

Gimnazija Kranj

Optimizacija mletja poliimidnega prahu v curku aerosola za nanos tankih plasti

Kemija in kemijska tehnologija

Raziskovalna naloga

Avtorji: Jon Kovačič, Urban Pleša, Črt Štibelj

Mentor: dr. Rok Rudež, uni. dipl. kemik

Kranj, 2025

Zahvala

Iskreno se zahvaljujemo Mateju Šadlu in Blažu Velkavrhu za njun izjemen prispevek pri vodenju eksperimentov, saj sta s svojo strokovnostjo, predanostjo in natančnostjo bistveno pripomogla k uspešni izvedbi raziskave. Njuno zavzeto delo in zanesljivost sta bila ključnega pomena pri zagotavljanju visokih standardov eksperimentalnega procesa, kar je pomembno prispevalo k doseganju kakovostnih rezultatov. Cenimo njun trud, čas in energijo, ki sta ju vložila v to delo.

Kazalo vsebine

Zahvala **2**

Povzetek **5**

Abstract **5**

1 Uvod **6**

1.1 Motivacija 6

1.2 Raziskovalno vprašanje 6

1.3 Teorija 6

1.3.1 AD metoda 6

1.3.2 Struktrura plasti 7

1.3.3 Poliamidi 7

1.3.4 Defekti 7

1.3.5 Aplikacije 8

1.4 Hipoteze 8

1.5 Spremenljivke 9

2 Metodologija **10**

2.1 Priprava podlage 10

2.2 Mletje prahov 10

2.3 Nanos prahov na podlago 11

2.4 Analiza plasti 11

2.5 Priprava elektrod 11

2.6 Analiza elektrod 11

2.7 Analiza 12

2.7.1 Meritve 12

2.7.2 Optična mikroskopija 13

3 Rezultati in diskusija **16**

4 Zaključek **17**

Literatura **18**

Kazalo slik

Slika 1 Skica AD metode in naprava s katero jo izvajamo. 6
Slika 2 Vpliv velikosti in kinetične energije na sprijetje delca s podlago. 7
Slika 3 Primer plasti z veliko luknjami skozi katere se vidi zlati substrat. 8
Slika 4 Primer plast z veliko „hribi in dolinami“ in neenakomerno razporejeno čez celotno plast. 8
Slika 5 Naprava za mletje, ki smo jo uporabili. 10
Slika 6 Volumska razporeditev delcev 11
Slika 7 Izgled dveh substratov 11
Slika 8 Surov G1 13
Slika 9 Suho 100 rpm C2 14
Slika 10 Suho 200 rpm E1 14
Slika 11 Suho 200 rpm F1 14
Slika 12 Mokro 100 rpm J2 15
Slika 13 Mokro 200 rpm K2 15
Slika 14 Mokro 200 rpm L2 15

Kazalo tabel

Tabela 1 Meritve plasti 12
Tabela 2 Meritve elektrod 13
Tabela 3 Rezultati 16

Povzetek

Prah lahko nanašamo na podlago z različnimi metodami. Ena od novih metod je aerosol deposition, ki je metoda, ki jo uporabljajo za nanos keramičnega prahu na podlago. Mi smo jo uporabili za nanos poliimidnega prahu na zlato elektrodo. Prah smo zmleli na različne načine in ugotavljali debelino, hrapavost, električno prevodnost in električno izgubo nanešene plasti. Naš cilj je bil najti najbolj optimalen način mešanja za pridobivanje najustreznejših nanosov plasti.

Ključne besede: poliimidi, aerosol deposition, elektrode

Abstract

Powder can be applied to the substrate using various methods. One of the new methods is aerosol deposition, which is a method used to apply ceramic powder to the substrate. We used it to apply polyimide powder to a gold electrode. We ground the powder in various ways and determined the thickness, roughness, electrical conductivity and electrical loss of the applied layer. Our goal was to find the most optimal mixing method to obtain the most suitable layer depositions.

