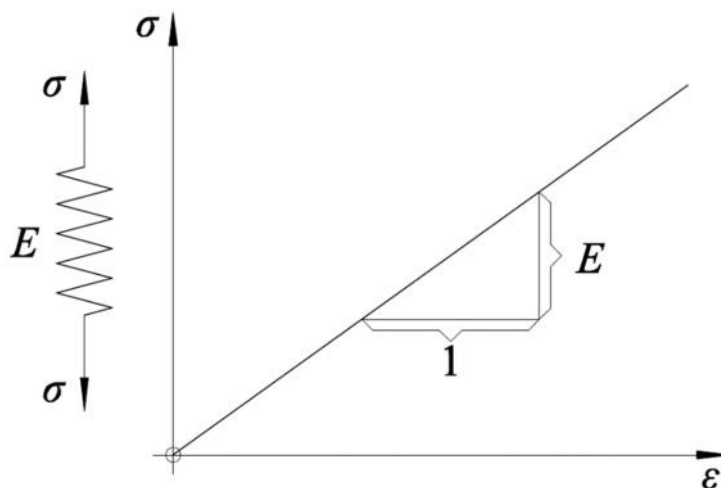
Hookov element, prikazan na slici 14, definiran je preko ponašanja idealno elastične opruge kod koje vrijedi da je deformacija proporcionalna primjenjenoj opterećenju:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

ε , % - osna deformacija

σ , N/m² – naprezanje

E , N/m² – Youngov modul elastičnosti



Slika 14. Hookov element [25]

Prema Hookovom elementu za idealno elasti no tijelo pretpostavlja se da deformacija nastaje trenutačno i sa kona nim iznosom, te se nakon uklanjanja optere enja tijelo vra a u prvobitni položaj. Za idealno elasti no tijelo prema Hookovom zakonu pri smiku vrijedi:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

, Pa – smi no naprezanje

G , Pa – Coulombov modul smi nosti

, rad – kut smicanja

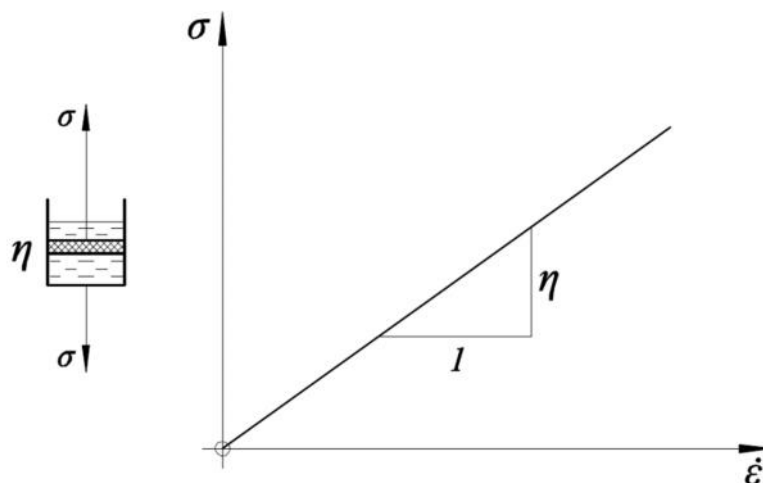
Newtonov element, prikazan na slici 15, opisan je prigušnim elementom, kojeg karakterizira idealna viskoznost, tj. brzina deformacije koja je proporcionalna primjenjenom optere enju:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} \rightarrow \varepsilon(t) = \frac{\sigma \cdot t}{\eta}$$

$\dot{\varepsilon}$, N/m^2 – brzina deformacije (prva derivacija deformacije)

, $N \cdot s/m^2$ – dinami ka viskoznost

, N/m^2 – naprezanje



Slika 15. Newtonov element [25]

Ponašanje Newtonovog elementa povezano je sa viskoznošću η , koja opisuje otpor materijala pri promjeni naprezanja. Nakon micanja opterećenja na elementu ostaje trajna deformacija. Fluidi koji se ponašaju na ovaj način nazivaju se Newtonski fluidi i za njih vrijedi prijenos smičnog naprezanja sa sloja na sloj fluida prema jednadžbi:

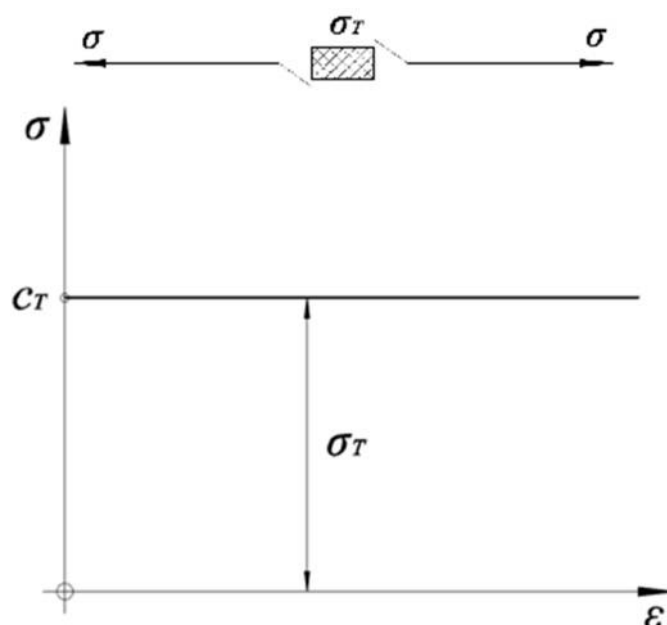
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \text{ ili } \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

τ , Pa – smično naprezanje

$\dot{\gamma}$, 1/s – smična brzina

η , $mPa \cdot s$ – dinamička viskoznost

Saint-Venantov element, prikazan na slici 16, temelji se na idealno kruto – plastičnom materijalu, čije je svojstvo da deformacija ne nastaje dok naprezanje ne dostigne kritičnu vrijednost.



