

# Utjecaj završnog sloja i vremena starenja na hidrofobnost polielektrolitnog višesloja kitozan/karboksimetilceluloza ; Međumolekulske interakcije - Učenička pogrešna shvaćanja

---

**Bogdanović, Marina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:856880>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
Kemijski odsjek

Marina Bogdanović

**Utjecaj završnog sloja i vremena starenja na  
hidrofobnost polielektrolitnog višesloja  
kitozan/karboksimetilceluloza**

**Diplomski rad**

predložen Kemijskom odsjeku  
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu  
radi stjecanja akademskog zvanja  
magistra edukacije fizike i kemije

Zagreb, 2025.



Ovaj diplomski rad izrađen je u Zavodu za fizikalnu kemiju Kemijskog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom prof. dr. sc. Davora Kovačevića i neposrednim voditeljstvom mag. educ. phys. et chem. Katarine Jerin. Metodički dio diplomskog rada izrađen je u Zavodu za opću i anorgansku kemiju Kemijskog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Draginje Mrvoš Sermek.

Diplomski rad izrađen je u okviru istraživačkog bilateralnog hrvatsko-slovenskog projekta Hrvatske zaklade za znanost pod nazivom *Modulacija polifenolnog profila voća uslijed fizikalnih tretmana nakon branja*, voditelji: prof. dr. sc. Davor Kovačević i prof. dr. sc. Klemen Bohinc (IPS-2020-01-6126).



## Zahvale

*Prije svega, želim izraziti iskrenu zahvalnost svojim mentorima, profesoru Davoru Kovačević i profesorici Druginji Mrvoš-Sermek, koji su mi svojim znanjem, strpljenjem i podrškom bili ključni oslonac tijekom izrade ovog diplomskog rada. Vaša stručnost i smjernice učinile su ovaj proces ne samo uspješnim već i iznimno vrijednim iskustvom za mene. Posebno sam zahvalna profesorici Mrvoš-Sermek koja je odigrala ključnu ulogu u mom obrazovanju i razvoju interesa za znanost. Vaša strast prema kemiji, predanost i iznimna sposobnost da prenesete znanje potaknule su moju ljubav prema kemiji.*

*Velike zahvale želim uputiti asistentici Katarini Jerin, čija mi je podrška bila od iznimne važnosti tijekom rada u laboratoriju i izrade ovog diplomskog rada. Hvala Vam što ste bili uz mene, pružajući ne samo stručnu podršku, već i ohrabrenje koje mi je pomoglo da savladam sve izazove.*

*Neizmjereno sam zahvalna svojim roditeljima i sestri na bezuvjetnoj ljubavi, razumijevanju i podršci koju su mi pružali kroz cijelo moje obrazovanje i život.*

*Zahvaljujem svim svojim prijateljima i kolegama koji su mi pružali podršku i motivaciju tijekom mog studija. Posebnu zahvalnost želim uputiti Martini, divnoj osobi koju sam imala sreću upoznati na fakultetu. Tvoje prijateljstvo obogatilo je moje studentske dane, a tvoje razumijevanje i podrška bile su mi od velike pomoći u trenucima kada je bilo najpotrebnije.*

*I na kraju, hvala mom dečku, koji je bio moj neiscrpni izvor inspiracije i podrške. Tvoja prisutnost u svakom koraku ovog putovanja značila su mi više nego što mogu opisati riječima. Hvala ti, ljubavi.*

*Svima vama, od srca hvala!*

*Marina*

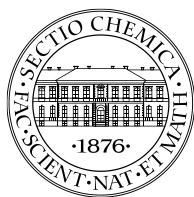


# Sadržaj

SAŽETAK .....	IX
ABSTRACT .....	XII
§ 1. UVOD .....	1
§ 2. LITERATURNI PREGLED .....	3
2.1. Polielektroliti .....	3
2.2. Polielektrolitni višeslojevi .....	4
2.3. Tenziometrija .....	6
2.4. Elipsometrija .....	9
§ 3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	14
3.1. Materijali.....	14
3.2. Metode.....	14
§ 4. REZULTATI .....	21
4.1. Močivost površine supstrata .....	21
4.2. Močivost površine CS/CMC višesloja.....	24
4.3. Rast višesloja CS/CMC .....	28
§ 5. RASPRAVA.....	32
§ 6. ZAKLJUČAK.....	35
§ 7. POPIS OZNAKA, KRATICA I SIMBOLA .....	37
§ 8. LITERATURNI IZVORI.....	38
§ 9. METODIČKI DIO .....	40
9.1. Uvod .....	41
9.2. Nastava kemije u školi .....	41
9.3. Priprema za nastavnika .....	44
9.4. Priprema nastavnog sata .....	61
9.5. Zaključak .....	76
9.6. Literaturni izvori .....	78
§ 10. ŽIVOTOPIS .....	80







Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
**Kemijski odsjek**

Diplomski rad

## SAŽETAK

### UTJECAJ ZAVRŠNOG SLOJA I VREMENA STARENJA NA HIDROFOBNOŠĆ POLIELEKTROLITNOG VIŠESLOJA KITOZAN/KARBOKSIMETILCELULOZA MEĐUMOLEKULSKA INTERAKCIJE – UČENIČKA POGREŠNA SHVAĆANJA

Marina Bogdanović

U istraživačkom dijelu ovog rada naizmjeničnom adsorpcijom pozitivnih i negativnih polielektrolita na čvrstoj podlozi pripremljen je polielektrolitni višesloj kitozan/karboksimetilceluloza (CHI/CMC). Istražen je utjecaj završnog sloja i vremena starenja na površinsku močivost i rast višesloja. Površinska močivost analizirana je tenziometrijskim mjerenjima kontaktnog kuta pri različitim uvjetima relativne vlažnosti. Također, istražena je ovisnost kontaktnog kuta silicijskih pločica o načinu čišćenja supstrata. Rast višesloja praćen je elipsometrijskim mjerenjem debljine u odabranim eksperimentalnim uvjetima. Rezultati su pokazali da završni sloj i vrijeme starenja značajno utječu na površinsku močivost i rast višesloja CHI/CMC.

U metodičkom dijelu rada izrađena je metodičko-didaktička priprema za učenike prvog razreda gimnazije, namijenjena obradi nastavne jedinice *Međumolekulske interakcije*. Priprema je osmišljena u skladu sa strategijom učenja otkrivanjem i temelji se na odgojno-obrazovnim ishodima i najčešćim učeničkim pogrešnim shvaćanjima vezanim uz koncept. U nastavnom satu povezana je građa molekula i međumolekulske interakcije s fizikalnim svojstvima tvari, temeljenim na makroskopskim opažanjima učenika.

(79 stranica, 47 slika, 7 tablica, 67 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)

Rad je pohranjen u Središnjoj kemijskoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac 102a, Zagreb i Repozitoriju Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Ključne riječi: elipsometrija, međumolekulske interakcije, polielektrolitni višeslojevi, pogrešna shvaćanja, tenziometrija

Mentor: prof. dr. sc. Davor Kovačević, izv. prof. dr. sc. Draginja Mrvoš-Sermek

Neposredni voditelj: Katarina Jerin, mag. educ. phys. et chem.

Ocjenitelji:

1. prof. dr. sc. Davor Kovačević
2. izv. prof. dr. sc. Draginja Mrvoš-Sermek
3. izv. prof. dr. sc. Maja Planinić

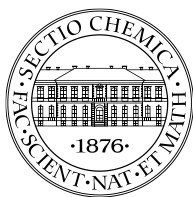
Zamjena: prof. dr. sc. Tajana Begović

dr. sc. Karolina Matejak Cveniće, viši predavač

Datum diplomskog ispita:

24. veljače 2025.





University of Zagreb  
Faculty of Science  
**Department of Chemistry**

Diploma Thesis

## ABSTRACT

### INFLUENCE OF THE TERMINATING LAYER AND AGING ON THE HYDROPHOBICITY OF CHITOSAN/CARBOXYMETHYLCELLULOSE POLYELECTROLYTE MULTILAYER INTERMOLECULAR INTERACTIONS – STUDENT'S MISCONCEPTIONS

Marina Bogdanović

In the research section, chitosan/carboxymethylcellulose (CHI/CMC) polyelectrolyte multilayers were prepared by alternating adsorption of polycations and polyanions on a solid surface. The influence of the terminating layer and aging on surface wettability and multilayer growth were investigated. Wettability was analyzed using tensiometric contact angle measurements under different humidity conditions, while multilayer growth was monitored by ellipsometry. The impact of substrate cleaning methods on the contact angle of silicon wafers was also examined. Results showed that the terminating layer and aging significantly affected the hydrophobicity and growth of the CHI/CMC multilayer.

In the methodological part, a lesson plan on *Intermolecular interactions* was created for first-year high school students. The lesson was based on educational outcomes and the most common student misconceptions, designed for strategy of learning by discovery. The lesson connected molecular structure and intermolecular interactions to the physical properties of substances through students' macroscopic observations.

(79 pages, 47 figures, 7 tables, 67 references, original in croatian)

Thesis deposited in Central Chemical Library, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac 102a, Zagreb, Croatia and in Repository of the Faculty of Science, University of Zagreb.

Keywords: ellipsometry, intermolecular interactions, polyelectrolyte multilayers, misconceptions, tensiometry

Mentor: Dr. Davor Kovačević, Professor, Dr. Draginja Mrvoš-Sermek, Professor  
Assistant mentor: Katarina Jerin, mag. educ. phys. et chem.

Reviewers:

1. Dr. Davor Kovačević, Professor
  2. Dr. Draginja Mrvoš-Sermek, Associate Professor
  3. Dr. Maja Planinić, Professor
- Substitute: Dr. Tajana Begović, Professor  
Dr. Karolina Matejak Cvenić, Professor

Date of exam:

24<sup>th</sup> of February 2025.

## § 1. UVOD

Polielektroliti su makromolekule koje sadrže značajan broj ionskih ili ionizabilnih skupina unutar svoje strukture. Ovisno o vrsti naboja, polielektroliti se dijele na polikatione i polianione. Njihovom naizmjeničnom adsorpcijom na čvrstu podlogu nastaju polielektrolitni višeslojevi (engl. *polyelectrolyte multilayers*, PEMs).<sup>1</sup> Zbog svojih širokih primjena, u suvremenim istraživanjima materijala polielektrolitni višeslojevi privlače sve veću pozornost. PEM-ovi i PEM-ovima prekriveni materijali intenzivno se istražuju u farmaceutskoj i biomedicinskoj industriji u kontekstu isporuke lijekova, posebice zbog mogućnosti kontrole otpuštanja aktivnih tvari, biokompatibilnosti i svojstava koja sprječavaju prijanjanje bakterija.<sup>2</sup> U industriji hrane, polielektrolitni višeslojevi pronalaze primjenu kao jestive, zaštitne prevlake za voće i povrće, produžujući njihov rok trajanja i očuvanje svježine.<sup>3</sup> Osim toga, koriste se za stabilizaciju emulzija, pjena i drugih kompleksnih sustava u prehrambenim proizvodima te u zaštiti okoliša za pročišćavanje vode, stabilizaciju kontaminiranog tla i smanjenje otpada putem razgradivih prevlaka.<sup>4</sup>

Visoka fleksibilnost u primjeni polielektrolitnih višeslojeva, posljedica je njihove sposobnosti da se prilagode različitim industrijskim zahtjevima kroz precizan odabir uvjeta pri pripremi. Najčešća metoda pripreme polielektrolitnih višeslojeva je Decherova sloj-po-sloj metoda (engl. *layer by layer*, LbL).<sup>5</sup> Promjenom eksperimentalnih uvjeta moguće je kontrolirati svojstva nastalih višeslojeva. Neki od čimbenika koji mogu utjecati na svojstva višeslojeva su odabir i koncentracija polielektrolita, pH otopine, ionska jakost, temperatura i relativna vlažnost.

U sklopu ovog diplomskog rada pripremljen je polielektrolitni višesloj kitozan/karboksimetilceluloza (CS/CMC) te su istražena njegova svojstva u odabranim eksperimentalnim uvjetima. Polielektroliti od kojih je sastavljen ovaj višesloj, kitozan i karboksimetilceluloza, ističu se svojom visokom biokompatibilnošću i ekološkom prihvatljivošću. Iz literature<sup>6</sup> je poznato da višesloj CS/CMC ima sposobnost samozacjeljivanja te kao takav je odličan kandidat za pripravu jestivih, zaštitnih filmova. Da bi se mogli pripremiti višeslojevi za tu primjenu potrebno je istražiti i ostala svojstva višesloja. Cilj ovog rada bio je istražiti utjecaj završnog sloja i vremena starenja na svojstva višesloja CS/CMC. Svojstva višesloja CS/CMC koja su se promatrala su površinska močivost i rast, odnosno debljina

višesloja. Površinska močivost višesloja ispitivana je tenziometrijskim mjerenjem u uvjetima različite relativne vlažnosti, uz praćenje promjena kontaktnog kuta tijekom vremena. Kako bi se dodatno pojasnila svojstva površinske močivosti višesloja, provedena su i tenziometrijska mjerenja kontaktnog kuta na silicijskim pločicama očišćenih različitim metodama. Uz hidrofobnost površine, svojstvo koje je još istraženo je rast višesloja. U odabranim eksperimentalnim uvjetima elipsometrijski je praćena promjena debljine višesloja.