Key words: poliimids, aerosol deposition, electrodes

1 Uvod

1.1 Motivacija

Po naravi smo vsi trije naravoslovci in nas zanimajo različne teme na področju naravoslovja. Všeč nam je astronomija, fizika in tudi kemija, iz katere smo želeli napisati raziskovalno nalogo, saj nas ta predmet že od nekdaj navdušuje zaradi svoje povezanosti z razumevanjem sveta okoli nas. Na naši šoli je to področje zelo zastopano in posledično tudi zelo uspešno, kar nas je dodatno spodbudilo, da smo želeli raziskovati nekaj novega in izvirnega. Idejo smo dobili v sodelovanju z IJS-jem, ki nam je predstavil metodo AD, kar je bila popolna priložnost za nas, saj smo želeli združiti teoretično znanje kemije z raziskovanjem sodobnih tehnologij. AD metoda, ali analiza disperzije, je raziskovalna tehnika, ki se uporablja za preučevanje razpršenosti delcev, energije ali signalov v določenem sistemu. Omogoča natančno analizo interakcij med delci in optimizacijo procesov, kot so mešanje, emulgiranje ali tvorba nanodelcev, z uporabo naprednih instrumentov. Navdušila nas je možnost, da lahko s to metodo raziskujemo procese, ki so tesno povezani z naprednimi znanstvenimi področji, ki vplivajo na aktualne izzive, kot so zdravje, trajnostni razvoj in napredne tehnološke rešitve. Hitro smo se navdušili nad idejo in začeli pisati raziskovalno nalogo s področja kemije in kemijske tehnologije, kjer smo lahko povezali naš hobi, šolsko znanje in zanimanje za inovativne pristope.

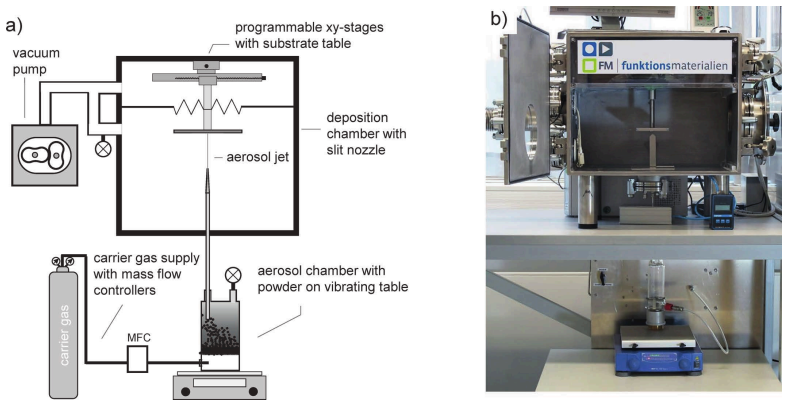
1.2 Raziskovalno vprašanje

Kako postopek mletja vpliva na nanašanje poliimidnega prahu v smislu njegove debeline, hrapavosti in električnih lastnosti?

1.3 Teorija

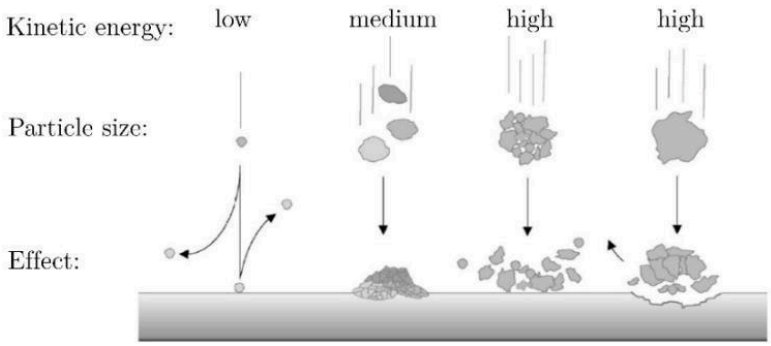
1.3.1 AD metoda

Metoda nanašanja plasti v curku aerosola oz. ang. aerosol deposition (AD) je nova metoda za zgoščevanje prahov (npr. kovin in polimerov) v obliki debelih plasti oz. prevlek, na osnovi kinetične energije. Zgoščevanje poteka zaradi kinetične energije, ki jo dovedemo delcem prahu s tlačno razliko. V sistemu sta 2 komori. V eni vzdržujemo vakum, v drugi pa je prah skozi katerega prepihavamo plin. Posledično prah pridobi kinetično energijo in ga ponese v drugo komoro, kjer se zaleti v podlago. Tako se njegova kinetična energija pretvori v notranjo, kar povzroči, da se zgosti v bolj urejeno strukturo. [1], [2]



Slika 1: Skica AD metode in naprava s katero jo izvajamo.

Da nam to uspe, morajo biti delci ravno prave velikosti. Premajhni delci imajo premalo kinetične energije in se od podlage odbijejo. Preveliki delci pa imajo kinetične energije preveč in uničijo podlago. [2]



Slika 2: Vpliv velikosti in kinetične energije na sprijetje delca s podlago.