Slika 16. Saint-Venantov element [25]

Fluidi se mogu podijeliti na Newtonske fluide i Nenevtonske fluide koji se dijele na:

- 1) dilatantne fluide
- 2) strukturno viskozne fluide
- 3) idealno plasti ne (Binghamove) fluide
- 4) neidealno plasti ne fluide

Zbog kompleksnosti ponašanja Nenevtonskih fluida jednostavni reološki elementi nedostatni su pa se za opisivanje njihovog ponašanja koriste složeni reološki elementi sastavljeni od više osnovnih elemenata. [25], [26], [27]

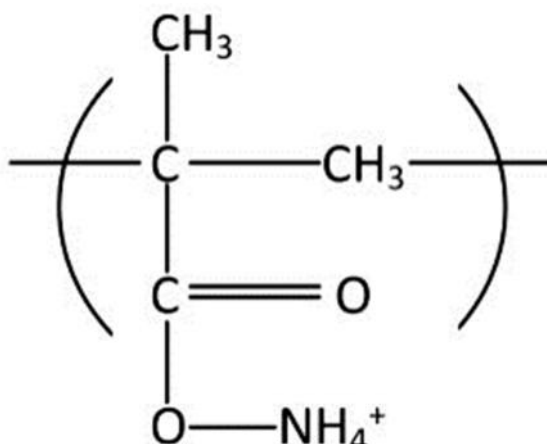
Viskozimetrija je znanstvena grana koja se bavi mjerenjem reoloških svojstava materijala. Neke od naj eš e korištenik metoda za mjerenje reoloških svojstava su:

- 1) Binghamova viskozimetrija
- 2) rotacijska viskozimetrija
- 3) kapilarna viskozimetrija
- 4) kinemati ka viskozimetrija
- 5) viskozimetar konus – plo a [17]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Sva ispitivanja i priprema uzoraka provedeni su u Laboratoriju za inženjersku keramiku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveu ilišta u Zagrebu.

Za pripremu kerami ke suspenzije korištena je destilirana voda, dvije vrste kerami kog Al_2O_3 prah visoke isto e: Al_2O_3 prah veli ine estica $0,9 \mu\text{m}$ i nano Al_2O_3 prah veli ine estica od 50 nm te disperzant Dolapix CE-64, ija je strukturna formula prikazana na slici 17.



Slika 17. Strukturna formula disperzanta Dolapix CE-64

U prvom nizu eksperimenata pripravljene su etiri 70 %-tne vodene Al_2O_3 suspenzije s razli itim udjelima mikro Al_2O_3 praha (proizvo a a Almatix GmbH, Njema ka) i nano Al_2O_3 praha (proizvo a a SkySpring Nanomaterials Inc., Houston Texas, SAD). Korišteni nano Al_2O_3 prah visoke je isto e sa masenim udjelom od 99,9% aluminijevog oksida. Sastav mikro Al_2O_3 praha prikazan je u tablici 5. Nakon homogenizacije suspenzija izmjerena im je pH vrijednost te su im odre ena reološka svojstva pomo u rotacijskog viskozimetra.

Tablica 5. Sastav korištenog Al₂O₃ praha

komponenta	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃
w, %	0,09	0,0147	0,0361	0,0721	0,0300	ostatak

Sve suspenzije sadrže 70% Al₂O₃ praha, a to na masa potrebna za pripremanje suspenzija izra unata je prema izrazu:

$$w(\text{Al}_2\text{O}_3) = \frac{m(\text{Al}_2\text{O}_3)}{m(\text{Al}_2\text{O}_3) + V(\text{voda})}$$

za $V(\text{voda}) = 120 \text{ mL}$ i $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 70\%$

Izra unato je da je potrebno 280 g Al₂O₃ praha za pripremu suspenzija.

Masa mikro i nano praha za svaku suspenziju dan je u tablici 6.

Tablica 6. Mase mikro i nano Al₂O₃ praha u suspenzijama

$m(\text{Al}_2\text{O}_3)$, g	suspenzija bez nano praha	suspenzija s 1% nano praha	suspenzija s 5% nano praha	suspenzija s 10% nano praha
$m(\text{mikro Al}_2\text{O}_3)$, g	280	277,2	266	252
$m(\text{nano Al}_2\text{O}_3)$, g	0	2,80	14,0	28,0

Vaganje mikro i nano praha prikazani su na slikama 18 i 19.

Slika 18. Vaganje mikro Al_2O_3 prašaSlika 19. Vaganje nano Al_2O_3 praša

Za osiguravanje stabilnosti suspenzije korišten je polielektrolitni disperzant Dolapix CE-64, prikazan na slici 20. Prema kemijskom sastavu Dolapix CE-64 je amonijeva sol polimetakrilne kiseline.



Slika 20. Korišteni disperzant Dolapix CE–64

Udio disperzanta je 0,4% za sve četiri suspenzije, a potrebna masa disperzanta izra unata je prema izrazu (maseni udio disperzanta izražen je preko ukupne mase Al_2O_3):

$$m(\text{disperzant}) = \frac{m(Al_2O_3) \cdot w(\text{disperzant})}{100}$$

za $m(Al_2O_3) = 280 \text{ g}$ i $w(\text{disperzant}) = 0,4\%$

Izra unata je potrebna masa disperzanta od 1,12 g za stabiliziranje suspenzija. Vaganje disperzanta prikazano je na slici 21.



Slika 21. Vaganje disperzanta Dolapix CE-64

U tablici 7. prikazan je sastav pripremljenih suspenzija.

Tablica 7. Sastav 70%-tnih Al_2O_3 vodenih suspenzija

skupina uzoraka (suspenzija)	w (suhe tvari), %	w (H_2O), %	w (sastav kerami kog praha), %	w (disperzanta)*, %
1	70	30	100% mikro Al_2O_3	0,4
2	70	30	99% mikro Al_2O_3 + 1% nano Al_2O_3	0,4
3	70	30	95% mikro Al_2O_3 + 5% nano Al_2O_3	0,4
4	70	30	99% mikro Al_2O_3 + 10% nano Al_2O_3	0,4

*prera unato na masu suhe tvari

Nakon izra unavanja i zatim vaganja potrebne mase Al_2O_3 praha i disperzanta Dolapix CE-64, komponente se stavljaju u posudu za homogeniziranje prate i odre en redosljed. Prvo se sa 120 mL destilirane vode disperzant ispire iz metalne posudice u kojoj je vagan, a zatim se u posudu postepeno dodaje Al_2O_3 prah uz konstantno miješanje staklenim štapi em. U posudu za homogeniziranje nakon dovoljnog miješanja, prikazano na slici 22, dodaju se kerami ke kuglice od istog materijala kao i keramika koja se prire uje, u ovom slu aju aluminij oksidna keramika. Kuglice moraju biti od istog materijala kao i smjesa kako nebi došlo do kontaminacije smjese zbog trošenja kuglica prilikom udaranja o stijenke posude za homogenizaciju.

