

Utjecaj polivinil alkohola na reološke karakteristike koloidnih Al₂O₃ suspenzija

Salopek, Sara

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

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:235:484336>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-18**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Sara Salopek

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ POLIVINIL ALKOHOLA NA REOLOŠKE
KARAKTERISTIKE KOLOIDNIH Al_2O_3 SUSPENZIJA

Mentor:

prof. dr. sc. Lidija Ćurković

Sara Salopek

Zagreb, 2011.

Izjava

Izjavljujem da sam završni rad na temu „Utjecaj polivinil alkohola na reološke karakteristike koloidnih Al_2O_3 suspenzija“ izradila samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Stručnu pomoć u odabiru literature, definiranju postupaka te savjetima prilikom izrade završnog rada pružili su mi mentorica prof. dr. sc. Lidija Ćurković i dipl.kemijski ing. Marijo Lalić.

Sažetak

U radu je prikazan utjecaj polivinil alkohola kao veziva, sadržaja Al_2O_3 praha u suspenzijama te Darvana kao disperzanta i spinela kao kao pomoćnog sredstva za sinteriranje, na reološke karakteristike koloidnih Al_2O_3 suspenzija. Pripremljene su dvije skupine suspenzija: prva skupina suspenzija sa sadržajem Al_2O_3 praha od 60%, 70% i 80% te dodatkom polivinil alkohola od 0,2%; druga skupina suspenzija sa sadržajem Al_2O_3 praha od 60%, 70% i 80% te dodatkom polivinil alkohola od 0,4%. U obje skupine priređenih suspenzija dodano je 0,4 % Darvana i 0,08 % spinela.

Snimljeni su reološki dijagrami koji pokazuju ovisnost smičnog naprezanja o brzini smicanja te ovisnost viskoznosti o brzini smicanja. Pri procjeni eksperimentalnih podataka primjenjeni su potencijnski model, Herschel-Bulkleyjev model te Binghamov model.

Na temelju provedenih mjerenja može se zaključiti da povećanjem sadržaja Al_2O_3 praha i udjela polivinil alkohola raste i viskoznost suspenzija.

Sadržaj

| | |
|---|-----|
| Popis slika..... | I |
| Popis tablica..... | III |
| Popis oznaka i mjernih jedinica..... | V |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TEORIJSKI DIO..... | 3 |
| 2.1. Konstrukcijska keramika..... | 3 |
| 2.2. Podjela konstrukcijske keramike..... | 4 |
| 2.3. Aluminij oksidna keramika (Al_2O_3)..... | 8 |
| 2.4. Postupci proizvodnje keramike..... | 11 |
| 2.4.1. Sirovine i aditivi..... | 12 |
| 2.4.2. Priprava mase za oblikovanje..... | 15 |
| 2.4.3. Oblikovanje..... | 17 |
| 2.5. Svojstva konstrukcijske keramike..... | 19 |
| 2.6. Mehanika fluida..... | 22 |
| 2.6.1. Viskoznost i Newtonov zakon viskoznosti..... | 22 |
| 2.6.2. Reologija..... | 27 |
| 2.6.2.1. Newtonski fluidi..... | 29 |
| 2.6.2.2. Nenewtonski fluidi..... | 29 |
| 2.6.2.3. Binghamov fluid..... | 30 |
| 2.6.2.4. Vremenski ovisni nenewtonski fluidi..... | 30 |
| 2.6.3. Određivanje viskoznosti..... | 31 |

| | |
|--|----|
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO..... | 33 |
| 3.1. Priprema suspenzija..... | 33 |
| 3.2. Ispitivanje reoloških svojstava Al ₂ O ₃ suspenzija..... | 39 |
| 4. REZULTATI I RASPRAVA..... | 41 |
| 4.1. Rezultati reoloških svojstava Al ₂ O ₃ suspenzija s 0,2% polivinil alkohola..... | 41 |
| 4.2. Rezultati reoloških svojstava Al ₂ O ₃ suspenzija s 0,4% polivinil alkohola..... | 48 |
| 4.3. Procjena eksperimentalnih podataka..... | 55 |
| 4.3.1. Reološki parametri Al ₂ O ₃ suspenzija s 0,2% polivinil alkohola..... | 57 |
| 4.3.2. Reološki parametri Al ₂ O ₃ suspenzija s 0,4% polivinil alkohola..... | 58 |
| 5. ZAKLJUČAK..... | 59 |
| 6. POPIS LITERATURE..... | 60 |

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 2.1. Mikrostruktura sitnozrnate aluminij oksidne keramike [6] | 10 |
| Slika 2.2. Mikrostruktura grubozrnate aluminij oksidne keramike [6]..... | 10 |
| Slika 2.3. Utjecajni čimbenici na mikrostrukturu keramike [6] | 11 |
| Slika 2.4. Grubozrnati Al_2O_3 [6] | 12 |
| Slika 2.5. Sitnozrnati Al_2O_3 [6] | 12 |
| Slika 2.6. Tijek proizvodnje keramičkih materijala [6] | 14 |
| Slika 2.7. Granule Al_2O_3 za prešanje [6]..... | 15 |
| Slika 2.8. Mehanizmi stabilizacije suspenzija [8] | 16 |
| Slika 2.9. Oblikovanje mase za sinteriranje [9] | 17 |
| Slika 2.10. Prikaz eksperimenta za Newtonov zakon viskoznosti [10] | 23 |
| Slika 2.11. Nelinearni profil brzine paralelnog pravocrtnog laminarnog strujanja [10] | 25 |
| Slika 2.12. Brzina kutne deformacije pri paralelnom pravocrtnom laminarnom strujanju [10] | 25 |
| Slika 2.13. Reološki dijagram [11] | 27 |
| Slika 2.14. Podjela nenevtonskih fluida [12] | 28 |
| Slika 2.15. Ovisnost prividne viskoznosti o vremenu trajanja smičnog naprezanja (1-newtonski fluid, 2-reopektantni sustavi, 3-tiksotropni sustavi) [13]..... | 31 |
| Slika 2.16. Vrste viskozimetara [13] | 32 |
| Slika 3.1. Vaganje pojedinih komponenata u suspenziji..... | 35 |
| Slika 3.2. Komponente suspenzije: Darvan, spinel, Al_2O_3 prah..... | 35 |
| Slika 3.3. Posuda za miješanje s deset keramičkih kuglica..... | 36 |
| Slika 3.4. Planetarni kuglični mlin..... | 37 |
| Slika 3.5. Uklanjanje mjehurića zraka..... | 38 |
| Slika 3.6. Mjerenje pH vrijednosti suspenzije..... | 39 |
| Slika 3.7. Rotacijski viskozimetar..... | 40 |
| Slika 4.1. Krivulja tečenja. Ovisnost viskoznosti (η , mPa s) o brzini smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Slika 4.2. Krivulja tečenja. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o brzini smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%..... | 46 |
| Slika 4.3. Ovisnost viskoznosti (η , mPa s) o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,2% pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}). | 47 |
| Slika 4.4. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,2% pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1})..... | 48 |
| Slika 4.5. Krivulja tečenja. Ovisnost viskoznosti (η , mPa s) o brzini smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%..... | 53 |
| Slika 4.6. Krivulja tečenja. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o brzini smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%..... | 53 |
| Slika 4.7. Ovisnost viskoznosti (η , mPa s) o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,4% pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1})..... | 54 |
| Slika 4.8. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,4% pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1})..... | 55 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 2.1. Prednosti i nedostaci osnovnih postupaka oblikovanja [6]..... | 18 |
| Tablica 2.2. Usporedba svojstava keramike, metala i polimera [6] | 19 |
| Tablica 3.1. Sastav prve grupe pripremljenih suspenzija, iskazan u masenim udjelima (w, %) | 34 |
| Tablica 3.2. Sastav druge grupe pripremljenih suspenzija, iskazan u masenim udjelima (w, %) | 34 |
| Tablica 4.1. Vrijednosti viskoznosti i brzini smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%..... | 42 |
| Tablica 4.2. Vrijednosti smičnog naprezanja i brzine smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2% | 43 |
| Tablica 4.3. Vrijednosti viskoznosti (η , mPa s) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%..... | 44 |
| Tablica 4.4. Vrijednosti smičnog naprezanja (τ , Pa) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%..... | 45 |
| Tablica 4.5. Vrijednosti viskoznosti i brzini smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%..... | 49 |
| Tablica 4.6. Vrijednosti smičnog naprezanja i brzine smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%..... | 50 |

| | |
|--|----|
| Tablica 4.7. Vrijednosti viskoznosti (η , mPa s) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s ⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al ₂ O ₃ uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%..... | 51 |
| Tablica 4.8. Vrijednosti smičnog naprezanja (τ , Pa) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s ⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al ₂ O ₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%..... | 52 |
| Tablica 4.9. Reološki parametri Al ₂ O ₃ suspenzija s udjelima polivinil alkohola od 0,2% i 0,4%..... | 56 |

Popis oznaka i mjernih jedinica

| | |
|----------|--|
| F | opća sila [N] |
| A | površina (ploče) [mm ²] |
| U | brzina gibanja (sloja fluida) [m/s] |
| h | razmak između ploča (visina) [mm] |
| μ | dinamički koeficijent viskoznosti [Pa s] |
| τ | smično naprezanje [Pa] |
| ν | kinematički koeficijent viskoznosti [m ² /s] |
| Φ | fluidnost [1/Pa s] |
| η | viskoznost [mPa s] |
| t | vrijeme [s] |
| w | maseni udjel [%] |
| γ | brzina smicanja [s ⁻¹] |
| T | temperatura [°C] |
| k | koeficijent konzistencije-pokazatelj viskoznosti |
| n | indeks tečenja (eksponent brzine smične brzine) |
| τ_0 | granica tečenja koja označava minimalno smično naprezanje da bi došlo do tečenja fluida [Pa] |
| ρ | oznaka za plastičnu viskoznost |
| R | koeficijent korelacije |

1. UVOD

U posljednje vrijeme sve više pažnje posvećuje se razumijevanju koloidnih suspenzija (otopina), jer upravo u tehnologijama kao što su lijevanje suspenzija, lijevanje folija, centrifugalno lijevanje, injekcijsko prešanje i prevlačenje uranjanjem, razumijevanje ponašanja koloidnih suspenzija igra važnu ulogu u dobivanju keramičkih proizvoda poboljšanih svojstava. Poznavanje i razumijevanje reoloških svojstava od izuzetne je važnosti u procesima oblikovanja keramičkih proizvoda te u optimiranju svojstava sirovca [1,2].

Svojstva keramičkih proizvoda ovise o veličini čestica keramičkog praha: što su one manje, to se postiže veći stupanj sinteriranja, a time naravno, i bolja svojstva konačnog proizvoda. Nasuprot tome, čestice malih dimenzija ($< 1 \mu\text{m}$) i visoka koncentracija suspenzije znatno smanjuju viskoznost, a što je posljedica povećane interakcije među česticama. Riječ je o van der Waalsovima privlačnim silama koje djeluju među česticama, uslijed kojih dolazi do aglomeracije čestica što ima negativan učinak na proces lijevanja suspenzija [3]. Povišena viskoznost suspenzija dakle, otežava lijevanje u kalup. Kako bi se viskoznost smanjila i time olakšao proces lijevanja, suspenzijama se dodaju određeni aditivi koji onemogućavaju interakcije među česticama mehanizmima stabilizacije.

U cilju potpune kontrole stabilnosti suspenzija i njihovih reoloških svojstava, potrebno je ispravno procijeniti stabilnost suspenzije. U tu svrhu koriste se sedimentacijski testovi i mjerenje prividne viskoznosti pri točno određenim brzinama smicanja. Međutim, kod procjene stabilnosti koncentriranih suspenzija ove metode imaju određena ograničenja. Iz tog razloga koriste se reološki dijagrami tečenja [4]. Reološki dijagrami tečenja pokazuju ovisnost smičnog naprezanja o brzini smicanja,

na temelju čega je moguće dobiti informacije o međudjelovanju između čestica u suspenziji. Za opisivanje i predviđanje tečenja pojedinih vrsta fluida koriste se različiti modeli: potencijalni model, Herschel-Bulkleyjev model, Binghamov model i dr.

Cilj ovog rada bio je ispitati utjecaj polivinil alkohola i sadržaja Al_2O_3 praha u suspenziji na viskoznost suspenzije, na temelju provedenih reoloških mjerenja. Za procjenu dobivenih rezultata korišteni su različiti modeli kako bi se utvrdilo ponašanje pojedinih suspenzija.

1. TEORIJSKI DIO

2.1. Konstrukcijska keramika

Riječ keramika potječe od grčke riječi "κέραμος" (*keramos*), što znači glina, lončarska roba ili glineno posuđe. Prvo što pada na um je da se od keramike izrađuje samo posuđe, no to je samo povijesno gledano točno. Danas keramika obuhvaća razne materijale koji se koriste u domaćinstvu, građevinarstvu, industriji i umjetnosti. Općenito, može se reći da su keramički materijali anorganski materijali, sastavljeni od metalnih i nemetalnih elemenata, spojenih ionskim i/ili kovalentnim vezama.

U tradicionalnu keramiku ubrajaju se glina i ostali mineralni materijali koji se koriste uglavnom za lončarstvo i zidarstvo. Klasično shvaćanje keramike je uglavnom kao tvrdog, krhkog i izolatorskog materijala. Unatoč takvom shvaćanju, u modernu keramiku ubrajaju se neki vrlo žilavi materijali i materijali koji obuhvaćaju široki raspon mehaničkih, toplinskih, električnih, optičkih te magnetskih svojstava. Značajna variranja u svojstvima posljedica su različitosti u načinu vezivanja.

Konstrukcijska (tehnička) keramika obuhvaća onaj dio keramičkih materijala koji se koristi u tehničke odnosno, konstrukcijske svrhe. Zbog visoke tvrdoće i otpornosti trošenju keramika se koristi za obradu čelika i drugih materijala te za sve konstrukcijske dijelove koji su izloženi visokom trenju. Zbog stabilnosti i jakosti veza keramički materijali imaju visoko talište i visoku kemijsku postojanost, stoga su prijeko potrebni za mnoge tehničke primjene. Nove vrste keramike su i dimenzijski postojane na visokim temperaturama pa je vrlo izgledna i primjena keramike u autoindustriji za dijelove motora.

Keramika ima mnoga izuzetna svojstva, no njezinu širu primjenu u tehnici ograničavaju niska žilavost, mala otpornost na toplinski umor i niska vlačna čvrstoća. Usavršavanjem izrade keramike ovi nedostaci se pokušavaju značajnije smanjiti.

Najznačajniji utjecajni čimbenici na svojstva keramike su: kemijski sastav, mikrostruktura i stanje površine. Utjecajni čimbenici su i temperatura, okolina, kao i vrsta te karakter naprezanja. Ciljanim stvaranjem određenih mikrostruktura nastoje se dobiti keramički materijali željenih svojstava.

Keramički materijali u pravilu se oblikuju pri sobnoj temperaturi iz sirovine, zatim se podvrgavaju postupku sinteriranja, na povišenoj temperaturi i tlaku, a nakon čega postižu maksimalnu moguću gustoću i uporabna mehanička svojstva. Završna obrada uključuje brušenje dijamantnim alatima, poliranje, lepanje, rezanje i obradu laserom.

2.2 Podjela konstrukcijske keramike

Njemačka keramička industrija keramiku dijeli prema veličini zrna, na grubu i finu (sitnozrnatu) keramiku. **Gruba keramika** ima veličinu zrna od 0,1 mm do 0,2 mm i rabi se u proizvodnji opeka i drugih konvencionalnih vatrostalnih materijala. **Fina keramika** posjeduje sastavne dijelove mikrostrukture manje od 0,1 mm i u nju se ubraja tehnička keramika, keramika za kuhinjsko posuđe, ukrasna keramika, keramika za sanitarije, zidne i podne pločice, te brusna sredstva na keramičkoj osnovi. Nadalje, konstrukcijska keramika može se podijeliti:

- prema namjeni,
- prema kemijskom sastavu.