1.3.2 Struktrura plasti

Plasti, ki jih želimo doseči,imajo določene lastnosti, ki so pomembne za njihovo uporabo v različnih aplikacijah. Cilj je doseči čem debelejše plasti ob čim manjši porabi. Iz izkušenj strokovnjaka naj bi bila primerna velikost več kot 1 mikrometer. Poleg tega želimo, da plasti imajo čim manjšo hrapavost, saj to vpliva na njihove električne in mehanske lastnosti. Homogenost plasti je tudi zelo pomembna, saj omogoča enakomerno porazdelitev lastnosti po vsem površju. Z uporabo metode aerosol deposition in prilagoditvijo postopka mletja želimo doseči plasti, ki imajo optimalne lastnosti za njihovo uporabo v različnih področjih, kot so elektronika, senzorji in drugi napredni tehnološki sistemi. [3]

1.3.3 Poliamidi

Poliamidi so visokozmogljivi in trpežni materiali, ki se pogosto uporabljajo v tekstilni industriji, inženirstvu in celo v različne vojaške namene (kevlar), ker imajo visoko mehansko odpornost, visoko tališče in visoko električno upornost, dokler niso izpostavljeni vlagi. [4]

Splošna struktura poliamida je: $\left[\text{-NH-}(\text{CH}_2)_x\text{-CO-}\right]n$

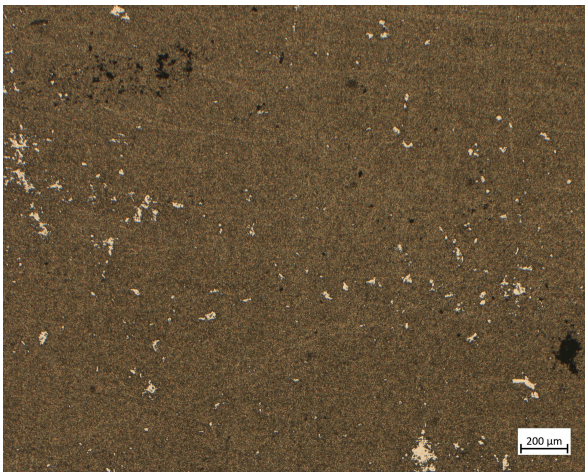
Poliamidi so polimeri, ki so sestavljeni iz monomerov, povezanih z amidnimi (-CONH-) vezmi. Te monomeri so lahko:

- Diamini in dikarboksilne kisline ($(\text{H}_2\text{N-}(\text{CH}_2)_n-\text{NH}_2$ in $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$),
- Laktami (ciklični amidi: $(\text{CO}-\text{NH}-(\text{CH}_2)_n)$,
- Aromatski monomeri (organske spojine s konjugiranimi aromatskimi obroči).

Mi ga bomo uporabili kot dielektrično plast predvsem zaradi njegove visoke električne upornosti.

1.3.4 Defekti

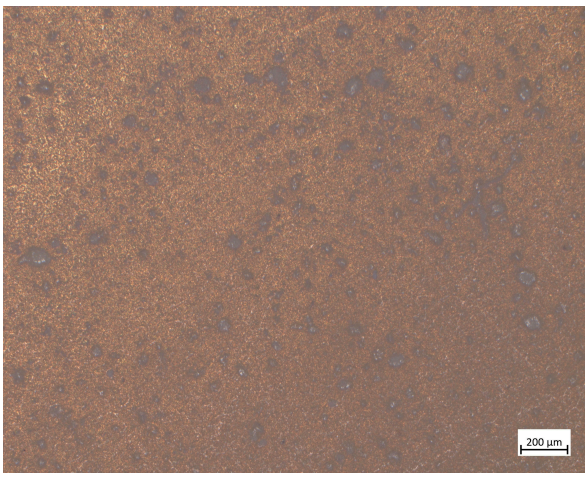
Pri nanašanju plasti lahko nastanejo različne vrste defektov. Do najbolj problematičnega pride, ko se prah ne sprime s substratom in nastane luknja.



Slika 3: Primer plasti z veliko luknjami skozi katere se vidi zlati substrat.

Na podoben način lahko nastanejo tudi zražni žepki, ki jih ne vidimo. To je zato, ker jih je kasneje prekril prah.

Ko se prah neenakomerno sprime lahko na površni nastanejo tako imenovani „hribi in doline“. Več jih je, večja je hrapavost. Lahko se zgodi, da se prah ne razporedi po celotnem substratu enakomerno in v enem kotu nastane plat debelejša kot v drugem.



Slika 4: Primer plast z veliko „hribi in dolinami“ in neenakomerno razporejeno čez celotno plast.

1.3.5 Aplikacije

Ena od aplikacij za katere lahko uporabimo plasti iz poliimidov so elektrode. V tej raziskovalni nalogi se bomo tudi dotaknili kako lastnosti plasti vplivajo na lastnosti elektrod. Izdelavo elektrod pa ne bomo omenjali, saj ni tema tega projekta.