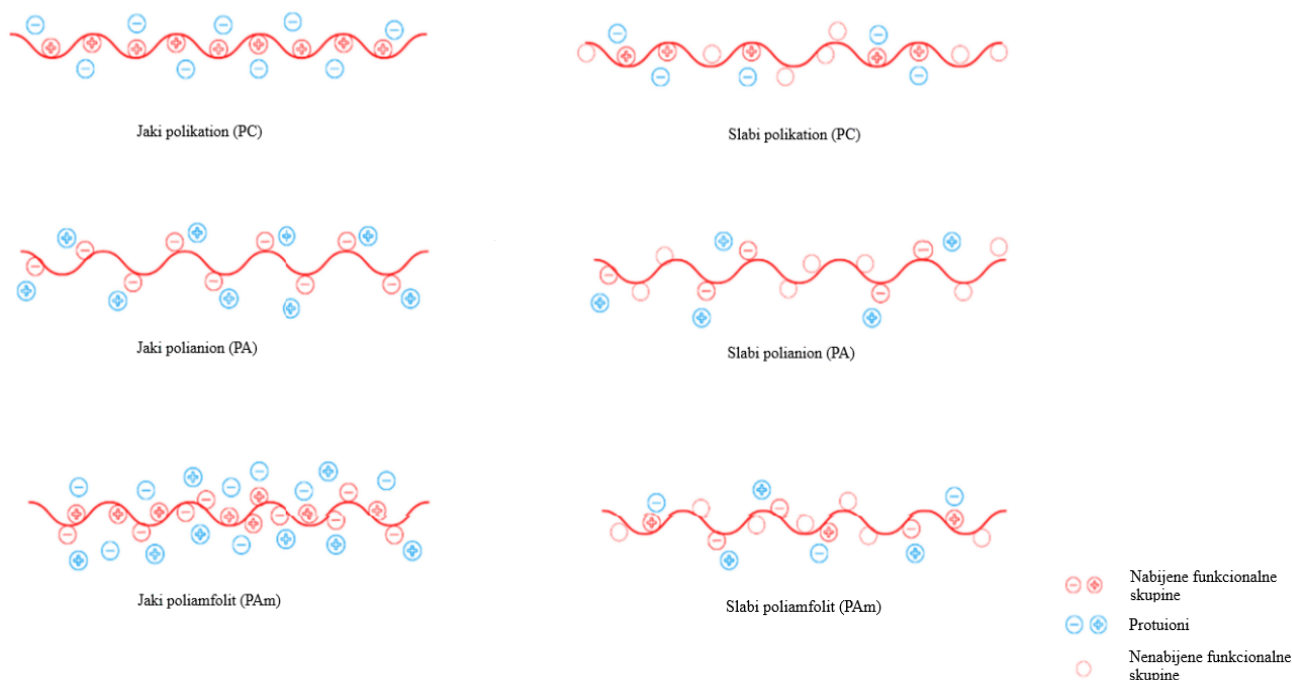


## § 2. LITERATURNI PREGLED

### 2.1. Polielektroliti

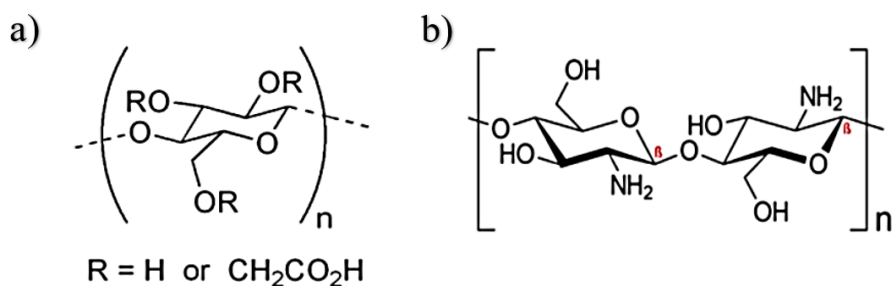
Polielektroliti su makromolekule kod kojih značajan dio strukturnih jedinica sadrži ionske ili ionizabilne skupine, ili oboje. Ove makromolekule čine fascinantnu klasu s jedinstvenim svojstvima, koja proizlaze iz njihove dvojne prirode – kombinacije visoko nabijenih elektrolita i lančanih makromolekula.<sup>7</sup>

Prema podrijetlu, polielektroliti mogu biti prirodni (npr. kitozan (CS), alginska kiselina, hijaluronska kiselina (HA), itd.), polusintetski (npr. ksantan, modificirani CS) ili sintetski (poli(etilenimin) (PEI), poli(akrilna kiselina) (PAA), poli(metakrilna kiselina) (PMA), itd.). Ovisno o vrsti ionskog naboja, polielektroliti se dijele na polianione (PA), polikatione (PC) te poliamfolite (PAm). Prema disocijaciji, polielektroliti mogu biti slabi ili jaki (slika 1.). Stupanj ionizacije slabih polielektrolita ovisi o pH vrijednosti, a konstanta disocijacije kreće se između 2 i 10. S druge strane, jaki polielektroliti (npr. poli(dialildimetilamonijev klorid), PDADMAC) u potpunosti disociraju u otopini i njihov stupanj ionizacije ne ovisi o pH.<sup>1</sup>



Slika 1. Klasifikacija polielektrolita prema prirodi funkcijskih skupina i ionskog naboja. Slika je preuzeta i dorađena iz reference 1.

U ovom radu korištene su dvije vrste polielektrolita: kitozan (CS) i karboksimetilceluloza (CMC). Njihove strukturne formule prikazane su na slici 2. Kitozan (CS), dobiven iz hitina, i karboksimetilceluloza (CMC), dobivena iz celuloze, potječu od dva najzastupljenija polisaharida te su zbog svoje biokompatibilnosti i antibakterijskih svojstava izazvali značajan znanstveni interes i našli široku primjenu u istraživanjima.<sup>8</sup>



Slika 2. Strukturne formule polielektrolita: a) karboksimetilceluloze, b) kitozana.

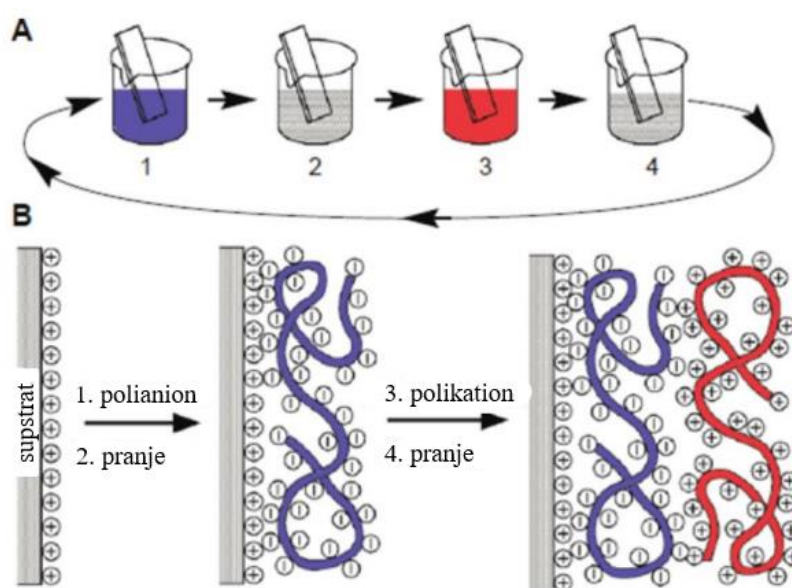
Iako je hitin netopljiv u većini organskih otapala, njegov *N*-deacetilirani derivat kitozan (CS) je lako topljiv u razrijeđenim kiselinskim otopinama pri pH vrijednosti ispod 6,0. Zbog prisutnosti amino skupina, stupanj ionizacije i svojstva kitozana ovise o pH vrijednosti otopine. Pri niskom pH, amino skupine se protoniraju i postaju pozitivno nabijene, što čini kitozan topljivim u vodi kao kationski polielektrolit. S druge strane, kada pH poraste iznad 6, amino skupine kitozana se deprotoniraju te on postaje netopljiv. Prijelaz iz topljivog u netopljivo stanje događa se oko njegove  $pK_a$  vrijednosti između pH 6 i 6,5. Uz stupanj deacetilacije, na svojstva kitozana također utječe njegova molarna masa i čistoća.<sup>8,9</sup>

Polianion karboksimetilceluloza (CMC) je derivat celuloze, glavnog sastojka staničnih stijenki biljaka. CMC nastaje reakcijom supstitucije pri kojoj se hidroksimetilne skupine zamjenjuju karboksimetilnim skupinama. Stupanj supstitucije, jedan je od glavnih faktora koji utječu na fizikalna i kemijska svojstva CMC-a. Dobro je topljiv u vodi te siguran za ljudsko zdravlje i okoliš. Zbog svoje biokompatibilnosti, biorazgradivosti i netoksičnosti pronalazi raznoliku primjenu u prehrambenoj i kozmetičkoj industriji.<sup>10,11</sup>

## 2.2. Polielektrolitni višeslojevi

Naizmjeničnom adsorpcijom pozitivno i negativno nabijenih polielektrolita na čvrstu podlogu nastaju polielektrolitni višeslojevi (engl. *polyelectrolyte multilayers*, PEMs). Prije nešto više od 30 godina prvu metodu pripreme polielektrolitnih višeslojeva predložili su Decher i suradnici.<sup>5</sup>

Decherova sloj-po-sloj (engl. *layer by layer*, LbL) metoda priprave PEM-ova se pokazala iznimno svestranom i primjenjivom. Proces se sastoji od naizmjeničnog izlaganja podloge otopini polikationa i otopini polianiona, obično s među koracima ispiranja i sušenja inertnim plinom (slika 3.). Postupak se ponavlja sve dok se ne postigne željeni broja slojeva.<sup>1</sup> Budući da se proces temelji samo na adsorpciji iz otopine, u načelu ne postoje ograničenja u pogledu veličine i vrste podloge. Polielektrolitni višeslojevi najčešće se pripravljaju na pločicama metala ili polumetala te njihovih oksida, no mogu se pripremiti i na koloidima<sup>12</sup> i objektima dimenzija nekoliko desetaka centimetara.<sup>13</sup>



Slika 3. A) Shema procesa priprave polielektrolitnog višesloja (koraci 1 i 3 prikazuju adsorpciju polianiona i polikationa, dok su koraci 2 i 4 ispiranje), B) pojednostavljeni prikaz prva dva koraka adsorpcije, s početkom taloženja filma na pozitivno nabijenu podlogu. Slika je preuzeta i doradena iz reference 13.

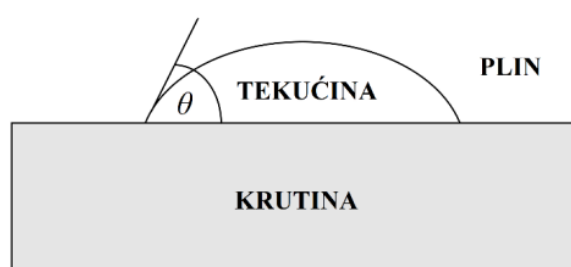
Priprema polielektrolitnih višeslojeva sloj-po-sloj metodom je prilagodljiva i omogućuje preciznu kontrolu parametara adsorpcije. Neki od čimbenika koji mogu utjecati na svojstva višesloja su ionska jakost, pH otopine, temperatura i relativna vlažnost. Promjena ionske jakosti dovodi do strukturnih promjena u konformaciji polielektrolita koji sudjeluju u stvaranju PEM-ova. Porastom ionske jakosti, konformacija polielektrolita prelazi iz „izdužene“ u „zavojitu“ što utječe na sposobnost međusobne interakcije polielektrolita te uzrokuje promjene u stabilnosti i fizičkim karakteristikama nastalih polielektrolitnih višeslojeva. Uz ionsku jakost,

na svojstva PEM-ova utječe promjena pH vrijednosti otopine, posebno za slabe polielektrolite poput poliakrilne kiseline (PAA), CS-a i CMC-a. Male promjene pH vrijednosti mogu promijeniti gustoću naboja funkcijskih skupina, što utječe na konformaciju polielektrolita i debljinu slojeva nastalog višesloja. U formiranju višeslojeva sudjeluju pretežito elektrostatske, ali i hidrofobne interakcije te kovalentne, vodikove i Van der Waalsove sile. Čimbenici koji utječu na interakcije posljedično utječu i na svojstva nastalih višeslojeva. Primjer takvog čimbenika je temperatura. S povećanjem temperature, dolazi do smanjenja elektrostatskih interakcija i konformacijskih promjena što utječe na rast slojeva. Također, odabir polielektrolita (molarna masa, gustoća naboja, linearna ili razgranata struktura) znatno utječe na svojstva nastalog polielektrolitnog višesloja.<sup>1</sup>

## 2.3. Tenziometrija

### 2.3.1. Kontaktni kut

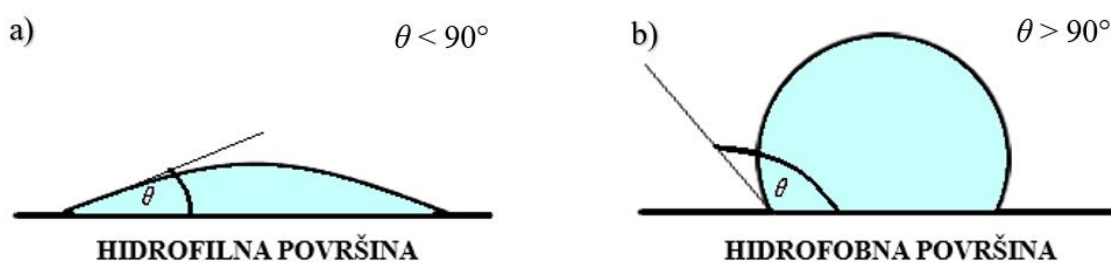
Kada se mala količina tekućine nanese na čvrstu površinu, ona oblikuje kap koja prekriva samo dio te površine. Taj proces prikazan je na slici 4. Oblik kapljice tekućine na površini ovisi o močivosti površine. U točki u kojoj se dodiruju sve tri faze (krutina, tekućina i plin) povučena je tangenta na tekućinu. Kut između tangente na tekućinu i površine krutine naziva se kontaktni kut ( $\theta$ ). Pomoću kontaktnog kuta može se odrediti močivost površine ispitivanom tekućinom. Granični uvjet je  $0^\circ < \theta < 180^\circ$ .<sup>14</sup>



Slika 4. Kapljica tekućine na površini krutine s pripadnim kontaktnim kutom ( $\theta$ ). Slika je preuzeta i doradena iz reference 14.

U slučaju kada se kontaktni kut približava nuli, površina je potpuno navlažena tekućinom i kapljica je spljoštenog oblika. Primjer takvog slučaja je voda na čistom staklu (slika 5. a)). Između molekula vode i površine stakla ostvaruju se jake međumolekulske interakcije

(vodikove veze, Londonove disperzijske sile...). Površina će biti bolje močiva što su jače međumolekulske interakcije. Kada kontaktni kut iznosi manje od  $90^\circ$  površina se smatra hidrofilnom (“voli” vodu), a hidrofobnom (“boji se” vode) kada je kontaktni kut veći od  $90^\circ$ . Detaljnije, površine čiji je kontaktni kut manji od  $10^\circ$  klasificiraju se kao superhidrofilne površine. S druge strane, površine čiji kontaktni kut iznosi više od  $150^\circ$  nazivaju se superhidrofobnim. Primjer u kojem tekućina ne moči površinu, odnosno primjer hidrofobne površine je kapljica žive na površini stakla. Oblik kapljice žive na staklu je sferičnog oblika (slika 5. b)).<sup>14,15</sup>



Slika 5. Klasifikacija močivosti površine krutine s obzirom na vrijednost kontaktnog kuta.

### 2.3.2. Čimbenici koji utječu na močivost površina

Kontaktni kut površine ovisi o mnogim čimbenicima uključujući površinsku energiju, kemijski sastav i vrstu tekućine, hrapavost površine te brojne vanjske čimbenike. Ravnotežu u kontaktnoj točki triju faza opisuje Youngova jednadžba:

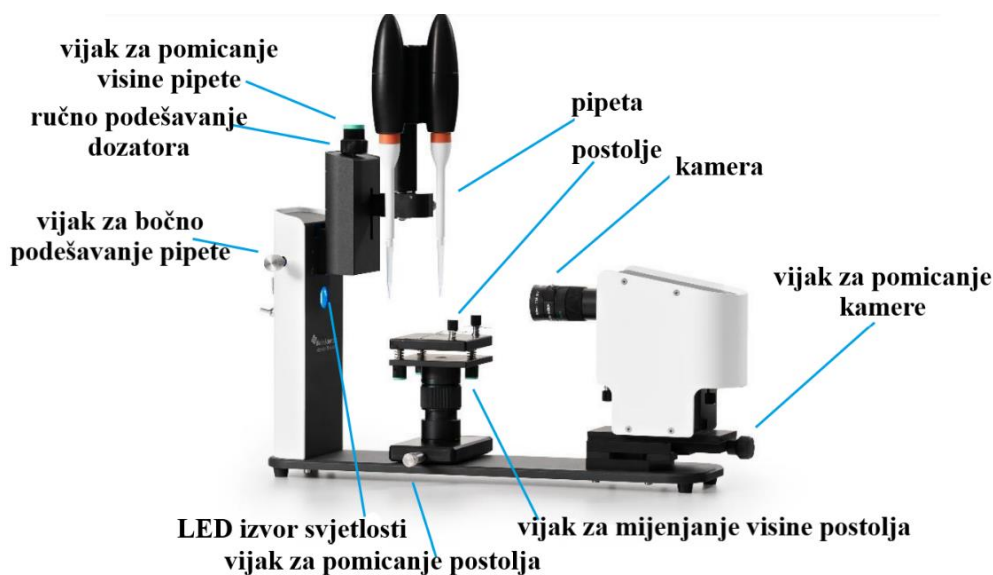
$$\sigma_{sg} = \sigma_{sl} + \sigma_{lg} \cos \theta_Y \quad (1)$$

gdje je  $\sigma_{xy}$  površinska napetost na granici dviju faza. S (engl. *solid*) označava krutinu, L (engl. *liquid*) tekuće i G (engl. *gas*) plinovito stanje) i  $\theta_Y$  Youngov kontaktni kut. Youngova jednadžba pretpostavlja da je površina kemijski homogena i topografski glatka. U tim slučajevima Youngov kontaktni kut ovisi isključivo o površinskim napetostima na granici dviju faza. Iako Youngova jednadžba precizno opisuje ravnotežu među površinskim napetostima na granici tri faze (kruta, tekuća i plinovita), njezina primjena ograničena je na idealizirane uvjete. Realne površine uobičajeno nisu idealno glatke i homogene, te za njih neće vrijediti navedena jednadžba. Hrapavost značajno mijenja stvarno područje kontakta tekućine s površinom, što vodi do odstupanja od ravnotežnih vrijednosti predviđenih Youngovom jednadžbom. Različiti modeli poput Wenzelovog i Cassie-Baxterovog uvode korekcije jednadžbe koje uključuju hrapavost površine. Uz hrapavost površine, na kontaktni kut značajno utječe i volumen same kapljice, koji uzrokuje promjene u dinamici širenja kapljice i raspodjele međupovršinskih sila.

