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: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb









Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Reološka svojstva koloidnih suspenzija koje sadrže mikro/nano Al_2O_3 prah

Stjepan Družinec

Zagreb, 2019



Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Reološka svojstva koloidnih suspenzija koje sadrže mikro/nano Al_2O_3 prah

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Lidija Ćurković 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 mico/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.

Zadatak zadao:

Lidija Ćurković

Prof. dr. sc. Lidija Ćurković

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.

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer

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, koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija. Ovom prilikom zahvaljujem se prof. dr. sc. Lidiji Ćurković, i mag. appl. chem. Ivani Sever, na stručnoj pomoći 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. Tehnička keramika.....3

2.2. Aluminij oksidna keramika - Al_2O_3.....5

2.3 Proizvodnja keramike.....8

2.4. Lijevanje suspenzija.....11

2.5 Stabilnost suspenzija.....12

2.5.1. Sterička stabilizacija.....13

2.5.2. Elektrostatička stabilizacija.....14

2.5.3. Elektrosterička stabilizacija.....14

2.6. Reologija.....15

3. EKSPERIMENTALNI DIO.....19

4. REZULTATI I RASPRAVA.....27

5. ZAKLJUČAK.....33

LITERATURA.....34

POPIS SLIKA

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

Slika 2. Keramički 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. Aluminij oksidni prah [15].....7

Slika 6. Tijek proizvodnje keramike [16].....8

Slika 7. Kuglični mlin [16].....9

Slika 8. a) mlin sa okretnom pločom, b) mlin sa valjcima [16].....9

Slika 9. Proces sinteriranja (sraščivanja) [7].....10

Slika 10. Postupak lijevenja suspenzije [16].....11

Slika 11. Sterička stabilizacija [21].....13

Slika 12. Elektrostatička stabilizacija [17].....14

Slika 13. Elektrosterička 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_2O_3 praha i disperzanta.....24

Slika 23. a) Planetarni kuglični mlin Retsch PM 100 (pogled iznutra) b) uneseni parametri...25

Slika 24. Viskozimetar Brookfield DV-III Ultra.....26

Slika 25. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju bez dodatka nano praha.....27

Slika 26. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha.....28

Slika 27. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha.....28

Slika 28. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 10% nano praha.....29

Slika 29. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za sve četiri 70%-tne Al_2O_3 vodene suspenzije.....29

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

Slika 31. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha.....30

Slika 32. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha.....31

Slika 33. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju sa dodatkom10% nano praha.....31

Slika 34. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za sve četiri 70%-tne Al_2O_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_2O_3 praha.....20

Tablica 6. Mase mikro i nano Al_2O_3 praha u suspenzijama.....20

Tablica 7. Sastav 70%-tnih Al2O3 vodenih suspenzija.....23

Tablica 8. Izmjerene pH vrijednosti pripremljenih suspenzija.....27

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ε	%	osna deformacija
σ	N/m^2	naprezanje
E	N/m^2	Youngov modul elastičnosti
τ	Pa	smično naprezanje
G	Pa	Coulombov modul smičnosti
γ	s^{-1}	brzina smicanja
$\dot{\varepsilon}$	N/m^2	brzina deformacije (prva derivacija deformacije)
ρ	$Pa \cdot s$	plastična viskoznost
η	$mPa \cdot s$	dinamička 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) čisti 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

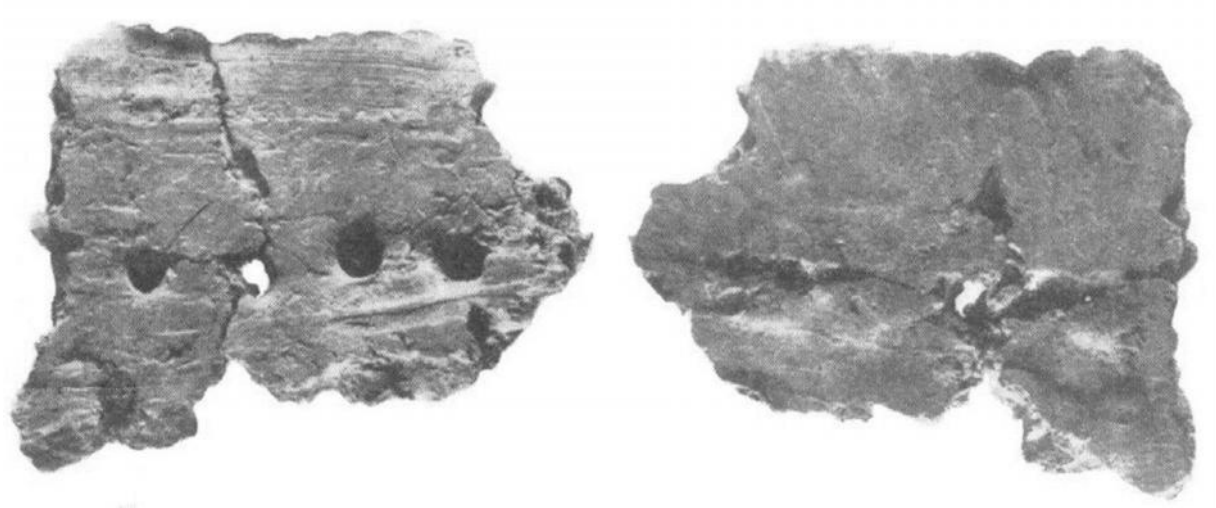
In this paper the influence of varying amounts of nano Al_2O_3 powder on rheological properties of micro Al_2O_3 powder suspensions is described.

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 supenson 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

Riječ keramika proizašla je iz imena gradića smještenog u blizini Atene, zvanog Cerami, u kojemu su lončari izrađivali keramičke predmete. Starogrčka riječ “keramos“ je isprva označavala rog za piće, a kasnije i glinu, a zatim i lončarske 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 pečene gline kojima se pripisuju starost od 13.000 godina. U Engleskoj, Belgiji i Njemačkoj pronađene su posude od pečene 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 neolitiku na sjevernim područjima te na jadranskoj obali i u njezinu zaleđu. Od 15. st. postojali su podatci o lončarskim obrtima u Zagrebu i Ivanić – Gradu. Počeci moderne hrvatske keramike vezani su uz Obrtnu školu u Zagrebu, gdje je 1884. bio otvoren Odjel za lončariju i pećariju. Keramika je imala veliku ulogu u pokretanju industrijskog razvoja, a primjena keramike u tehnici, koju danas poznajemo, započinje 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 vučenje i vođenje 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 svojstava i jednostavnost proizvodnje glavni su razlozi primjene keramike. Povoljna svojstva keramike su: visoka tvrdoća, tlačna i savojna čvrstoća, 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 vlačnom čvrstoćom 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. Tehnička keramika

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

Podjela prema veličini zrna:

1) gruba keramika (veličine zrna od 0,1 mm do 0,2 mm) – tradicionalna keramika
2) fina keramika (veličine zrna manje od 0,1 mm) – tehnička 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 predočila svojstva keramičkih materijala u tablici 2 dana je usporedba svojstava keramičkih, metalnih i polimernih materijala. Iz tablice se može iščitati 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. Aluminij oksidna keramika – Al_2O_3

Aluminij 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 čistoće mogu se postići dodavanjem aditiva prilikom proizvodnje kako bi se dobila tražena svojstva keramike. Prilikom proizvodnje aluminij 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]

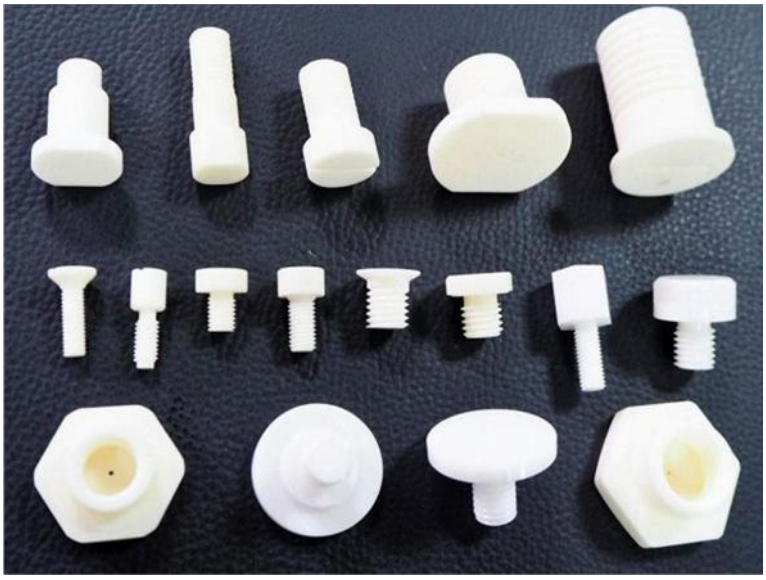
Svojstva aluminij oksidne keramike:

1) visoka čvrstoća
2) visoka tvrdoća
3) temperaturna stabilnost
4) visoka otpornost abrazijskom 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 aluminij oksidna keramika koristi se za proizvodnju:

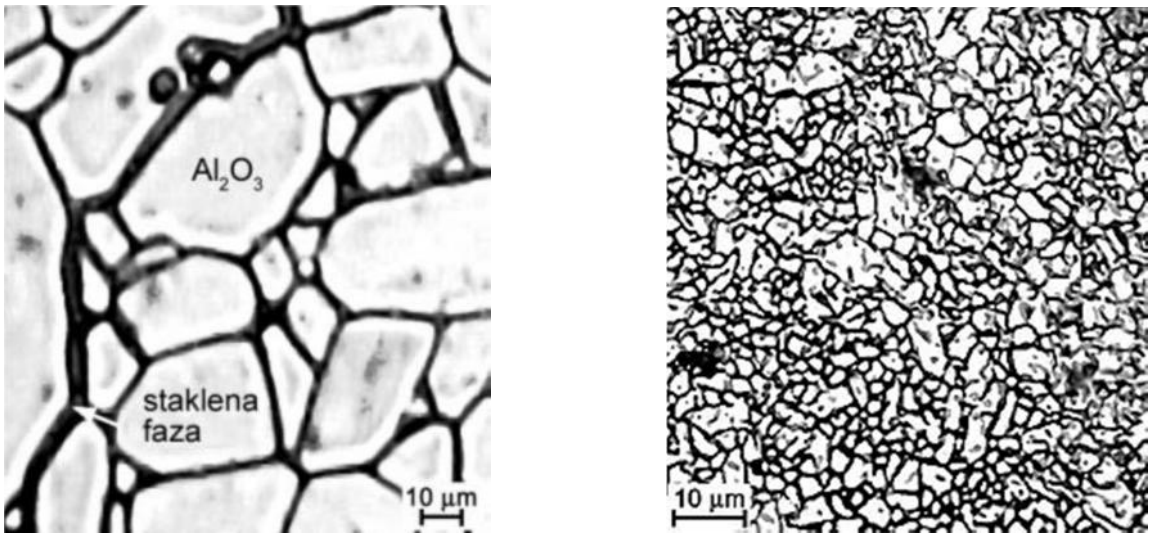
1) brtvenih elemenata u industriji sanitarija
2) proizvoda koji su u kontaktu sa visokim temperaturama, parom, talinom i troskom
3) supstrata u elektrotehnici
4) dijelova otpornih na koroziju
5) dijelova otpornih na trošenje
6) implatata u medicini

Kao primjer proizvoda od aluminij 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, korozijska i druga svojstva.[12]



a) b)

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
gustoća	3,97 g/cm^2
molarna masa	101,961 g/mol
talište	2030 ^{0}C
točka vrenja	2977 ^{0}C
tvrdoća po Knoopu	21 kN/m^2



Slika 5. Aluminij oksidni prah [15]

Osim za proizvodnju keramike aluminijev oksid koristi se kao:

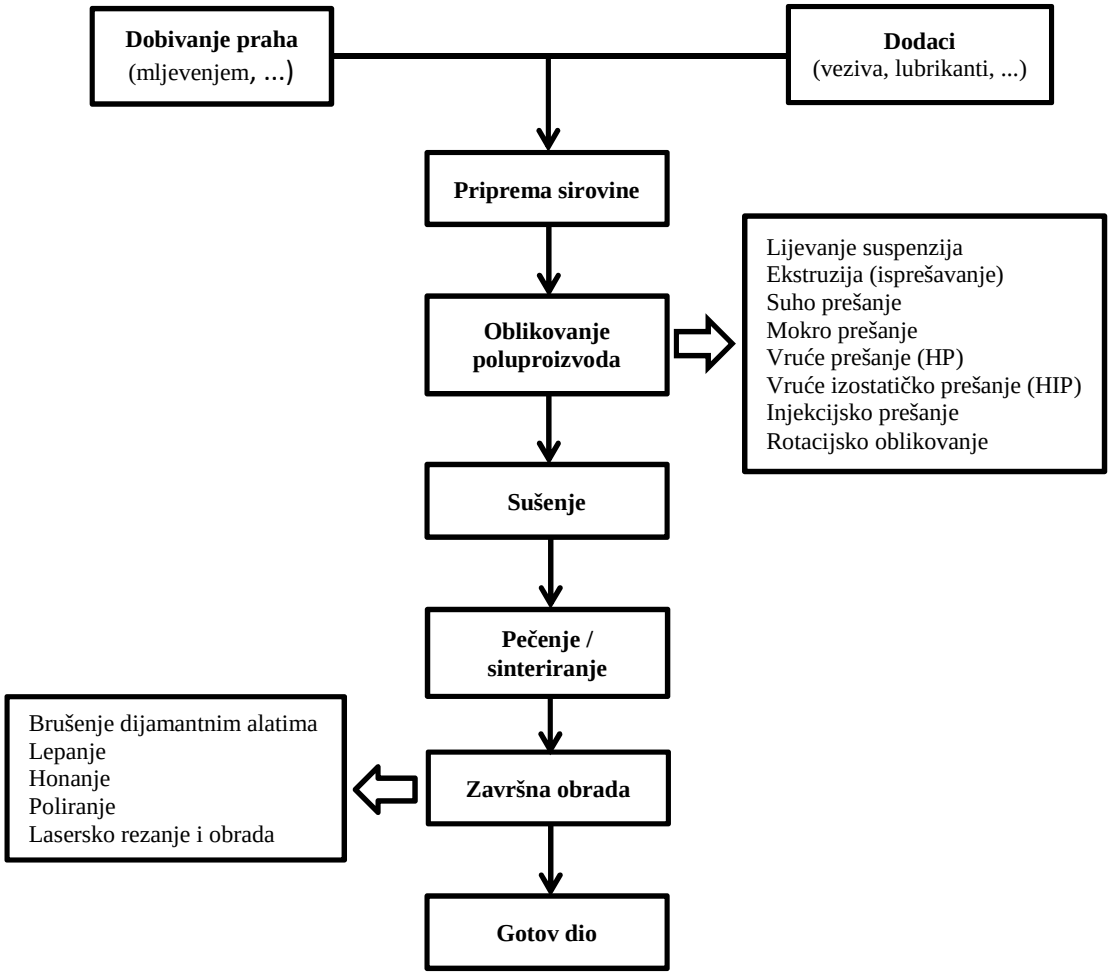
1) katalizator i nosač katalizatora
2) prašak za poliranje
3) abraziv
4) reagens u analizama
5) sirovina u taljenju aluminija
6) upijajući materijal
7) vatrostalan materijal [15]

2.3 Proizvodnja keramike

Tehnološki proces proizvodnje keramike tipično se sastoji od slijedečih koraka:

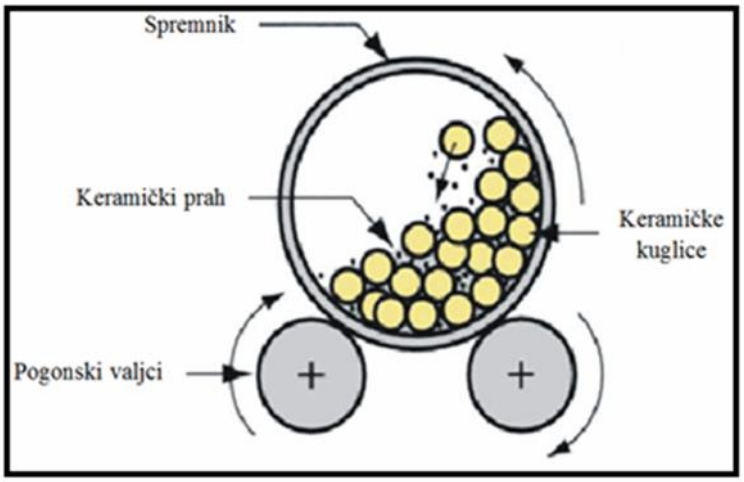
1) sinteza keramičkog praha
2) mljevenje u mlinu s kuglicama, miješanje, sušenje
3) formiranje potrebnih oblika komada (zelena keramika)
4) sjedinjavanje u gust monolitan komad sinteriranjem ili žarenjem
5) dodatni procesi (rezanje, brušenje, oblaganje)
6) završno sinteriranje