1.4 Hipoteze

Predvidevamo, da je mletje prahu optimalno, ko ga zmeljemo na 100 rpm, kar je srednja moč mletja. Tako predvidevamo ker delci v tem primeru niso preveliki, saj bi drugače zaradi velikosti in posledično visoke kinetične energije pri pospeševanju prišlo do poškodb podlage. Hkrati niso premajhni, saj bi drugače pri pospeševanju dosegli prenizko kinetično energijo kar bi preprečilo zgostitev.

1.5 Spremenljivke

Pri mletju poliimidnega prahu bi lahko spreminjali naslednje parametre:

- hitrost mletja
- čas mletja
- način mletja (mokro/suho)
- količina snovi istočasno mleta

Pri nanosu poliimidnega prahu bi lahko spreminjali naslednje parametre:

- podlaga
- masa prahu v aerosolni komori
- frekvenca tresenja aerosolne komore
- pretok inertnega plina (N_2), ki ustvari aerosol
- širina šobe
- oddaljenost šobe od podlaga
- hitrost premikanja šobe
- število premikov šobe čez podlago
- tlak ob nanosu

Za neodvisne spremenljivke smo vzeli hitrost in način mletja prahu. Ostalo so konstante, odvisne spremenljivke pa so debelina, hrapavost, dielektričnost in električna prebojna trdnost nanesenih plasti.

2 Metodologija

2.1 Priprava podlage

Uporabili smo ravne steklene podlage, ki smo jih razrezali na primerne kose (12x12 mm^2). Na njih smo s posebno metodo fizikalnega naparjanja (ang. sputtering) nanesli 0,1 mikrometrov debelo plast Au, ki nam je pri električnih meritvah služil kot spodnja elektroda.

2.2 Mletje prahov

Vrsta poliimidnega prahu, ki smo ga uporabljali je P84NT iz proizvodnje podjetja Evonik.

Na podlago smo nanašali prahove, ki so bili različno zmleti. Mleli smo 20 g prahu v mlevni posodi z volumnom 125 mL z mlevnimi kroglami premera 3 mm in skupno maso 220 g. Mletje je trajalo 4 h, s hitrostjo 100 ali 200 rpm in pri suhem ali mokrem mletju. Pri mokrem mletju smo dodali še 35 mL propan-2-ola.

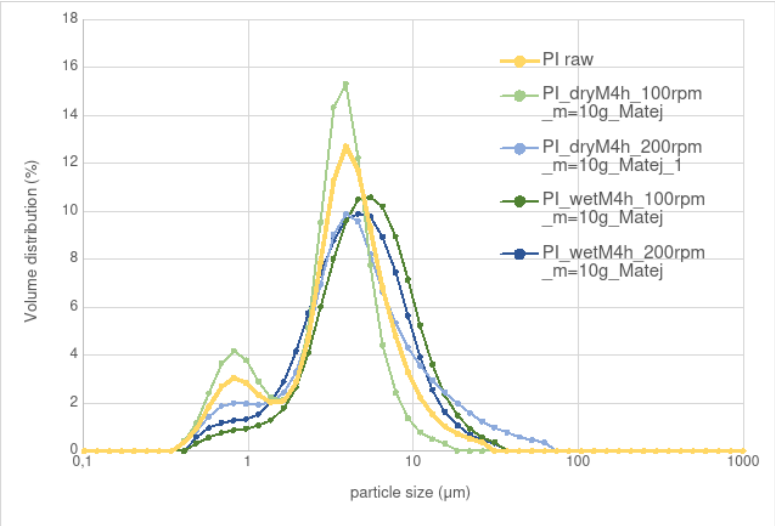


Slika 5: Naprava za mletje, ki smo jo uporabili.

Pripravili smo naslednje prahove:

- surov (brez obdelave)
- suho mlet pri 100 rpm
- suho mlet pri 200 rpm
- mokro mlet pri 100 rpm
- mokro mlet pri 200 rpm