Povećanjem volumena kapljice i hrapavosti površine uočena je razlika između kutova napredovanja (engl. *advancing angle*) i povlačenja (engl. *receding angle*). Taj fenomen poznat je pod nazivom histereza kontaktnog kuta (engl. *contact angle hysteresis*, CAH). Kontaktni kut podložan je i utjecaju vanjskih faktora poput temperature, tlaka i relativne vlažnosti atmosfere. Povećanje temperature smanjuje površinsku i međupovršinsku napetost, prvenstveno za tekuće faze. To je rezultat slabljenja međumolekulskih sila s porastom temperature. Atmosferski tlak ima manje izravan utjecaj na kontaktni kut, ali može utjecati na isparavanje tekućine, posebno u sustavima gdje je tlak znatno niži ili viši od standardnog. Dok vanjski utjecaji poput temperature i tlaka imaju određeni trend, utjecaj relativne vlažnosti na kontaktni kut je dosta nepredvidiv. Kako bi se osigurala točnost i ponovljivost rezultata mjerenja kontaktnog kuta potrebno je kontrolirati uvjete, odnosno navesti temperaturu i relativnu vlažnost pri kojem su provedena mjerenja.<sup>15</sup>

### 2.3.3. Mjerenje kontaktnog kuta

Tenziometrija je tehnika koja se koristi za mjerenje kontaktnih kutova i površinske napetosti. Kontaktni kut najčešće se mjeri metodom položene kapi, metodom zarobljenog mjehurića ili Wilhelmyevom metodom pločice. U ovom diplomskom radu primijenjena je metoda položene kapi (engl. *sessile drop method*). Kapljica tekućine postavlja se pomoću šprice na površinu tankog uzorka koji se nalazi na postolju tenziometra. Shema tenziometra korištenog u radu prikazana je na slici 6. Kamera visoke rezolucije koja snima fotografije kapljice povezana je s računalnim sustavom za analizu fotografija. Analiza fotografija, odnosno određivanje kontaktnog kuta temelji se na određivanju tangente na kapljicu u kontaktnoj točki triju faza (krutina, tekućina i plin). Mjerni instrumenti najčešće imaju računalne programe koji automatski mogu izračunati kontaktni kut. Koristeći se različitim algoritmima matematički prilagođavaju podatke i određuju tangentu u kontaktnoj točki te potom i kontaktni kut.<sup>14-16</sup>

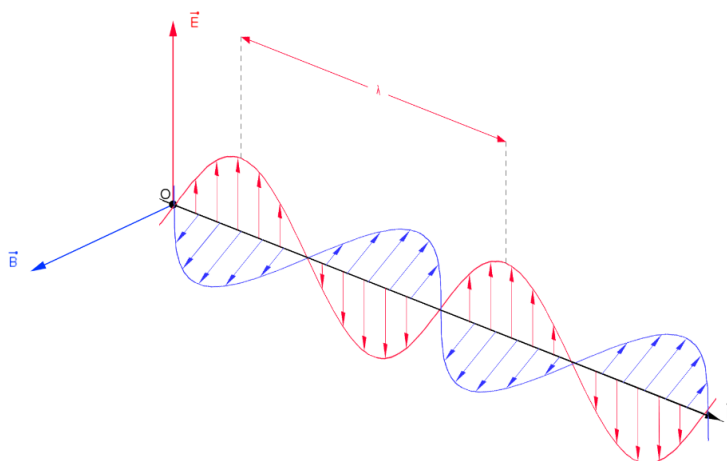


Slika 6. Shema tenziometra Attension Theta Lite (*Biolin Scientific*). Slika je preuzeta i dorađena iz reference 16.

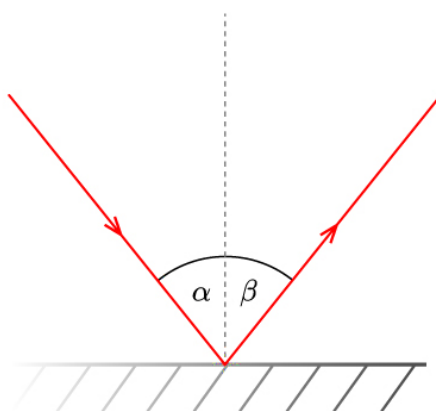
## 2.4. Elipsometrija

### 2.4.1. Elektromagnetski valovi i njihove optičke pojave

Elektromagnetski valovi (EM valovi) šire se prostorom kao oscilacije elektromagnetskog polja. Električno i magnetsko polje titraju u međusobno okomitim ravninama, a smjer širenja vala okomit je na obje ravnine titranja (slika 7.). Elektromagnetski val opisuju osnovne valne karakteristike: valna duljina ( $\lambda$ ), koja predstavlja udaljenost između dviju uzastopnih točaka u istoj fazi titranja (označeno na slici 7.), frekvencija ( $\nu$ ), koja označava broj titraja u sekundi i brzina svjetlosti ( $c$ ). Valna duljina, frekvencija i brzina ovise o izvoru i sredstvu kojim se širi EM val.<sup>17</sup>

Slika 7. Elektromagnetski val.<sup>18</sup>

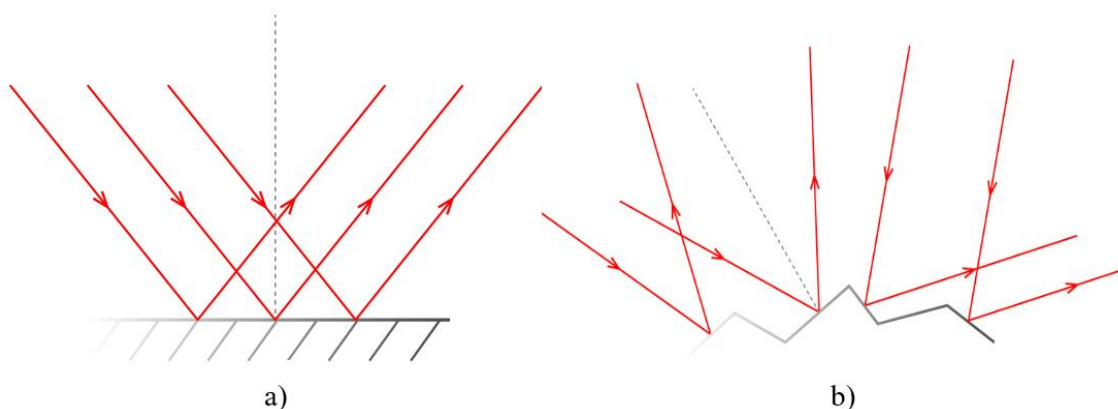
Elektromagnetski valovi podliježu optičkim pojavama poput refleksije (odbijanja), loma i difrakcije. S obzirom da se elipsometrija temelji na refleksiji svjetlosti, ona će biti detaljnije objašnjena. Refleksija predstavlja proces pri kojem elektromagnetski valovi, poput svjetlosti, mijenjaju smjer pri udaru o površinu. Reflektirani valovi pritom ostaju u istom mediju. Svjetlosna zraka koja pada na neku ravninu reflektira se tako da je upadni kut ( $\alpha$ ) jednak kutu refleksije ( $\beta$ ) što se naziva zakonom refleksije.

Slika 8. Zakon refleksije svjetlosti.<sup>19</sup>

Ovisno o površini na koju dolazi upadni val razlikuju se dvije vrste refleksije svjetlosti: spekularna/pravilna i difuzna refleksija. Spekularna refleksija se javlja na glatkim površinama. Ako na ravno zrcalo upadne paralelni snop zraka, on će i nakon spekularne refleksije ostati paralelan. Kod neravnih površina, reflektirani valovi (difuzna refleksija) šire se u različitim smjerovima. Za svaku pojedinu zraku i dalje vrijedi zakon refleksije svjetlosti. Posebni primjer, kada dođe do pojave potpunog odbijanja, naziva se totalna refleksija. Ona se događa kada zraka

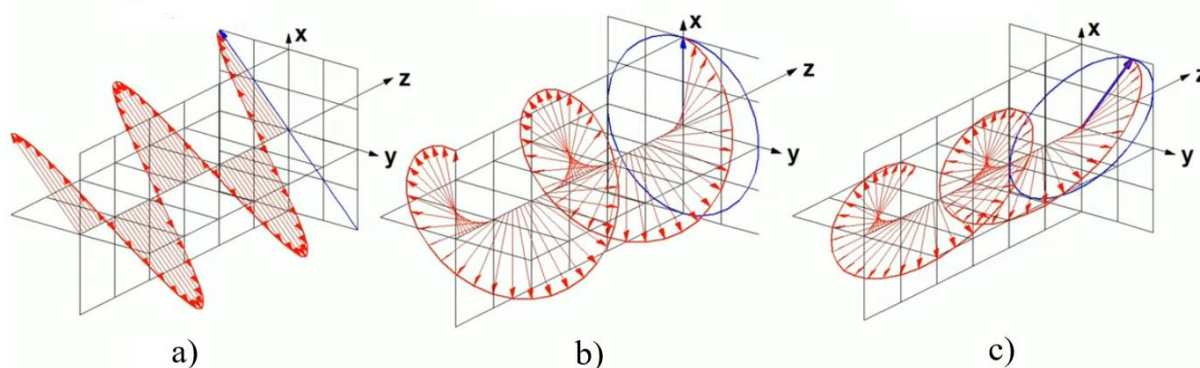


svjetlosti iz optički gušćega sredstva (npr. staklo) pada na granicu s optički rjeđim sredstvom (npr. zrak) pod većim kutom od kritičnog. Zraka se tada u cijelosti odbija ili reflektira.



Slika 9. a) Pravilna refleksija svjetlosti, b) difuzna refleksija svjetlosti.<sup>19</sup>

Refleksijom na nemetalnim površinama, lomom ili raspršenjem, svjetlost se može polarizirati. Polarizacija je pojava koja pokazuje da je svjetlost transverzalni EM val. Val može biti linearno, kružno ili eliptično polariziran (slika 10.). Smjer polarizacije je dogovorno smjer titranja električnog polja. Nepolariziranom valu polje titra u svim smjerovima u ravnini okomitoj na smjer širenja. Nepolariziranu svjetlost polarizira optički sustav, polarizator. Svjetlost se polarizira tako da se propušta samo ono električno polje koje titra u ravnini polarizacije.<sup>20</sup>

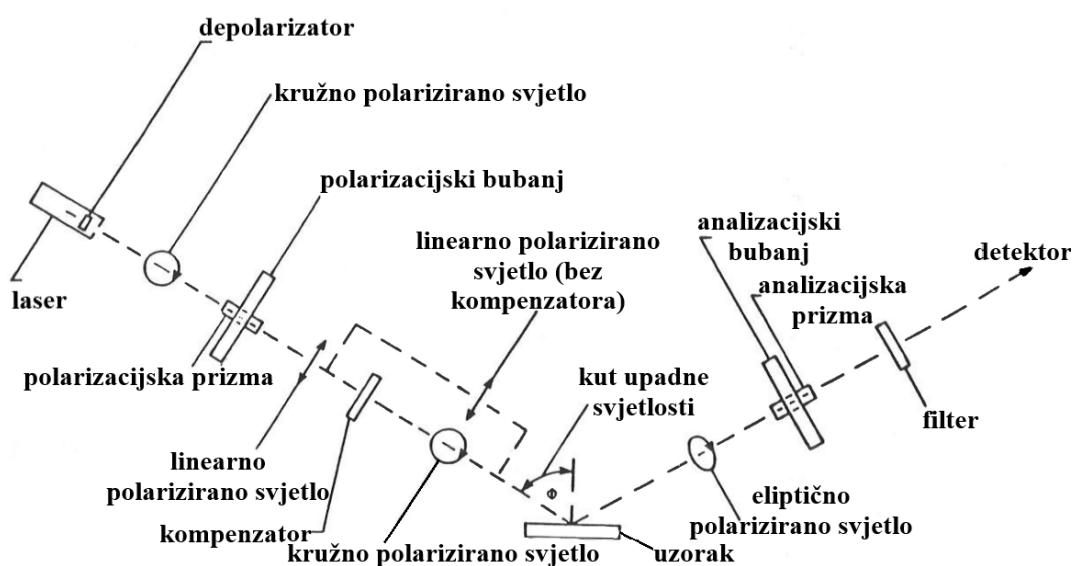


Slika 10. a) Linearna polarizacija, b) kružna polarizacija i c) eliptična polarizacija.<sup>21</sup>

#### 2.4.2. Elipsometrija

Elipsometrija je vrlo osjetljiva, nedestruktivna metoda za karakterizaciju tankih filmova. Budući da optička svojstva tankih slojeva ovise o njihovom sastavu, debljini, vodljivosti i poroznosti, elipsometrija može pružiti informacije o svim tim parametrima. Princip elipsometrije temelji se na analizi promjene polarizacije svjetlosti nakon što se reflektira od površinu uzorka.<sup>22</sup>

Instrument pomoću kojeg se određuje promjena u polarizaciji svjetlosti nakon što se ona reflektira, prolazi kroz površinu ili tanki sloj materijala naziva se elipsometar. Glavni dijelovi elipsometra su izvor zračenja, polarizator, nosač uzorka, analizator i detektor. Shema elipsometra korištenog u mjerenjima prikazana je na slici 11. Izvor zračenja je laser, monokromatskog zračenja određene valne duljine. Izvor emitira nepolarizirano svjetlo koje zatim prolazi kroz polarizator. Polarizator ograničava vibracije svjetlosti te se nepolarizirano svjetlo prolaskom kroz polarizacijski bubanj, odnosno prizmu, pretvara u linearno polarizirano. U slučaju kada se koristi kompenzator, linearno polarizirano svjetlo se konvertira u kružno. Bez kompenzatora, linearno polarizirano svjetlo ostaje linearno i kao takvo pada na uzorak pod određenim kutom. Kut upada svjetlosti može se prilagođavati. Reflektiranjem od površinu uzorka nastaje eliptično polarizirano svjetlo koje potom dolazi na rotirajuću analizatorsku prizmu. Svjetlo potom dolazi na fotodetektor koji pretvara svjetlosnu energiju u električni signal. Između analizatora i detektora nalazi se optički filter koji zaustavlja zračenja svih valnih duljina osim onog od laserske zrake.<sup>23</sup>



Slika 11. Shema elipsometra L116USB (*Gaertner Scientific Ellipsometer*). Slika je preuzeta i dorađena iz reference 23.