Posuda za homogeniziranje sa pripremljenom smjesom i dodanim kerami kim kuglicama stavlja se u planetarni kugli ni mlin PM 100 (Retsch GmbH, Njema ka), prikazan na slici 23. Parametri homogenizacije uneseni u mlin su: vrijeme homogenizacije u trajanju od 90 minuta i brzina vrtnje u iznosu od 300 okretaja u minuti.



Slika 22. Promiješana smjesa destilirane vode, Al_2O_3 praha i disperzanta



a)

b)

Slika 23. a) Planetarni kugli ni mlin Retsch PM 100 (pogled iznutra) b) uneseni parametri

Po završetku homogenizacije, kerami ke su kuglice filtracijom odvojene od suspenzije. Nakon toga je uslijedio tretman u ultrazvu noj kupelji BRANSONIC 220 u trajanju od 15 minuta te odre ivanje pH vrijednosti na pH-metru Mettler Toledo FE20/EL20 . Dio svake suspenzije (oko 10 ml) odvojen je za ponavljanje reoloških mjerenja, kako bi se snimili reološki dijagrami realnih uzoraka.

Reološka svojstva suspenzija izmjerena su na rotacijskom viskozimetru Brookfield DV-III Ultra, prikazan na slici 24. Viskoznost se mjeri na na in da se vreteno viskozimetra rotira u suspenziji rastu om brzinom od $0,1 \text{ s}^{-1}$ do 180 s^{-1} , a zatim usporava od 180 s^{-1} do 0 s^{-1} u 100 jednakih intervala. Pri svakoj brzini uzorak se zadržava 3 sekunde, a viskoznost se o itava neposredno prije svake promjene brzine. Viskoznost se ra una preko izmjerenog otpora koji suspenzija pruža vretenu pri rotaciji vretena.



Slika 24. Viskozimetar Brookfield DV-III Ultra

4. REZULTATI I RASPRAVA

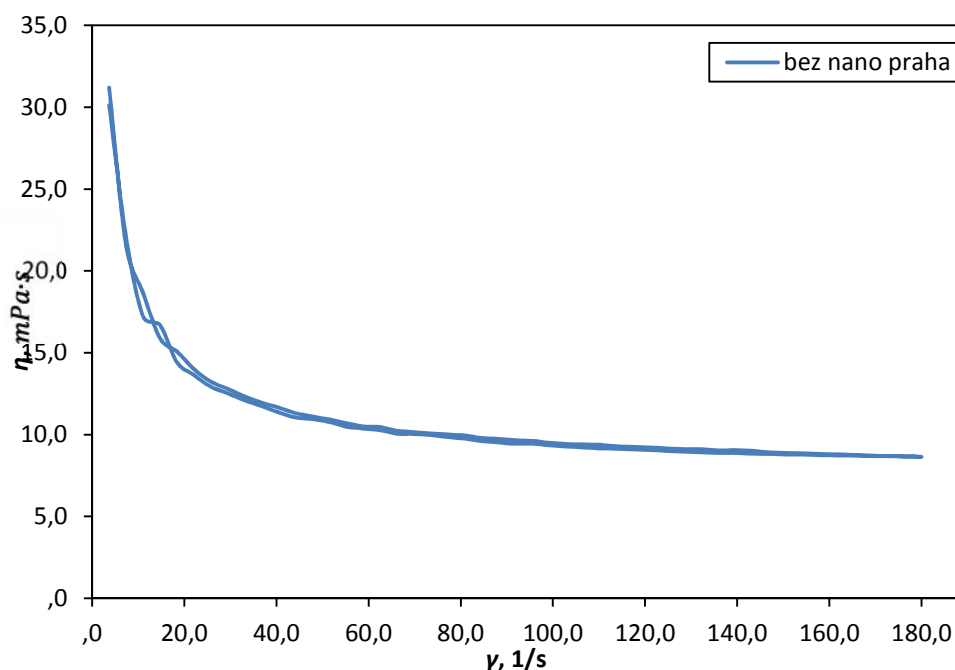
Mjerenjem pH vrijednosti dobivene su vrijednosti prikazane u tablici 8.

Tablica 8. Izmjerene pH vrijednosti pripremljenih suspenzija

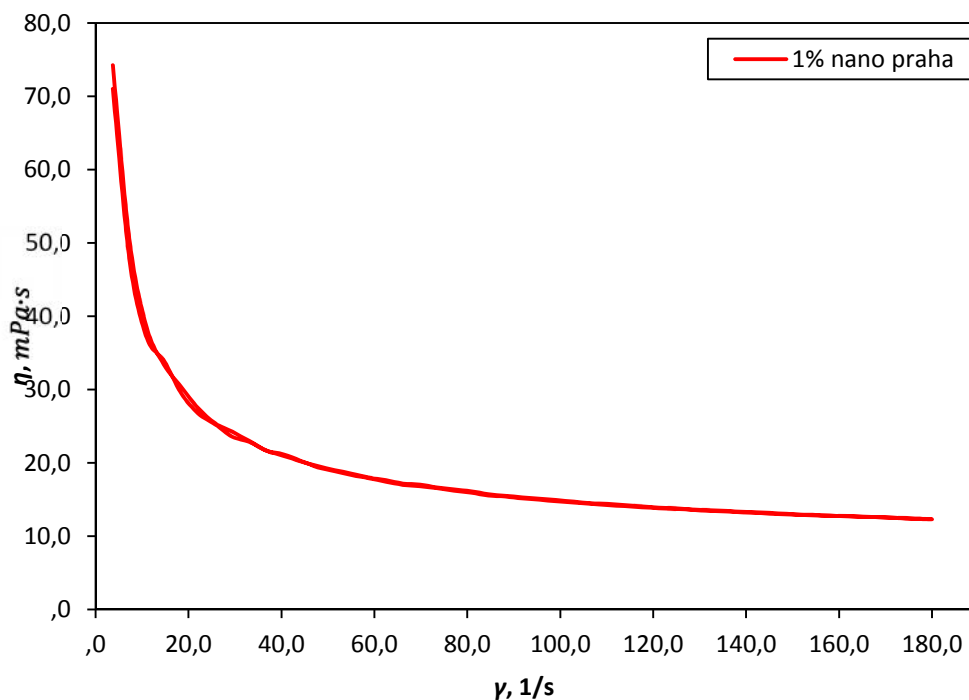
Suspenzija	bez nano praha	1% nano praha	5% nano praha	10% nano praha
pH vrijednost	8,56	8,62	8,59	8,61