Prema namjeni keramika se dijeli na:

- funkcionalnu keramiku,
- visokokvalitetnu keramiku,
- konstrukcijsku keramiku,
- elektrokeramiku,
- reznu keramiku,
- biokeramiku.

Funkcionalna keramika je visokokvalitetan materijal čija se svojstva koriste u određenu svrhu (npr. keramički dijelovi koji iskazuju posebna električna, magnetska, dielektrična ili optička svojstva).

Visokokvalitetna keramika je visokorazvijen, visokokvalitetan keramički materijal koji je pretežno nemetalan i anorganski te posjeduje određena svrhovita svojstva.

Konstrukcijska keramika (inženjerska keramika) podrazumijeva materijale koji u bilo kojem obliku moraju izdržati mehanička opterećenja (npr. savojna i tlačna).

Elektrokeramika je visokokvalitetna keramika koja se, na temelju svojih specifičnih svojstava, primjenjuje u elektrotehnici i elektronici.

Rezna keramika je visokokvalitetna keramika, koja je zbog svoje otpornosti na trošenje i visoke temperature, prikladna za izradu alata za obradu odvajanjem čestica (tokarenje, bušenje, glodanje).

Biokeramika je visokokvalitetna keramika koja se primjenjuje u medicini, tj. u ljudskom organizmu (za izradu i popravak tvrdog tkiva, kostiju, zubi, implantate itd.).

Prema kemijskom sastavu tehnička keramika dijeli se na:

- silikatnu keramiku,
- oksidnu keramiku,
- neoksidnu keramiku.

Silikatna keramika je najstarija vrsta keramike. U silikatnu keramiku se ubrajaju: tehnički porculan, steatit, kordijerit, mulit. Glavne sirovine iz kojih se dobivaju su glina i kaolin, glinenci i talk (milovka) koji sadrže silicij. Sinteriranjem se dobiva višefazni izradak koji sadrži kristalnu fazu i visok udio staklene faze (> 20 %) čiji je glavni sastojak silicijev oksid (SiO_2). Silikatna keramika je značajno jeftinija i pristupačnija od oksidne i neoksidne keramike zbog relativno niskih temperatura sinteriranja, dobre mogućnosti kontrole procesa i dostupnosti prirodne sirovine, dok su za proizvodnju oksidne i neoksidne keramike nužni skupi sintetički prašci i visoke temperature sinteriranja. Silikatna keramika ima veliku primjenu u termotehnici, mjernoj i regulacijskoj tehnici, procesnoj tehnici, u tehnici visokog i niskog napona (izolatori, osigurači, katalizatori i kućišta) kao i u izradi elektroinstalacija i vatrostalnih proizvoda.

Oksidna keramika uglavnom podrazumijeva materijal koji se sastoji od jednokomponentnih metalnih oksida (> 90 %) izgrađenih od jedne kristalne faze [6]. Sirovine koje se koriste za dobivanje oksidne keramike uglavnom su dobivene sintetičkim putem i imaju visok stupanj čistoće. Iz tog razloga, keramički materijali iz skupine oksidne keramike nemaju udio staklene faze ili je taj udio vrlo nizak. Pri visokim temperaturama sinteriranja ove vrste keramike nastaje vrlo ujednačena

mikrostruktura. Zahvaljujući ujednačenoj mikrostrukturi oksidna keramika ima izuzetno dobra svojstva.

Primjeri jednokomponentnog sustava oksidne keramike su aluminij oksid (Al_2O_3), magnezij oksid (MgO), cirkonij oksid (ZrO_2), titan oksid (TiO_2).

Osim jednokomponentnih keramičkih materijala postoje i višekomponentni keramički materijali. Primjeri višekomponentnog sustava oksidne keramike su:

- miješana oksidna keramika (npr. aluminij titanat, olovo cirkonij-titanat),
- kompozitna keramika (npr. aluminij oksid ojačan cirkonij oksidom).

U skupinu **neoksidne keramike** ubrajaju se materijali na temelju spojeva bora, ugljika, dušika i silicija (ovdje se ne ubrajaju ugljični proizvodi od amornog grafita) [19]. Najvažniji predstavnici neoksidne keramike jesu: silicij karbid (SiC), silicij nitrid (Si_3N_4), aluminij nitrid (AlN), bor karbid (B_4C_3) i dr.

2.4. Aluminij oksidna keramika (Al_2O_3)

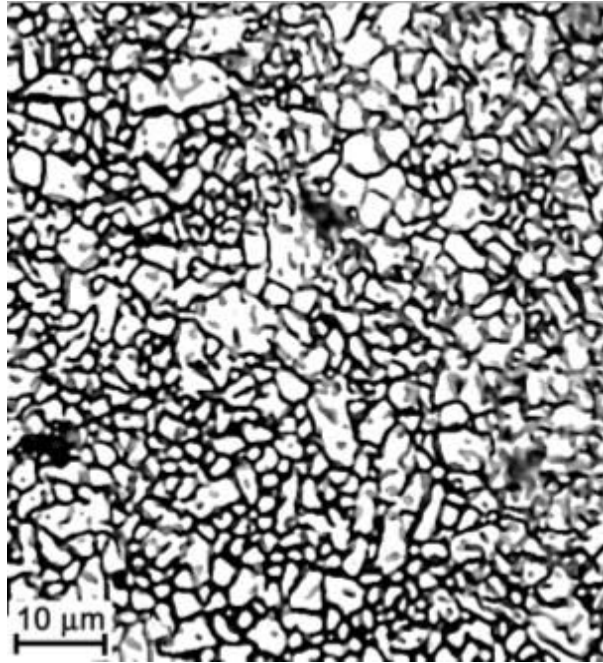
Aluminij oksidna keramika (Al_2O_3) je najvažniji materijal iz skupine oksidne keramike obzirom na vrlo široku primjenu. Najvažnija svojstva aluminij oksidne keramike su:

- visoka gustoća,
- niska žilavost,
- visoka čvrstoća,
- visoka tvrdoća,
- temperaturna stabilnost,
- visoka otpornost na abrazijsko trošenje,
- dobar električni izolator,
- kemijska postojanost u agresivnom mediju (djelomična postojanost na djelovanje lužina),
- korozijska otpornost na povišenim temperaturama,
- niska cijena sirovine.

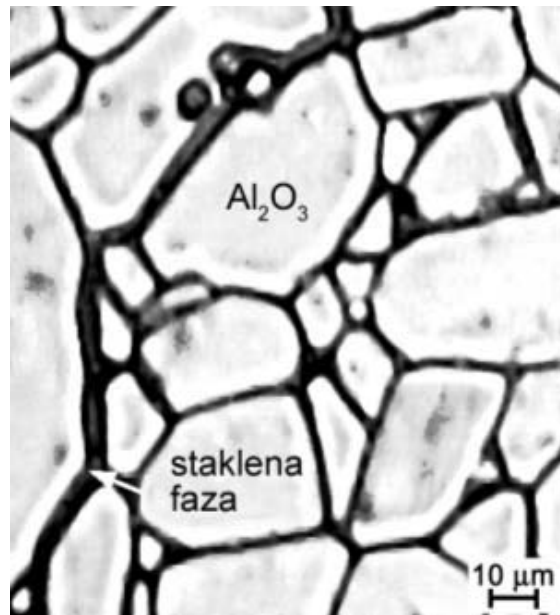
Upravo zbog navedenih svojstava aluminij oksidna keramika svoju primjenu nalazi u sljedećim područjima:

- industriji sanitarija za brtvene elemente,
- elektrotehnici za izolatorske elemente,
- elektronicima,
- strojogradnji za dijelove otporne na trošenje,
- kemijskoj industriji za dijelove otporne na koroziju i visoke temperature,
- medicini za implantate,
- visokotemperaturna primjena, kao npr. sapnice za plamenik.

U praksi se najčešće koristi aluminij oksidna keramika s udjelom aluminij oksida u području od 80% do 99%. U ovisnosti o udjelu aluminij oksida, aditiva, nečistoća i procesu sinteriranja postižu se različite mikrostrukture, a time i različita svojstva (Slike 2.1. i 2.2.). Mehanička svojstva ne ovise o udjelu aluminij oksida, već o pripremi praha za proizvodnju keramike.



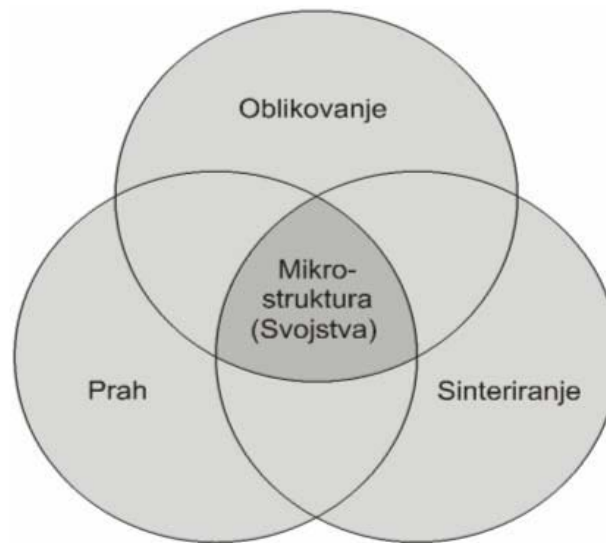
Slika 2.1. Mikrostruktura sitnozrnate aluminij oksidne keramike [6].



Slika 2.2. Mikrostruktura grubozrnate aluminij oksidne keramike [6].

2.4. Postupci proizvodnje keramike

Na Slici 2.3. prikazane su operacije koje u procesu proizvodnje utječu na mikrostrukturu keramike, a time i na svojstva keramike. [6]



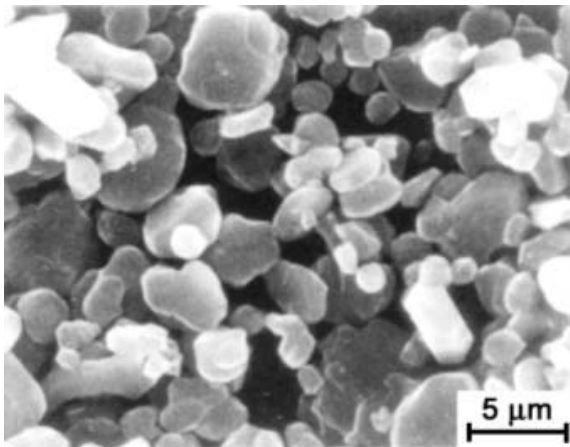
Slika 2.3. Utjecajni čimbenici na mikrostrukturu keramike [6].

U procesu proizvodnje na mikrostrukturu, odnosno svojstva keramike utječu: svojstva praha, proces oblikovanja te proces sinteriranja.

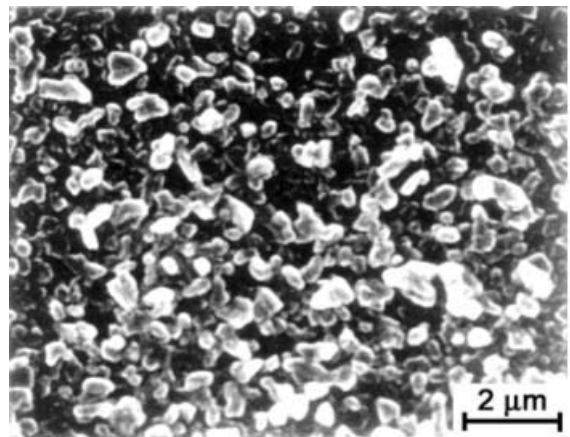
2.4.1. Sirovine i aditivi

Konstruktivska keramika dobiva se od čistih, prirodnih minerala (oksidi, nitridi, boridi, karbidi i dr.) ili kemijskom sintezom elemenata kisika, dušika, ugljika, bora i silicija s metalima kao što su: aluminij, cirkonij, titan te njihovim legurama [7]. Pri tome bitno je sljedeće:

- vrsta sirovine,
- čistoća,
- veličina zrna (Slike 2.4. i 2.5.),
- specifična površina,
- količina i vrsta aditiva (pomoćnih sredstava).



Slika 2.4. Grubozrnati Al₂O₃ [6].

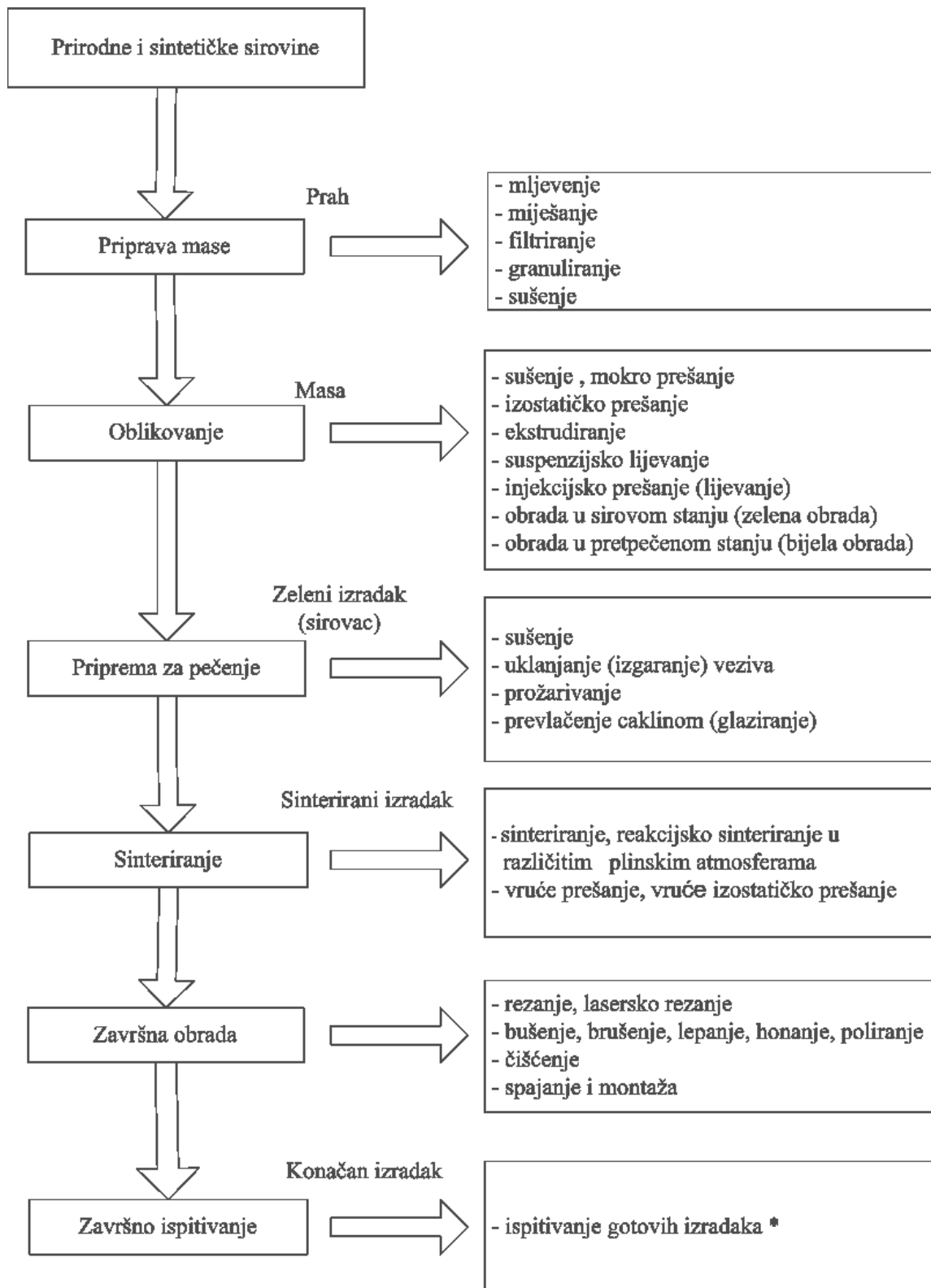


Slika 2.5. Sitnozrnati Al₂O₃ [6].