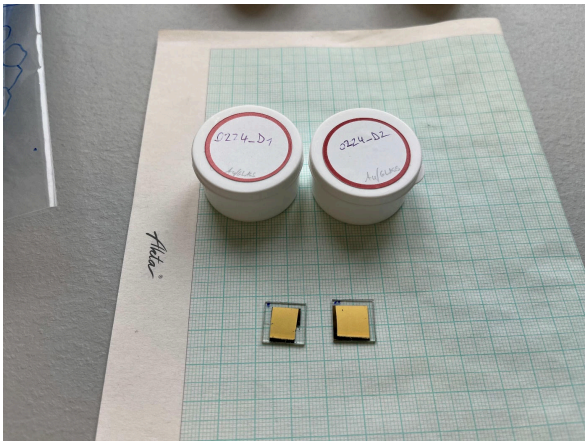
Po mletju smo izmerili volumsko razporeditev delcev za vsak vzorec. Pri neobdelanem prahu sta dva vrhova - najbolj pogosti velikosti delcev. Pri suhem mletju s 100 rpm se vrhova še zvišata, kar pomeni, da je nastala snov sestavljena iz delcev, ki ima manj raznoliko velikost delcev. Pri ostalih mletjih pa se vrhova rahlo zgladita, kar pomeni, da imajo te snovi delce bolj raznolikih velikosti.



Slika 6: Volumska razporeditev delcev

2.3 Nanos prahov na podlago

Najprej smo prah precedili, da smo razbili skupke. Pri tem smo opazili, da so prahovi, ki so bili mokro zmleti, veliko bolj elektrostatični kot suho mleti in surovi. Nato smo ga 10 minut sušili pod tlakom manjšim od 10 milibarov in pri temperaturi 80°C. V tem času smo podlago pritrdili v odlagalno komoro. Namestili smo aerosolno komoro, ter znižali tlak na manj kot 0,2 milibara. Nato smo prižgali tresenje aerosolne komore in odprli dovod dušika s pretokom 2 L/min. Kmalu po tem smo pognali program za premikanje šobe. Program premakne šobo 5-krat čez podlago in nazaj s hitrostjo 5 mm/s, torej gre šoba 10-krat čez podlago. Med postopkom se prah prime na podlago in zgosti. Tako smo dobili vzorce, ki smo jih na koncu še nežno obrisali s papirnato brisačo in tako odstranili nesprijeti prah.



Slika 7: Izgled dveh substratov

2.4 Analiza plasti

Nastalim plastem smo izmerili debelino in hrapavost

2.5 Priprava elektrod

Na nanesene debele plasti smo z metodo fizikalne naparjanja nanesli plast zlata, ki je služila kot zgornja elektroda. Zgornja elektroda ima premer 1,0 mm in debelino 0,1 mikrometra.

2.6 Analiza elektrod

Vsaki elektrodi smo izmerili električno prevodnost in električne izgube. Nato smo izmerili še električno prebojno trdnost. Pri tem se elektroda uniči in postane neuporabna za kasnejše raziskave.

2.7 Analiza

2.7.1 Meritve

Ime vzorca	Mletje	Poraba [g]	Debelina [μm]	Hrapavost
0224_G1	brez	10,8	0,8	0,83
0224_G2	brez	6,8	0,8	1,71
0224_H1	brez	18,0	1,1	1,19
0224_H2	brez	17,8	1,1	0,74
0224_C1	suho 100 rpm	0,8	2,9	0,23
0224_C2	suho 100 rpm	0,8	2,9	0,17
0224_D1	suho 100 rpm	0,8	3,2	0,14
0224_D2	suho 100 rpm	0,8	2,9	0,36
0224_E1	suho 200 rpm	0,6	0,6	0,16
0224_E2	suho 200 rpm	0,6	0,7	0,14
0224_F1	suho 200 rpm	0,5	0	0,28
0224_F2	suho 200 rpm	0,5	0	0,23
0224_I1	mokro 100 rpm	0,8	7,2	0,34
0224_I2	mokro 100 rpm	0,8	6,1	0,62
0224_J1	mokro 100 rpm	0,9	10,6	0,45
0224_J2	mokro 100 rpm	0,9	9,1	0,60
0224_K1	mokro 200 rpm	0,7	0,9	0,09
0224_K2	mokro 200 rpm	0,7	0,9	0,13
0224_L1	mokro 200 rpm	0,9	0,7	0,07
0224_L2	mokro 200 rpm	0,9	0,7	0,11

Tabela 1: Meritve plasti

V tabeli so navedene vse meritve, ki smo jih opravili. V prvem stolpcu je poraba material v gramih. Za nas je ta podatek zelo pomemben, saj si želimo najti čim bolj optimalno mešanje. To pa bo mešanje, ki ima poleg drugih kvalitet tudi najmanjšo porabo materiala. V drugem stolpcu pa lahko vidimo podatke za debelino nanosa v mikrometrih. Nam seveda ustreza, če je debelina čim večja. Z drugimi besedami, v našem interesu je, da se čim večji delež materiala, ki ga nanašamo prime na substrat. V tretjem stolpcu pa je podatek o hrapavosti. Mi si želimo, da je nanešen material čim bolj enakomerno razporejen po substratu, zato bo mešanje pri katerem je hrapavost na koncu najmanjša najprimernejše, seveda če ustreza tudi ostalim kriterijem.