Bazi nost suspenzije uzrokovana je pove anjem negativnih naboja na površini estica praha pri disocijaciji disperzanta u otopini. Time se postiže ja e odbijanje estica u suspenziji. [17]

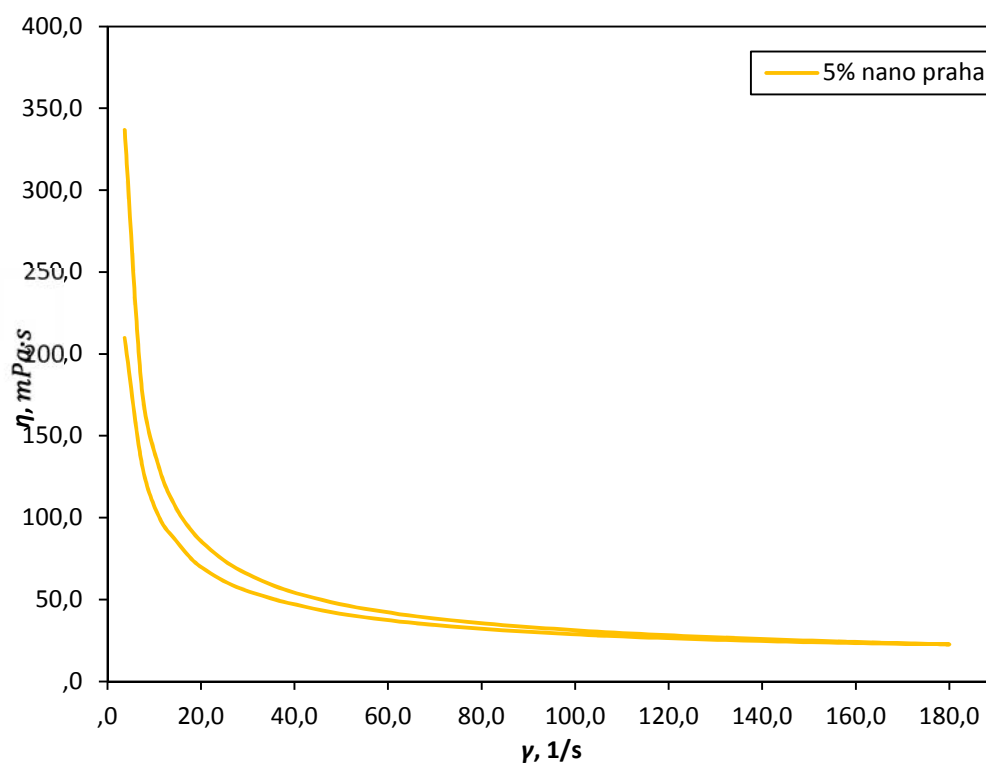
Reološkim mjerenjima, provedenim na suspenzijama sa razli itim udjelom nano Al_2O_3 praha, dobiveni su rezultati prikazani na dijagramima ovisnosti viskoznosti o brzini smicanja, vidljivi na slikama 25, 26, 27 i 28 za svaku suspenziju pojedino, te na slici 29 za sve etiri suspenzije zajedno i dijagramima ovisnosti smi nog naprezanja o brzini smicanja, prikazanima na slikama 30, 31, 32 i 33 tako er za svaku suspenziju pojedino dok je na slici 34 prikazan dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o brzini smicanja za sve etiri suspenzije zajedno.



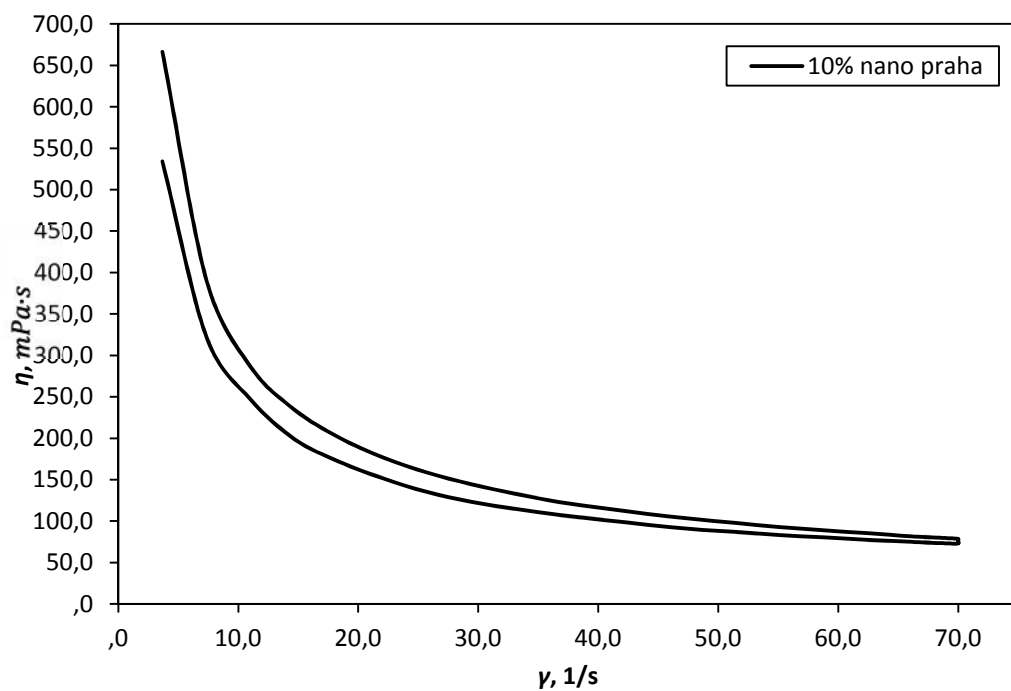
Slika 25. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju bez dodatka nano praha