Aditivi (tj. pomoćna sredstva) mogu biti:

- za oblikovanje (uglavnom su to organske tvari):
 - sredstva za tečenje,
 - plastifikatori,
 - očvršćivači.
- za sinteriranje (anorganske tvari, npr. MgO).

Tijek proizvodnje keramičkih materijala prikazan je na Slici 2.6.



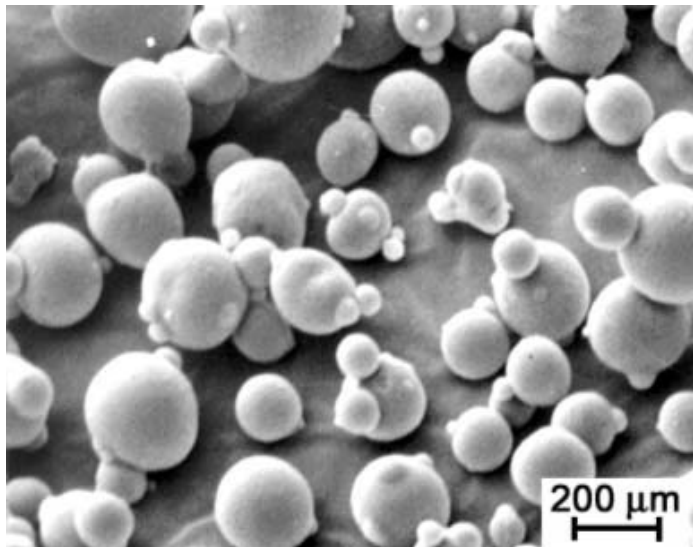
* - po specifičnim zahtjevima kupaca

Slika 2.6. Tijek proizvodnje keramičkih materijala [6].

2.4.2. Priprava mase za oblikovanje

Prva faza u proizvodnji keramičkih materijala je priprema mase za oblikovanje. Pri proizvodnji keramike može se koristiti već pripremljena masa za oblikovanje ili se masa priprema iz sirovine i aditiva. Pripremljena masa u oba slučaja može biti u sljedećim oblicima:

- u obliku suspenzije za lijevanje,
- u obliku praha za prešanje (Slika 2.7.),
- u obliku keramičkog tijesta za ekstrudiranje.

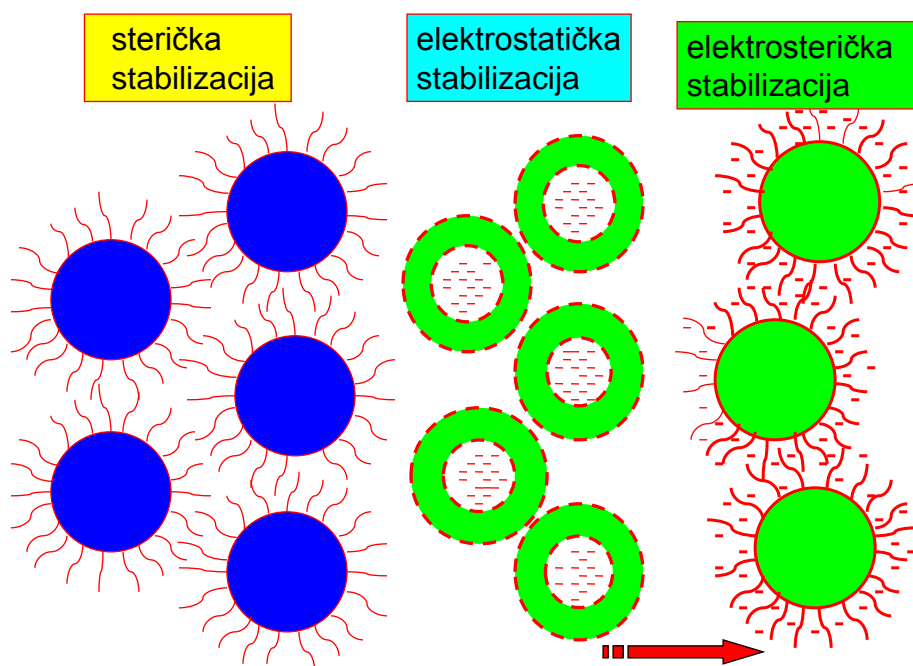


Slika 2.7. Granule Al₂O₃ za prešanje [6].

Prilikom pripreme mase za oblikovanje, pogotovo kada je riječ o pripremi suspenzije, poželjno ju je stabilizirati. Stabilizacija je mehanizam koji omogućava odvojenost između čestica u suspenziji, te ovisi o odbojnim silama među česticama.

Suspenziju je moguće stabilizirati nekim od sljedećih mehanizama (Slika 2.8.):

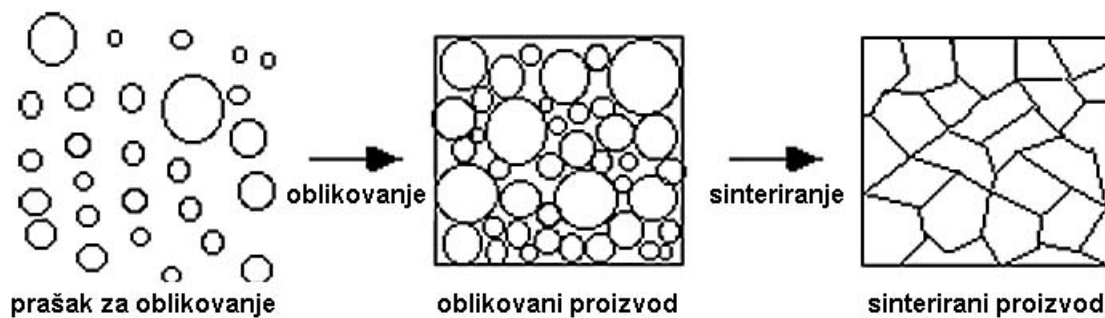
- elektrostatičkom stabilizacijom,
- steričkom stabilizacijom,
- elektrosteričkom stabilizacijom (kombinacija prva dva mehanizma stabilizacije).



Slika 2.8. Mehanizmi stabilizacije suspenzija [8].

2.4.3. Oblikovanje

Oblikovanjem se postiže zgušnjavanje mase, čime se dobiva čvrstoća i oblik koji omogućavaju daljnju obradu (Slika 2.9.). Pri procesu oblikovanja bitno je dobivanje sirovaca jednake gustoće po čitavom presjeku. Posljedice nejednolike gustoće sirovaca prilikom oblikovanja, očituju se u postupku sinteriranja, a uključuju: zaostala naprezanja i pojavu deformacije [6]. Izbor postupka oblikovanja ovisi o veličini i geometriji proizvoda te o zahtjevima na proizvod.



Slika 2.9. Oblikovanje mase za sinteriranje [9].

Postupci oblikovanja keramike dijele se u sljedeće skupine prema udjelu vode:

- mokro i vlažno prešanje, vlažnost: (0-15)%,
- plastično oblikovanje (ekstrudiranje i injekcijsko prešanje), vlažnost: (15-25)%,
- lijevanje (lijevanje suspenzija, folija i tlačno lijevanje), vlažnost: >25%.

U Tablici 2.1. prikazane su prednosti i nedostaci osnovnih postupaka oblikovanja.

Tablica 2.1. Prednosti i nedostaci osnovnih postupaka oblikovanja [6].

| Postupci oblikovanja | Prednosti | Nedostaci |
|--|--|--|
| Lijevanje suspenzije | <ul style="list-style-type: none"> • složeni dijelovi (tankostijeni, nesimetrični) • nizak trošak materijala | <ul style="list-style-type: none"> • složena reologija • hrapave površine • problematično stvaranje oblika • ograničena tolerancija oblika • široka tolerancija mjera |
| Tlačno lijevanje (u usporedbi sa suspenzijskim lijevanjem) | <ul style="list-style-type: none"> • brzo stvaranje komada • mali gubitci uslijed sušenja • dobra dimenzijska stabilnost • nema povratnog sušenja • ne zahtijeva mnogo mjesta | <ul style="list-style-type: none"> • skupi alati • potrebne velike serije • problematične organske otopine |
| Lijevanje folija | <ul style="list-style-type: none"> • kontinuirana proizvodnja • tanki slojevi • dobra dimenzijska stabilnost • velik proizvodni kapacitet | <ul style="list-style-type: none"> • ograničena geometrija dijelova • visoki investicijski troškovi • nužno je sušenje |
| Injekcijsko prešanje | <ul style="list-style-type: none"> • složene geometrije • uske tolerancije • dobra ponovljivost (reproducibilnost) • vrlo dobra kvaliteta površine • oštre konture • velik broj komada | <ul style="list-style-type: none"> • visoki troškovi alata • veliko trošenje alata • ograničena veličina izradaka • skupo uklanjanje veziva • neuobičajeni gradijenti gustoće |
| Ekstrudiranje | <ul style="list-style-type: none"> • kontinuirana proizvodnja • velik proizvodni kapacitet • dijelovi velikih duljina • jeftina proizvodnja | <ul style="list-style-type: none"> • izražene teksture • nužno sušenje |
| Suho prešanje | <ul style="list-style-type: none"> • automatizirani procesi • dobra ponovljivost • dobra dimenzijska stabilnost • ograničeno sušenje • jeftina izrada velikog broja komada | <ul style="list-style-type: none"> • ograničenja geometrije dijelova • mogući gradijenti gustoće • skupi alati za oblikovanje • skupa priprema praha |
| Mokro/vlažno prešanje (u usporedbi sa suhim prešanjem) | <ul style="list-style-type: none"> • dijelovi složenih geometrija • ravnomjerna raspodjela gustoće | <ul style="list-style-type: none"> • nužno sušenje • slabo zgušnjavanje • veće tolerancije |

2.5. Svojstva konstrukcijske keramike

Keramički materijali imaju neka specifična svojstva koja drugi materijali nemaju, stoga im je i primjena vrlo široka i raznolika. U Tablici 2.3. prikazana je usporedba nekih svojstava metala, keramike i polimera.

Tablica 2.2. Usporedba svojstava keramike, metala i polimera [6].

| SVOJSTVA | KERAMIKA | METAL | POLIMERI |
|---------------------------------------|----------|-------|----------|
| Tvrdoća | ↑ | ↓ | ↓ |
| Modul elastičnosti | ↑ | ↑ | ↓ |
| Otpornost prema visokim temperaturama | ↑ | ↓ | ↓ |
| Toplinska rastezljivost | ↓ | ↑ | ↑ |
| Duktilnost | ↓ | ↑ | ↑ |
| Otpornost na koroziju | ↑ | ↓ | ↓ |
| Otpornost na trošenje | ↑ | ↓ | ↓ |
| Električna vodljivost | ↕ | ↑ | ↓ |
| Gustoća | ↓ | ↑ | ↓ |
| Toplinska vodljivost | ↕ | ↑ | ↓ |

U odnosu na metalne materijale, konstrukcijska keramika posjeduje sljedeća svojstva:

- višu tvrdoću, osobito na visokim temperaturama,
- višu tlačnu i savojnu čvrstoću (posebno na visokim temperaturama),
- otpornost puzanju,
- viši modul elastičnosti, tj. krutost,
- nižu toplinsku i električnu provodnost,
- visoku otpornost trošenju,
- visoku kemijsku postojanost (prema različitim medijima),
- nižu gustoću,
- nižu toplinsku dilataciju.

Prednosti konstrukcijske keramike su:

- velika tvrdoća,
- velika čvrstoća,
- visoke dopuštene temperaturne primjene,
- stabilnost oblika (specifična krutost),
- korozijska postojanost, otpornost na kemijske utjecaje bilo koje vrste,
- otpornost na atmosferilije,
- otpornost na trošenje,
- vrlo dobra električna izolacijska svojstva,
- dielektrična i feroelektrična svojstva,

- mala gustoća,
- mala i velika toplinska vodljivost.

Nedostatci konstrukcijske keramike su:

- mala žilavost – visoka krhkost,
- niska otpornost prema toplinskom umoru (šoku),
- niska vlačna čvrstoća,
- velika rasipanja vrijednosti za svojstva,
- visoki troškovi sirovina i postupaka oblikovanja.

Prema sastavu i pripravi sirovine, kao i prema načinu oblikovanja te vrsti pečenja, svojstva pojedinih keramičkih proizvoda u velikoj se mjeri mogu prilagoditi predviđenoj namjeni.

2.6. Mehanika fluida

2.6.1. Viskoznost i Newtonov zakon viskoznosti

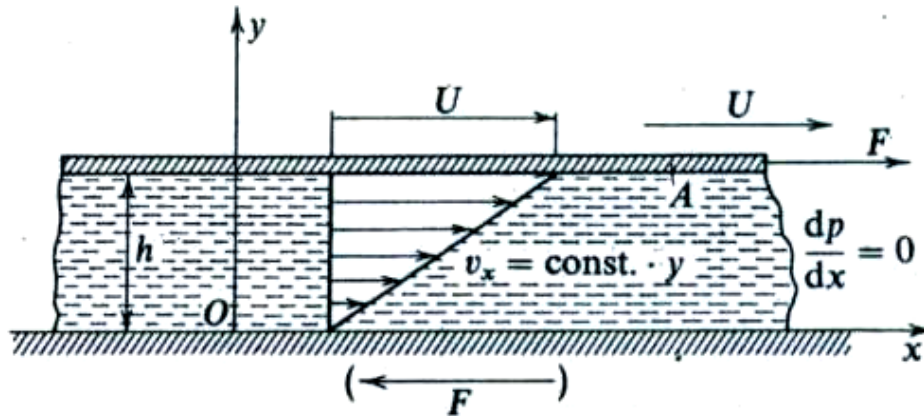
Viskoznost je svojstvo otpornosti fluida prema smičnoj deformaciji. Ona predstavlja mjeru unutrašnjeg trenja, koje djeluje kao otpor promjeni položaja molekula prilikom strujanja fluida, kada se fluid nalazi pod djelovanjem smičnog naprezanja. To unutrašnje trenje je, u idealnom slučaju, ovisno jedino o tlaku i temperaturi, a tada je uspostavljena brzina smicanja između pokretnih slojeva u fluidu, proporcionalna smičnom naprezanju.

Recipročno svojstvo viskoznosti naziva se fluidnost ili svojstvo tečenja.

Viskoznost se objašnjava pomoću jednostavno zamišljenog eksperimenta koji je prikazan na slici 2.10. Fluid se nalazi između dviju ravnih paralelnih ploča, razmaknutih za udaljenost h i dovoljno velikih površina da se mogu zanemariti učinci rubova. Donja ploča miruje, a gornja ploča površine A , pod djelovanjem sile F , giba se paralelno sa svojom ravninom brzinom U . Pokazuje se da se čestice fluida lijepe odnosno prijanjaju uz stijenku donje, mirujuće ploče, a one čestice uz stijenku gornje ploče gibaju se istom brzinom U , kao i ploča. Ukoliko udaljenost između ploča h nije prevelika, a brzina U previsoka te ukoliko nema uzdužnog gradijenta tlaka: $dp/dx = 0$, uspostavlja se linearni profil brzine od 0 do U , prikazan na slici 2.10. Također, sila F proporcionalna je površini ploče A , brzini U , a obrnuto proporcionalna udaljenosti između ploča h . Koeficijent proporcionalnosti označava se s μ , a rezultat tog eksperimenta valjan je za veliku grupu fluida i izražava se u obliku *Newtonova zakona viskoznosti*:

$$F = \mu \frac{AU}{h} \quad (1)$$

gdje koeficijent μ nosi naziv dinamički koeficijent viskoznosti ili dinamička, apsolutna viskoznost, izražena u Pa s.