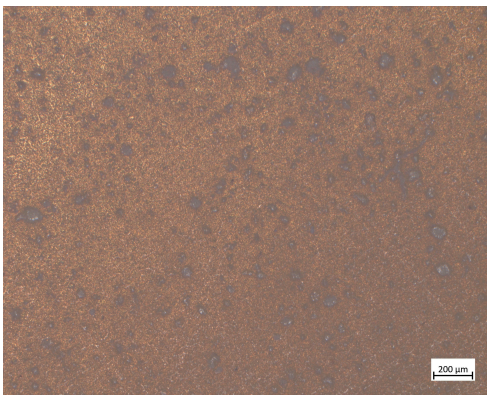
Ime vzorc	Mletje	Kapacitivnost - C [pF]	Dielektrične izgube - D	Odstotek prevodnih elektrod	Električna prebojna trdnost - E_p [$\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$]
0224_G1	brez	3,92	0,021	0 %	677
0224_H1	brez	2,35	0,021	0 %	942
0224_C1	suho 100 rpm	14,45	0,045	33 %	1591
0224_D1	suho 100 rpm	15,29	0,043	22 %	2266
0224_I1	mokro 100 rpm	6,59	0,033	11 %	1413
0224_J1	mokro 100 rpm	4,49	0,026	0 %	616

Tabela 2: Meritve elektrod

V drugi tabeli pa so podatki o vseh električnih lastnostih vzorcev, ki smo jih izmerili. V prvem stolpcu je kapacitivnost v pikofaradih. To je lastnost električno prevodnih teles, da pod vplivom električne napetosti sprejmejo in shranijo naboj in energijo. Višja kot je kapacitivnost, ustreznejši je vzorec za namen naše raziskave. V drugem stolpcu so podatki dielektričnih izgub vzorcev glede na mletje uporabljenega prahu. Primernejši vzorci imajo izgube čim manjše. Podobno je z odstotkom prevodnih elektrod za katerega si želimo, da je čim manjši. Zadnji četrti stolpec pa ima podatke o električni prebojni trdnosti vzorcev. Pove nam pri kateri električni napetosti bo prišlo do ionizacije snovi oziroma električnega preboja. Mi si želimo, da je število kilovoltov na kvadratni centimeter vzorca čim večji.

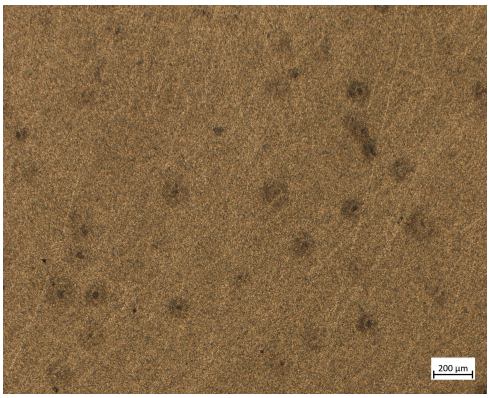
2.7.2 Optična mikroskopija

Dobljene vzorce smo opazovali tudi z optičnim mikroskopom, z namenom zaznavanja različnih defektov na površini vzorcev.



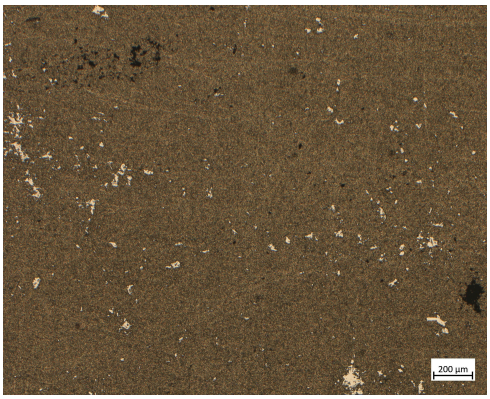
Slika 8: Surov G1

Na vzorcu vidimo neenakomerno debelino plasti in veliko majhnih struktur (sive pike), kar nam pove, da so se delci zgoščevali, a neenakomerno zaradi prevelikih delcev.