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

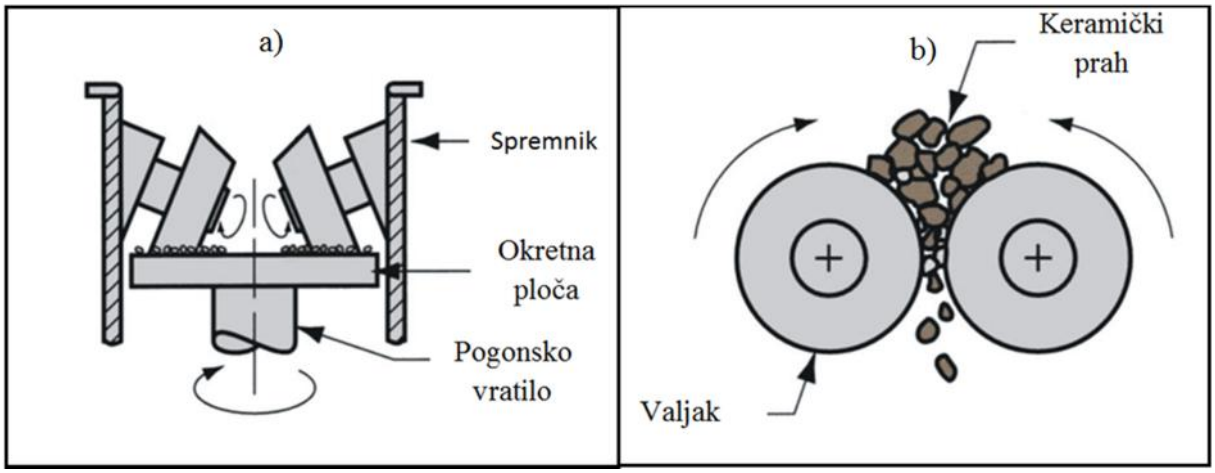


Slika 6. Tijek proizvodnje keramike [16]

Sirovina u proizvodnji keramike su prahovi čistih prirodnih minerala (oksida, karbida, nitrida,...) ili kemijski sintetiziranih elemenata metala sa kisikom, ugljikom, dušikom, silicijem i borom. Prema zahtjevima proizvodnje bira se određena čistoća, 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, očvršćivači te 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, čije 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.

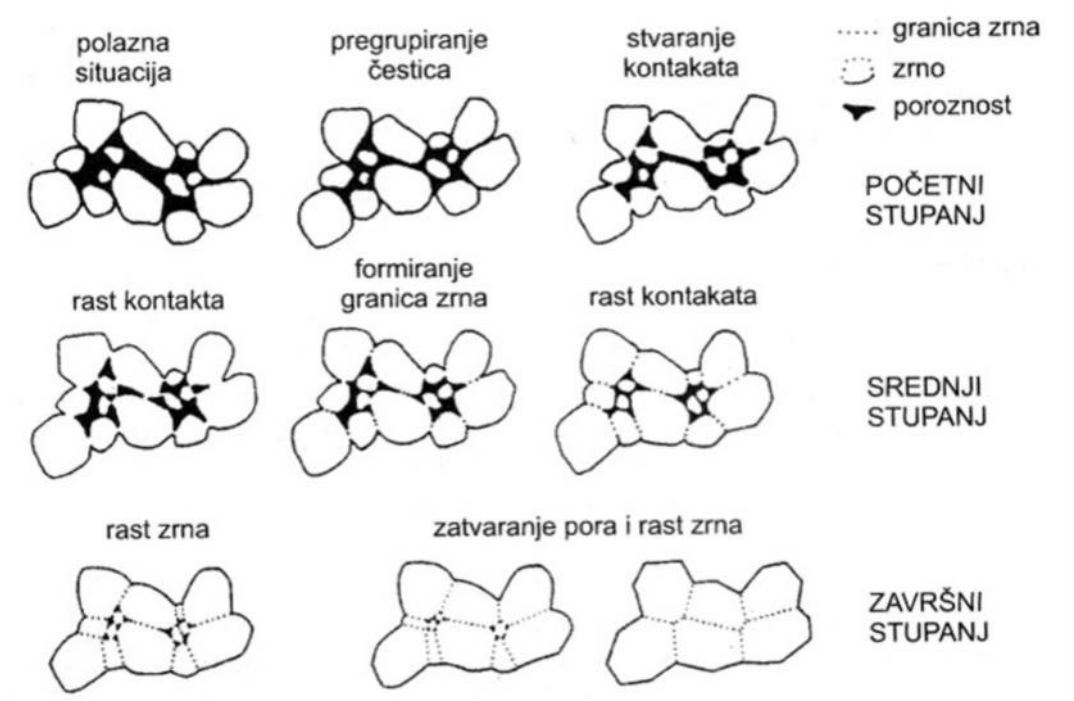


Slika 7. Kuglični mlin [16]



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

Nakom mljevenja smjesa praha i aditiva se homogenizira. Potom se spravlja smjesa u obliku suspenzije, granulata ili keramičkog tijesta, ovisno o postupku oblikovanja poluproizvoda koji je odabran. Sinteriranje (srašćivanje), prikazano na slici 9, je postupak kojim se čestice spajaju pri visokim temperaturama kako bi se smanjila poroznost. Prije sinteriranja se međutim 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 keramičkog proizvoda.



Slika 9. Proces sinteriranja (srašćivanja) [7]

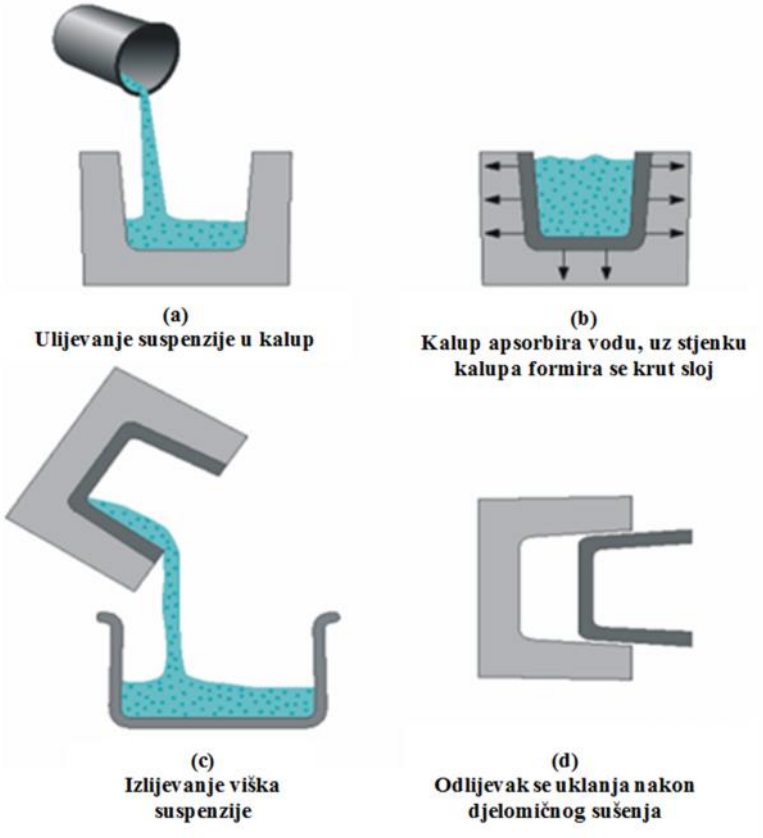
Završna obrada se izvodi nakon sinteriranja kako bi se uklonile sve nesavršenosti nakon prethodnih postupaka te osigurale uske tolerancije, zahtjevano stanje površine, točnost dimenzija i ostali zahtjevi koje je potrebno zadovoljiti prije eksploatacije proizvoda. [7], [16], [17]

2.4. Lijevanje suspenzija

Lijevanje suspenzija (eng. *Slip Casting*) ili lijevanje u forme je najbolja proizvodna tehnologija za proizvodnju kompleksnih keramičkih 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 ulijevenja suspenzije keramičkih 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 stjenci

2) puni proizvodi – nakon što prođe dovoljno dugo vremena cijela masa unutar kalupa se skrutne [16], [18], [19]



Slika 10. Postupak lijevenja suspenzije [16]

2.5. Stabilnost suspenzija

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

Tablica 4. Disperzije krutih tvari u kapljevinama [20]