Slika 2.10. Prikaz eksperimenta za Newtonov zakon viskoznosti [10].

Brzina U i udaljenost h u opisanom pokusu moraju biti ograničeni da bi se osiguralo *slojevito* ili *laminarno strujanje*. Laminarnost strujanja nije stabilna pojava i pri višim brzinama U ili većim razmacima h između ploča strujanje postaje *turbulentno* s osjetnim fluktuacijama brzine strujanja i intenzivnim miješanjem makroskopskih gromada čestica fluida između udaljenih slojeva. Za turbulentni režim strujanja nije valjan Newtonov zakon viskoznosti definiran izrazom (1).

Za laminarno strujanje uvjet je da se izmjene čestica fluida između bliskih slojeva zbivaju u mikroskopskom, molekularnom mjerilu.

Sila F , prenosi se kroz slojeve fluida do donje ploče, jer je čitav fluid u prostoru između ploča u kontinuiranom deformiranju. Zbog linearnog profila brzine strujanja (slika 2.10.), brzina deformiranja fluida je konstantna, pa je i tangencijalna (smična) sila F u svakom sloju ista (npr. ako se gornja ploča na slici 2.10. giba brzinom $U/2$ na udaljenosti $h/2$ od donje ploče, daje istu silu F), tako da je svaki sloj fluida u stanju smičnog naprezanja koje ostaje konstantno u prostoru između dvije ploče. Izraz

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (2a)$$

drugi je oblik Newtonova zakona viskoznosti.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad \left(\frac{N}{mm^2} \right)$$

$$F_{\tau} = \mu A \frac{dv}{dz} \quad (N)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left(\frac{m^2}{s} \right) \quad (2b)$$

μ - koeficijent proporcionalnosti koji se naziva dinamički koeficijent viskoznosti (za newtonske fluide je konstanta),

dv/dz - gradijent brzine u smjeru okomitom na strujanje, tj. brzina deformacije,

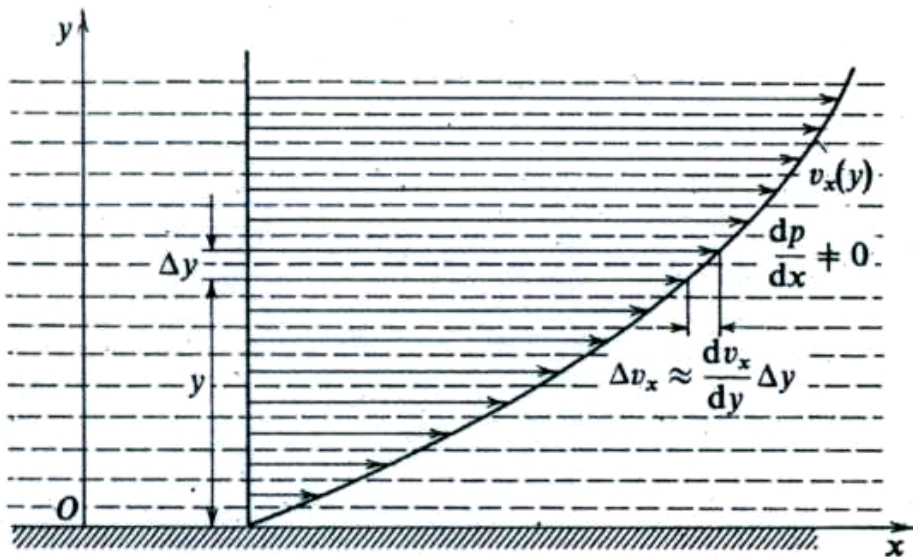
ν - kinematički koeficijent viskoznosti (mijenja se promjenom temperature).

U paralelnom pravocrtnom laminarnom strujanju s proizvoljnim profilom brzine, koji se ne mijenja s vremenom (Slika 2.11.), razmatranja koja su pratila opisani eksperiment, mogu se primijeniti na element fluida debljine Δy , preko kojeg brzina strujanja linearno raste za $\Delta v_x \approx (dv_x/dy)\Delta y$.

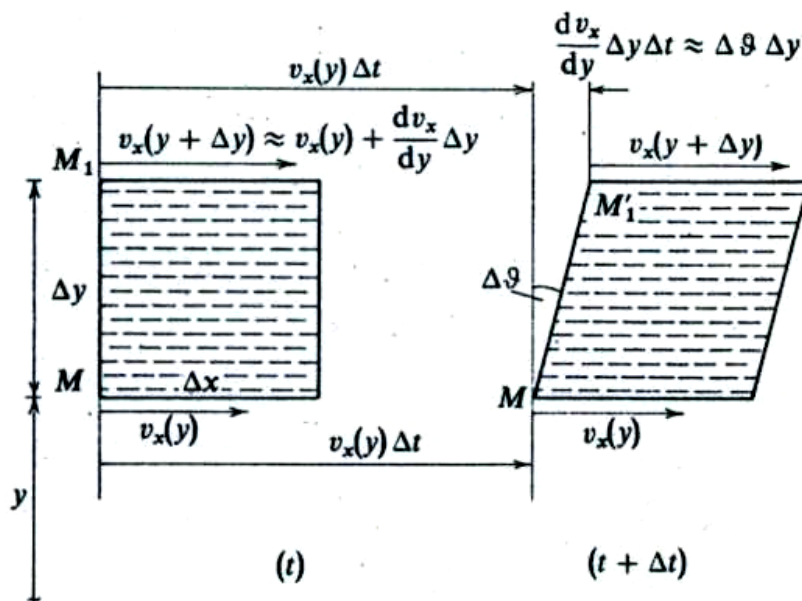
Taj prirast brzine odgovara brzini U u izrazu (1), a debljina Δy udaljenosti h , i kada $\Delta y \rightarrow 0$, za tangencijalno naprezanje uzduž sloja na udaljenosti y dobiva se izraz:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (3)$$

Izraz (3) je općenitiji oblik Newtonova zakona viskoznosti za proizvoljan profil brzine paralelnoga pravocrtnoga laminarnog strujanja. Derivacija dv/dy u izrazu (3) predstavlja brzinu kutne deformacije elementa fluida.



Slika 2.11. Nelinearni profil brzine paralelnog pravocrtnog laminarnog strujanja [10].



Slika 2.12. Brzina kutne deformacije pri paralelnom pravocrtnom laminarnom strujanju [10].

U laminarnom strujanju proizvoljnog profila brzine, prikazanom na slici 2.12., uz $v_x = v_x(y)$ i $v_y = v_z \equiv 0$, formira se u točki M , kao jednim od vrhova, pravokutni element fluida s bridovima $\Delta y = MM_1$ i Δx . Budući da točka M_1 brida Δy ima veću brzinu od točke M za približan iznos $(dv_x/dy)\Delta y$ (Slika 2.12.), taj brid, prvobitno u vertikalnom položaju u trenutku t , zauzet će u trenutku $(t + \Delta t)$ kosi položaj M'_1M , otklonjen od vertikale za kut $\Delta\varphi \approx (dv_x/dy)\Delta y\Delta t/\Delta y$. Ako je smanjenje prvobitnoga pravog kuta između bridova Δx i Δy pozitivna kutna (smična) deformacija, tada je brzina kutne deformacije elementa fluida, definirana u točki M i u trenutku t , dana izrazom:

$$\frac{dv}{dt} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ \Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \frac{\left(\frac{dv_x}{dy}\Delta y\Delta t\right)}{\Delta t} = \frac{dv_x}{dy} \cdot \frac{1}{s} \quad (4)$$

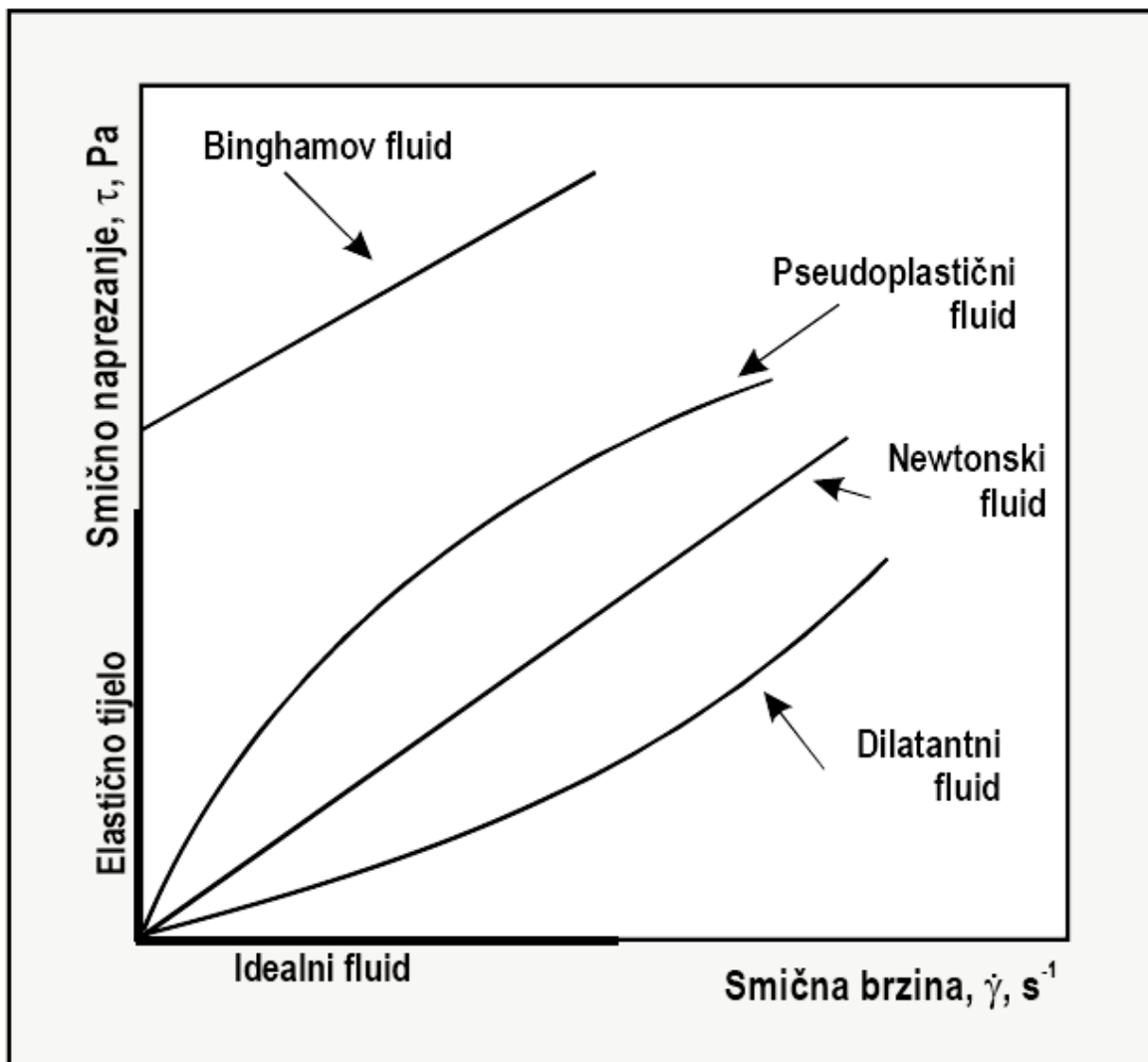
Pomoću jednakosti (4), Newtonov zakon viskoznosti definiran jednadžbom (3) može se izraziti u obliku:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

što znači da je smično naprezanje u fluidu proporcionalno brzini kutne deformacije. Taj je zakon analogan Hookeovu zakonu za elastična tijela, prema kojem je smično naprezanje u elastičnom tijelu proporcionalno kutnoj deformaciji. [10]

2.6.2. Reologija

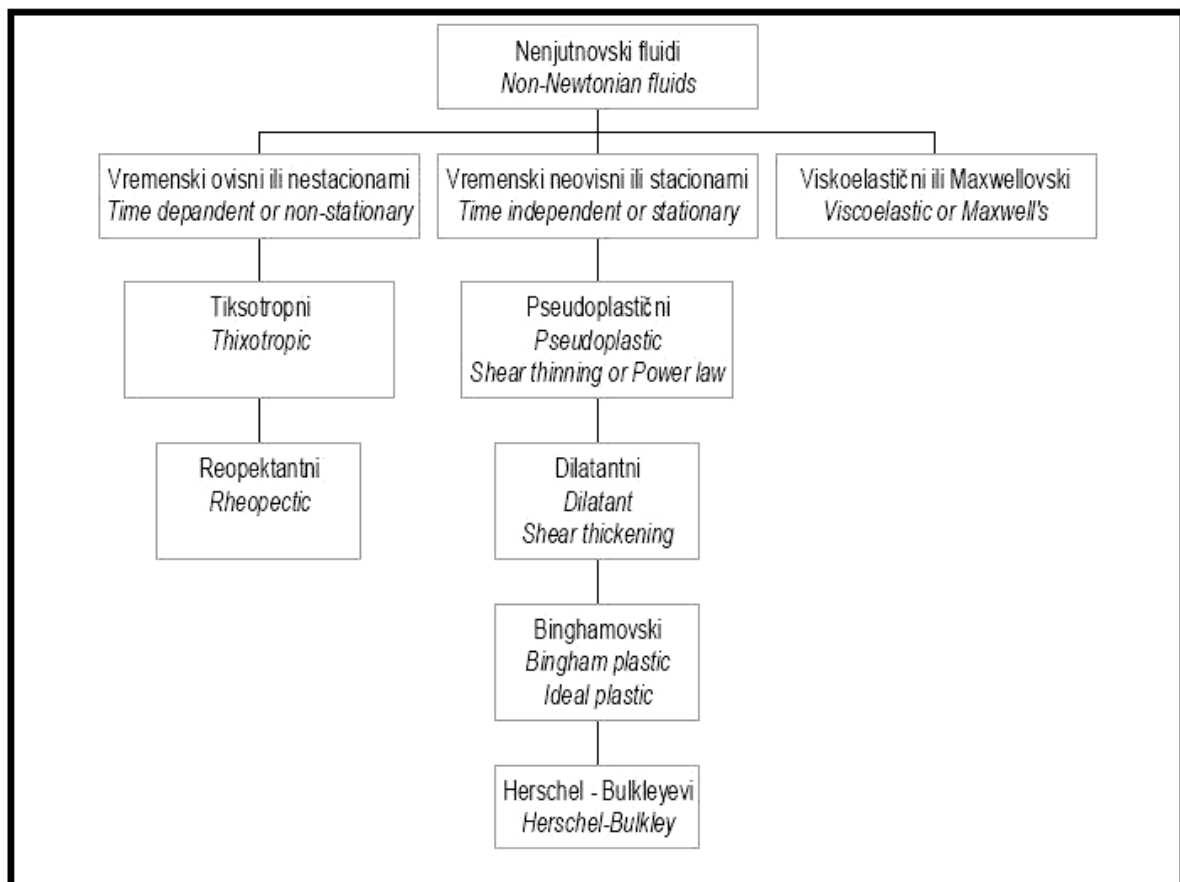
Grana mehanike koja se bavi modelima neprekidnih sredina različitih tipova odnosa naprezanja, deformacije i brzine deformacije zove se *reologija*. Ovisnost smičnog naprezanja o smičnoj brzini obično se za različite tipove fluida prikazuje tzv. *reološkim dijagramima*. Na Slici 2.13. prikazan je reološki dijagram različitih modela neprekidne sredine [11].



Slika 2.13. Reološki dijagram [11].