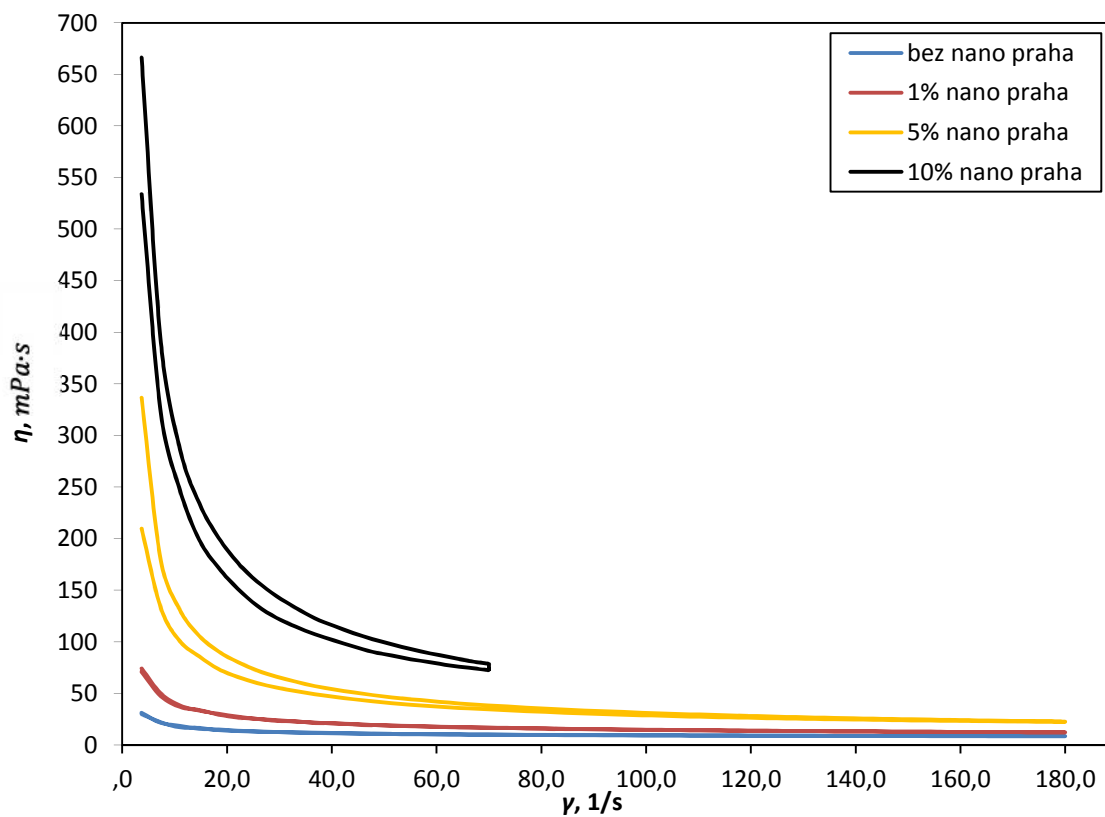
Slika 26. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha



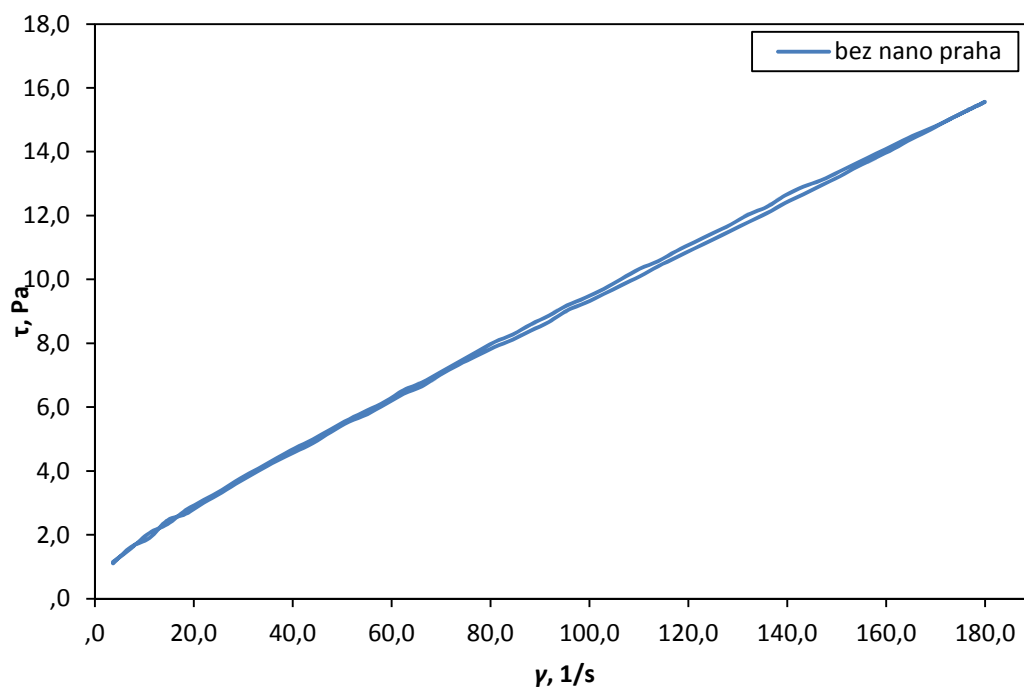
Slika 27. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha



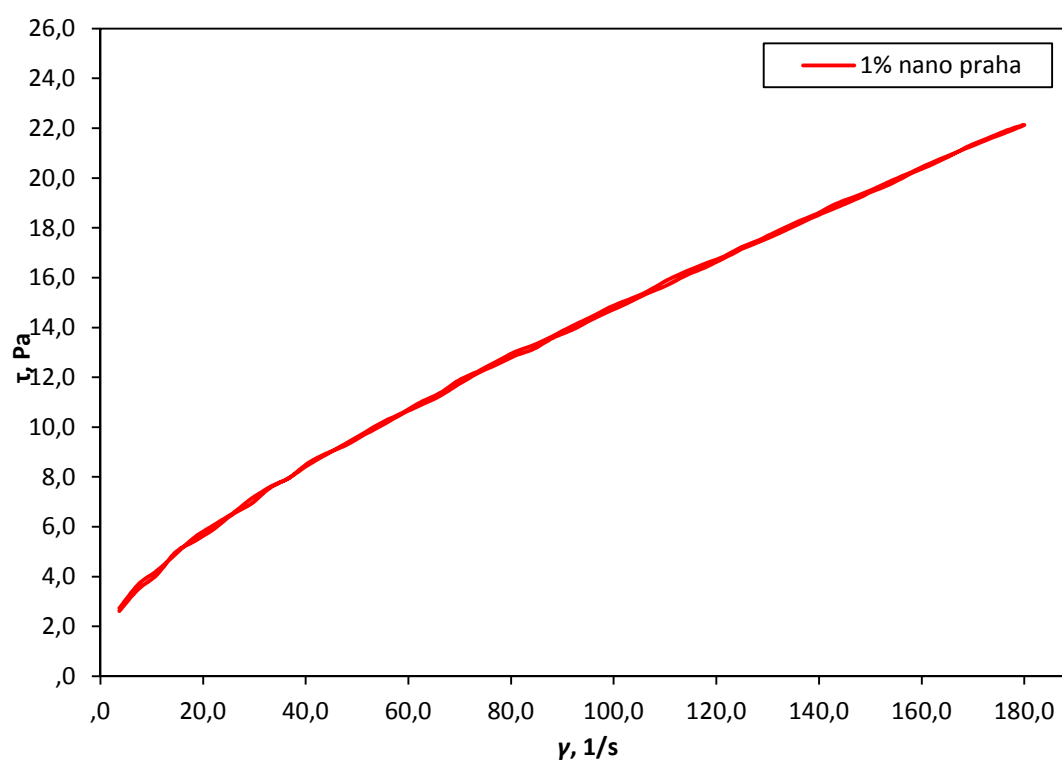
Slika 28. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 10% nano praha



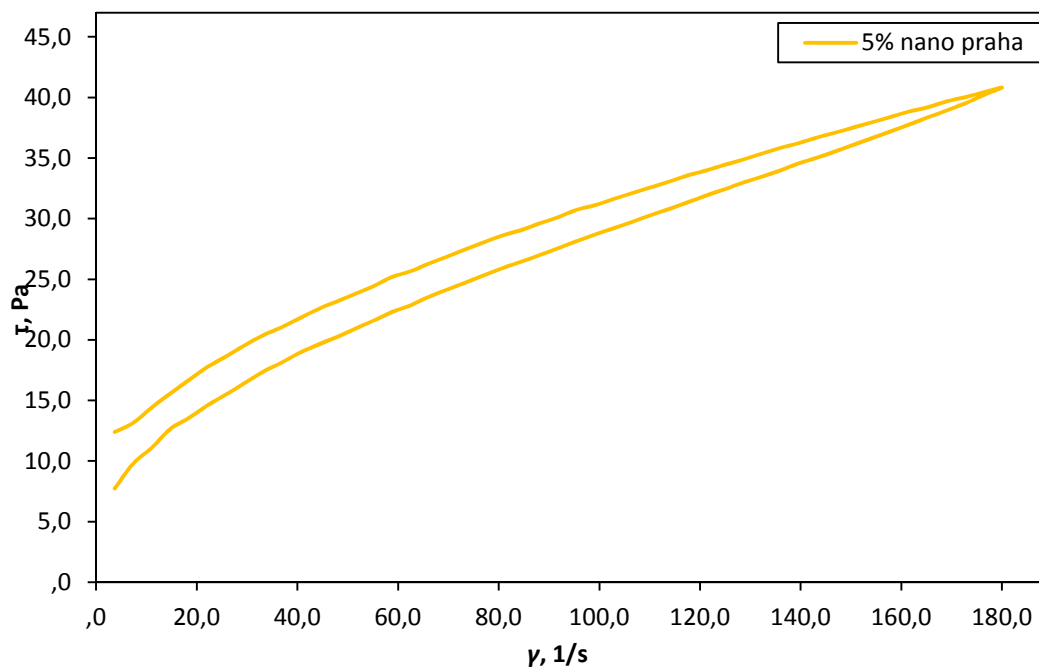
Slika 29. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smi noj brzini za sve etiri 70%-tne Al_2O_3 vodene suspenzije