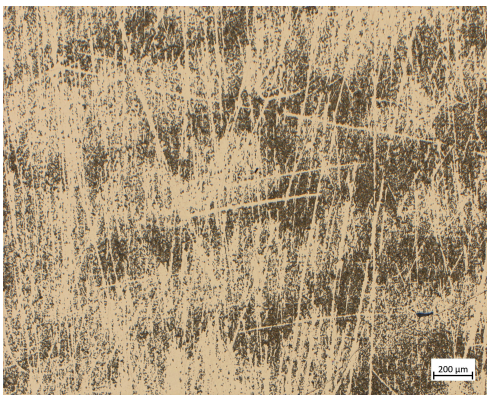
Slika 9: Suho 100 rpm C2

Na vzorcu vidimo nekaj srednje velikih struktur (temnejše pike), kar nakazuje ne preveč veliko hrapavost. Ni lukenj.



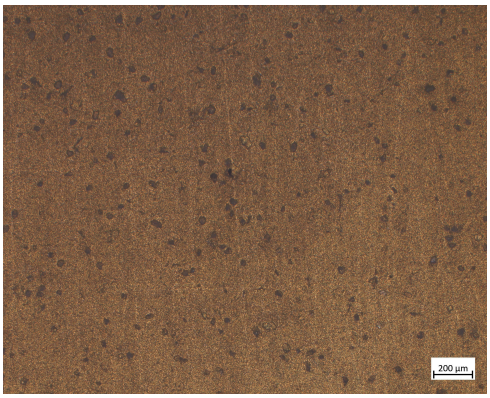
Slika 10: Suho 200 rpm E1

Na vzorcu vidimo nekaj majhnih stuktur (temnejši deli) in veliko majhnih lukenj (svetlejši deli), ker je bil poliamidni prah mlet predrobno in delci niso dosegli dovolj velike kinetične energije, da bi se zgostili.



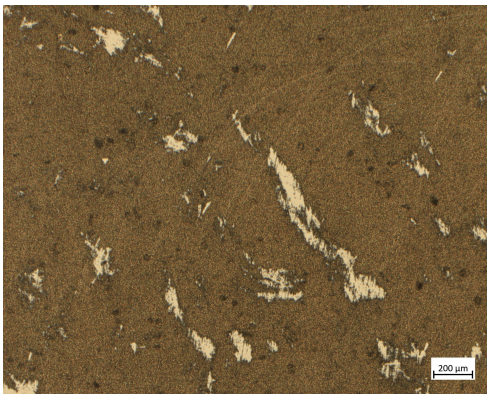
Slika 11: Suho 200 rpm F1

Na vzorcu vidimo več površine brez prahu (svetla površina) kot z njim, ker je bil poliamidni prah mlet predrobno in delci niso dosegli dovolj velike kinetične energije, da bi se zgostili.



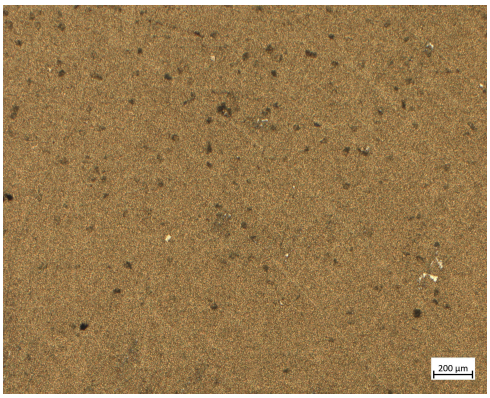
Slika 12: Mokro 100 rpm J2

Na vzorcu vidimo veliko majhnih struktur. Lukenj ni. Vzorec izgleda precej dobro.



Slika 13: Mokro 200 rpm K2

Na vzorcu vidimo nekaj majhnih stuktur (temne pike) in veliko večjih lukenj (svetla območja), ki so posledica predrobnega mletja.



Slika 14: Mokro 200 rpm L2

Na vzorcu vidimo veliko majhnih stuktur (temne pike) in nekaj majhnih lukenj (svetle pike), ki so posledica predrobnega mletja.

3 Rezultati in diskusija

Legenda:

- $\overline{p}$ - povprečna poraba
- $\overline{d}$ - povprečna debelina *(večje = boljše)*
- $\overline{h}$ - povprečna hrapavost *(manjše = boljše)*
- $\overline{C}$ - povprečna kapacitivnost
- $\overline{D}$ - povprečne dielektrične izgube
- $\%$ - odstotek prevodnih (nedelujočih) elektrod *(manjše = boljše)*
- $\overline{E_p}$ - povprečna električna prebojna trdnost *(večje = boljše)*
- $\frac{\overline{d}}{\overline{p}}$ - izkoristek *(večje = boljše)*
- $\frac{\overline{d}}{\overline{h}}$ - kvaliteta plasti *(večje = boljše)*