1. *Elastično tijelo* napregnuto je proporcionalno veličini deformacije (proporcionalna sili) i ne ovisi o brzini deformacije.
2. *Idealni fluid* je neviskozni fluid kod kojeg ne dolazi do promjene smičnog naprežanja povećanjem smične brzine.
3. *Newtonski fluidi* ponašaju se u skladu s Newtonovim zakonom viskoznosti
4. *Nenewtonski fluidi* ne ponašaju se u skladu s Newtonovim zakonom viskoznosti.

Podjela nenewtonskih fluida prikazana je na Slici 2.14.



Slika 2.14. Podjela nenewtonskih fluida [12].

2.6.2.1. Newtonski fluidi

Fluidi koji slijede linearni odnos naprezanja i brzine kutne deformacije prema Newtonovu zakonu viskoznosti, izraz (3) ili (5), zovu se *newtonski fluidi*. Za Newtonovske fluide tangencijalna naprezanja su proporcionalna gradijentu brzine, nagib pravca ovisi o dinamičkom koeficijentu viskoznosti. Voda, ulja, zrak i ostale kapljevine i plinovi, koji se najčešće susreću u tehnici, newtonski su fluidi [10, 13].

2.6.2.2. Nenewtonski fluidi

Reološka jednačba nenewtonskog fluida ima oblik:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n \quad (6)$$

gdje n može biti veći ili manji od 1. Ako $n > 1$, radi se o dilatantnim nenewtonskim fluidima, a ukoliko je $n < 1$ riječ je o pseudoplastičnim fluidima.

Kod nenewtonskih fluida viskoznost ovisi, osim o temperaturi i tlaku, još i o brzini smicanja (deformiraju se nelinearno – tangencijalna naprezanja nisu proporcionalna tangencijalnim deformacijama). Obzirom da je pojam viskoznosti definiran Newtonovim zakonom kao faktor proporcionalnosti, označava se tako samo ona *vrijednost ovog faktora koja vrijedi za određenu brzinu*, kao *prividna viskoznost*. Do takvog načina tečenja dolazi kada su koloidne čestice prisutne u newtonskom fluidu vrlo velike molekule nepravilnog oblika i koje se pod djelovanjem nastalih smičnih sila, pri visokim brzinama smicanja, deformiraju i usmjeravaju u pravcu strujanja. Ovo ponašanje, pad viskoznosti pri porastu brzine smicanja, označava se kao takozvana strukturna viskoznost [10, 13].

2.6.2.3. Binghamov fluid

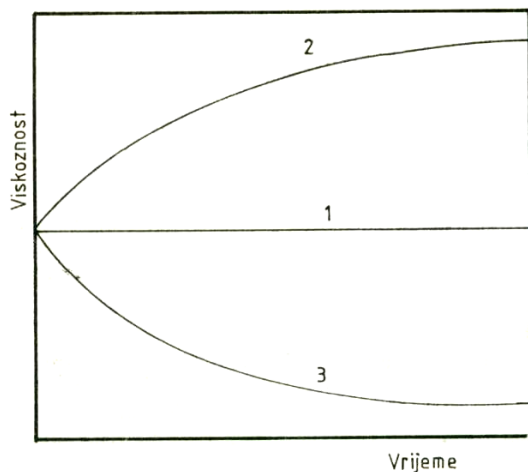
Linearna veza između prividne dinamičke viskoznosti i brzine smicanja osim kod newtonskih fluida, također postoji još i kod drugih tvari kada se savlada minimalno smično naprežanje i postigne ustaljenost tečenja kod takozvanih Binghamovih fluida. Ako brzina smicanja raste eksponencijalno sa temperaturom, tada se radi o padu viskoznosti sa porastom smičnog naprežanja. Takve materije se u užem smislu označavaju kao strukturnoviskozni fluidi. Reološka jednažba Binghamovih fluida ima oblik:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (7)$$

gdje je τ_0 minimalno smično naprežanje, nakon kojeg se uspostavlja ustaljenost tečenja.

2.6.2.4. Vremenski ovisni nenevtonski fluidi

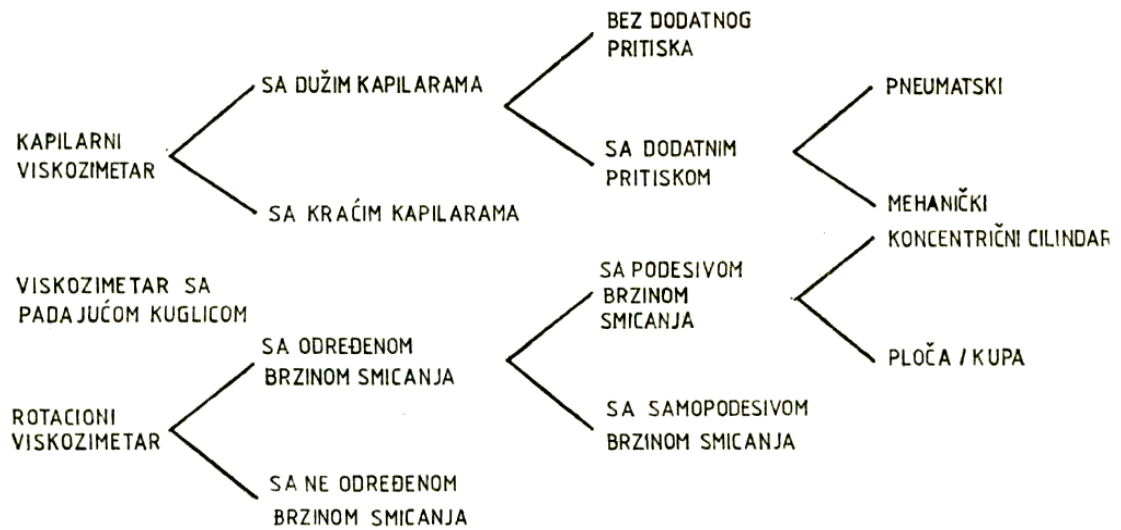
Kod ove grupe fluida, viskoznost nije funkcija samo brzine smicanja, već i vremena trajanja smicanja. Razlikuju se tiksotropni i reopektantni fluidi, ovisno o tome opada li ili raste viskoznost u ovisnosti o vremenu. Ukoliko se viskoznost sustava smanjuje s vremenom govori se o tiksotropnim sustavima, a ukoliko raste govori se o reopektantnim sustavima. Na Slici 2.15. prikazani su reopektantni i tiksotropni sustavi.



Slika 2.15. Ovisnost prividne viskoznosti o vremenu trajanja smičnog naprezanja
(1-newtonski fluid, 2-reopektantni sustavi, 3-tiksotropni sustavi) [13].

2.6.3. Određivanje viskoznosti

Zbog izražene ovisnosti o temperaturi mora se kod svakog podatka o viskoznosti navesti temperatura mjerenja. Obično se mjerenja obavljaju pri tlaku od oko 1 bar tako da fluid ne bi u uvjetima mjerenja pokazao strukturnu viskoznost. Viskoznost se određuje u viskozimetrima sa kapilarama, padajućim kuglicama i rotacijskim viskozimetrima (Slika 2.16.) [13].



Slika 2.16. Vrste viskozimetara [13].

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Priprema suspenzija

Za pripremu suspenzija korišten je Al_2O_3 prah (visoke čistoće, C90, Alcan Chemicals, Ohio). Prema deklaraciji proizvođača, prosječna raspodjela veličine čestica korištenog praha iznosi $0,9 \mu\text{m}$.

U prvom nizu eksperimenata pripremljene su tri suspenzije sa sadržajem Al_2O_3 praha od 60%, 70% i 80%, s konstantnim udjelom od 0,2% polivinil alkohola (PVOH), konstantnim udjelom disperzanta od 0,4% i konstantnim udjelom spinela od 0,08%. Kao disperzant korišten je amonij polimetakrilat, pod trgovačkim nazivom Darvan. Spinel se dodaje kako bi se spriječio abnormalan rast kristalnog zrna prilikom sinteriranja. Sastavi suspenzija prikazani su u Tablici 3.1.

U drugom nizu eksperimenata također su pripremljene tri suspenzije sa sadržajem Al_2O_3 praha od 60%, 70% i 80%, s istim udjelima Darvana i spinela kao i u prvom nizu eksperimenata. Udio polivinil alkohola u drugom nizu eksperimenata iznosio je 0,4%. Udjeli PVOH, Darvana te spinela preračunati su na masu Al_2O_3 praha. Sastavi pripremljenih suspenzija prikazani su u Tablici 3.2.

Tablica 3.1. Sastav prve grupe pripremljenih suspenzija, iskazan u masenim udjelima (w, %).

| Suspenzija | maseni udio, w, % | | | | |
|------------|--------------------------------|------------------|------|--------|--------|
| | Al ₂ O ₃ | H ₂ O | PVOH | Darvan | Spinel |
| 1 | 60 | 40 | 0,2 | 0,4 | 0,08 |
| 2 | 70 | 30 | 0,2 | 0,4 | 0,08 |
| 3 | 80 | 20 | 0,2 | 0,4 | 0,08 |

Tablica 3.2. Sastav druge grupe pripremljenih suspenzija, iskazan u masenim udjelima (w, %).

| Suspenzija | maseni udio, w, % | | | | |
|------------|--------------------------------|------------------|------|--------|--------|
| | Al ₂ O ₃ | H ₂ O | PVOH | Darvan | Spinel |
| 1 | 60 | 40 | 0,4 | 0,4 | 0,08 |
| 2 | 70 | 30 | 0,4 | 0,4 | 0,08 |
| 3 | 80 | 20 | 0,4 | 0,4 | 0,08 |



Slika 3.1. Vaganje pojedinih komponenata u suspenziji.



Slika 3.2. Komponente suspenzije: Darvan, spinel, Al_2O_3 prah.

Nakon pripreme, suspenziju je potrebno homogenizirati. Za homogenizaciju, odnosno miješanje, korišten je planetarni kuglični mlin (*Pulverisette 6, Fritsch, Germany*) s keramičkim kuglicama. Suspenzija se ulijeva u keramičku posudu za miješanje u kojoj se nalazi deset keramičkih (Al_2O_3) kuglica (Slika 3.3.). Zatim se određuju parametri miješanja na planetarnom kugličnom mlinu: suspenzija se homogenizira tijekom 120 min pri brzini od 300 o./min (Slika 3.4.).



Slika 3.3. Posuda za miješanje s deset keramičkih kuglica.



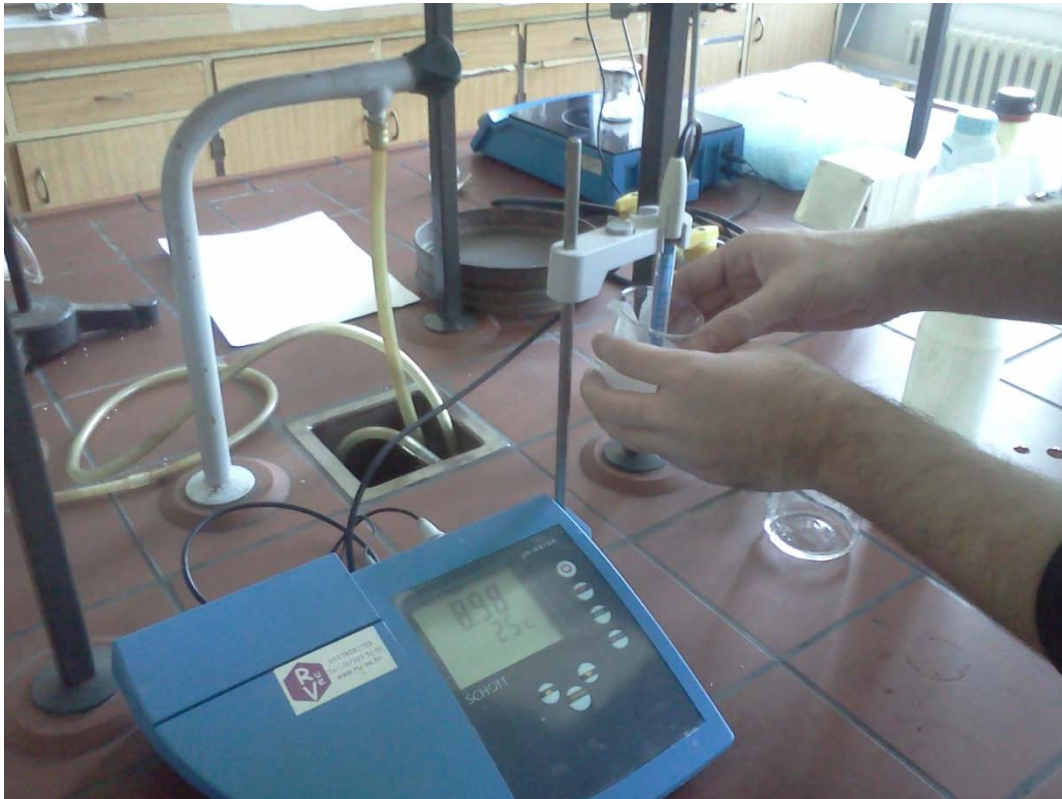
Slika 3.4. Planetarni kuglični mlin.

Nakon homogenizacije potrebno je ukloniti mjehuriće zraka, što je učinjeno u eksikatoru u trajanju od 3 minute (Slika 3.5.). Mjehurići zraka uklanjaju se u cilju dobivanja što homogenije suspenzije, kako bi rezultati reoloških mjerenja bili što pouzdaniji.



Slika 3.5. Uklanjanje mjehurića zraka.

Nakon homogenizacije, izmjerena je pH vrijednost suspenzija, koja je varirala oko 9 (Slika 3.6.).



Slika 3.6. Mjerenje pH vrijednosti suspenzije.

3.2. Ispitivanje reoloških svojstava Al_2O_3 suspenzija

Nakon pripreme suspenzija i homogenizacije, 8 mL suspenzije prenosi se u cilindar rotacijskog viskozimetra (Brookfield DV-III Ultra, SAD) (Slika 3.7.). Temperatura je održavana na $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Određuje se smično naprezanje u ovisnosti o brzini smicanja te viskoznost u ovisnosti o brzini smicanja. Brzina smicanja se povećava od 0 s^{-1} do 200 s^{-1} u 50 jednakih vremenskih intervala. Nakon što brzina smicanja dosegne vrijednost od 200 s^{-1} , smanjuje se do vrijednosti od 0 s^{-1} kako bi se utvrdilo pokazuje li suspenzija svojstvo tiksotropnosti. Mjerenje za svaku suspenziju traje 2 minute.



Slika 3.7. Rotacijski viskozimetar.

Proučen je utjecaj polivinil alkohola i različitih sadržaja Al_2O_3 praha u suspenzijama, primjenom tri reološka modela i reološkim dijagramima. U reološkim dijagramima prikazane su sljedeće ovisnosti:

- ovisnost smičnog naprežanja u odnosu na brzinu smicanja,
- ovisnost viskoznosti u odnosu na brzinu smicanja.

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Rezultati reoloških svojstava Al_2O_3 suspenzija s 0,2% polivinil alkohola

U prvoj skupini suspenzija, pripremljene su tri suspenzije sa sadržajem Al_2O_3 praha od 60%, 70% i 80%, s udjelom polivinil alkohola od 0,2%, s udjelom disperzanta od 0,4% i udjelom spinela od 0,08%. (Tablica 3.1.). Cilj ispitivanja bio je utvrditi utječe li, i u kojoj mjeri, koncentracija suspenzija i udio polivinil alkohola na viskoznost i smično naprezanje.