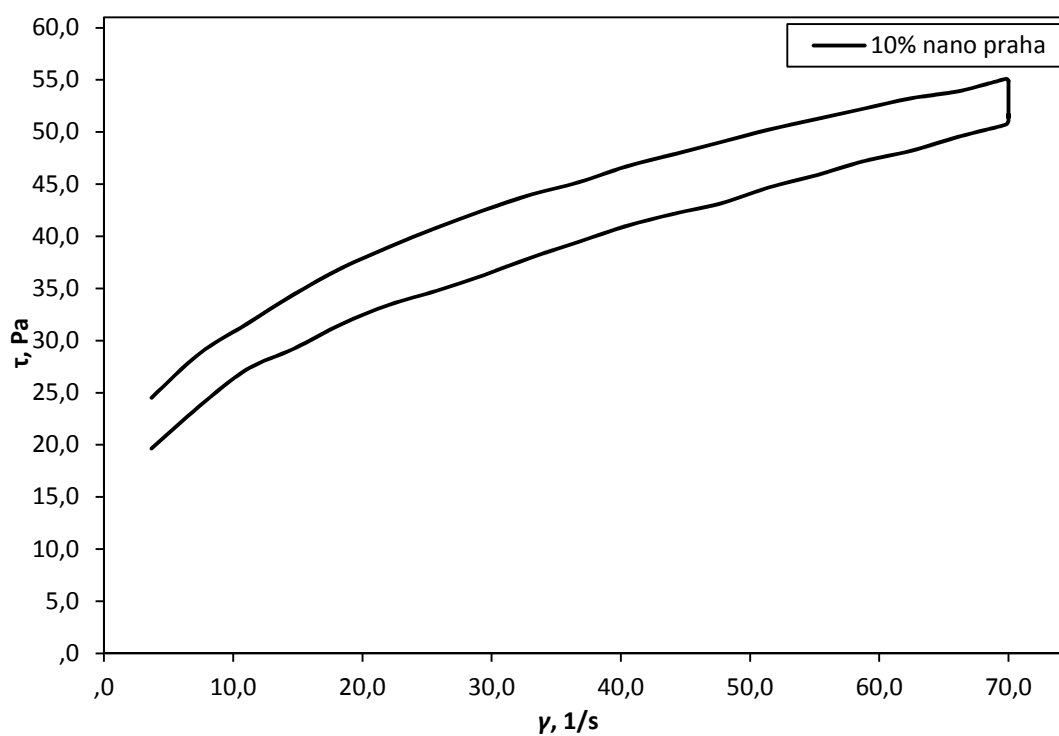
Slika 30. Dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju bez dodatka nano praha



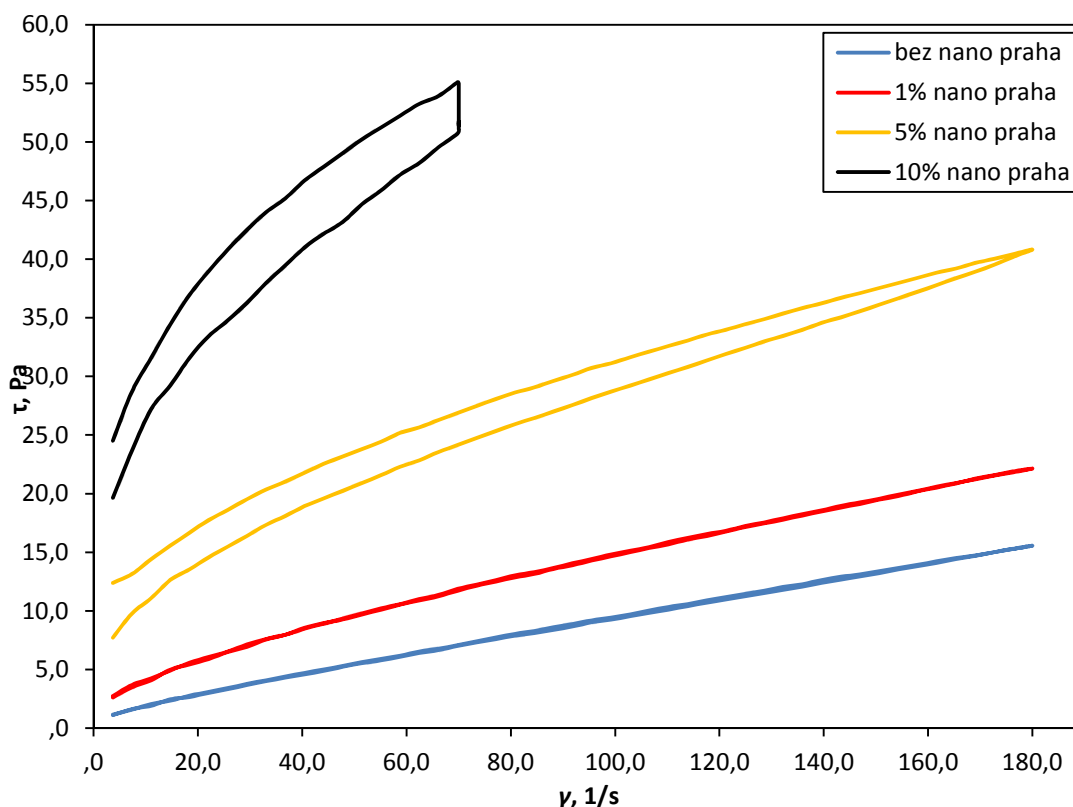
Slika 31. Dijagram ovisnosti smi nog naprezanja o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha



Slika 32. Dijagram ovisnosti smi nog napreznaja o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha



Slika 33. Dijagram ovisnosti smi nog napreznaja o smi noj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 10% nano praha



Slika 34. Dijagram ovisnosti smi nog napreznja o smi noj brzini za sve etiri 70%-tne Al_2O_3 vodene suspenzije

Pri reološkim mjerenjima sve etiri skupine suspenzija pokazale su pad prividne viskoznosti s povećanjem brzine smicanja, što je vidljivo na slici 29. To ukazuje na činjenicu da ovako pripravljene suspenzije pripadaju skupini Nenevtonskih fluida. Smi no napreznje povećava se povećanjem brzine smicanja, što također potvrđuje pripadnost skupini Nenevtonskih fluida i vidljivo je na slici 34.

Iz dijagrama na slikama 29 i 34 može se vidjeti da suspenzija bez nano prahe i suspenzija sa 1% nano prahe pokazuju pseudoplastično ponašanje uobičajeno za koloidne suspenzije keramičkih Al_2O_3 prahova. S druge strane suspenzije sa 5% i 10% nano prahe ponašaju se znatno drugačije, dolazi do histereze pri smanjenju smi ne brzine, a u suspenziji sa 10% nano prahe ona ne prelazi 70 s^{-1} dok kod ostalih suspenzija dostiže 180 s^{-1} . Najmanju viskoznost i smi no napreznje posjeduje suspenzija bez nano prahe. Takve pojave posljedica su puno veće ukupne površine nano estica i zbog toga veće interakcije među esticama, koju količina disperzanta optimalna za suspenziju bez nano estica ne može spriječiti. U daljnjim istraživanjima utjecaja dodatka nano Al_2O_3 prahe na reološka svojstva suspenzija koje sadrže mikro Al_2O_3 prah, udio disperzanta treba biti promijenjen.