Promjena polarizacije svjetlosti nakon refleksije očituje se analizom omjera amplituda dviju međusobno okomito polariziranih komponenti svjetlosti. Komponenta koja je paralelna s ravninom upada zrake svjetlosti naziva se p-komponenta, a s-komponenta je komponenta okomita na ravninu upada. Uz pomoć polarizacijskih koeficijenata refleksije ( $r_s$  i  $r_p$ ) mogu se izračunati parametri ( $\Psi$  i  $\Delta$ ) koji karakteriziraju eliptično polarizirano svjetlo nakon refleksije.

Analiza podataka započinje tako da se nakon mjerenja konstruira određeni model. Omjer amplituda ( $\Psi$ ) i fazna razlika ( $\Delta$ ), ključne su fizikalne veličine za odabir modela koji opisuje uzorak. Pojedini parametri modela poput upadnog kuta i valne duljine izvora zračenja mogu se mijenjati. Pomoću zadanog modela dolazi se do podataka o debljini i indeksu loma materijala.<sup>22,24</sup>

## § 3. EKSPERIMENTALNI DIO

### 3.1. Materijali

U izvedbi ovog diplomskog rada korištene su sljedeće polazne kemikalije:

- kitozan (CS), viskoznosti 20 – 300 cps, p.a. (*Sigma-Aldrich*)
- karboksimetilceluloza (CMC), viskoznosti 400 – 800 cps, p.a. (*Sigma-Aldrich*)
- octena kiselina, CH<sub>3</sub>COOH, p.a. (*LabExpert, Kefo*)
- sumporna kiselina, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, p.a.
- vodikov peroksid, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, p.a. (*Gram-mol*)

Za izvedbu diplomskog rada korišteni su sljedeći instrumenti i pribor:

- pH metar (*Metrohm*)
- kombinirana staklena mikroelektroda (*Metrohm*)
- magnetska miješalica
- elipsometar, L116USB (*Gaertner Scientific Ellipsometer*)
- tenziometar, Attension Theta Lite (*Biolin Scientific*)
- plazma cleaner, Zepto (*Diener*)

### 3.2. Metode

#### 3.2.1. Čišćenje supstrata

Diskovi od silicija narezani su pomoću dijamantne igle na dimenzije 2 cm × 1 cm. Kako bi se ispitaio utjecaj čišćenja supstrata na svojstva polielektrolitnih višeslojeva, supstrati su očišćeni na dva načina: pomoću *piranha* otopine ili pomoću plazme. *Piranha* otopina je otopina koncentrirane sumporne kiseline i vodikovog peroksida ( $w = 30\%$ ) u volumnom omjeru 3 : 1. Pripremljena je tako da je u kalotu na magnetskoj miješalici pomoću pipete odmjerena koncentrirana sumporna kiselina, a zatim je, uz miješanje, kap po kap, pipetom dodavana otopina vodikova peroksida. Tako pripremljena otopina zagrijava se sat vremena uz stalno miješanje. Silicijske pločice su potom dobro isprane deioniziranom vodom te osušene inertnim plinom, argonom.

Za uklanjanje nečistoća pomoću plazme korišten je plazma cleaner Zepto tvrtke *Diener* (slika 12.). Prilikom rukovanja plazma cleanerom prvo je potrebno uključiti senzor tlaka te potom prekidač na plazma uređaju. Pomoću kotačića na prednjoj strani uređaja snaga je postavljena na 80 W. Rukavicama se pažljivo stavi uzorak u komoru za plazmu s aktivnom površinom okrenutom prema gore. Zatvori se komora pomoću poklopca te se on rukom pridržiava i uključi se prekidač za pumpu. Dolazi do evakuiranja komore te se potom otvori ventil na boci kisika (slika 13.). Pomoću regulatora tlaka namješten je tlak u komori na 0,2 – 0,4 mbar. Uključi se generator plazme te se za vrijeme izlaganja plazmi pomoću ventila regulatora tlaka održava tlak u komori na željenom. Nakon provedenog postupka čišćenja, generator plazme i regulator tlaka se isključe te se zatvori ventil za dovod plina. Isključi se pumpa, pričekaj 2 do 3 minute i zatim uključi ventilacija. Pritom dolazi do izjednačavanja tlaka u komori s atmosferskim tlakom. Ukoliko su uzorci prelagani, mogu pasti s nosača. Nakon što se prestane čuti zvuk šuštanja koji je posljedica ulaska zraka u komoru, otvori se poklopac komore i oprezno izvadi uzorak. Vrati se poklopac, isključe se ventilacija, sklopka i senzor tlaka.



Slika 12. Plazma cleaner Zepto (*Diener*).



Slika 13. Petrijeva zdjelica s uzorcima u komori za plazmu, nakon što je pušten dovod kisika.

### 3.2.2. Priprava otopina polielektrolita i polielektrolitnih višeslojeva

Pripremljene su dvije vodene otopine kitozana ( $\gamma_1 = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $\gamma_2 = 15 \text{ g dm}^{-3}$ ) i otopina karboksimetilceluloze ( $\gamma = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ). Za pripremu svih vodenih otopina korištena je deionizirana voda ( $\kappa \leq 0,055 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$ ). Vodena otopina kitozana pripravljena je otapanjem u otopini octene kiseline ( $w = 1 \%$ ). Otopine su preko noći miješane do potpunog otapanja polielektrolita. pH metar je baždaren pomoću pufera poznatih pH vrijednosti. Otopine kitozana su namještene na pH = 3, dok je otopina karboksimetilceluloze namještena na pH = 5.

Višeslojevi su pripremljeni ručno sloj-po-sloj metodom. Deset supstrata stavljeno je na nosač (slika 14.) koji je potom uronjen u otopinu kitozana ( $\gamma_2 = 15 \text{ g dm}^{-3}$ ). Vrijeme adsorpcije polielektrolita je 5 minuta. Za otklanjanje neadsorbiranog polielektrolita provedeno je ispiranje u tri navrata: 3 min, 1 min i 1 min u deioniziranoj vodi. Nakon ispiranja supstrati su osušeni inertnim plinom, argonom. Za sljedeći sloj supstrati su uronjeni u otopinu CMC-a ( $\gamma = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ) na 5 minuta te je ponovljen isti postupak ispiranja i sušenja inertnim plinom. Treći sloj je sloj kitozana ( $\gamma_1 = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ). Pripremljeno je pet uzoraka s 10 slojeva i pet uzoraka s 11 slojeva. Provedeno je i dodatno istraživanje gdje su višeslojevi pripremljeni na isti opisani način, ali bez sušenja inertnim plinom između slojeva.



Slika 14. Nosač supstrata.

### 3.2.3. Komora za vlažnost

Relativna vlažnost, fizikalna je veličina za iskazivanje udjela vodene pare u zraku ili općenito u plinovima. Izražava se kao omjer parcijalnog tlaka prisutne vodene pare i parcijalnog tlaka zasićene vodene pare pri određenoj temperaturi i tlaku zraka. Također se može izraziti omjerom apsolutne vlažnosti i maksimalno moguće apsolutne vlažnosti pod istim uvjetima. Relativna vlažnost se često izražava u postotcima (%). Relativna vlažnost iznosi 0 % kada je zrak potpuno suh, a 100 % kada je zrak potpuno zasićen vodenom parom.<sup>25</sup>

Za istraživanja koja su proučavala utjecaj relativne vlažnosti zraka na svojstva višeslojeva bila je potrebna komora koja omogućuje precizno podešavanje i stabilno održavanje željene razine vlažnosti, stoga je konstruirana komora za kontrolu relativne vlažnosti (slika 15.). Komora se sastoji od eksikatora unutar kojeg je pripravljena zasićena otopina određene soli, ventilator i senzor za relativnu vlažnost. Zasićena otopina predstavlja otopinu u kojoj je otopljeno točno onoliko tvari koliko se najviše može otopiti pri toj temperaturi. Zbog svoje stalne koncentracije, pa time i stalnog tlaka para vode iznad te otopine, zasićene otopine su idealne za održavanje relativne vlažnosti unutar komore. Odabir soli za pripremu zasićene otopine ovisi o željenoj relativnoj vlažnosti. Prilikom istraživanja utjecaja relativne vlažnosti na svojstva višesloja odabrana su tri područja promatranja: u uvjetima niske, srednje i visoke relativne vlažnosti. Unutar komore, niska relativna vlažnost od 19 % postignuta je pomoću zasićene otopine litijeva klorida. Za istraživanja utjecaja srednje relativne vlažnosti na svojstva višesloja odabrana je relativna vlažnost od 58 %, održavana zasićenom otopinom magnezijeva

nitrata, dok je za uvjete visoke vlažnosti odabrana relativna vlažnost od 98 %, postignuta zasićenom otopinom kalijeva sulfata.



Slika 15. Komora za vlažnost.

#### 3.2.4. Tenziometrija

Za tenziometrijska mjerenja korišten je tenziometar Attension Theta Lite (*Biolin Scientific*), prikazan na slici 16. Korišten je program *OneAttension* te je odabrana metoda položene kapi (engl. *sessile drop method*). Kalibracija parametara kamere (fokus i osvjetljenje) provedena je kalibracijskom kuglicom od volframova karbida. Pritiskom na *Start* automatska pipeta dozira kap deionizirane vode ( $V = 5 \mu\text{L}$ ) te se potom pritisne gumb kojim se kap vode položi na uzorak na postolju uređaja. Automatski je pokrenuto snimanje fotografija CCD kamerom, frekvencije od 20 fotografija po sekundi (engl. *frames per second*). Snimanje traje 10 sekundi, a za obradu podataka korištene su fotografije od treće do šeste sekunde snimanja. Fotografije između 3. i 6. sekunde odabrane su iz dva ključna razloga. U prvih nekoliko sekundi, točnije od 0 do 3. sekunde, kap vode se rasteže i prilagođava površini, postupno tražeći svoj stabilan i ravnotežni oblik. U tom periodu kap još nije u potpunosti stabilna, pa fotografije iz tog vremena ne bi bile dovoljno precizne za analizu kontaktnog kuta. S druge strane, nakon 6. sekunde, proces isparavanja vode iz kapi može utjecati na njenu veličinu i oblik, što bi moglo promijeniti vrijednosti kontaktnog kuta i narušiti točnost mjerenja. Za navedeno vrijeme snimanja analizirani su podaci lijevog i desnog kontaktnog kuta. Srednja vrijednost lijevog i desnog kontaktnog kuta navedena je kao izmjereni kontaktni kut. Za svaki uzorak načinjeno je pet mjerenja na različitim mjestima uzorka te je izračunata njihova srednja vrijednost.

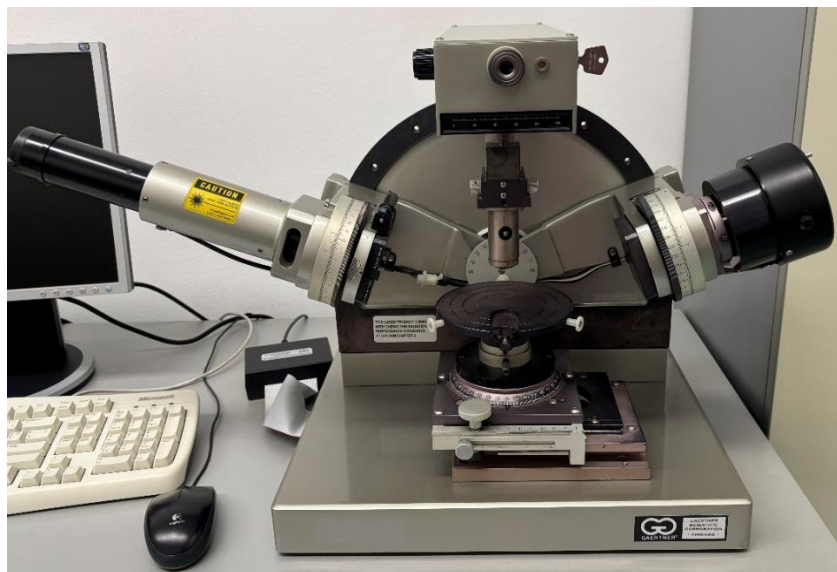




Slika 16. Tenziometar Attension Theta Lite (*Biolin Scientific*).

### 3.2.5. Elipsometrija

Za elipsometrijsko određivanje debljine višesloja korišten je elipsometar tvrtke *Gaertner* (slika 17.) i pripadni računalni program GEMP (*Gaertner Ellipsometry Measurement Program v. 8.071*). Navedeni elipsometar kao izvor zračenja koristi He-Ne laser monokromatskog zračenja valne duljine 632,8 nm i upadni kut refleksije zrake podešen je na  $70^\circ$ . Prije mjerenja debljine određene su realne i imaginarne komponente indeksa loma svjetlosti ( $N_s$  i  $K_s$ ) za svaku pločicu. Mjerenje je provedeno na deset različitih mjesta na pločici te je izračunata srednja vrijednost za realnu i imaginarnu komponentu. Srednje vrijednosti indeksa loma svjetlosti korištene su za određivanje debljine višesloja. Model filma za određivanje debljine višesloja je troslojni model. Silicij s oksidnim slojem je prvi sloj dok se na njemu nalazi film. Zadnjim slojem smatra se zrak. Potrebni parametri za određivanje debljine ovim modelom su indeks loma svjetlosti zraka ( $n = 1$ ), indeks loma višesloja CS/CMC ( $n = 1,46$ ) i izračunata srednja vrijednost indeksa loma za pojedinu pločicu. Za svaku pločicu određena je debljina na deset različitih mjesta i izračunata srednja vrijednost debljine. Mjerenja su provedena pri ambijentalnim uvjetima.



Slika 17. Elipsometar L116USB (*Gaertner Scientific Ellipsometer*).