U Tablici 4.1. prikazani su rezultati izmjerenih vrijednosti viskoznosti i brzine smicanja suspenzija s različitim sadržajem Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%. U Tablici 4.1. prikazani su rezultati izmjerenih vrijednosti smičnog naprezanja i brzine smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

Tablica 4.1. Vrijednosti viskoznosti i brzini smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

| γ (brzina smicanja), s^{-1} | η (viskoznost), mPa s | | |
|---|----------------------------|-------|--------|
| | 60% | 70% | 80% |
| 4,10 | 24,39 | 97,56 | 402,44 |
| 8,10 | 18,52 | 61,73 | 277,78 |
| 12,10 | 16,53 | 41,32 | 231,40 |
| 16,10 | 12,42 | 37,27 | 186,34 |
| 20,10 | 9,95 | 29,85 | 146,77 |
| 24,10 | 10,37 | 26,97 | 124,48 |
| 28,10 | 8,90 | 24,91 | 119,22 |
| 32,10 | 7,79 | 23,36 | 105,92 |
| 36,10 | 8,31 | 23,55 | 99,72 |
| 40,10 | 8,73 | 21,20 | 92,27 |
| 44,10 | 7,94 | 20,41 | 87,30 |
| 48,10 | 8,32 | 19,75 | 83,16 |
| 52,10 | 7,68 | 18,23 | 79,65 |
| 56,10 | 8,02 | 18,72 | 76,65 |
| 60,10 | 7,49 | 17,47 | 74,04 |
| 64,10 | 7,02 | 17,16 | 70,98 |
| 68,10 | 6,61 | 16,89 | 69,02 |
| 72,10 | 6,93 | 15,95 | 67,27 |
| 76,10 | 7,23 | 16,43 | 65,70 |
| 80,10 | 6,87 | 15,61 | 64,29 |
| 84,10 | 6,54 | 15,46 | 62,43 |
| 88,10 | 6,81 | 15,32 | 61,29 |
| 92,10 | 7,06 | 15,20 | 59,17 |
| 96,10 | 6,76 | 15,09 | 58,27 |
| 100,10 | 6,49 | 14,49 | 56,94 |
| 104,10 | 6,72 | 14,41 | 56,20 |
| 108,10 | 6,94 | 14,34 | 55,04 |
| 112,10 | 6,24 | 13,83 | 54,42 |
| 116,10 | 6,46 | 13,78 | 53,40 |
| 120,10 | 6,66 | 13,74 | 52,46 |
| 124,10 | 6,45 | 13,30 | 51,97 |
| 128,10 | 6,25 | 13,27 | 51,52 |
| 132,10 | 6,43 | 13,25 | 50,72 |
| 136,10 | 6,25 | 12,86 | 50,33 |
| 140,10 | 6,42 | 12,49 | 49,61 |
| 144,10 | 6,25 | 12,49 | 48,92 |
| 148,10 | 6,08 | 12,49 | 48,62 |
| 152,10 | 6,25 | 12,49 | 47,99 |
| 156,10 | 6,09 | 12,49 | 47,41 |
| 160,10 | 6,25 | 12,49 | 46,85 |
| 164,10 | 6,09 | 12,49 | 46,62 |
| 168,10 | 5,95 | 12,20 | 46,40 |
| 172,10 | 6,10 | 12,20 | 45,61 |
| 176,10 | 5,96 | 11,93 | 45,43 |
| 180,10 | 6,11 | 11,94 | 44,98 |
| 184,10 | 6,25 | 11,95 | 44,54 |
| 188,10 | 6,11 | 11,96 | 44,39 |
| 192,10 | 5,99 | 11,97 | 43,99 |
| 196,10 | 6,12 | 11,98 | 43,86 |

Tablica 4.2. Vrijednosti smičnog naprezanja i brzine smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

| γ (brzina smicanja), s^{-1} | τ (smično naprezanje), Pa | | |
|---|--------------------------------|------|------|
| | 60% | 70% | 80% |
| 4,10 | 0,09 | 0,37 | 1,53 |
| 8,10 | 0,14 | 0,47 | 2,09 |
| 12,10 | 0,19 | 0,47 | 2,60 |
| 16,10 | 0,19 | 0,56 | 2,79 |
| 20,10 | 0,19 | 0,56 | 2,74 |
| 24,10 | 0,23 | 0,60 | 2,79 |
| 28,10 | 0,23 | 0,65 | 3,12 |
| 32,10 | 0,23 | 0,70 | 3,16 |
| 36,10 | 0,28 | 0,79 | 3,35 |
| 40,10 | 0,33 | 0,79 | 3,44 |
| 44,10 | 0,33 | 0,84 | 3,58 |
| 48,10 | 0,37 | 0,88 | 3,72 |
| 52,10 | 0,37 | 0,88 | 3,86 |
| 56,10 | 0,42 | 0,98 | 4,00 |
| 60,10 | 0,42 | 0,98 | 4,14 |
| 64,10 | 0,42 | 1,02 | 4,23 |
| 68,10 | 0,42 | 1,07 | 4,37 |
| 72,10 | 0,47 | 1,07 | 4,51 |
| 76,10 | 0,51 | 1,16 | 4,65 |
| 80,10 | 0,51 | 1,16 | 4,79 |
| 84,10 | 0,51 | 1,21 | 4,88 |
| 88,10 | 0,56 | 1,26 | 5,02 |
| 92,10 | 0,60 | 1,30 | 5,07 |
| 96,10 | 0,60 | 1,35 | 5,21 |
| 100,10 | 0,60 | 1,35 | 5,30 |
| 104,10 | 0,65 | 1,40 | 5,44 |
| 108,10 | 0,70 | 1,44 | 5,53 |
| 112,10 | 0,65 | 1,44 | 5,67 |
| 116,10 | 0,70 | 1,49 | 5,77 |
| 120,10 | 0,74 | 1,53 | 5,86 |
| 124,10 | 0,74 | 1,53 | 6,00 |
| 128,10 | 0,74 | 1,58 | 6,14 |
| 132,10 | 0,79 | 1,63 | 6,23 |
| 136,10 | 0,79 | 1,63 | 6,37 |
| 140,10 | 0,84 | 1,63 | 6,46 |
| 144,10 | 0,84 | 1,67 | 6,56 |
| 148,10 | 0,84 | 1,72 | 6,70 |
| 152,10 | 0,88 | 1,77 | 6,79 |
| 156,10 | 0,88 | 1,81 | 6,88 |
| 160,10 | 0,93 | 1,86 | 6,98 |
| 164,10 | 0,93 | 1,91 | 7,11 |
| 168,10 | 0,93 | 1,91 | 7,25 |
| 172,10 | 0,98 | 1,95 | 7,30 |
| 176,10 | 0,98 | 1,95 | 7,44 |
| 180,10 | 1,02 | 2,00 | 7,53 |
| 184,10 | 1,07 | 2,05 | 7,63 |
| 188,10 | 1,07 | 2,09 | 7,77 |
| 192,10 | 1,07 | 2,14 | 7,86 |
| 196,10 | 1,12 | 2,18 | 8,00 |

U Tablici 4.3. prikazane su vrijednosti viskoznosti (η , mPa s) u ovisnosti o brzini smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

Tablica 4.3. Vrijednosti viskoznosti (η , mPa s) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

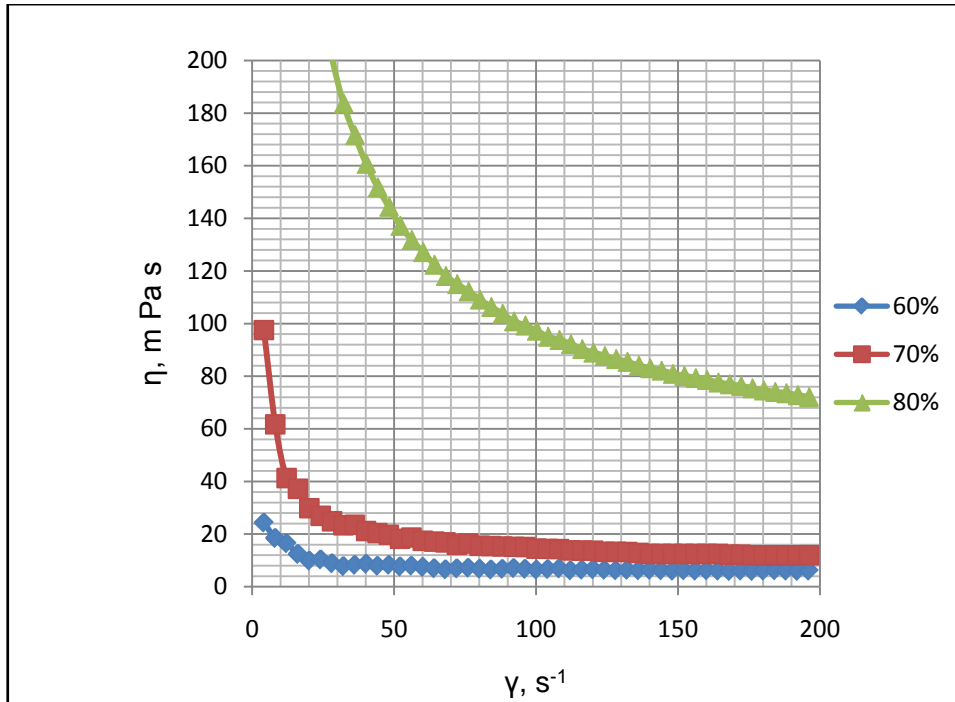
| w (Al ₂ O ₃), % | η (viskoznost), mPa s | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), |
| | 50 s ⁻¹ | 100 s ⁻¹ | 150 s ⁻¹ |
| 60% | 8,32 | 6,49 | 6,08 |
| 70% | 19,75 | 14,49 | 12,49 |
| 80% | 83,16 | 56,94 | 48,92 |

U Tablici 4.4 prikazane su vrijednosti smičnog naprezanja (τ , Pa) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

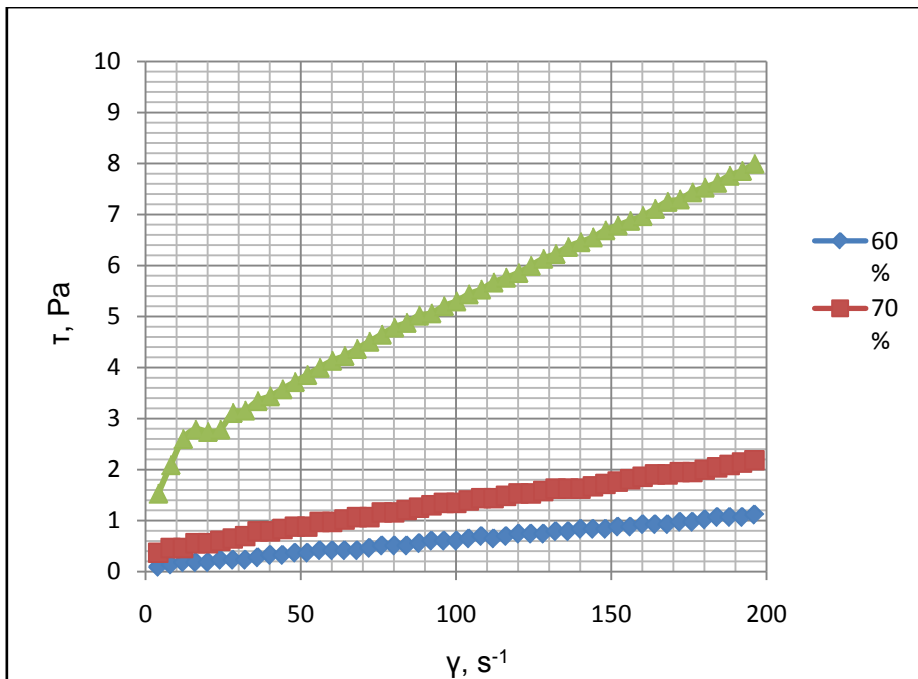
Tablica 4.4. Vrijednosti smičnog naprezanja (τ , Pa) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

| w (Al ₂ O ₃), % | τ (smično naprezanje), Pa | | |
|--|---|--|--|
| | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), 50 s ⁻¹ | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), 100 s ⁻¹ | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), 150 s ⁻¹ |
| 60% | 0,37 | 0,60 | 0,84 |
| 70% | 0,88 | 1,35 | 1,72 |
| 80% | 3,72 | 5,30 | 6,70 |

Na slici 4.1. prikazan je utjecaj sadržaja Al₂O₃ praha u suspenziji (uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%) na viskoznost u ovisnosti o brzini smicanja. Iz slike je vidljivo da se s porastom udjela Al₂O₃ praha u suspenziji znatno povećava viskoznost suspenzije. 60%-tna Al₂O₃ suspenzija ima najmanju viskoznost, ali nije znatno manja od viskoznosti 70%-tne Al₂O₃ suspenzije. Na slici 4.2. prikazana je ovisnost smičnog naprezanja o brzini smicanja za suspenzije s različitim sadržajem Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%. Iz slike je vidljivo da je smično naprezanje znatno veće za 80%-tnu Al₂O₃ suspenziju, a za 60%-tnu i 70%-tnu se tek neznatno razlikuje.

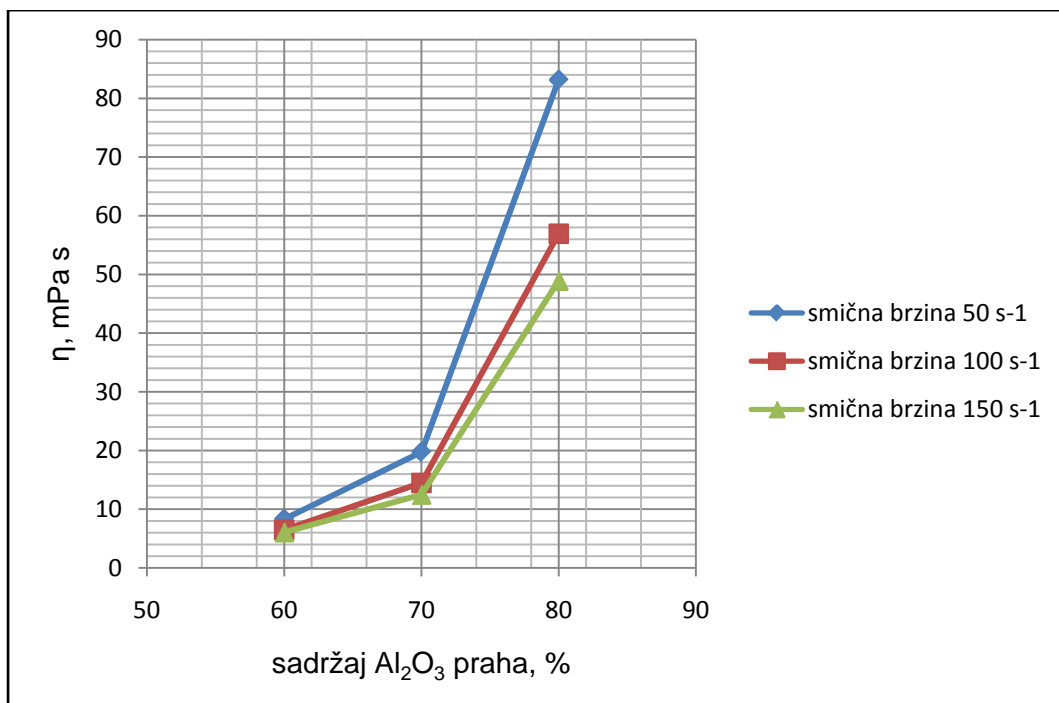


Slika 4.1. Krivulja tečenja. Ovisnost viskoznosti (η , mPa s) o brzini smicanja (γ , s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

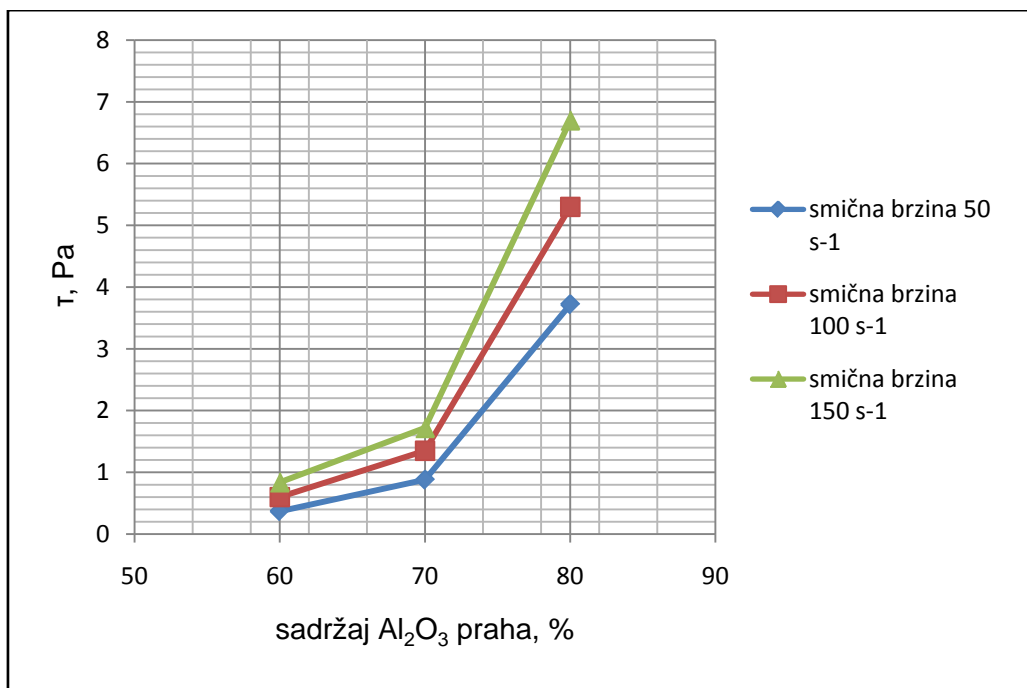


Slika 4.2. Krivulja tečenja. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o brzini smicanja (γ , s^{-1}) za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,2%.