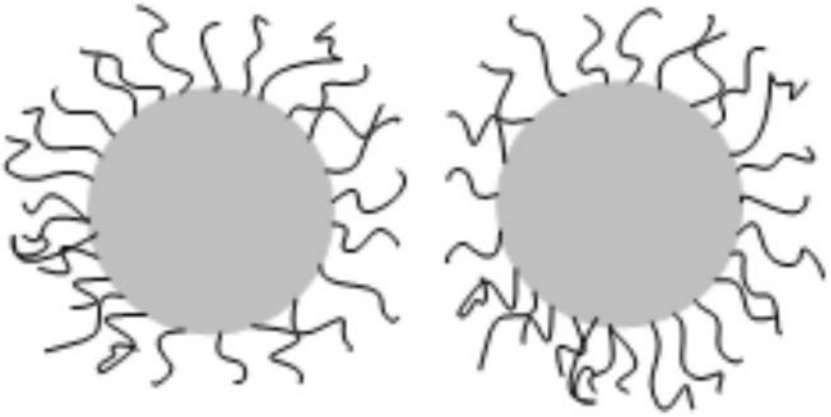
Grube disperzije	Koloidne otopine	Molekularne otopine
Čestice veće od 0,1 μm Čestice vidljive mikroskopom Čestice ne prolaze kroz filter papir Ne difundiraju Ne dijaliziraju Brzo sedimentiraju Mutne su	Čestice od 0,001μm do 0,1 μm Čestice vidljive ultra – mikroskopom Čestice prolaze kroz filter papir Ne difundiraju Ne dijaliziraju Sporo sedimentiraju Opaliziraju ili su bistre	Čestice su manje od 0,001 μm Čestice nevidljive ultra – mikroskopom Čestice 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 keramičkom materijalu a samim time i heterogena svojstva konačnog proizvoda. Disperzantima se ostvaruje bolja disperzija čestica, čime se postiže niža viskoznost suspenzije što omogućava bolje popunjavanje kalupa i ujedno smanjuje nakupljanje čestica (aglomeracija) i sedimentacija. Disperzanti pravilno raspršuju čestice praha u vodi koje se prilikom sušenja pravilno gusto slažu i time ostvaruju dobra svojstva keramičkog proizvoda. Mehanizmi stabilizacije na kojima se temelji djelovanje disperzanata su sterička stabilizacija, elektrostatička stabilizacija i elektrosterička stabilizacija. Za ispitivanje stabilnosti koriste se reološka ispitivanja (mjerenje viskoznosti i pH vrijednosti) i sedimentacijski testovi (mjerenje veličine čestica i zeta potencijala).[20], [21]

2.5.1. Sterička stabilizacija

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

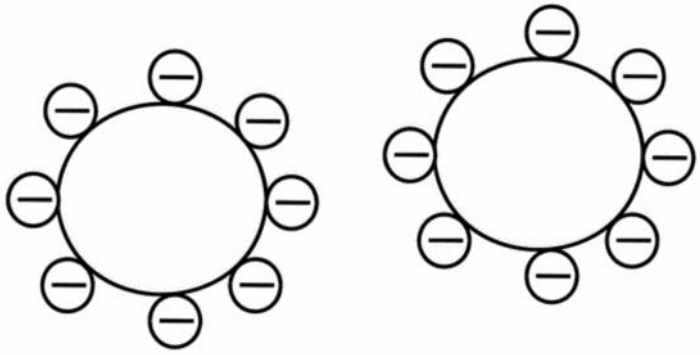
Za postizanje stabilne suspenzije udio disperzanta mora biti optimalan. U slučaju nedovoljne količine disperzanta postoji opasnost od nastajanja aglomerata, a u slučaju previsoke količine disperzanta polimerni lanci se petljaju i time gube svoju funkciju. Glavni nedostaci steričke stabilizacije su sama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



Slika 11. Sterička stabilizacija [22]

2.5.2. Elektrostatička stabilizacija

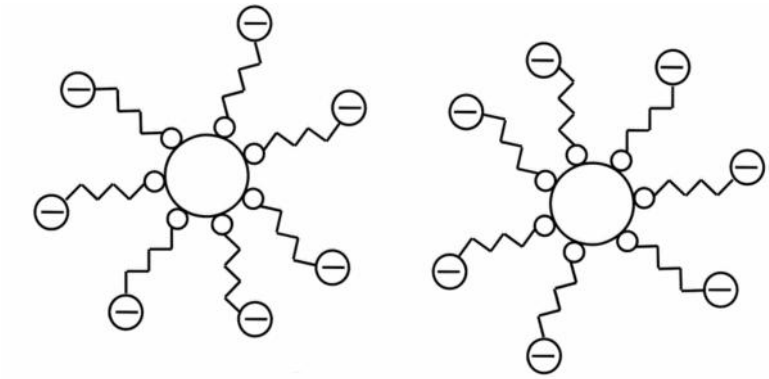
Elektrostatička stabilizacija, prikazana na slici 12, temelji se na stvaranju električnog dvosloja. Dodavanjem novih grupa iona formira se nabijeni sloj te se ioni adsorbiraju na površinu čestica keramičkog praha. Jednak broj protuiona sa suprotnim nabojem okružuje čestice i time osiguravaju njihovu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



Slika 12. Elektrostatička stabilizacija [17]

2.5.3. Elektrosterička stabilizacija

U današnje vrijeme najčešće upotrebljavana metoda stabilizacije je elektrosterička. Elektrosterička stabilizacija, prikazana na slici 13, kao što i samo ime sugerira je kombinacija steričke i elektrostatičke metode stabilizacija. Elektrosterički disperzanti uglavnom su polielektroliti koji adsorbiranjem na površinu čestica keramičkog praha stvaraju dovoljnu razliku potencijala da omoguće odbijanje među česticama. Polielektrolit korišten kao disperzant u eksperimentalnom dijelu, Dolapix CE–64, je vodena otopina amonijeve soli polimetakrilne kiseline. [23]



Slika 13. Elektrosterička 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 τ [Pa] i kut smicanja γ [rad], dok su osnovni elementi reoloških modela:

1) Hookov element

2) Newtonov element

3) Saint–Venantov element

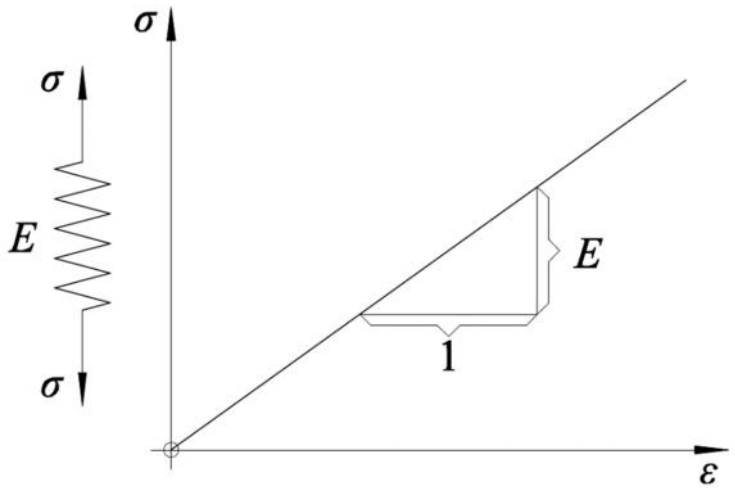
Hookov element, prikazan na slici 14, definiran je preko ponašanja idealno elastične opruge kod koje vrijedi da je deformacija proporcionalna primjenjenom opterećenju:

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

ε, % - osna deformacija

σ, N/m^2 – naprezanje

E, N/m^2 – Youngov modul elastičnosti



Slika 14. Hookov element [25]

Prema Hookovom elementu za idealno elastično tijelo pretpostavlja se da deformacija nastaje trenutačno i sa konačnim iznosom, te se nakon uklanjanja opterećenja tijelo vraća u prvobitni položaj. Za idealno elastično tijelo prema Hookovom zakonu pri smiku vrijedi:

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

τ, Pa – smično naprezanje

G, Pa – Coulombov modul smičnosti

γ, rad – kut smicanja

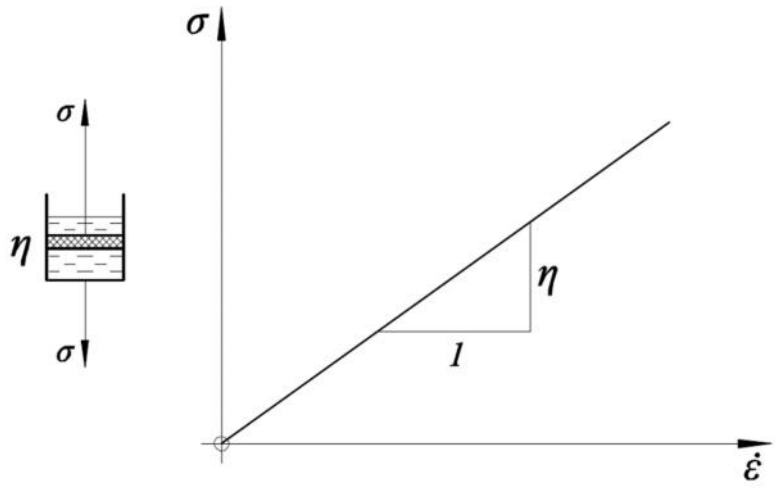
Newtonov element, prikazan na slici 15, opisan je prigušnim elementom, kojeg karakterizira idealna viskoznost, tj. brzina deformacije koja je proporcionalna primjenjenom opterećenju:

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

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

$\eta, N \cdot s/m^2$ – dinamička viskoznost

σ, 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:

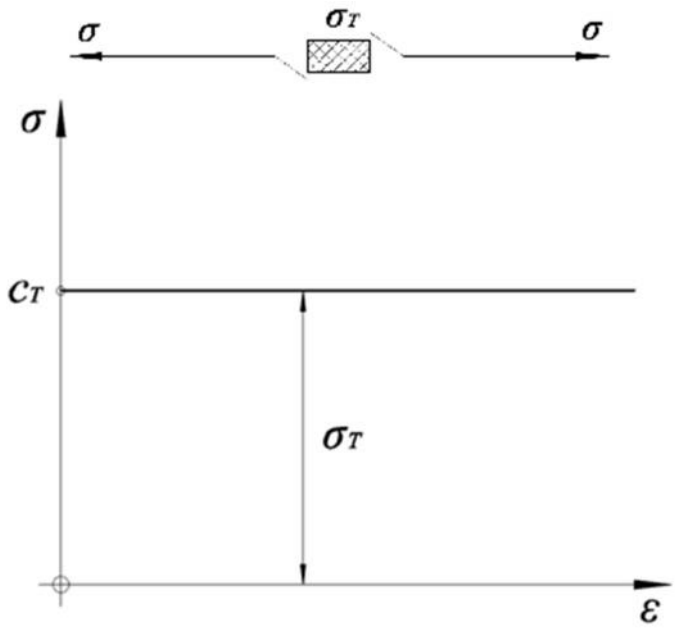
$$\tau = \eta \cdot \gamma \text{ ili } \eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

τ, Pa – smično naprezanje

γ, 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 ε ne nastaje dok naprezanje ne dostigne kritičnu vrijednost.