### 3.2.6. Uređivanje trake pogrešaka u grafikonima

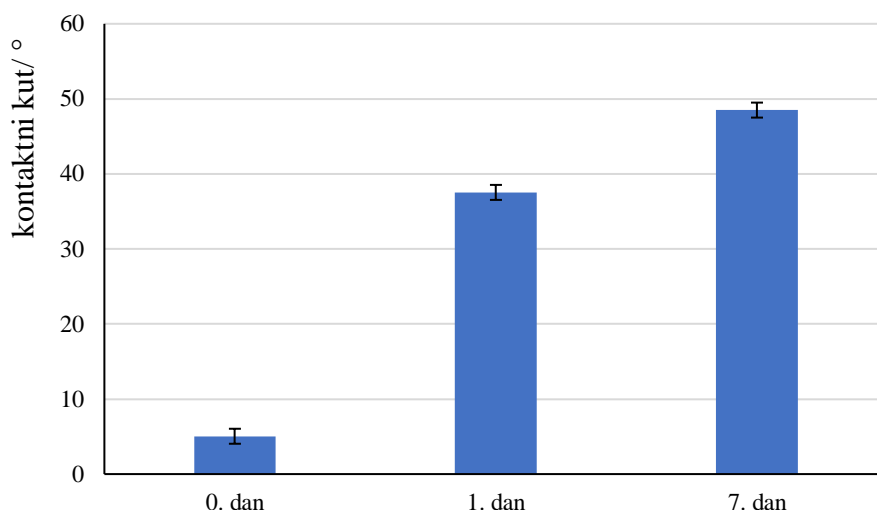
Rezultati pojedinih mjerenja prikazani su u grafičkom prikazu i/ili tablici. Iz tabličnog izvještaja prvotno se odredi srednja vrijednost. Kako bi se na prvi pogled mogle vidjeti granice pogreške i standardne devijacije koriste se trake pogrešaka (engl. *error bars*) u grafikonima. U Microsoft programu *Excel* trake pogreške se mogu prikazivati kao standardni iznos pogreške, postotak ili standardna devijacija. Također, moguće je prikazati vlastite vrijednosti kao točne iznose pogreške. U ovom diplomskom radu za sve grafove traka pogreške je izračunata tako da je standardna devijacija temeljena na cijeloj populaciji (naredba *STDEV.P* u *Excelu*) podijeljena s kvadratnim korijenom broja mjerenja (naredba *SQRT(N)* u *Excelu*, gdje *N* predstavlja broj mjerenja).<sup>26,27</sup>

## § 4. REZULTATI

### 4.1. Močivost površine supstrata

#### 4.1.1. Supstrati očišćeni u piranha otopini

Kao supstrati korištene su silicijske pločice s nativnim oksidnim slojem. Očišćene su u *piranha* otopini kako je opisano u poglavlju *Čišćenje supstrata*. Promatrana je ovisnost kontaktnog kuta supstrata o vremenu, u uvjetima srednje relativne vlažnosti od 58 %. Pripremljene su tri pločice te je prvaj izmjeren kontaktni kut na dan pripreme uzorka, drugoj 24 h nakon i trećoj tjedan dana nakon. Rezultati su prikazani su na slici 18. Može se uočiti da se nakon 24 h kontaktni kut znatno povećao, dok se nakon tjedan dana manje povećao kontaktni kut u odnosu na povećanje kuta za 24 h.

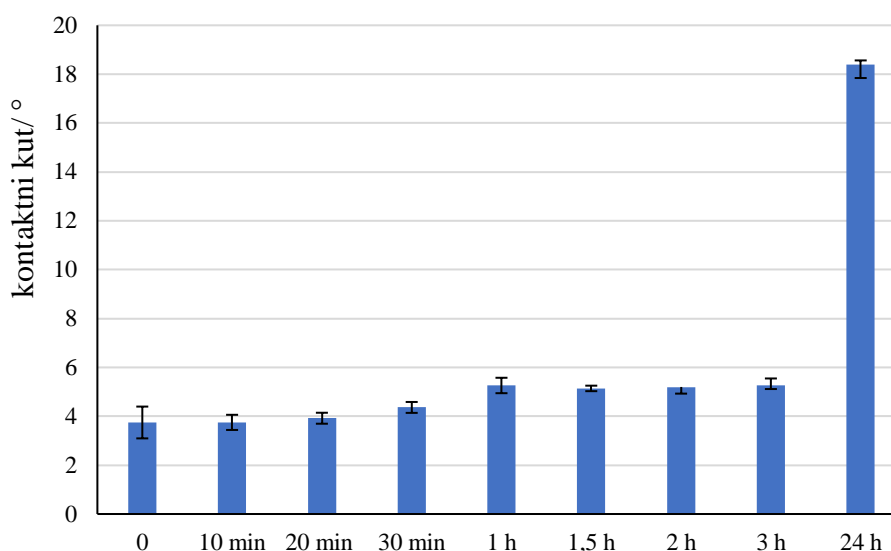


Slika 18. Kontaktni kut tri različita uzoraka u ovisnosti o vremenu starenja. Uzorci su čuvani pri sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti 58 %.

S obzirom na to da je uočeno znatno povećanje kontaktnog kuta u prvih 24 sata, dodatno je proučena ovisnost kontaktnog kuta supstrata u kraćim vremenskim trenucima. Tablica 1. i slika 19. prikazuju odabrane vremenske trenutke i pripadajuće kontaktne kutove supstrata očišćenih u *piranha* otopini.

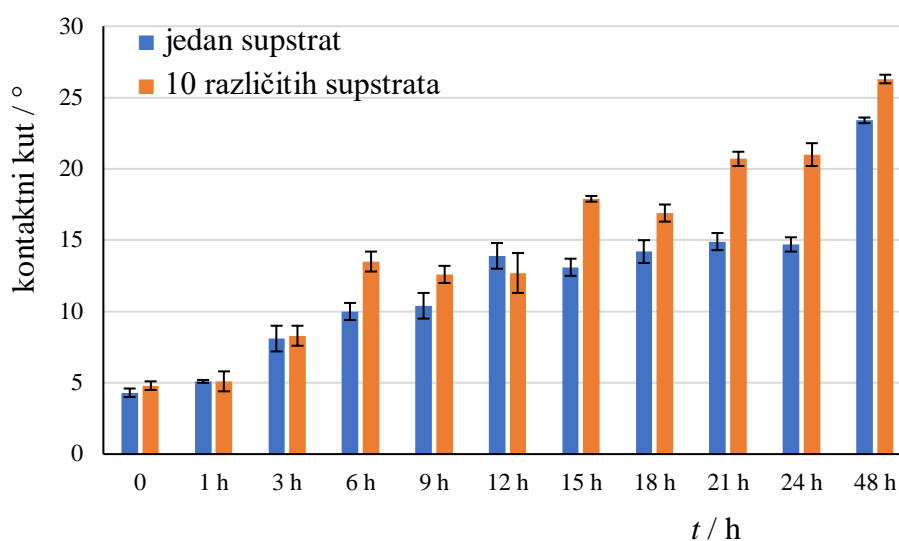
Tablica 1. Kontaktni kut supstrata očišćenih u *piranha* otopini u ovisnosti o vremenu starenja.

vrijeme	0	10 min	20 min	30 min	1 h	1,5 h	2 h	3 h	24 h
kontaktni kut / °	3,75	3,75	3,92	4,36	5,26	5,14	5,2	5,28	18,4



Slika 19. Kontaktni kut devet različitih uzoraka u ovisnosti o vremenu starenja. Uzorci su nakon čišćenja *piranha* otopinom čuvani u komori pri sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti od 58 %.

U prva tri sata vrijednost kontaktnog kuta je u rasponu od 3,7° do 5,3°. U razdoblju između 3 i 24 sata uočeno je najveće povećanje kontaktnog kuta (18,4°) stoga su pripremljeni novi uzorci na kojima je proučavano detaljnije navedeno vremensko razdoblje. Pripremljeno je 10 uzoraka supstrata i na njima su provedena tenziometrijska mjerenja na dva načina. Prvi način obuhvaćao je mjerenje kontaktnog kuta za sve vremenske trenutke samo na jednoj pločici, a drugi način mjerenja se provodio tako da je za svaki vremenski trenutak upotrijebljena druga pločica. Uspoređivanjem navedena dva načina mjerenja provjeriti će se utječe li korištenje istog uzorka za sve vremenske trenutke na kontaktni kut. Kontaktni kut mjerio se odmah, sat vremena nakon te potom svaka 3 sata sve do 24 sata od pripreme uzorka. Rezultati kontaktnog kuta za jedan supstrat i za 10 različitih supstrata prikazani su na slici 20.



Slika 20. Kontaktni kut silicijevih pločica u ovisnosti o vremenu starenja nakon čišćenja *piranha* otopinom. Uzorci su čuvani u komori pri sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti od 58 %.

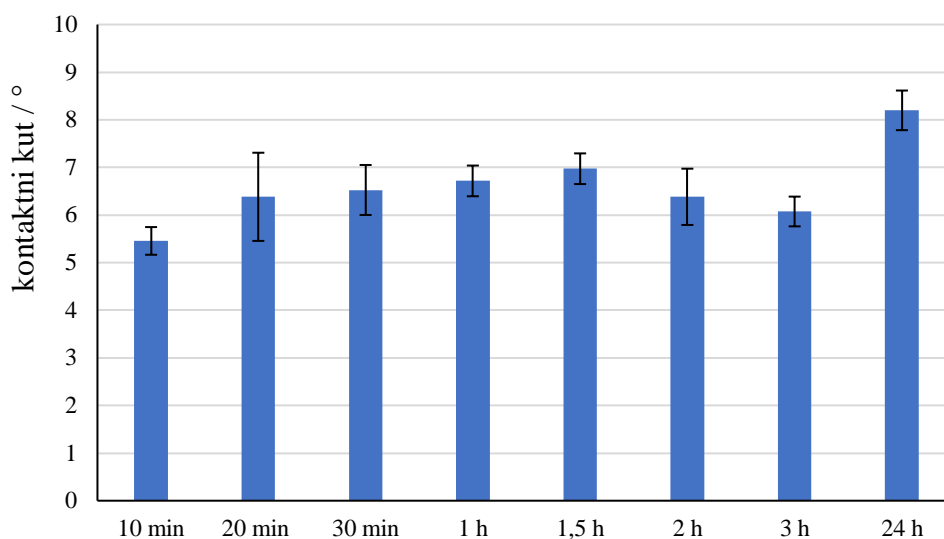
Usporedbom rezultata na slici 20. može se uočiti da nema velike razlike u vrijednosti kontaktnog kuta ako se koristi jedna pločica ili više različitih pločica za različite vremenske trenutke. U prva 3 sata razlika je gotovo neprimjetna. Ipak, u sljedećim vremenskim trenucima nešto su veće vrijednosti kada se za svako mjerenje koristila nova pločica. Na primjer, 15 sati nakon pripreme supstrata pri kojoj se za sve vremenske trenutke koristio isti uzorak kontaktni kut iznosi  $13,12^\circ$ . Za isti vremenski trenutak, kada su se pri mjerenju kontaktnog kuta koristili različiti supstrati, kontaktni kut iznosi  $17,88^\circ$ . Nedostatak mjerenja kontaktnog kuta na istom uzorku je mogućnost pogreške prilikom sušenja. Ukoliko se sušenje argonom između mjerenja provede nepotpuno, vrijednost kontaktnog kuta će biti veća. Veća hidrofilnost može se pojaviti zbog povećane vlažnosti uzorka, što utječe na rezultate. Time će slabije osušen uzorak pokazati veće kontaktne kutove u odnosu na bolje osušen uzorak.

#### 4.1.2. Supstrati očišćeni pomoću plazme

U Tablici 2. i na slici 21. prikazani su odabrani vremenski trenutci te izmjerene vrijednosti kontaktnih kutova supstrata očišćenih pomoću plazme. Kontaktni kut u prva tri sata iznosi između  $5,4^\circ$  i  $6,1^\circ$ , a nakon 24 h iznosi  $8,2^\circ$ . Vrijednost kontaktnog kuta približne je vrijednosti kao i prethodnog dana.

Tablica 2. Kontaktni kut supstrata očišćenih pomoću plazme u ovisnosti o vremenu starenja.

vrijeme	0	10 min	20 min	30 min	1 h	1,5 h	2 h	3 h	24 h
kontaktni kut / °	/	5,46	6,38	6,53	6,72	6,97	6,38	6,07	8,2

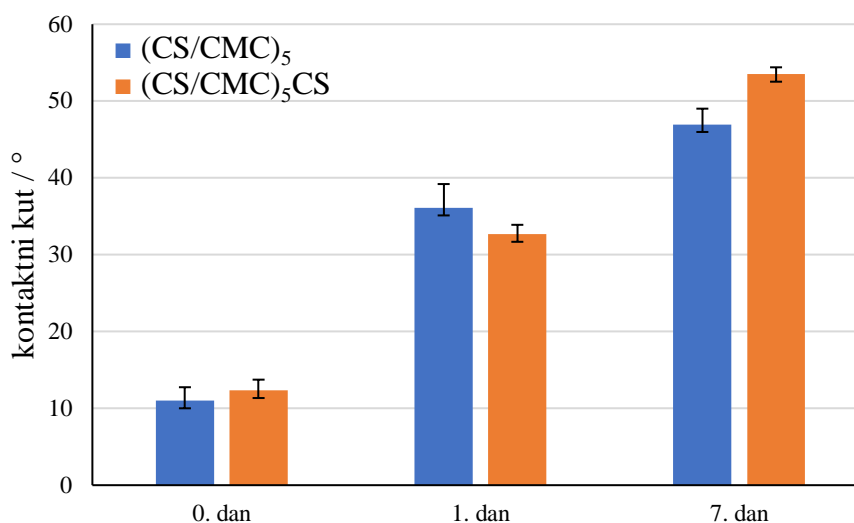


Slika 21. Kontaktni kut osam različitih supstrata u ovisnosti o vremenu starenja. Uzorci su nakon čišćenja plazma cleanerom čuvani u komori pri sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti od 58 %.

## 4.2. Močivost površine CS/CMC višesloja

### 4.2.1. Močivost površine višesloja u uvjetima niske relativne vlažnosti

Rezultati mjerenja kontaktnih kutova višeslojeva pohranjenih u uvjetima niske relativne vlažnosti prikazani su na slici 22. Za uzorak s 10 slojeva, kontaktni kut je iznosio 11,01° na dan pripreme višesloja. Nakon 24 sata, kontaktni kut se povećao otprilike tri puta u odnosu na vrijednost izmjerenu na dan pripreme, te je iznosio 36,11°. Nakon tjedan dana, kontaktni kut za uzorak s 10 slojeva porastao je na 46,98°. Slično, za uzorke s 11 slojeva, kontaktni kut je bio 12,34° na dan pripreme višesloja, 32,68° nakon jednog dana, te 53,52° nakon tjedan dana od pripreme.

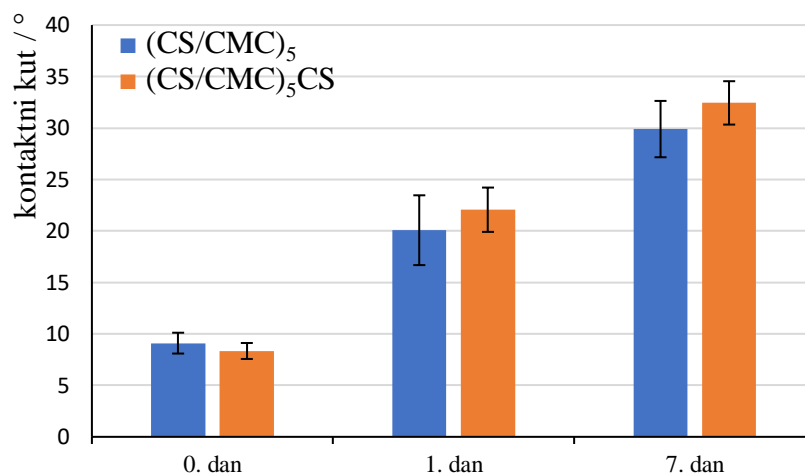


Slika 22. Kontaktni kut šest različitih uzoraka u ovisnosti o vremenu starenja nakon adsorpcije polielektrolitnog višesloja (CS/CMC)<sub>n</sub>. Uzorci su nakon adsorpcije čuvani pri sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti od 19 %.