Slika 4.3. prikazuje ovisnost viskoznosti o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenziji pri različitim brzinama smicanja (γ, s^{-1}). Slika 4.5. prikazuje ovisnost smičnog naprezanja o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenziji pri različitim brzinama smicanja (γ, s^{-1}). Iz slika se može zaključiti da viskoznost opada porastom brzine smicanja i smanjenjem udjela Al_2O_3 u suspenziji, a smično naprezanje raste porastom brzine smicanja. 60%-tna Al_2O_3 suspenzija najniže je viskoznosti te je iz tog razloga i najpovoljnija za lijevanje suspenzija.



Slika 4.3. Ovisnost viskoznosti ($\eta, \text{mPa s}$) o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,2% pri različitim brzinama smicanja (γ, s^{-1}).



Slika 4.4. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o sadržaju Al₂O₃ praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,2% pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹).

4.2. Rezultati reoloških svojstava Al₂O₃ suspenzija s 0,4% polivinil alkohola

Drugu skupinu suspenzija čine 60%-tna, 70%-tna i 80%-tna Al₂O₃ suspenzija sa stalnim udjelom od 0,4% polivinil alkohola, s udjelom disperzanta od 0,4% i udjelom spinela od 0,08%. (Tablica 3.2.). Cilj je utvrditi utječe li i na koji način, povećani udio polivinil alkohola na reološka svojstva suspenzija.

U Tablici 4.5. prikazani su rezultati izmjerenih vrijednosti viskoznosti i brzine smicanja suspenzija s različitim sadržajem Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%. U Tablici 4.6. prikazani su rezultati izmjerenih vrijednosti smičnog naprezanja i brzine smicanja za drugu grupu pripremljenih suspenzija.

Tablica 4.5. Vrijednosti viskoznosti i brzini smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

| γ (brzina smicanja), s^{-1} | η (viskoznost), mPa s | | |
|---|----------------------------|--------|--------|
| | 60% | 70% | 80% |
| 4,10 | 48,78 | 158,54 | 756,10 |
| 8,10 | 30,86 | 104,94 | 481,48 |
| 12,10 | 20,66 | 78,51 | 359,50 |
| 16,10 | 18,63 | 62,11 | 295,03 |
| 20,10 | 14,93 | 52,24 | 251,24 |
| 24,10 | 14,52 | 47,72 | 221,99 |
| 28,10 | 12,46 | 44,48 | 201,07 |
| 32,10 | 12,46 | 40,50 | 183,80 |
| 36,10 | 11,08 | 37,40 | 171,75 |
| 40,10 | 11,22 | 36,16 | 160,85 |
| 44,10 | 11,34 | 34,01 | 151,93 |
| 48,10 | 10,40 | 31,19 | 144,49 |
| 52,10 | 9,60 | 30,71 | 137,24 |
| 56,10 | 9,80 | 28,52 | 131,91 |
| 60,10 | 9,15 | 28,29 | 127,29 |
| 64,10 | 9,36 | 27,30 | 122,46 |
| 68,10 | 8,81 | 25,70 | 118,21 |
| 72,10 | 9,02 | 25,66 | 115,12 |
| 76,10 | 8,54 | 24,97 | 112,35 |
| 80,10 | 8,74 | 24,34 | 109,24 |
| 84,10 | 8,32 | 23,78 | 106,42 |
| 88,10 | 8,51 | 23,27 | 103,86 |
| 92,10 | 8,14 | 22,80 | 100,98 |
| 96,10 | 8,32 | 22,37 | 99,38 |
| 100,10 | 8,49 | 21,48 | 97,40 |
| 104,10 | 7,68 | 21,61 | 95,10 |
| 108,10 | 7,86 | 21,28 | 93,89 |
| 112,10 | 8,03 | 20,96 | 92,33 |
| 116,10 | 7,75 | 20,67 | 90,44 |
| 120,10 | 7,91 | 20,40 | 89,09 |
| 124,10 | 7,66 | 19,74 | 87,83 |
| 128,10 | 7,42 | 19,52 | 86,65 |
| 132,10 | 7,57 | 19,68 | 85,54 |
| 136,10 | 7,35 | 19,47 | 84,13 |
| 140,10 | 7,14 | 18,92 | 83,15 |
| 144,10 | 7,29 | 18,74 | 82,23 |
| 148,10 | 7,09 | 18,57 | 81,03 |
| 152,10 | 7,23 | 18,74 | 80,21 |
| 156,10 | 7,05 | 17,94 | 79,44 |
| 160,10 | 6,87 | 18,11 | 78,70 |
| 164,10 | 7,01 | 17,98 | 77,70 |
| 168,10 | 6,84 | 18,14 | 77,04 |
| 172,10 | 6,68 | 17,43 | 76,41 |
| 176,10 | 6,81 | 17,60 | 75,53 |
| 180,10 | 6,66 | 17,49 | 74,68 |
| 184,10 | 6,79 | 17,38 | 74,14 |
| 188,10 | 6,65 | 17,28 | 73,63 |
| 192,10 | 6,51 | 17,18 | 72,88 |
| 196,10 | 6,63 | 16,83 | 72,16 |

Tablica 4.6. Vrijednosti smičnog naprezanja i brzine smicanja za suspenzije s različitim udjelom Al_2O_3 praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

| γ (brzina smicanja), s^{-1} | τ (smično naprezanje), Pa | | |
|---|--------------------------------|------|-------|
| | 60% | 70% | 80% |
| 4,10 | 0,19 | 0,60 | 2,88 |
| 8,10 | 0,23 | 0,79 | 3,63 |
| 12,10 | 0,23 | 0,88 | 4,05 |
| 16,10 | 0,28 | 0,93 | 4,42 |
| 20,10 | 0,28 | 0,98 | 4,70 |
| 24,10 | 0,33 | 1,07 | 4,98 |
| 28,10 | 0,33 | 1,16 | 5,25 |
| 32,10 | 0,37 | 1,21 | 5,49 |
| 36,10 | 0,37 | 1,26 | 5,77 |
| 40,10 | 0,42 | 1,35 | 6,00 |
| 44,10 | 0,47 | 1,40 | 6,23 |
| 48,10 | 0,47 | 1,40 | 6,46 |
| 52,10 | 0,47 | 1,49 | 6,65 |
| 56,10 | 0,51 | 1,49 | 6,88 |
| 60,10 | 0,51 | 1,58 | 7,11 |
| 64,10 | 0,56 | 1,63 | 7,30 |
| 68,10 | 0,56 | 1,63 | 7,49 |
| 72,10 | 0,60 | 1,72 | 7,72 |
| 76,10 | 0,60 | 1,77 | 7,95 |
| 80,10 | 0,65 | 1,81 | 8,14 |
| 84,10 | 0,65 | 1,86 | 8,32 |
| 88,10 | 0,70 | 1,91 | 8,51 |
| 92,10 | 0,70 | 1,95 | 8,65 |
| 96,10 | 0,74 | 2,00 | 8,88 |
| 100,10 | 0,79 | 2,00 | 9,07 |
| 104,10 | 0,74 | 2,09 | 9,21 |
| 108,10 | 0,79 | 2,14 | 9,44 |
| 112,10 | 0,84 | 2,19 | 9,63 |
| 116,10 | 0,84 | 2,23 | 9,77 |
| 120,10 | 0,88 | 2,28 | 9,95 |
| 124,10 | 0,88 | 2,28 | 10,14 |
| 128,10 | 0,88 | 2,33 | 10,32 |
| 132,10 | 0,93 | 2,42 | 10,51 |
| 136,10 | 0,93 | 2,46 | 10,65 |
| 140,10 | 0,93 | 2,46 | 10,83 |
| 144,10 | 0,98 | 2,51 | 11,02 |
| 148,10 | 0,98 | 2,56 | 11,16 |
| 152,10 | 1,02 | 2,65 | 11,35 |
| 156,10 | 1,02 | 2,60 | 11,53 |
| 160,10 | 1,02 | 2,70 | 11,72 |
| 164,10 | 1,07 | 2,74 | 11,86 |
| 168,10 | 1,07 | 2,84 | 12,04 |
| 172,10 | 1,07 | 2,79 | 12,23 |
| 176,10 | 1,12 | 2,88 | 12,37 |
| 180,10 | 1,12 | 2,93 | 12,51 |
| 184,10 | 1,16 | 2,98 | 12,69 |
| 188,10 | 1,16 | 3,02 | 12,88 |
| 192,10 | 1,16 | 3,07 | 13,02 |
| 196,10 | 1,21 | 3,07 | 13,16 |

U tablici 4.7. prikazane su vrijednosti viskoznosti (η , mPa s) u ovisnosti o brzini smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

Tablica 4.7. Vrijednosti viskoznosti (η , mPa s) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

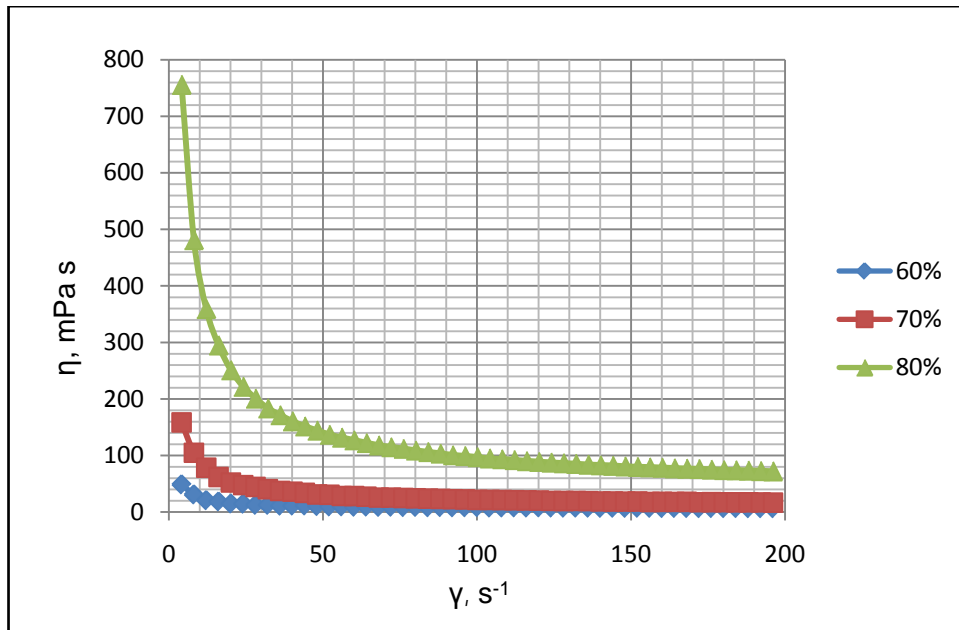
| w (Al ₂ O ₃), % | η (viskoznost), mPa s | | |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), |
| | 50 s ⁻¹ | 100 s ⁻¹ | 150 s ⁻¹ |
| 60% | 10,4 | 8,49 | 7,09 |
| 70% | 31,19 | 21,48 | 18,57 |
| 80% | 144,49 | 97,40 | 81,03 |

U Tablici 4.8 prikazane su vrijednosti smičnog napreznja (τ , Pa) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

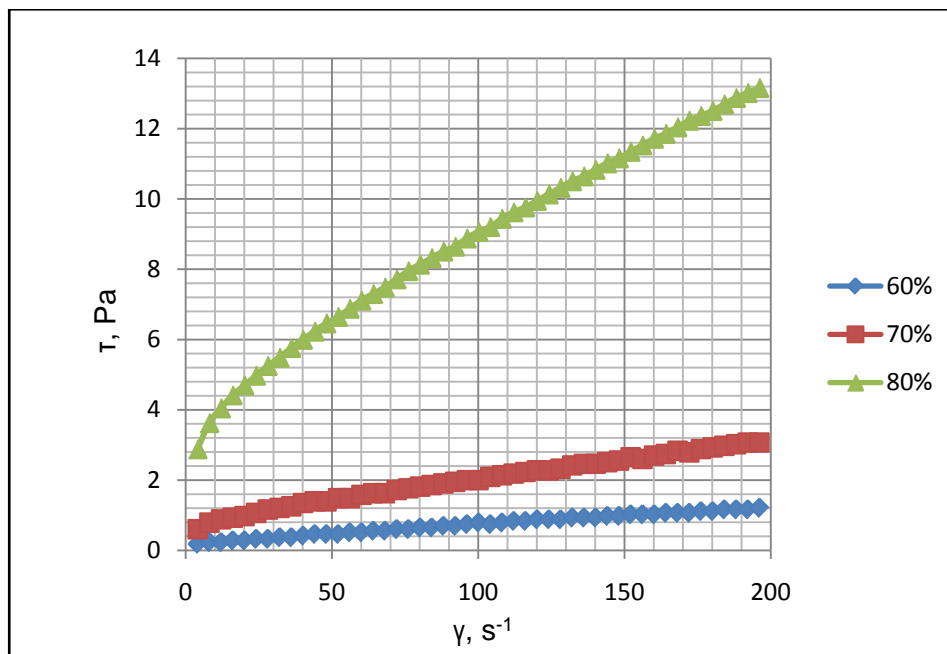
Tablica 4.8. Vrijednosti smičnog naprezanja (τ , Pa) za određene brzine smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

| w (Al ₂ O ₃), % | τ (smično naprezanje), Pa | | |
|--|---|--|--|
| | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), 50 s ⁻¹ | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), 100 s ⁻¹ | $\dot{\gamma}$ (brzina smicanja), 150 s ⁻¹ |
| 60% | 0,47 | 0,79 | 0,98 |
| 70% | 1,40 | 2 | 2,56 |
| 80% | 6,46 | 9,07 | 11,16 |

Na Slici 4.5. prikazana je ovisnost viskoznosti o sadržaju Al₂O₃ praha u suspenziji pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹). Na Slici 4.6. prikazana je ovisnost smičnog naprezanja o sadržaju Al₂O₃ praha u suspenziji pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s⁻¹). Uspoređujući rezultate prve grupe suspenzija i rezultate druge grupe suspenzija vidljivo je da se povećanjem udjela polivinil alkohola povećava i viskoznost za sve koncentracije Al₂O₃ suspenzija. Ipak, to povećanje je neznatnije za 60%-tnu suspenziju. Najizraženiji porast viskoznosti i smičnog naprezanja je za suspenziju koja sadrži 80% Al₂O₃ praha i 0,4% polivinil alkohola u odnosu na suspenziju koja sadrži 80% Al₂O₃ praha i 0,2% polivinil alkohola.