Mletje	$\overline{p}$ [g]	$\overline{d}$ [μm]	$\overline{h}$	$\overline{C}$ [pF]	$\overline{D}$	%	$\overline{E_p}$ [$\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$]	$\frac{\overline{d}}{\overline{p}}$	$\frac{\overline{d}}{\overline{h}}$
brez	0,95	13,35	1,12	3,1	0,021	0 %	800	14,05	11,95
suho 100 rpm	0,80	2,98	0,23	14,9	0,044	28 %	1900	3,72	13,22
suho 200 rpm	0,55	0,65	0,20					1,18	3,21
mokro 100 rpm	0,85	8,25	0,50	5,5	0,030	6 %	1000	9,71	16,42
mokro 200 rpm	0,80	0,80	0,10					1,00	8,00

Tabela 3: Rezultati

V tabeli z rezultati so vsi pomembni podatki za določanje najustreznejšega mletja in prahu. Kot lahko razberemo iz tabele, največjo debelino dosežemo s surovim prahom a pri tem nastane tudi najbolj hrapava plast. S prahovi mletimi z 200 rpm ne dosežemo primerne debeline, kar povzroči preveliko količino defektov in onemogoči izdelavo elektrod iz plasti. Tudi pri 100 rpm se je pojavilo nekaj defektov, njihova posledica pa je nekaj nedelojočih elektrod. Najboljše razmerje med debelino in hrapavostjo so dosegle plasti iz prahov mletih pri 100 rpm, največje razmerje pri mokrem mletju.

4 Zaključek

V raziskovalni nalogi smo preučili vpliv postopka mletja poliimidnega prahu na njegove lastnosti ter na uspešnost nanosa na zlato elektrodo z uporabo metode aerosol deposition (AD). Ugotovili smo, da različni načini mletja, kot so suho in mokro mletje pri različnih hitrostih, pomembno vplivajo na debelino, hrapavost ter električne lastnosti nastalih plasti. S pomočjo natančne priprave podlage in kontroliranih pogojev smo pridobili vzorce, ki so omogočili analizo teh lastnosti.

Naša raziskava je pokazala, da je mokro mletje prahu povečalo elektrostatične lastnosti, kar je pozitivno vplivalo na nanos prahu na podlago. S tem smo potrdili hipotezo, da postopek mletja vpliva na kakovost in lastnosti debelih plasti poliimidov. Rezultati meritev električne prevodnosti in dielektričnosti so potrdili, da so plasti, pridobljene z mokrim mletjem, izkazovale boljše električne lastnosti v primerjavi s suho mletimi vzorci. To pa velja samo za prah mokro mlet s hitrostjo 100 rpm, saj tisti s hitrostjo 200 rpm poskusa sploh ni opravilo. Poleg električnih lastnosti vzorcev pa smo preverjali tudi njihovo hrapavost za katero nam je v interesu, da je čim manjša in debelino nanos za katero si želimo, da je čim večja. Ob obeh doseženih ciljih pa si želimo tudi čim manjšo porabo materiala za nanos. Vsem tem kriterijem najbolj ustrezajo vzorci z mokro mletim prahom s hitrostjo 100 rpm, ki so po vseh naših meritvah očitno najbolj optimalni. To pa je tudi odgovor na naše raziskovalno vprašanje.

Veseli nas, da smo uspešno napisali raziskovalno nalogo iz ne tako poznanega področja in se pri tem naučili uporabljati stroje za uporabo AD metodo. To je metoda, ki v Sloveniji še ni zelo razvita, zato je novo znanje na tem področju vredno veliko. S pomočjo tega znanja smo optimizirali metodo in preverili vpliv različnih dejavnikov na končni rezultat. Zdaj vemo, kakšno mletje je najboljše za nanašanje keramike z AD metodo. Naša raziskava prispeva k razumevanju procesov, ki vplivajo na nanos keramičnih in polimernih materialov ter odpira možnosti za nadaljnje raziskave na področju razvoja naprednih dielektričnih materialov za različne aplikacije.

Literatura

[1] M. Šadl, „Ferroelectric Ceramic Thick Films Prepared by Aerosol Deposition“, 2019.

[2] D. Hanft, J. Exner, M. Schubert, T. Stöcker, P. A. Fuierer, in R. Moos, „An Overview of the Aerosol Deposition Method: Process Fundamentals and New Trends in Materials Applications“, 2015. [Na spletu]. Dostopno na: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13862838

[3] M. Sadl *idr.*, „Energy-storage-efficient 0.9Pb(Mg1/3Nb2/3)O3–0.1PbTiO3 thick films integrated directly onto stainless steel“, *Acta Materialia*, let. 221, str. 117403, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117403.

[4] Wikipedia contributors, „Polyimide — Wikipedia, The Free Encyclopedia“. [Na spletu]. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Polyimide&oldid=1275600686