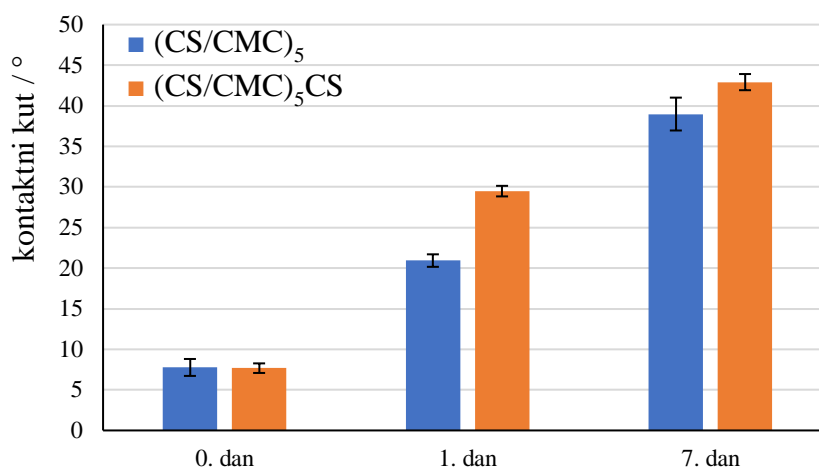
#### 4.2.2. Močivost površine višesloja u uvjetima srednje relativne vlažnosti

Za pripremljene višeslojeve CS/CMC kontaktni kutovi izmjereni su u tri vremenska trenutka, identična kao u slučaju niske relativne vlažnosti. Rezultati ovisnosti kontaktnih kutova za višeslojeve pohranjene u području srednje relativne vlažnosti za navedene vremenske trenutke prikazani su na slici 23. Za višeslojeve pripremljene sloj-po-sloj metodom, bez sušenja inertnim plinom, početni kontaktni kut uzorka s 10 slojeva iznosio je 7,76°. Nakon jednog dana, kontaktni kut je porastao na 20,93°, a nakon tjedan dana dosegao je 38,98°. Za uzorke s 11 slojeva, također pripremljene bez sušenja inertnim plinom, početna vrijednost kontaktnog kuta iznosila je 7,67°. 24 h nakon pripreme, vrijednost se povećala na 29,48°, dok je nakon tjedan dana iznosila 42,91°. Kod rezultata kontaktnih kutova na dan pripreme višeslojeva nema velike razlike u vrijednostima za uzorke s 10 i 11 slojeva, neovisno je li provedeno sušenje argonom pri pripremi višesloja. Kod rezultata nakon 24 h i tjedan dana može se uočiti porast kontaktnog kuta za uzorke s 11 slojeva u odnosu na uzorke s 10 slojeva.

a)



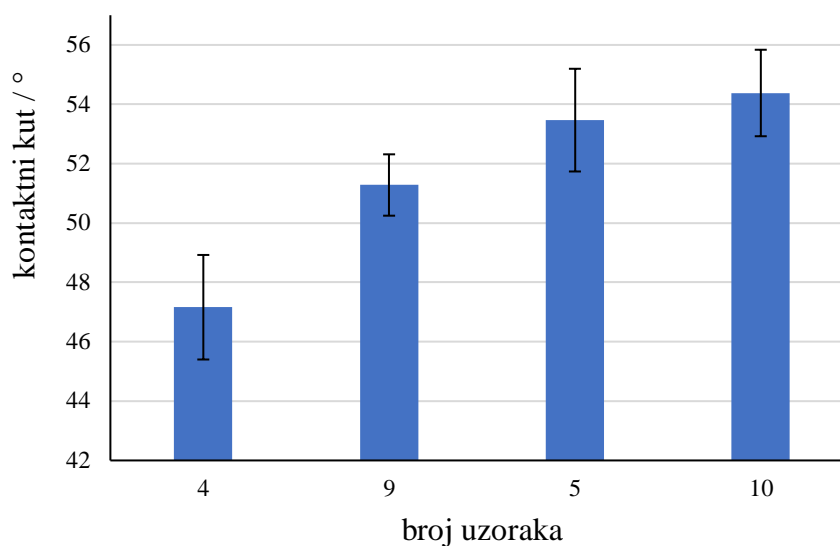
b)



Slika 23. Kontaktini kut šest različitih uzoraka u ovisnosti o vremenu starenja nakon adsorpcije polielektrolitnog višesloja (CS/CMC)<sub>n</sub>. Sustav CS/CMC pripremljen je sloj-po-sloj metodom: a) sa sušenjem inertnim plinom između pripreme slojeva, b) bez sušenja. Uzorci su nakon adsorpcije čuvani pri sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti od 58 %.

S obzirom na to da je uočen porast kontaktnog kuta u vremenu, dodatno su izmjereni kontaktini kutovi za ostale uzorke sustava CS/CMC koji su pripremljeni bez sušenja inertnim plinom. Rezultati mjerenja 4. uzorka (10 slojeva) i 9. uzorka (11 slojeva) te 5. uzorka (10 slojeva) i 10. uzorka (11 slojeva) koji su bili u sušioniku na 70 °C na sat vremena prikazani su na slici 24. Kontaktini kutovi 5. i 10. uzorka koji su sušeni u sušioniku su veći nego kod 4. i 9. uzorka.

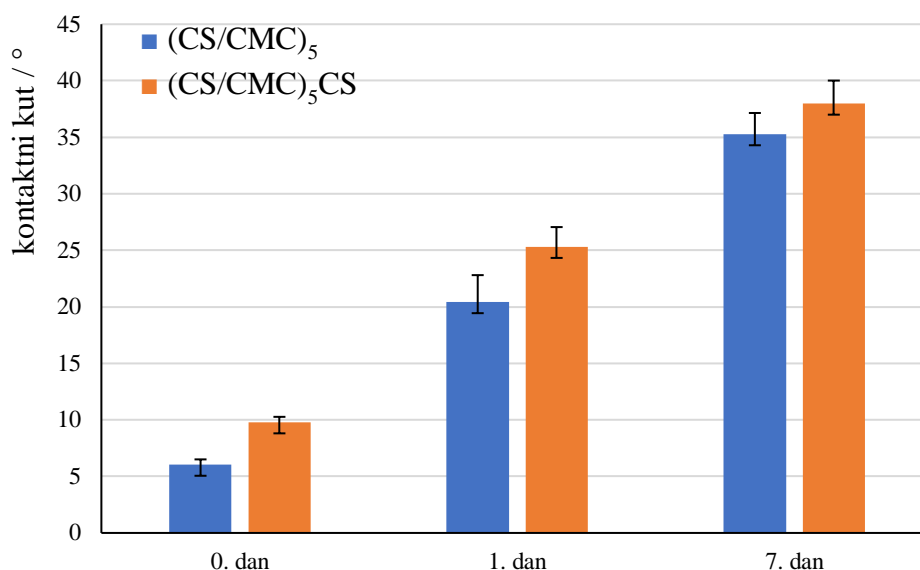




Slika 24. Kontaktini kut uzoraka: 4. (10 slojeva) i 9. (11 slojeva) bez sušenja, 5. (10 slojeva) i 10. (11 slojeva) nakon sušenja sat vremena u sušioniku na 70 °C.

#### 4.2.3. Močivost površine višesloja u području visoke relativne vlažnosti

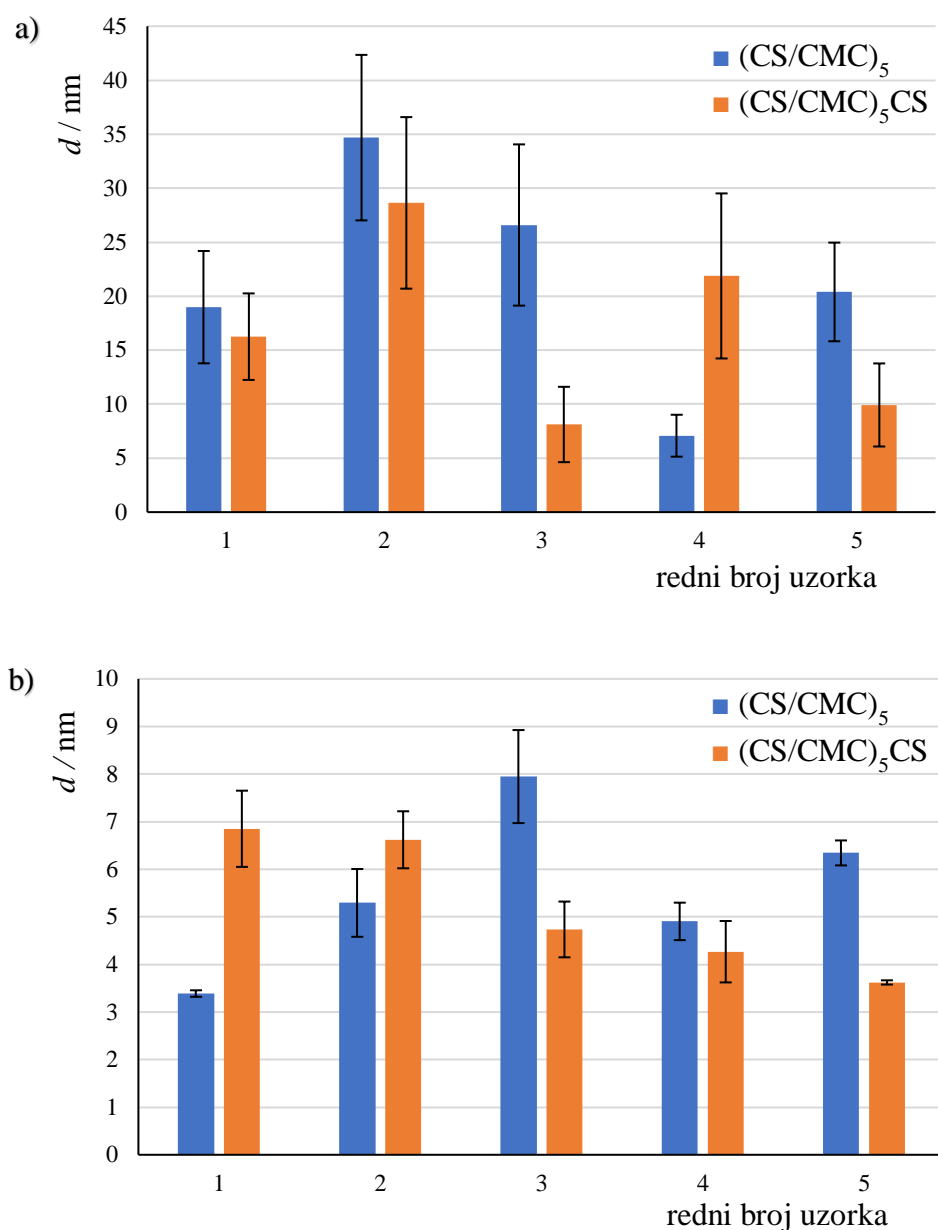
Ovisnost izmjerenih kontaktnih kutova o odabranim vremenskim trenutcima prikazana je na slici 25. Za uzorak s 10 slojeva, na dan pripreme višesloja, kontaktini kut iznosio je 6,06°. Nakon 24 h od pripreme, vrijednost kontaktnog kuta povećala se na 20,44°, a nakon tjedan dana povećao se na 35,29°. Uzorak s 11 slojeva imao je početni kontaktini kut od 9,81°. Nakon jednog dana, povećao se na 25,33°, te nakon sedam dana iznosio je 38°.



Slika 25. Kontaktini kut šest različitih uzoraka u ovisnosti o vremenu starenja nakon adsorpcije polielektrolitnog višesloja (CS/CMC)<sub>n</sub>. Uzorci su nakon adsorpcije čuvani pri sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti od 98 %.

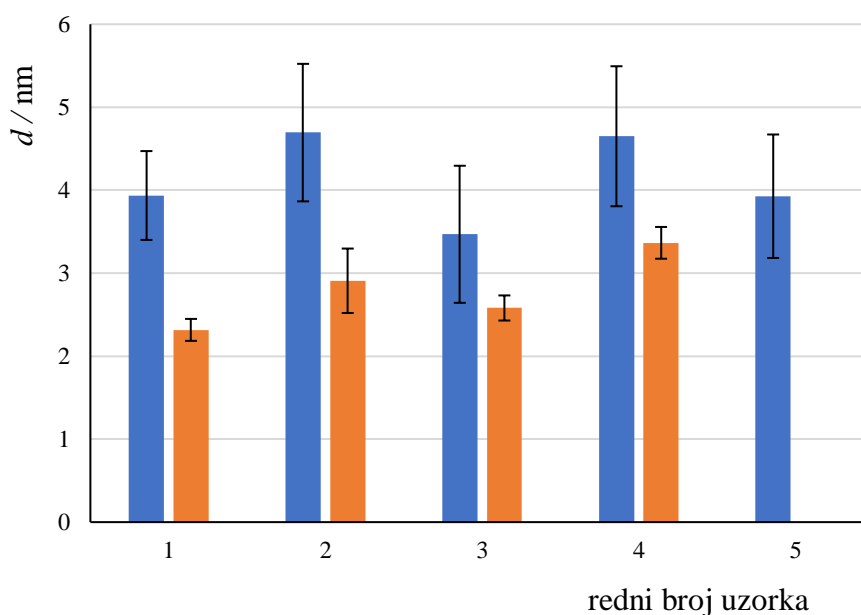
### 4.3. Rast višesloja CS/CMC

Sloj-po-sloj metodom pripremljeno je 10 uzoraka CS/CMC višesloja. Pripremljeno je 5 supstrata s 10 ((CS/CMC)<sub>5</sub>) i 5 supstrata s 11 slojeva ((CS/CMC)<sub>5</sub>CS). Na slici 26. prikazane su debljine svih uzoraka određene elipsometrijski. Slika 26. a) prikazuje debljine višesloja kada je između adsorpcije slojeva provedeno sušenje argonom, a slika 26. b) bez sušenja. Debljine višesloja se u oba slučaja mijenjaju i za sustave od 10 i od 11 slojeva. Veće debljine višesloja izmjerene su pri dnu supstrata. Također, za višeslojeve pripremljene bez sušenja inertnim plinom debljina je još manja, prosječno manja od 10 nm.



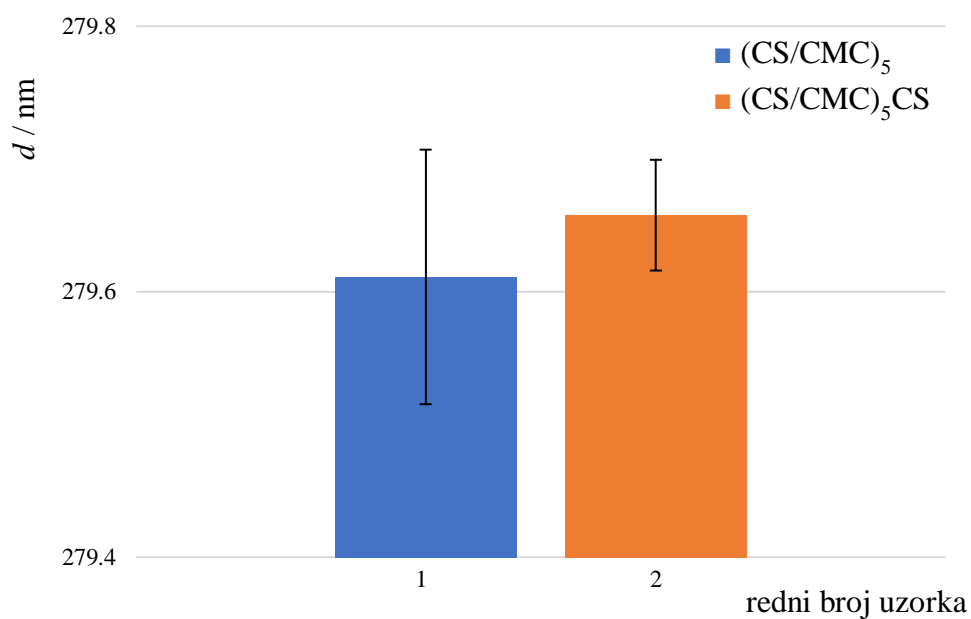
Slika 26. Elipsometrijsko određivanje debljine višesloja koji se sastoji od kitozana ( $\gamma_1 = 1 \text{ g dm}^{-1}$ ) i karboksimetilceluloze ( $\gamma = 1 \text{ g dm}^{-1}$ ) s vremenom adsorpcije 5 min i ispiranjem 3 puta u deioniziranoj vodi (2 min, 1 min, 1 min): a) sa sušenjem inertnim plinom između pripreme slojeva, b) bez sušenja. Prvi sloj je sloj kitozana ( $\gamma_2 = 15 \text{ g dm}^{-1}$ ).