Slika 16. Saint-Venantov element [25]

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

1) dilatantne fluide
2) strukturno viskozne fluide
3) idealno plastične (Binghamove) fluide
4) neidealno plastične fluide

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

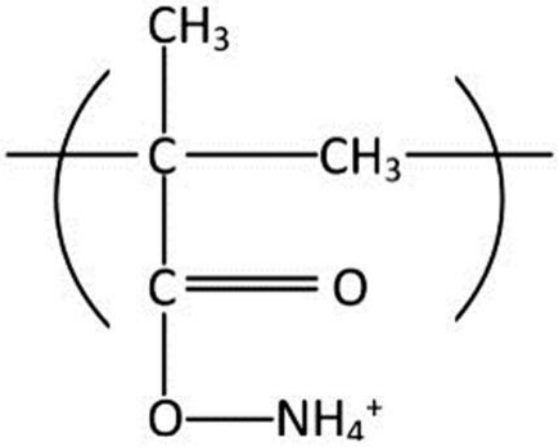
Viskozimetrija je znanstvena grana koja se bavi mjerenjem reoloških svojstava materijala. Neke od najčešće korištenik metoda za mjerenje reoloških svojstava su:

1) Binghamova viskozimetrija
2) rotacijska viskozimetrija
3) kapilarna viskozimetrija
4) kinematička viskozimetrija
5) viskozimetar konus – ploča [17]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

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

Za pripremu keramičke suspenzije korištena je destilirana voda, dvije vrste keramičkog Al_2O_3 prah visoke čistoće: Al_2O_3 prah veličine čestica 0,9 μm i nano Al_2O_3 prah veličine čestica od 50 nm te disperzant Dolapix CE-64, čija je strukturna formula prikazana na slici 17.



Slika 17. Strukturna formula disperzanta Dolapix CE-64

U prvom nizu eksperimenata pripravljene su četiri 70 %-tne vodene Al_2O_3 suspenzije s različitim udjelima mikro Al_2O_3 praha (proizvođača Almatis GmbH, Njemačka) i nano Al_2O_3 praha (proizvođača SkySpring Nanomaterials Inc., Houston Texsas, SAD). Korišteni nano Al_2O_3 prah visoke je čistoče 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 određena reološka svojstava pomoću rotacijskog viskozimetra.

Tablica 5. Sastav korištenog Al_2O_3 praha

komponenta	Na_2O	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3
w, %	0,09	0,0147	0,0361	0,0721	0,0300	ostatak

Sve suspenzije sadrže 70% Al_2O_3 praha, a točna masa potrebna za pripremanje suspenzija izračunata je prema izrazu:

$$w(Al_2O_3) = \frac{m(Al_2O_3)}{m(Al_2O_3) + V(voda)}$$

za *V* (voda) = 120 mL i *w* (Al_2O_3) = 70%

Izračunato je da je potrebno 280 g Al_2O_3 praha za pripremu suspenzija.

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

Tablica 6. Mase mikro i nano Al_2O_3 praha u suspenzijama

m (Al_2O_3), g	suspenzija bez nano praha	suspenzija s 1% nano praha	suspenzija s 5% nano praha	suspenzija s 10% nano praha
m (mikro Al_2O_3), g	280	277,2	266	252
m (nano Al_2O_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 praha



Slika 19. Vaganje nano Al_2O_3 praha

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 izračunata je prema izrazu (maseni udio disperzanta izražen je preko ukupne mase Al_2O_3.):

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

za m (Al_2O_3) = 280 g i w (disperzant) = 0,4%

Izračunata 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 pripravljenih suspenzija.

Tablica 7. Sastav 70%-tnih Al_2O_3 vodenih suspenzija

skupina uzoraka (suspenzija)	*w* (suhe tvari), %	*w* (H_2O), %	*w* (sastav keramičkog 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

*preračunato na masu suhe tvari

Nakon izračunavanja i zatim vaganja potrebne mase Al_2O_3 praha i disperzanta Dolapix CE-64, komponente se stavljaju u posudu za homogeniziranje prateći određen redoslijed. 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 štapićem. U posudu za homogeniziranje nakon dovoljnog miješanja, prikazano na slici 22, dodaju se keramičke kuglice od istog materijala kao i keramika koja se priređuje, u ovom slučaju 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 keramičkim kuglicama stavlja se u planetarni kuglični mlin PM 100 (Retsch GmbH, Njemačka), 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 kuglični mlin Retsch PM 100 (pogled iznutra) b) uneseni parametri

Po završetku homogenizacije, keramičke su kuglice filtracijom odvojene od suspenzije. Nakon toga je uslijedio tretman u ultrazvučnoj kupelji BRANSONIC 220 u trajanju od 15 minuta te određivanje 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 način da se vreteno viskozimetra rotira u suspenziji rastućom brzinom od 0,1 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 očitava neposredno prije svake promjene brzine. Viskoznost se računa preko izmjerenog otpora koji suspenzija pruža vretenu pri rotaciji vretena.



Slika 24. Viskozimetar Brookfield DV-III Ultra

4. REZULTATI I RASPRAVA

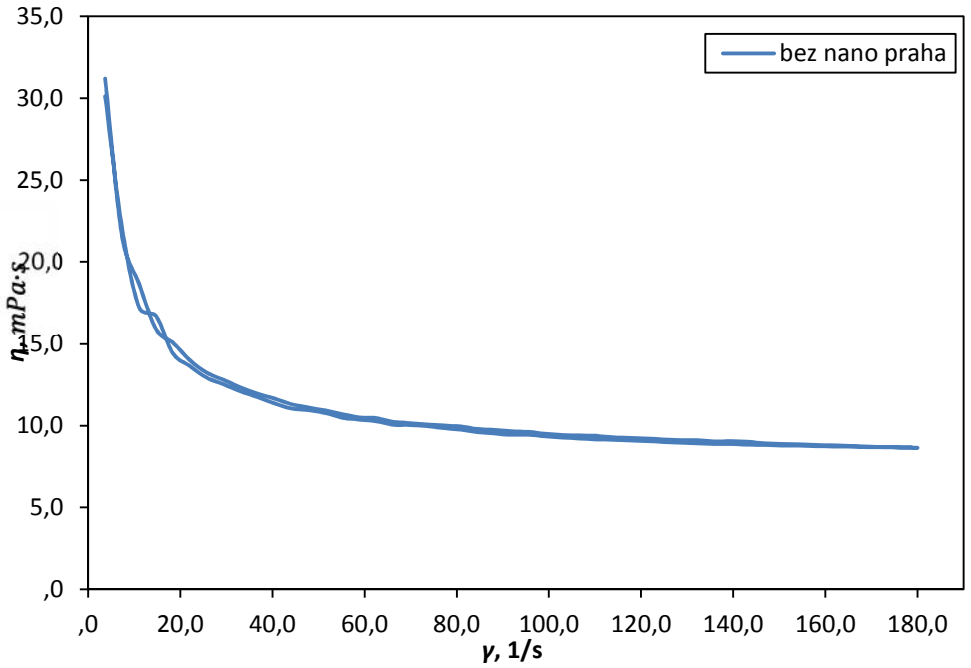
Mjerenjem pH vrijednosti dobivene su vrijednosti prikazane u tablici 8.