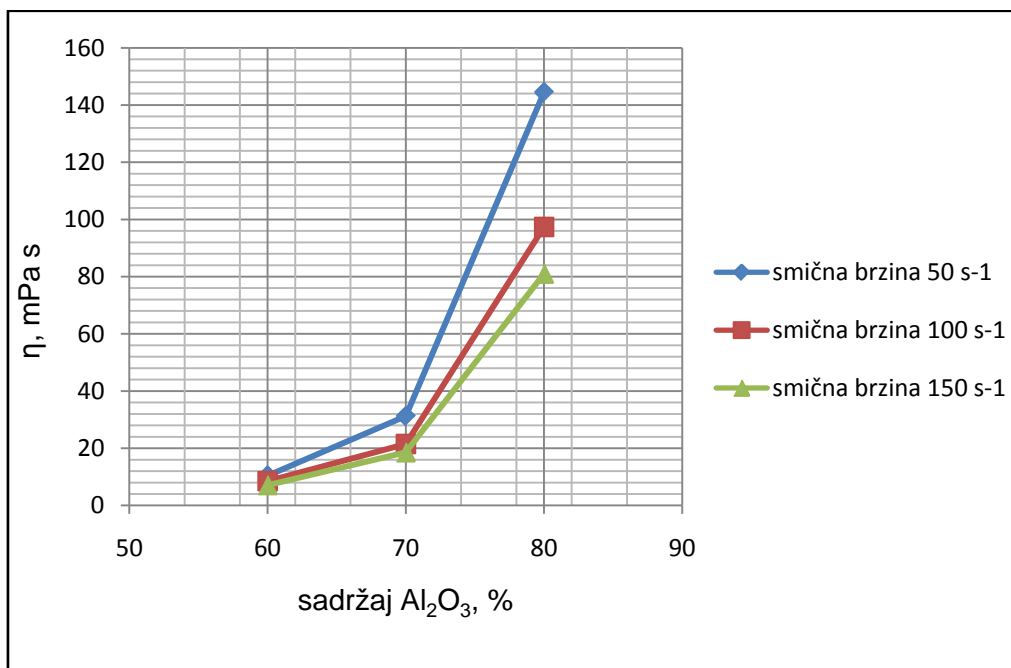


Slika 4.5. Krivulja tečenja. Ovisnost viskoznosti (η , mPa s) o brzini smicanja (γ , s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

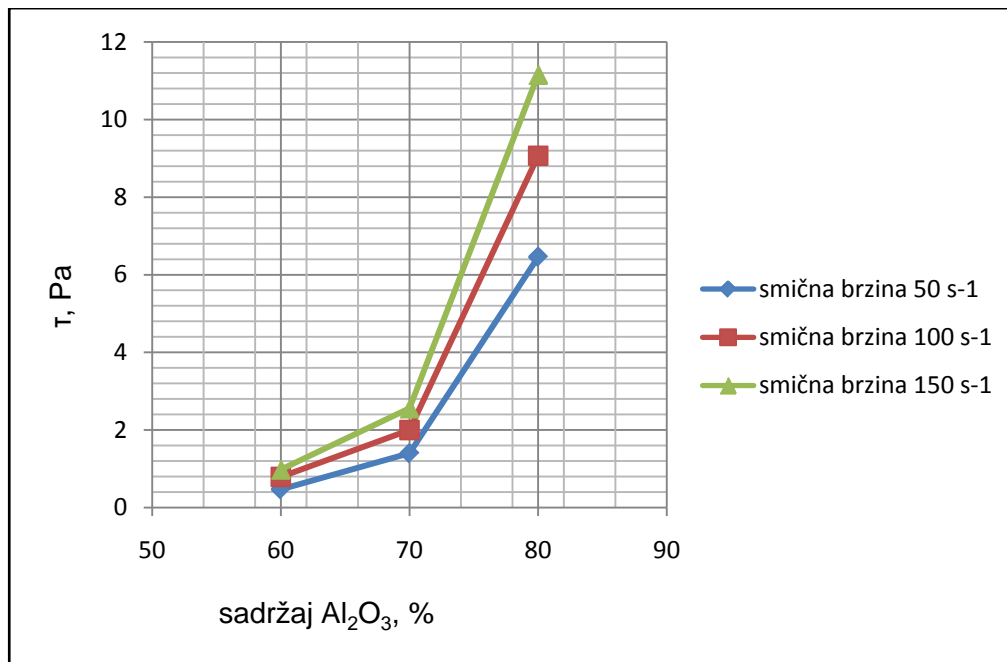


Slika 4.6. Krivulja tečenja. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o brzini smicanja (γ , s⁻¹) za suspenzije s različitim udjelom Al₂O₃ praha uz dodatak polivinil alkohola od 0,4%.

Na Slici 4.7. prikazana je ovisnost viskoznosti o različitim brzinama smicanja za pojedine koncentracije suspenzija. Iz slike je vidljivo da viskoznost opada s porastom brzine smicanja i najmanja je za 60%-tnu suspenziju, što ujedno znači da je ona i najpogodnija za postupak lijevanja suspenzija. Slika 4.8. prikazuje ovisnost smičnog napreznja o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenziji pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}). Dobiveni rezultati pokazuju da smično napreznje raste s porastom brzine smicanja.



Slika 4.7. Ovisnost viskoznosti (η , mPa s) o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,4% pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}).



Slika 4.8. Ovisnost smičnog naprezanja (τ , Pa) o sadržaju Al_2O_3 praha u suspenzijama uz dodatak polivinil alkohola od 0,4% pri različitim brzinama smicanja ($\dot{\gamma}$, s^{-1}).

4.3. Procjena eksperimentalnih podataka

Za procjenu eksperimentalnih podataka, odnosno ovisnost smičnog naprezanja o brzini smicanja, primijenjena su tri modela:

- Potencijski model: $\tau = k\dot{\gamma}^n$ (1)

- Herschel-Bulkleyjev model: $\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$ (2)

- Binghamov model: $\tau = \tau_0 + \rho\dot{\gamma}$ (3)

gdje je:

- τ (Pa) je smično naprezanje,
- k je koeficijent konzistencije, tj. pokazatelj viskoznosti,
- γ (s^{-1}) brzina smicanja,
- n je indeks tečenja (eksponent brzine smicanja),
- τ_0 (Pa) je minimalno smično naprezanje potrebno za uspostavu tečenja fluida,
- ρ je oznaka za plastičnu viskoznost.

Iz slika 4.2. i 4.6. može se zaključiti da ispitivane suspenzije pokazuju pseudoplastično ponašanje (viskoznost opada s porastom brzine smicanja, odnosno tečljivost je bolja porastom naprezanja).

Dobivene vrijednosti reoloških parametara za obje grupe suspenzija te za prethodno navedene primijenjene modele prikazane su tablicom 4.9.

Tablica 4.9. Reološki parametri Al_2O_3 suspenzija s udjelima polivinil alkohola od 0,2% i 0,4%.

| $w(Al_2O_3)$, % | w (PVOH), % | Viskoznost | | Potencijski model | | | Herschel-Bulkleyev model | | | | Binghamov model | | |
|------------------|---------------|------------------------|-------------------------|--------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|
| | | η , mPa s | | $\tau = k\gamma^n$ | | | $\tau = \tau_0 + k\gamma^n$ | | | | $\tau = \tau_0 + \rho\gamma$ | | |
| | | γ , 50 s^{-1} | γ , 100 s^{-1} | k | n | R^2 | τ_0 | k | n | R^2 | τ_0 | ρ | R^2 |
| 60 | 0,2 | 8,32 | 6,49 | 0,0168 | 0,7994 | 0,9934 | 0,0586 | 0,0094 | 0,9021 | 0,9954 | 0,0941 | 0,0055 | 0,9942 |
| 70 | 0,2 | 19,75 | 14,49 | 0,0887 | 0,6059 | 0,9892 | 0,2444 | 0,0322 | 0,7814 | 0,9968 | 0,4048 | 0,0098 | 0,9904 |
| 80 | 0,2 | 83,16 | 56,94 | 0,5868 | 0,4938 | 0,9869 | 0,6961 | 0,3245 | 0,5921 | 0,9898 | 2,0378 | 0,0338 | 0,9669 |
| 60 | 0,4 | 10,40 | 8,49 | 0,0399 | 0,6508 | 0,9911 | 0,1149 | 0,0168 | 0,8011 | 0,9968 | 0,1979 | 0,0057 | 0,9912 |
| 70 | 0,4 | 31,19 | 21,48 | 0,2037 | 0,5152 | 0,9888 | 0,3222 | 0,0951 | 0,6432 | 0,9935 | 0,7495 | 0,0133 | 0,9759 |
| 80 | 0,4 | 144,49 | 97,40 | 1,0937 | 0,4721 | 0,9913 | 0,8936 | 0,7212 | 0,5400 | 0,9929 | 3,5992 | 0,0554 | 0,9607 |

4.3.1. Reološki parametri Al_2O_3 suspenzija s 0,2% polivinil alkohola

Iz vrijednosti koeficijenta korelacije R^2 , iz Tablice 4.9., 60%-tnu Al_2O_3 suspenziju s 0,2% polivinil alkohola, podjednako dobro opisuju sva tri modela, 70%-tnu suspenziju podjednako dobro opisuju Herschel-Bulkleyjev i Binghamov model, dok 80%-tnu suspenziju podjednako dobro opisuje potencijski i Herschel-Bulkleyjev model.

Promatranjem parametara potencijskog modela, uočen je pad indeksa tečenja n , porastom sadržaja Al_2O_3 praha u suspenzijama. Indeks tečenja je manji od jedan, što znači da se ispitane suspenzije ponašaju pseudoplastično prema potencijskom modelu. Također, potrebno je uočiti da se porastom sadržaja Al_2O_3 praha u suspenzijama koeficijent korelacije smanjuje za potencijski model, što znači da je i manje pouzdan za procjenu dobivenih podataka.

Kod primjene Herschel-Bulkleyjevog modela dolazi do porasta granice tečenja fluida τ_0 . Prema indeksu tečenja n , suspenzije se ponašaju pseudoplastično.

Binghamov model nije primjenjiv za procjenu podataka 80%-tne Al_2O_3 suspenzije, a primjenjiv je za opis 60%-tne i 70%-tne Al_2O_3 suspenzije. Bitno je uočiti da porastom sadržaja Al_2O_3 u suspenziji od 60% na 70% raste i τ_0 , što znači da je potrebno veće smično naprezanje kako bi se postiglo tečenje suspenzije.

Brzina smicanja od 50 s^{-1} je upravo brzina koja se ostvaruje kod gravitacijskog lijevanja te je vidljivo da 60%-tna Al_2O_3 suspenzija s 0,2% polivinil alkohola ima najmanju viskoznost, zbog čega je taj sastav najpogodniji za lijevanje.

4.3.2. Reološki parametri Al₂O₃ suspenzija s 0,4% polivinil alkohola

Iz Tablice 4.9. promatrajući vrijednosti koeficijenta korelacije R^2 , vidljivo je da 60%-tnu Al₂O₃ suspenziju s 0,4% polivinil alkohola podjednako dobro opisuju sva tri modela. 70%-tnu Al₂O₃ suspenziju najbolje opisuje Herschel-Bulkleyjev model, dok 80%-tnu Al₂O₃ suspenziju podjednako dobro opisuje Herschel-Bulkleyjev model i potencijski model.

Promatranjem parametara potencijskog modela uočeno je da porastom sadržaja Al₂O₃ u suspenziji pada indeks tečenja n . Indeks tečenja je za sve koncentracije suspenzija manji od jedan, što znači da se prema tom modelu suspenzije ponašaju pseudoplastično.

Kod primjene Herschel-Bulkleyjevog modela dolazi do značajnijeg porasta granice tečenja, što znači da je potrebno veće naprezanje kako bi se postiglo tečenje fluida. Indeks tečenja je kod svih koncentracija suspenzija manji od jedan što znači da se ponašaju pseudoplastično prema primijenjenom modelu.

Binghamov model primjenjiv je jedino za 60%-tnu suspenziju. I kod Binghamovog modela granica tečenja (τ_0) raste porastom sadržaja Al₂O₃ u suspenziji.

Brzina smicanja od 50 s⁻¹ odgovara postignutoj brzini kod gravitacijskog lijevanja i upravo 60%-tna suspenzija ima najmanju viskoznost pri toj smičnoj brzini, što ju čini najpogodnijom za lijevanje, iako je povećani udio polivinil alkohola s 0,2% na 0,4% značajno povećao viskoznost suspenzija.

5. ZAKLJUČAK

Temeljem provedenih reoloških ispitivanja za suspenzije koje sadrže 60%, 70% i 80% Al_2O_3 praha i 0,2% polivinil alkohola, te suspenzije koje sadrže 60%, 70% i 80% Al_2O_3 praha i 0,4% polivinil alkohola može se zaključiti:

- 60%-tna Al_2O_3 suspenzija koja sadrži 0,2% polivinil alkohola ima najmanju vrijednost viskoznosti. Pri brzini smicanja od 50 s^{-1} (što odgovara brzini koja se ostvaruje prilikom gravitacijskog lijevanja), viskoznost suspenzije iznosi 8,32 mPa s što ju čini najpovoljnijom za lijevanje suspenzija.
- prema dijagramima tečenja ispitane suspenzije pokazuju pseudoplastično ponašanje. Za procjenu eksperimentalnih podataka korištena su tri modela: Potencijski model, Herschel-Bulkleyjev model te Binghamov model.
- porastom sadržaja Al_2O_3 praha u suspenzijama uočen je pad viskoznosti.
- povišenjem udjela polivinil alkohola smanjuju se vrijednosti viskoznosti za sve priređene suspenzije.
- najveću viskoznost ima suspenzija koja sadrži 80% Al_2O_3 praha i 0,4% polivinil alkohola.

6. POPIS LITERATURE

- [1] [1] Chang, J. C., Velamakanni, B. V., Lange, F. F., Pearson, D. S.: *J. Am. Ceram. Soc.*, 74, 2201-2247 (1991).
- [2] Bergstrom, L., Schilling, C. H., Aksay, I. A.: *J. Am. Ceram. Soc.*, 75, 3305-3314 (1992).
- [3] McCauley, R. A., Rheology, In *Ceramic Monographs - Hand-book of Ceramics*, Verlag Schmid GmbH, Freiburg, 1-7 (1983).
- [4] Bell, S. H., Crowl, V. T.: *Dispersion of Powders in Liquids*, 291-305, Edited by G. D. Parfitt, Applied Science, London, (1973).
- [5] Darby, R.: *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 5, *Slurry Flow Technology*, Edited by N. P. Cheremisinoff, Gulf Publishing, Houston, 49-65 (1986).
- [6] Filetin, T.; Kramer, I.: *Tehnička keramika*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, (2005).
- [7] Bjerregaard, L.; Geels, K.; Ottesen, B.; Rückert, M.: *Metalog Guide*, Struers, (2000).
- [8] Sarraf, H.: *Comparison of the rheological properties of zirconia slurries applied for slip-cast ceramics*, .ppt, (2003).
- [9] Ćurković, L.: *ACI_Sisak.ppt – prezentacija o proizvodnji keramike u kompaniji Applied Ceramics, Inc.*
- [10] *Tehnička enciklopedija*, JLZ, Zagreb, 75-78, (1963 – 1997).
- [11] *Prijenos tvari i energije*, skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva, Zagreb
- [12] *Dinamika fluida*, skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [13] *Tehnička enciklopedija*, JLZ, Zagreb, 75-78, (1963 – 1997).