S obzirom na to da su dobivene debljine višesloja male, ponovljeno je elipsometrijsko određivanje debljine višesloja na još jednom setu uzoraka. Uzorci sustava CS/CMC pripremljeni su sloj-po-sloj metodom, bez sušenja inertnim plinom, argonom. Rezultati mjerenja prikazani su na slici 27.



Slika 27. Elipsometrijsko određivanje debljine višesloja koji se sastoji od kitozana ( $\gamma_1 = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ) i karboksimetilceluloze ( $\gamma = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ) s vremenom adsorpcije 5 min i ispiranjem 3 puta u deioniziranoj vodi (2 min, 1 min, 1 min), bez sušenja. Prvi sloj je sloj kitozana ( $\gamma_2 = 15 \text{ g dm}^{-3}$ ).

Debljine višesloja ponovno su izrazito male, manje od 5 nm, neovisno jesu li uzorci s 10 ili 11 slojeva. Kako bi istražili utjecaj pripreme na debljinu višesloja, priprema polielektrolitnog višesloja je ponovljena, na jednom supstratu. Višesloj CS/CMC pripremljen je na supstratu tako da je supstrat uronjen u čašu s polielektrolitom dok ga se pridržava pincetom. Pinceta se pričvrsti za stalak s klemom i drvenom hvataljkom tako da je supstrat okrenut prema dolje. Vrijeme adsorpcije i ispiranja ostaje isto, sa sušenjem inertnim plinom između pripreme slojeva. Rezultati mjerenja su prikazani na lici 28. Debljine višeslojeva i za 10 i 11 slojeva su slične i iznose približno 279,6 nm.



Slika 28. Elipsometrijsko određivanje debljine višesloja koji se sastoji od kitozana ( $\gamma_1 = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ) i karboksimetilceluloze ( $\gamma = 1 \text{ g dm}^{-3}$ ) s vremenom adsorpcije 5 min i ispiranjem 3 puta u deioniziranoj vodi (2 min, 1 min, 1 min), sa sušenjem inertnim plinom, argonom. Prvi sloj je sloj kitozana ( $\gamma_2 = 15 \text{ g dm}^{-3}$ ).

## § 5. RASPRAVA

U okviru ovog diplomskog rada istraživana je površinska močivost silicijskih pločica očišćenih različitim metodama, uključujući *piranha* otopinu i plazmu. U istim vremenskim intervalima promjene u kontaktnom kutu plazmom očišćenih supstrata su manje (slika 21.) nego kad su supstrati očišćeni *piranha* otopinom (slika 19.). Stabilnost hidrofilnosti supstrata očišćenih plazmom u vremenu povezana je s načinom na koji plazma uklanja organske nečistoće i modificira površinu stvarajući dodatne hidroksilne skupine. Površinsku močivost i vrijeme starenja silicijskih pločica pri različitim uvjetima čišćenja proučavali su Yang i suradnici.<sup>28</sup> Silicijske pločice prvo su očišćene *piranha* ili HF otopinom te potom tretirane plazmom argona, dušika ili kisika. Nakon tretmana plazmom i starenja u vakuumu, sve silicijske pločice u njihovom istraživanju imale su slične i stabilne vrijednosti kontaktnih kutova. U odnosu na one očišćene plazmom, silicijske pločice očišćene *piranha* otopinom pokazale su niži početni kontaktni kut i sporiji porast kontaktnog kuta u prvih pet sati (slika 19.). Međutim, tijekom vremena, kontaktni kut na supstratima očišćenim *piranha* otopinom utrostručio se već 24 sata nakon čišćenja, dok su pločice očišćene plazmom pokazale sporiji porast. Yang i suradnici<sup>28</sup> također su uočili sličan trend rasta kontaktnog kuta silicijskih pločica očišćenih *piranhom*.

Utjecaj različitih uvjeta čišćenja na silicijske pločice omogućuje bolje razumijevanje površinskih karakteristika supstrata te posljedično i nastalih polielektrolitnih višesloja. Ključni mehanizam u formiranju višesloja je naizmjenična adsorpcija suprotno nabijenih polielektrolita na površinu. Između negativno nabijene površine silicijskih pločica<sup>29</sup> i polielektrolita pozitivnog naboja u otopini javlja se snažna elektrostatska privlačnost. Povećanje negativnog površinskog naboja supstrata utječe na jakost elektrostatske privlačnosti, što rezultira većom količinom adsorbiranog polikationa. Kada se prvi sloj nanese, može se adsorbirati molekula suprotnog naboja, odnosno polianion, što omogućava izgradnju drugog sloja na već postojećem.<sup>1,30</sup> Poznato je iz literature da naizmjenična adsorpcija polikationa i polianiona utječe na vrijednosti kontaktnog kuta površine. Pri polielektrolitnim višeslojevima sastavljenim od poli(dialildimetilamonijeva klorida) (PDADMAC) i poli(natrijev 4-stirensulfonata) (PSS) na silicijskim pločicama uočena je pravilna „cik-cak“ promjena kontaktnog kuta. Višeslojevi sa zadnjim, polikationskim slojem (PDADMAC) imaju veće kontaktne kutove od višeslojeva sa zadnjim polianionskim slojem (PSS). Zbog prisutnosti dviju metilnih skupina koje smanjuju

elektrostatske interakcije, PDADMAC sloj je hidrofobniji od PSS sloja koji posjeduje sulfonatne skupine.<sup>31,32</sup> Ova istraživanja naglašavaju da naboj i funkcijske skupine adsorbiranih polielektrolita modificiraju svojstva površine, što izravno utječe na kontaktni kut. U ovom diplomskom radu pripremljen je višesloj kitozan/karboksimetilceluloza (CS/CMC) sloj-po-sloj metodom. Na pripremljenim višeslojevima istraživana je utjecaj različitih uvjeta (niska, srednja i visoka relativna vlažnost) i vremena starenja višeslojeva na kontaktni kut. Na hidrofobnost površine višesloja CS/CMC utječe vrsta polielektrolita koja čini završni sloj. U svim uvjetima relativne vlažnosti (slike 22., 23. i 25.), višeslojevi pri kojima je zadnji sloj kitozan (višeslojevi od 11 slojeva) u pravilu imaju veće kontaktne kutove u odnosu na one kojima je zadnji sloj CMC (višeslojevi od 10 slojeva). Višesloj kojemu je zadnji sloj slabi polikation kitozan hidrofobniji je od višesloja kojemu je zadnji sloj polianion što je u skladu sa literaturom. Veća hidrofobnost višesloja kojemu je kitozan zadnji sloj je izraženija pri uvjetima veće relativne vlažnosti i duljem vremenu izlaganja uzorka tim uvjetima. Elzbieciak i suradnici<sup>33</sup> pripremili su različite kombinacije polielektrolitnih višeslojeva od slabih i jakih polielektrolita na silicijskim pločicama. Za sve pripremljene višeslojeve, oni koji završavaju slojem polikationa pokazuju veći stupanj hidrofobnosti u usporedbi s višeslojevima koji završavaju slojem polianiona. Tipične funkcijske skupine polielektrolita su amino skupine kao pozitivno nabijene, te karboksilne, sulfatne i sulfonatne, kao negativno nabijene skupine. Karboksilne skupine u polianionu CMC-u doprinose hidrofilnosti površine zbog njihove sposobnosti stvaranja vodikovih veza i snažnih ion-dipol interakcija s molekulama vode. Istraživanja pokazuju da povećanje koncentracije karboksilnih skupina u materijalima dovodi do površina s izraženijom hidrofilnošću.<sup>34</sup>

Uz utjecaj završnog sloja, relativna vlažnost ima ključnu ulogu u očuvanju ili promjeni hidrofobnosti površine. U uvjetima niske relativne vlažnosti kontaktni kutovi višeslojeva su najveći (slika 22.). Niski postotak vlage u zraku uzrokuje dehidraciju materijala što može utjecati na površinske karakteristike poput močivosti. Suprotno tome, u uvjetima visoke relativne vlažnosti zrak je skoro u potpunosti zasićen vodenom parom. Kontaktni kutovi višeslojeva čuvanih u tim uvjetima pokazuju najniže vrijednosti (slika 25.). U svim uvjetima starenja višeslojeva, primjećuje se kontinuirano povećanje kontaktnih kutova tijekom vremena. Rezultati pokazuju da se najveće promjene javljaju u uvjetima niske relativne vlažnosti, odnosno iznos kontaktnog kuta je povezan s uvjetima vlažnosti u komori. Suh zrak unutar komore utječe na broj molekula vode na površini te uzrokuje brže povećanje hidrofobnosti. S

druge strane, u uvjetima visoke vlažnosti, prisutnost veće količine vodene pare u zraku može usporavati proces sušenja. Visoka vlažnost održava stabilnost vlage i omogućuje postupno povećanje kontaktnog kuta.

Sustav CS/CMC, pripremljen sloj-po-sloj metodom uz sušenje inertnim plinom, u uvjetima srednje relativne vlažnosti (slika 23. a)), pokazuje niže vrijednosti kontaktnog kuta od višesloja pripremljenog bez sušenja inertnim plinom između pripreme slojeva (slika 23. a)). U uvjetima srednje relativne vlažnosti, Liu i suradnici<sup>6</sup> proučavali su promjenu kontaktnog kuta višesloja CS/CMC. Pri pripremi PEM-a koristili su sušenje inertnim plinom između slojeva te su dobili sličan trend promjene kontaktnog kuta. Na pripremljenim višeslojevima CS/CMC u području srednje relativne vlažnosti dodatno je istraživana utjecaj sušenja uzorka na kontaktni kut. Uzorci višeslojeva koji su sušeni u sušioniku na 70 °C na sat vremena pokazali su veće kontaktne kutove u odnosu na one koji nisu prošli proces sušenja (slika 24.). Povišena temperatura može promijeniti interakcije unutar višesloja i između višesloja i supstrata.<sup>35</sup> Dolazi do jačanja hidrofobnih interakcija i istodobnog slabljenja vodikovih veza s molekulama vode, što dovodi do povećane hidrofobnosti površine, očitujući se u većim kontaktnim kutovima.

Površina silicijskih pločica obično je prekrivena tankim slojem silicijeva oksida koji nastaje reakcijom silicija s kisikom iz zraka.<sup>36</sup> Istraživanja su pokazala da debljina tog sloja varira od 12 do 30 Å, ovisno o vremenu izlaganja i uvjetima.<sup>37,38</sup> U ovom radu, elipsometrijski je određena debljina višesloja CS/CMC na tankom nativnom sloju silicijeva oksida. Pripremljeni višeslojevi kod kojih je proveden korak sušenja inertnim plinom između pripreme slojeva debljine su od 10 do 40 nm (slika 26. a)), dok su oni višeslojevi kod kojih nije provedeno sušenje manjih debljina, od 2 do 5 nm (slika 26. b)). Tako male vrijednosti upućuju na slabiju adsorpciju polielektrolita na supstrat. Prilikom pripreme višesloja CS/CMC u početnim istraživanjima (slika 26. i 27.), korišten je nosač za supstrate, te je istovremeno pripravljano 10 uzoraka. Uporabom nosača dobiveni su tanki višeslojevi. Međutim, ponovljena priprema višesloja na samo jednom supstratu (slika 28.), uz pažljiviju pripremu i sušenje inertnim plinom, dovela je do porasta debljine višesloja. Na temelju provedenog istraživanja uočen je utjecaj metode pripreme polielektrolitnog višesloja na njegovu debljinu. Debljine višeslojeva za uzorke s 10 i 11 slojeva su slične, no kod višesloja s 11 slojeva debljina je malo veća. Iako je broj slojeva povećan, dodatni sloj nije značajno povećao debljinu, vjerojatno zbog ograničenja u procesima kao što su nejednolika adsorpcija polielektrolita ili uvjeti sušenja.



## § 6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu istražen je utjecaj različitih metoda čišćenja silicijskih supstrata na njihovu površinsku močivost, kao i na stabilnost tih svojstava tijekom vremena starenja. Rezultati su pokazali da način čišćenja supstrata ima značajan utjecaj na početnu hidrofilnost i stabilnost kontaktnog kuta tijekom vremena. Supstrati očišćeni plazmom pokazali su veću stabilnost i dulje zadržavanje hidrofilnih svojstava u usporedbi s onima očišćenima *piranha* otopinom.

Na pripremljenim polielektrolitnim višeslojevima kitozan/karboksimetilceluloza istražen je utjecaj završnog sloja i vremena starenja na hidrofobnost površine. Uočeno je da završni sloj značajno mijenja hidrofobna svojstva površine. Višeslojevi s kitozonom kao završnim slojem imaju veće kontaktne kutove i izraženiju hidrofobnost u odnosu na one s CMC-om kao završnim slojem. Razlike u hidrofilnosti pripisane su naboju i funkcijskim skupinama polielektrolita – amino skupinama u kitozanu i karboksilnim skupinama u CMC-u. Karboksilne skupine u polianionu CMC-u povećavaju hidrofilnost površine zahvaljujući svojoj sposobnosti formiranja vodikovih veza i snažnih ion-dipol interakcija s molekulama vode. Osim toga, istraživanje je potvrdilo utjecaj okolnih uvjeta na hidrofobnost površine. Na pripremljenim višeslojevima CHI/CMC uočen je utjecaj različitih uvjeta relativne vlažnosti i vremena starenja višeslojeva na kontaktni kut. U svim uvjetima relativne vlažnosti, sloj s polikationom kao završnim slojem imao je veći kontaktni kut od završnog polianiona. Pri nižoj relativnoj vlažnosti zabilježeno je povećanje hidrofobnosti površine, što je pripisano dehidraciji materijala i smanjenju broja molekula vode na površini. S druge strane, višeslojevi izlagani visokoj relativnoj vlažnosti imaju niže kontaktne kutove. Razlog tomu vrlo je vjerojatno prisutnost veće količine vodene pare, koja smanjuje dehidraciju materijala i održava stabilnost površinskih svojstava. Ovisnost kontaktnih kutova o vremenu starenja uočena je u svim uvjetima relativne vlažnosti, s najvećim promjenama u uvjetima niske relativne vlažnosti.

Rezultati istraživanja su također istaknuli važnost tehnike pripreme i sušenja inertnim plinom u među koraku pripreme višesloja sloj-po-sloj metodom. Višeslojevi CHI/CMC, pripremljeni sloj-po-sloj metodom uz sušenje inertnim plinom imaju niže kontaktne kutove u uvjetima srednje relativne vlažnosti u usporedbi s višeslojevima pripremljenim bez sušenja. Osim toga, proces sušenja višeslojeva na povišenoj temperaturi (70 °C) dodatno je povećao

kontaktne kutove. Dolazi do jačanja hidrofobnih interakcija i istodobnog slabljenja vodikovih veza s molekulama vode, što dovodi do povećane hidrofobnosti površine, očitujući se u većim kontaktnim kutovima.