Tablica 8. Izmjerene pH vrijednosti pripremljenih suspenzija

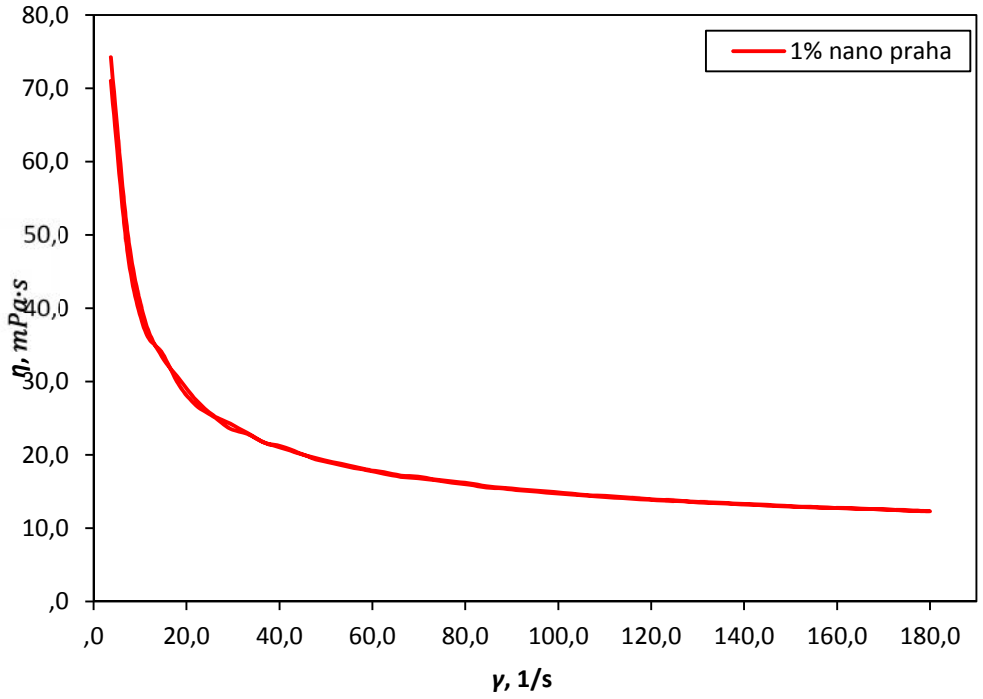
Suspenzija	bez nano praha	1% nano praha	5% nano praha	10% nano praha
pH vrijednost	8,56	8,62	8,59	8,61

Bazičnost suspenzije uzrokovana je povećanjem negativnih naboja na površini čestica praha pri disocijaciji disperzanta u otopini. Time se postiže jače odbijanje čestica u suspenziji. [17]

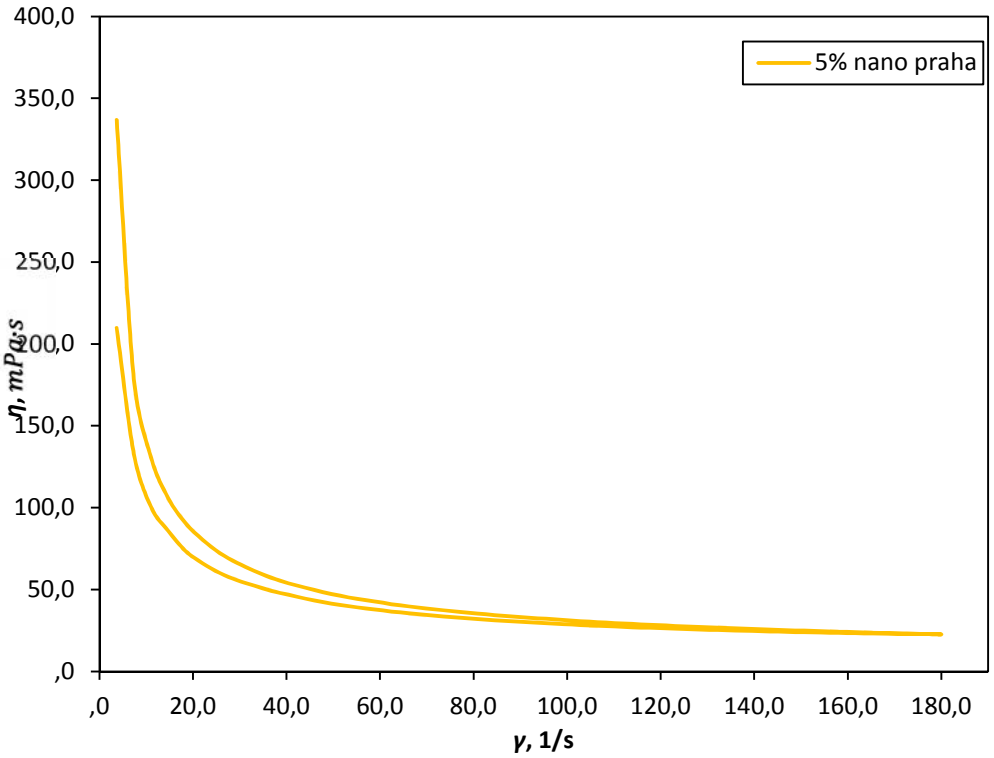
Reološkim mjerenjima, provedenim na suspenzijama sa različitim udjelom nano Al_2O_3 praha, dobiveni su rezultati prikazani na dijagramima ovisnosti viskoznosti o brzini smicanja, vidljivi na slikama 25, 26, 27 i 28 za svaku suspenziju pojedino, te na slici 29 za sve četiri suspenzije zajedno i dijagramima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



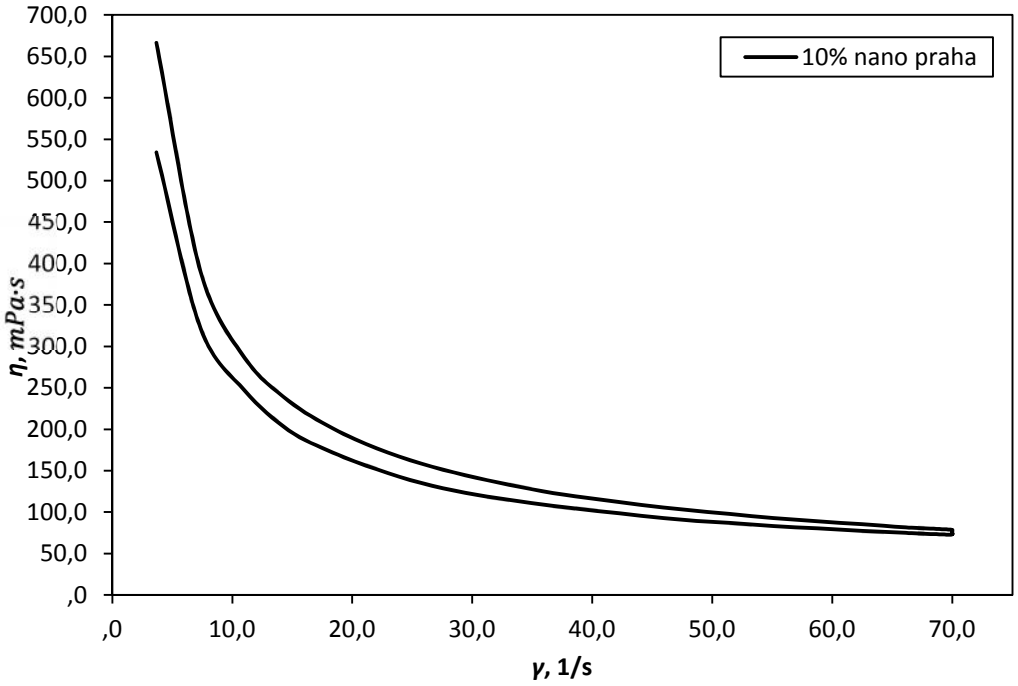
Slika 25. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju bez dodatka nano praha



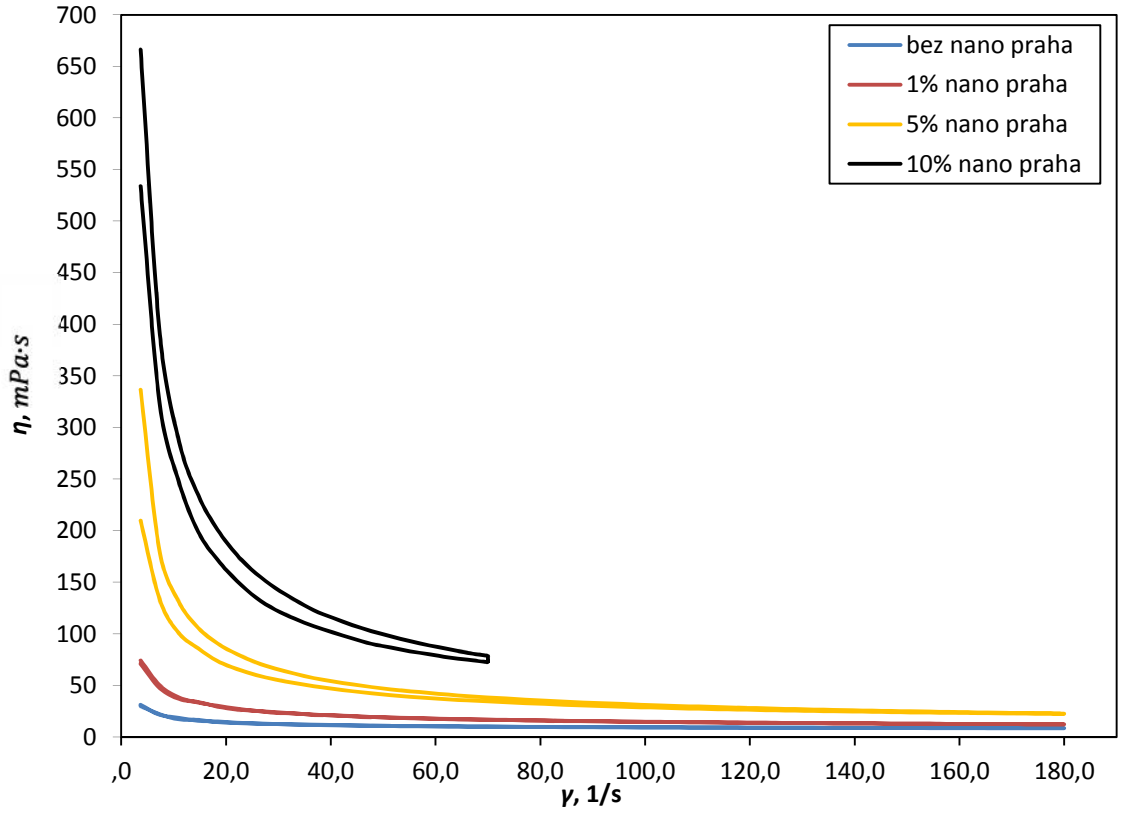
Slika 26. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha



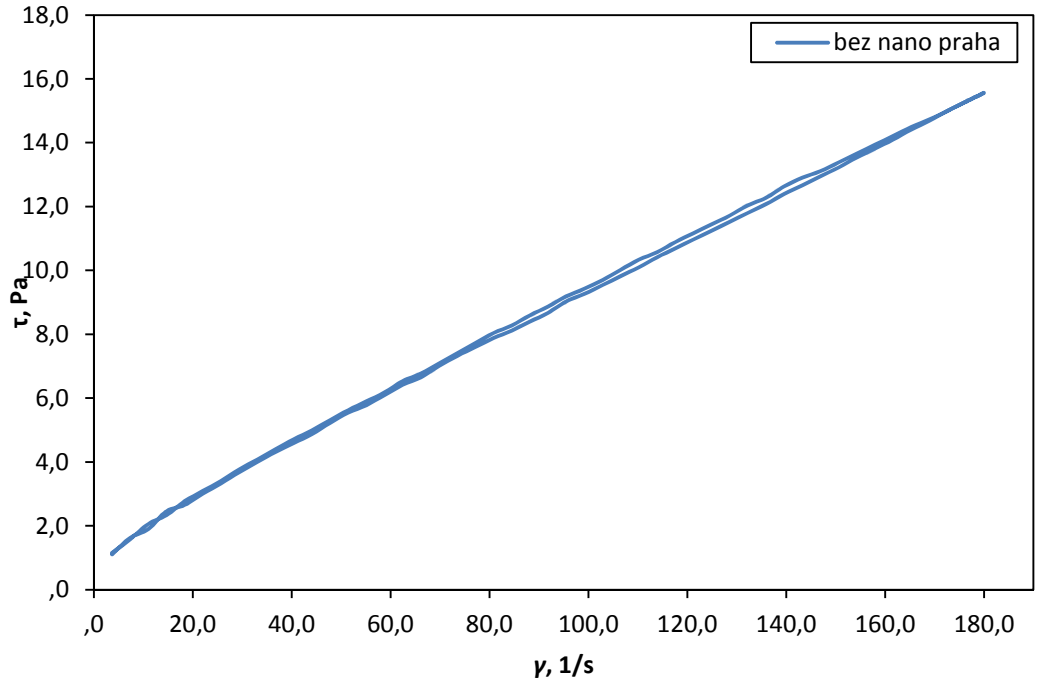
Slika 27. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha



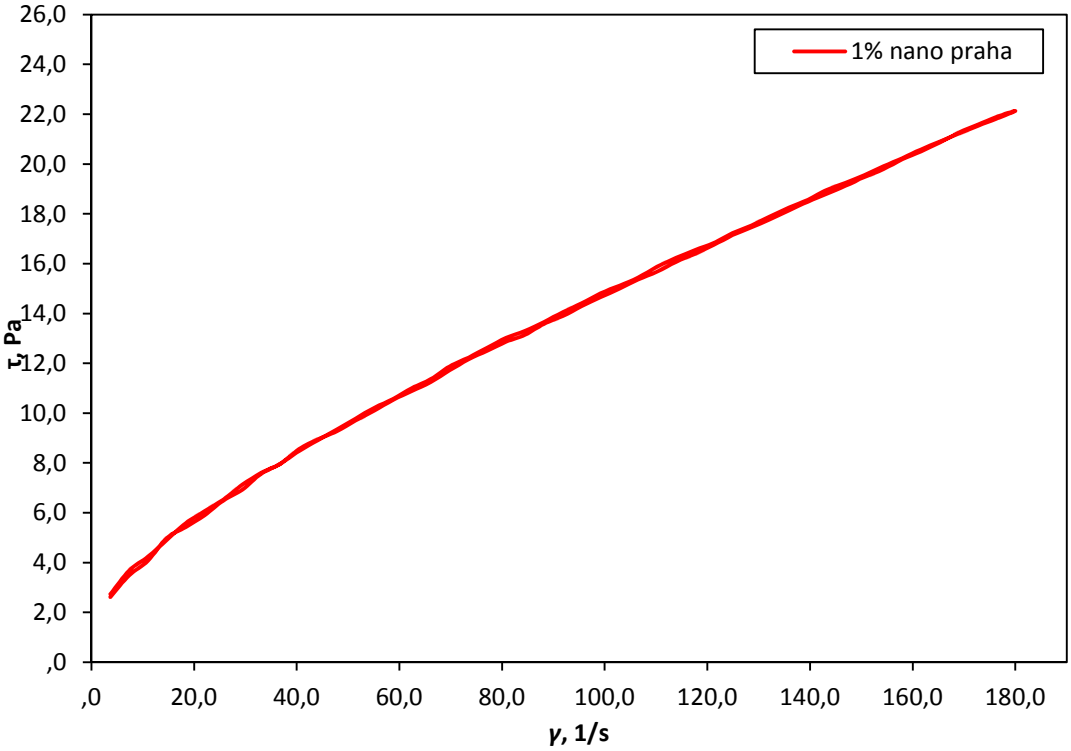
Slika 28. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 10% nano praha



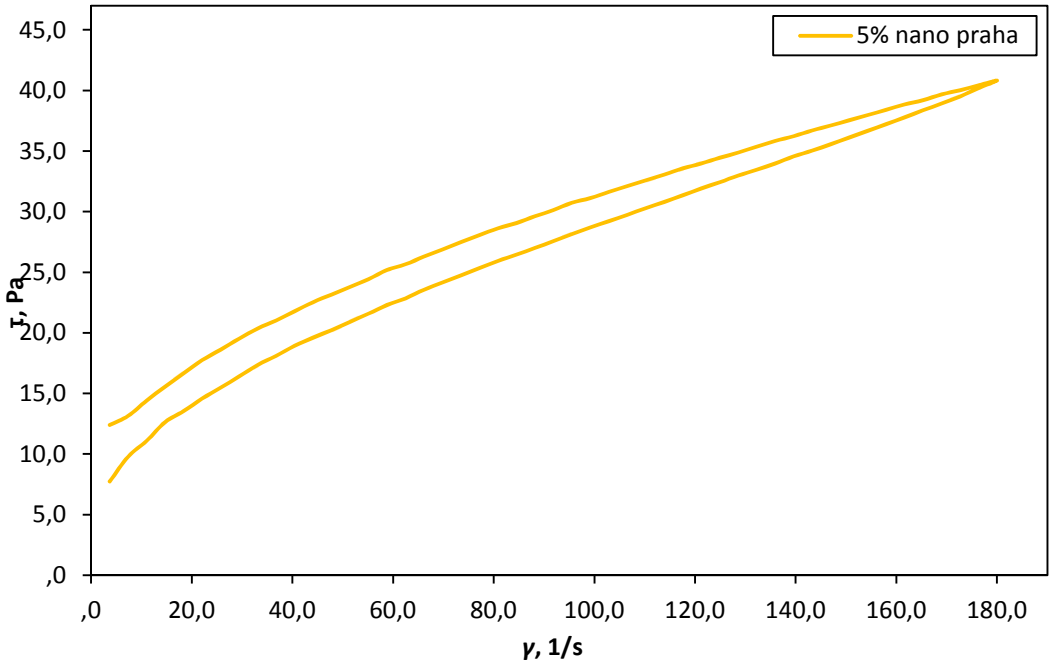
Slika 29. Dijagram ovisnosti viskoznosti o smičnoj brzini za sve četiri 70%-tne Al_2O_3 vodene suspenzije