5. ZAKLJUČAK

Reološka mjerenja (krivulje tečenja) provedena su na četiri 70% - tne Al_2O_3 suspenzije s različitim udjelima nano Al_2O_3 praha. Maseni udjeli nano praha bili su 0%, 1%, 5% i 10%. Sve suspenzije stabilizirane su sa 0,4% disperzanta Dolapix CE-64.

Na temelju dobivenih rezultata mjerenja reoloških svojstava može se zaključiti:

- 1) Suspenzija koja ne sadrži nano Al_2O_3 prah pri brzini smicanja od 50 s^{-1} , koja odgovara gravitacijskom lijevu, ima najnižu viskoznost ($\eta = 10,9292 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)
- 2) Povećanjem udjela nano Al_2O_3 praha dolazi do porasta viskoznosti i smičnog naprežanja, te ponašanja suspenzije koje odstupa od uobičajenog, uzrokovanog većom interakcijom između čestica nano Al_2O_3 praha.

Ovim istraživanjem utvrđeno je da dodatak nano Al_2O_3 praha u suspenziju mikro Al_2O_3 praha stabiliziranu s 0,4% disperzanta Dolapix CE-64 ima velik utjecaj na viskoznost suspenzije, tj. povisuje ju što nije povoljno za oblikovanje keramike lijevanjem suspenzija. U sljedećim ispitivanjima treba odrediti optimalan udjel disperzanta za suspenzije koje sadrže dodatak nano Al_2O_3 praha.

LITERATURA

- [1] <https://korak.com.hr/korak-009-ozujak-2005-povijest-i-tehnologija-keramike/>, [kolovoz 2019.]
- [2] <https://www.nytimes.com/2012/07/03/science/oldest-known-pottery-found-in-china.html> [kolovoz 2019.]
- [3] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=31230> [kolovoz 2019.]
- [4] Dizdarevi M. Primjena keramike u mašinskoj industriji [seminarski rad iz Novih materijala]. Biha : Tehni ki fakultet Biha ; 2009.
- [5] <https://www.coorstek.com/english/industries/chemicals/labware/> [kolovoz 2019.]
- [6] Filetin T, Kova i ek F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2002.
- [7] Matijevi B. Materijali 2 - Nemetalni materijali: keramika – interne podloge za predavanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [8] urkovi L. Kemijska postojanost materijala: Kemijska postojanost keramike – interne podloge za predavanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.
- [9] Filetin T, Kramer I. Tehni ka keramika – Priru nik za primjenu [prijevod djela Brevier Technische Keramik]. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju; 2004.
- [10] http://www.morgantechnicalceramics.com/en-gb/materials/alumina/?gclid=EAIaIQobChMIu5i63sao5AIVC6WaCh3r3wYWEAAAYAiAAEgLi1fD_BwE [kolovoz 2019.]
- [11] https://www.touchdown.com.tw/en/product/Precision-Ceramic-Aluminium-Oxide-Zirconia-Screw-Thread-Nut/precision-ceramic_aluminium-oxide_zirconia_screw-thread_nut.html [kolovoz 2019.]
- [12] Župeti R. Reološka svojstva i steri ka stabilizacija aluminij oksidne keramike [diplomski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2013.

- [13] http://www.keramverband.de/brevier_engl/3/4/2/3_4_2.htm [kolovoz 2019.]
- [14] <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Aluminum-oxide#section=Other-Experimental-Properties> [kolovoz 2019.]
- [15] <http://hr.ysceramicglaze.com/ceramic-raw-material/alumina-oxide/new-alumina-oxide-al2o3-aluminum.html> [kolovoz 2019.]
- [16] Dun er M. Strojarska tehnologija II – 3. Izrada kerami kih proizvoda – interne podloge za predavanja. Rijeka: Filozofski fakultet; 2009.
- [17] Briševac D. Karakterizacija Al_2O_3 suspenzija stabiliziranih polielektrolitnim disperzantom [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [18] urkovi L, Maji Renjo M, ori D, Šok evi Z, Rede V. (2017.), Slip casting of alumina ceramics. In: Begi Hadžipaši A, editor. 16th International Foundrymen Conference, Global Foundry Industry – Perspectives for the Future; Opatija, Hrvatska, 15.05.-17.05. 2017. Sisak: Metalurški fakultet; 2017.
- [19] Sever I, urkovi L, Žmak I. Sintering of slip cast composite $Al_2O_3 - ZrO_2$ ceramics. In: 9th International Scientific and Expert Conference TEAM 2018; Novi Sad, Srbija 10.10.-12.10.2018. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [20] Andri I. Priprava stabilne suspenzije za lijevanje kompozitne keramike [rad nagra en Rektorovom nagradom]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.
- [21] Lali M, urkovi L. Utjecaj sadržaja Darvana na reološke karakteristike 70% - tne Al_2O_3 suspenzije. In: Schauerl Z, Šnajdar M, editors. International conference on materials, tribology, recycling, MATRIB 2010; Vela Luka, Hrvatska, 23.06.-25.06.2010. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2010.
- [22] Župeti R. Steri ka stabilizacija Al_2O_3 suspenzija [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.
- [23] Sever I, Žmak I, urkovi L, Švigelj Z. Stabilization of highly concentrated alumina suspensions with different dispersants. Transactions of FAMENA, 2018; 42(3):61-70
- [24] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=52475> [kolovoz 2019.]

- [25] https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_14._predavanje_Reologija_stijenskog_materijala.pdf [kolovoz 2019.]
- [26] Maji Renjo M, Lali M, urkovi L, Matijaševi G. Rheological properties of aqueous alumina suspensions. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2012;43(11):979–983.
- [27] Sarraf H, Havrda J. Rheological behavior of concentrated alumina suspension: Effect of electrosteric stabilization. *Ceram - Silikaty*. 2007;51(3):147–52.