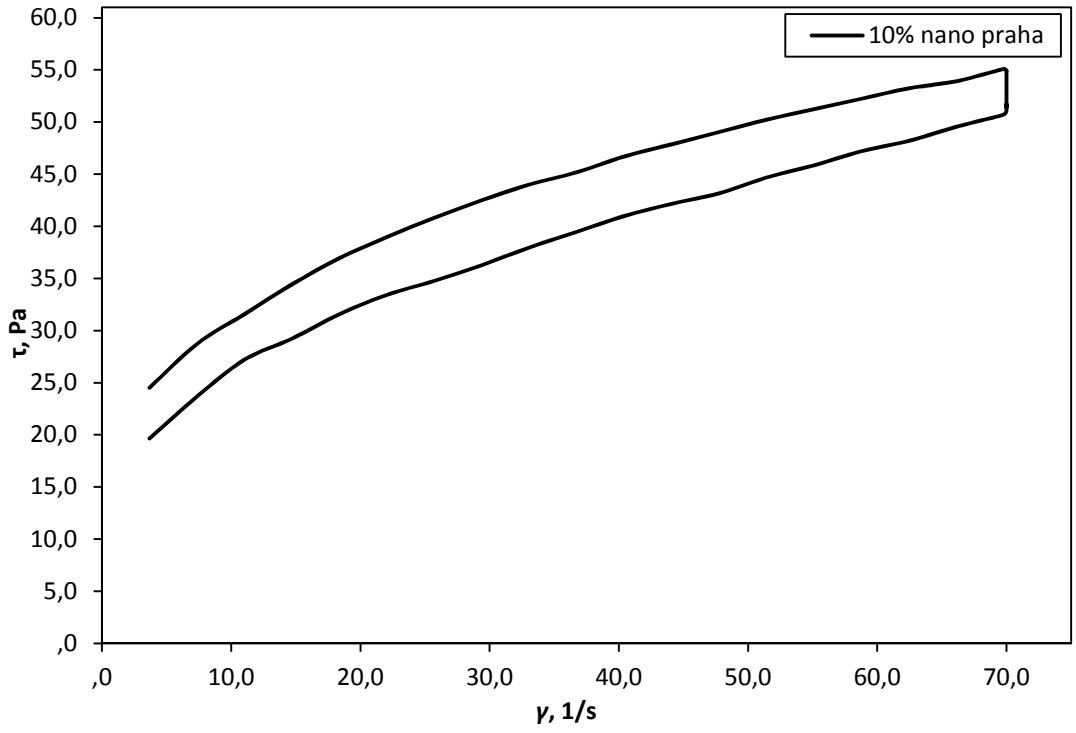
Slika 30. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju bez dodatka nano praha



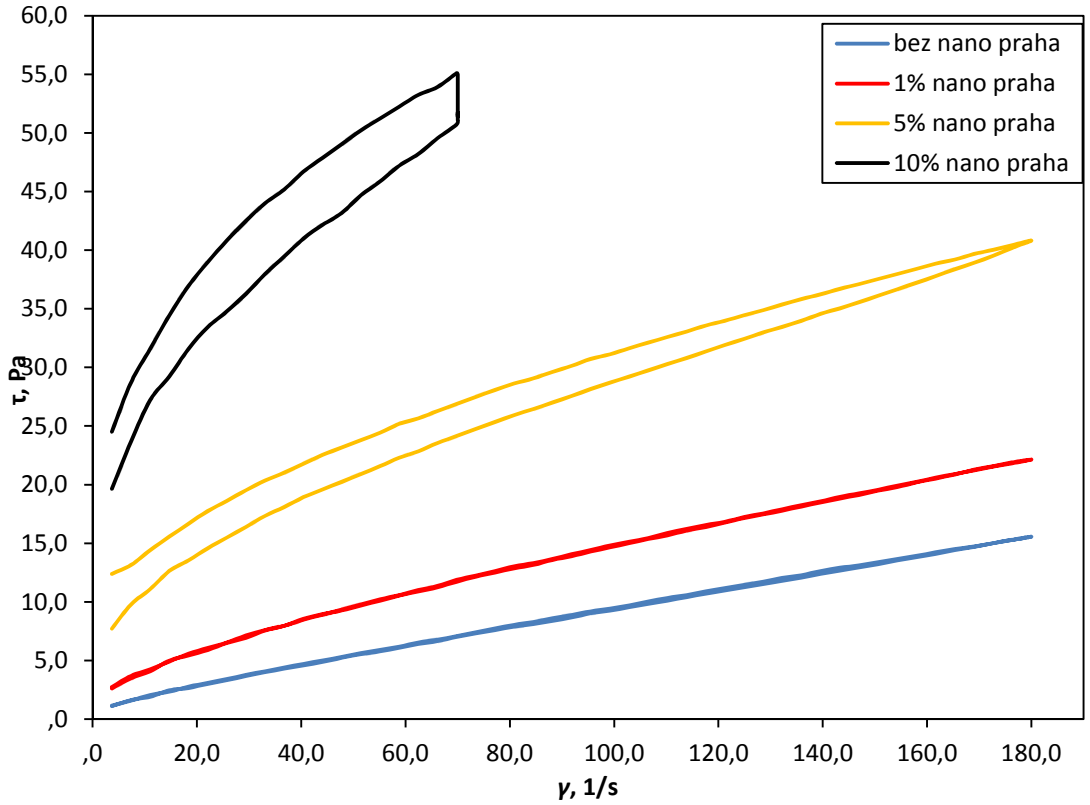
Slika 31. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 1% nano praha



Slika 32. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom 5% nano praha



Slika 33. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za 70%-tnu Al_2O_3 vodenu suspenziju s dodatkom10% nano praha



Slika 34. Dijagram ovisnosti smičnog naprezanja o smičnoj brzini za sve četiri 70%-tne Al_2O_3 vodene suspenzije

Pri reološkim mjerenjima sve četiri 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 Nenewtonskih fluida. Smično naprezanje povećava se povećanjem brzine smicanja, što također potvrđuje pripadnost skupini Nenewtonskih fluida i vidljivo je na slici 34.

Iz dijagrama na slikama 29 i 34 može se vidjeti da suspenzija bez nano praha i suspenzija sa 1% nano praha pokazuju pseudoplastično ponašanje uobičajeno za koloidne suspenzije keramičkih Al_2O_3 prahova. S druge strane suspenzije sa 5% i 10% nano praha ponašaju se znatno drugačije, dolazi do histereze pri smanjenju smične brzine, a u suspenziji sa 10% nano praha ona ne prelazi 70 s^{-1} dok kod ostalih suspenzija dostiže 180 s^{-1}. Najmanju viskoznost i smično naprezanje posjeduje suspenzija bez nano praha. Takve pojave posljedica su puno veće ukupne površine nano čestica i zbog toga veće interakcije među česticama, koju količina disperzanta optimalna za suspenziju bez nano čestica ne može spriječiti. U daljnjim istraživanjima utjecaja dodatka nano Al_2O_3 praha 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 (η = 10,9292 $mPa \cdot s$)

2) Povećanjem udjela nano Al_2O_3 praha dolazi do porasta viskoznosti i smičnog naprezanja, te ponašanja suspenzije koje odstupa od uobičajenog, uzrokovanog većom interakciom 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] Dizdarević M. Primjena keramike u mašinskoj industriji [seminarski rad iz Novih materijala]. Bihać: Tehnički fakultet Bihać; 2009.

[5] https://www.coorstek.com/english/industries/chemicals/labware/ [kolovoz 2019.]

[6] Filetin T, Kovačićek F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2002.

[7] Matijević B. Materijali 2 - Nemetalni materijali: keramika – interne podloge za predavanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.

[8] Ćurković L. Kemijska postojanost materijala: Kemijska postojanost keramike – interne podloge za predavanja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.

[9] Filetin T, Kramer I. Tehnička keramika – Priručnik 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=EAIaIQobChMIu5i63sao5AIVC6WaCh3r3wYWEAAYAiAAEgLi1fD_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] Župetić R. Reološka svojstva i sterička 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] Dunđer M. Strojarska tehnologija II – 3. Izrada keramičkih 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] Ćurković L, Majić Renjo M, Ćorić D, Šokčević Z, Rede V. (2017.), Slip casting of alumina ceramics. In: Begić Hadžipašić 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, Ćurković 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] Andrić I. Priprava stabilne suspenzije za lijevanje kompozitne keramike [rad nagrađen Rektorovom nagradom]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.

[21] Lalić M, Ćurković L. Utjecaj sadržaja Darvana na reološke karakteristike 70% - tne Al_2O_3 suspenzije. In: Schauperl 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] Župetić R. Sterička stabilizacija Al_2O_3 suspenzija [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2012.

[23] Sever I, Žmak I, Ćurković L, Švagelj 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] Majić Renjo M, Lalić M, Ćurković L, Matijašević 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.