Utjecaj sušenja inertnim plinom između pripreme slojeva jasno je vidljiv i u rezultatima elipsometrijskih mjerenja. Višeslojevi CHI/CMC, pripremljeni uz sušenje inertnim plinom pokazali su veće debljine u usporedbi s onima kod kojih nije provedeno sušenje. Također, uočen je utjecaj metode pripreve polielektrolitnog višesloja na njegovu debljinu. Veće debljine višeslojeva uočene su kada su uzorci pripremljeni pojedinačno, bez korištenja nosača za supstrate.

## § 7. POPIS OZNAKA, KRATICA I SIMBOLA

CMC	karboksimetilceluloza
CS	kitozan
LbL	engl. <i>layer-by-layer</i> (sloj-po-sloj metoda)
PDADMAC	poli(dialildimetilamonijev klorid)
PEMs	engl. <i>polyelectrolyte multilayers</i> (polielektrolitni višesloji)
PSS	poli(natrijev 4-stirensulfonat)

## § 8. LITERATURNI IZVORI

1. M. Petrila, F. Bucatariu, M. Mihai, C. Teodosiu, *Materials* **14** (2021) 4152.
2. J. Potaś, K. Winnicka, *Int. J. Mol. Sci.* **23** (2022) 3496.
3. C. Ungureanu, G. Tihan, R. Zgârian, G. Pandelea, *Coatings* **13** (2023) 1420.
4. A. Ottenhall, J. Henschen, J. Illergård, M. Ek, *Environ. Sci. (Camb.)* **4** (2018) 2070–2079.
5. G. Decher, J. D. Hong, J. Schmitt, *Thin Solid Films* 210/211 (1992) 831–835.
6. X. Liu, C. Tang, W. Han, H. Xuan, J. Ren, J. Zhang, L. Ge, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **529** (2017) 1016–1023.
7. J. Koetz i S. Kosmella, *Polyelectrolytes and Nanoparticles*, Springer, Berlin, 2007.
8. A. A. Altam, L. Zhu, W. Huang, H. Huang, S. Yang, *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* **2** (2021) 100100.
9. C. K. S. Pillai, W. Paul, C. P. Sharma, *Prog. Polym. Sci.* **34** (2009) 641–678.
10. C. Roy, A. Ferri, S. Giraud, G. Jinping, F. Salaün, *Int. J. Mol. Sci.* **19** (2018) 2521.
11. V. Guarnizo-Herrero, C. Torrado-Salmerón, N. S. T. Pabón, G. T. Durán, J. Morales, S. Torrado-Santiago, *Polymers* **13** (2021) 2813.
12. A. Mateos-maroto, I. Abelenda-núñez, F. Ortega, R. G. Rubio, E. Guzmán, *Polymers* **13** (2021) 1221.
13. G. Decher, *Science* **277** (1997) 1232–1237
14. J. W. Goodwin, *Colloids and Interfaces with Surfactants and Polymers—An Introduction*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2004, str. 153–176.
15. T. Klačić, (2020) *Površinska močivost krutina tekućinama*. Seminarski rad, Kemijski odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.
16. *Manual OneAttention ThetaLite Rev 2.7*, str. 1–56.
17. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektromagnetski-valovi> (datum pristupa: 21.11.2024.)
18. [https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Onde\\_electromagn%C3%A9tique.png](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Onde_electromagn%C3%A9tique.png) (datum pristupa: 25.11.2024.)
19. <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/6b9de2eb-c6d7-412b-8afc-c0820325b64d/zakoni-geometrijske-optike.html> (datum pristupa: 30.10.2024.)
20. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/polarizacija> (datum pristupa: 18.12.2024.)

21. <https://www.youtube.com/watch?v=Q0qrU4nprB0> (datum pristupa: 21.11.2024.)
22. V. M. Airaksinen, *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, Elsevier Inc., 2010, str. 289–298.
23. *Instructions for L116B ellipsometer*, Gaertner Scientific Corporation, Skokie, str. 2–2.
24. <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial> (datum pristupa: 30.10.2024.)
25. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/relativna-vlaznost> (datum pristupa 30.10.2024.)
26. [http://www.phy.pmf.unizg.hr/~pzugec/FP/obrada\\_rezultata.pdf](http://www.phy.pmf.unizg.hr/~pzugec/FP/obrada_rezultata.pdf) (datum pristupa 6.11.2024.)
27. <https://support.microsoft.com/hr-hr/office/dodavanje-promjena-ili-uklanjanje-traka-pogre%C5%A1aka-na-grafikonu-e6d12c87-8533-4cd6-a3f5-864049a145f0> (datum pristupa 6.11.2024.)
28. X. M. Yang, Z. W. Zhong, E. M. Diallo, Z. H. Wang, W. S. Yue, *Mater. Sci. Semicond. Process* **26** (2014) 25–32.
29. Z. Xia, V. Rozyyev, A. U. Mane, J. W. Elam, S. B. Darling, *Langmuir* **37** (2021) 11618–11624.
30. N. Khan, B. Brettmann, *Polymers* **11** (2019) 51.
31. S. Köstler, A. V. Delgado, V. Ribitsch, *J. Colloid. Interface Sci.* **286** (2005) 339–348.
32. P. Kittitheeranun, S. T. Dubas, L. Dubas, *Appl. Mech. Mat.* **229-231** (2012), 2745–2748.
33. M. Elzbieciak, M. Kolasinska, P. Warszynski, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* **321** (2008) 258–261.
34. Y. Lian, G. Zhang, X. Wang, J. Yang, *Nanomaterials* **11** (2021) 2470.
35. M. Zerball, A. Laschewsky, R. Köhler, R. Von Klitzing, *Polymers* **8** (2016) 120.
36. M. Morita, T. Ohmi, E. Hasegawa, M. Kawakami, M. Ohwada, *J. Appl. Phys.* **68** (1990) 1272–1281.
37. A. H. Al-Bayati, K. G. Orrman-Rossiter, J. A. Van Den Berg, D. G. Armour, *Surf. Sci.* **241** (1991) 91–102
38. M. Mesić, T. Klačić, A. Abram, K. Bohinc, D. Kovačević, *Polymers* **14** (2022) 2566.

# **MEĐUMOLEKULSKE INTERAKCIJE – UČENIČKA POGREŠNA SHVAĆANJA**

Metodički dio rada

## § 9. METODIČKI DIO

### 9.1. Uvod

Cilj metodičkog dijela ovog diplomskog rada je upoznati učenike s pojmom i značajem međumolekulskih interakcija te potaknuti buduće nastavnike kemije na istraživanje literaturno opisanih pogrešnih shvaćanja unutar koncepta. Naglasak je stavljen na razvijanje dubljeg razumijevanja važnosti međumolekulskih interakcija u svakodnevnom životu, prirodi i tehnologiji. Kroz odabir jednostavnih, ali efektinih demonstracijskih pokusa unutar nastavne cjeline „*Međumolekulske interakcije*“ osmišljen je 90-minutni nastavni sat temeljen na strategiji učenja otkrivanjem. Obrazovna postignuća prilagođena su učenicima prvog razreda srednje škole. Uz detaljnu razradu pripreme za nastavnika i učenički radni list u nastavnom satu povezana je građa molekula i međumolekulske interakcije s fizikalnim svojstvima tvari kroz strategije poučavanja temeljene na makroskopskim opažanjima učenika.

### 9.2. Nastava kemije u školi

#### 9.2.1. Struktura i organizacija nastave kemije

Kemija je jedna od osnovnih prirodoslovnih znanosti koja proučava sastav, strukturu, svojstva i promjene tvari. Kao znanstvena disciplina, kemija je usmjerena na razumijevanje temeljnih procesa koji se odvijaju u prirodi i u našem svakodnevnom životu. U skladu s time, poučavanje i učenje kemije u školama organizirano je kroz sljedeća područja: *Tvari, Promjene i procesi, Energija i Prirodoslovnost pristup*. Kemija se poučava u 7. i 8. razredu osnovne škole te potom u srednjoj školi. U osnovnoj školi nastava kemije usmjerena je na usvajanje temeljnih i trajnih znanja koja služe kao osnova za daljnje obrazovanje te na razvijanje pozitivnog stava prema kemiji. Naglasak je na razumijevanju ključnih kemijskih teorija, posebno atomske teorije i srodnih konceptata i modela, koji omogućuju učenicima objašnjavanje i razumijevanje svojstava i promjena tvari. U osnovnim školama, općim, jezičnim i prirodoslovno-matematičkim gimnazijama nastavni predmet Kemija izvodi se u okviru nastavnoga plana u trajanju od 70 sati godišnje. U prirodoslovnim gimnazijama, kemija se poučava kao predmet s vježbama u trajanju od 140 sati godišnje, pri čemu se 50 % nastavnih sati provodi kao laboratorijske vježbe u specijaliziranim učionicama ili laboratorijima. Cilj obrazovanja u svakoj srednjoj školi je osposobljavanje za određeno zanimanje. Nastava kemije u tim školama prilagođena je ostvarenju tog cilja, što se odražava u oblikovanju nastavnog plana, odabiru

nastavnih sadržaja i primjeni odgovarajućih metoda poučavanja. Unatoč raznolikosti zanimanja za koja se učenici pripremaju, zadaci nastave kemije u svim srednjim školama su slični. Ostvarivanje svih odgojno-obrazovnih ishoda navedenih u Nacionalnom kurikulumu obavezno je u svim osnovnim i srednjim školama. Oni se ostvaruju kroz pojedine ishode i njihovu detaljno opisanu razradu. Sadržaji predviđeni u kurikulumu i udžbenicima mogu se ostvariti na mnogo načina i onim redoslijedom kako je nastavnik odlučio.<sup>39,40</sup>

### 9.2.2. *Obrazovne strategije, metode i postupci*

Tvari i njihove promjene, glavni predmet učenja i poučavanja kemije, najlakše je upoznati iskustvom, odnosno pokusom. Vlastitim izvođenjem pokusa učenici će lakše steći znanje o kemijskim svojstvima tvari te razviti sposobnost rada u laboratoriju. Takvo znanje, stečeno vlastitim radom i promatranjem, je dublje i dugotrajnije. Nastava koja uključuje takav pristup također zahtjeva određenu prilagodbu nastavnika. Preporuka je učenje u nastavi organizirati u 90-minutnom nastavnom satu. Primjena odgovarajućih strategija poučavanja i metoda rada ključna je za uspješno izvođenje i obradu nastavnog sata. Strategija koja značajno doprinosi razvoju sposobnosti i vještina učenika te povećava njihovu motivaciju za rad je učenje kroz otkrivanje. Učenje otkrivanjem je poželjan pristup poučavanju kemije. Takvo poučavanje slično je u postavkama strategiji znanstvenog istraživanja (slika M1.). Učenje otkrivanjem obično započinje postavljanjem problema ili pitanja. Učenici potom vlastitim radom, odnosno najčešće izvođenjem pokusa, iznose opažanja i rezultate. Raspravom dolaze do zaključka i rješenja te potom i odgovora na početno postavljeno pitanje. Usmjereno učenje otkrivanjem u kemiji preferira učenički pokus (individualni ili grupni rad), no idealno je kombinirati ga s demonstracijskim pokusima, snimljenim pokusima ili računalnim simulacijama. Veliku ulogu u izvedbi pokusa ima nastavnik koji osim što kontrolira sigurno izvođenje eksperimenta potiče aktivnost i intelektualnu uključenost učenika. Postavljanjem dobro odabranih pitanja on usmjerava učenike na samostalno promišljanje i zaključivanje. Proces poučavanja kemije mora biti prilagođen uzrastu učenika, njihovom kognitivnom razvoju, suvremenim znanstvenim spoznajama i društvenim potrebama. Također je bitno uvažiti individualni interes, sposobnosti i stilove učenja svakog učenika. Cilj je razviti ne samo znanje već i sposobnost kritičkog promišljanja te praktičnu primjenu kemijskih koncepata u stvarnom životu.<sup>39,40</sup>





Slika M1. Shematski prikaz strategije znanstvenog istraživanja.

### 9.2.3. Sociološki oblici nastave

Cilj učenja otkivanjem u kemiji je istraživački usmjeriti nastavu, potaknuti aktivno učenje te ostvariti visoku razinu intelektualnog angažmana učenika. Kako bi se postigao taj cilj, potrebno je osigurati učenje kroz različite interakcije i oblike rada. Sociološki oblici nastave kemije odnose se na način međusobne suradnje učenika, komunikaciju s nastavnikom i ostvarivanje postavljenih ciljeva učenja. Socijalni oblici rada u nastavi kemije uključuju: *frontalni rad*, *rad u grupama*, *rad u parovima* i *individualni rad*. *Frontalni rad* karakterizira nastavni proces orijentiran prema nastavniku. Za takav način rada prilagođena je većina učionica. Iako je u nekim situacijama nužan, poput izvođenja demonstracijskih pokusa, frontalni oblik rada često nije dovoljno interaktivan da u cijelosti ispuni ciljeve obrazovanja. Unatoč njegovim ograničenjima, frontalni rad i dalje ima svoje mjesto u nastavi, ali ne bi trebao dominirati cijelim obrazovnim procesom. S druge strane, *grupni oblik rada* stavlja naglasak na učenike i omogućuje im veću interakciju i suradnju. Učenici iznose svoja mišljenja, uvažavaju sugovornike i bolje razumiju različite perspektive, razvijaju timske vještine i zajednički dolaze do cilja. Grupni rad obično uključuje manji broj učenika (najčešće 6 članova), čime se izbjegava izolacija pojedinca i potiče aktivno sudjelovanje svih članova grupe. Osim frontalnog rada i rada u grupama, nastavnik može primijeniti rad u parovima ili individualni rad u svojoj nastavi. *Rad u parovima* omogućuje intenzivniju komunikaciju, jer oba učenika moraju aktivno sudjelovati, razmjenjivati mišljenja i zajedno tražiti rješenja. Ovaj rad pridonosi osposobljavanju učenika za samostalan rad i učenje. U *individualnom obliku* nastave učenici rade samostalno na rješavanju zadataka, provođenju eksperimenata ili analizi rezultata. Ovaj oblik razvija odgovornost i sposobnost neovisnog rješavanja problema. Sve ove socijalne oblike rada važno je primjenjivati u nastavi kemije kako bi se učenicima omogućilo razvijanje kognitivnih, socijalnih i praktičnih vještina. U svim oblicima rada, nastavnik je samostalan organizator i kreator nastavnog procesa. Zbog interdisciplinarnosti mnogih nastavnih sadržaja, suradnja među nastavnicima postaje neophodna. Timski rad i kooperativnost među nastavnicima omogućuju međusobnu razmjenu ideja i obogaćuju obrazovni proces.<sup>39</sup>

### 9.3. Priprema za nastavnika

#### 9.3.1. Teorijska podloga

Nastavni plan i program predviđa niz tema i ishoda koji se moraju obraditi u nastavi kemije. Kvalitetna priprema za nastavu ključna je za uspješan rad s učenicima. Priprema za nastavnika uključuje jasno definirane ishode i ciljeve učenja te pripremu materijala i metoda rada prilagođenih učenicima. U ovom diplomskom radu predstavljen je prijedlog nastavne jedinice *Međumolekulske interakcije*. Navedena nastavna jedinica nalazi se unutar nastavne cjeline *Kemijske veze*. Glavni odgojno-obrazovni ishodi koji se žele postići obradom nastavne jedinice *Međumolekulske interakcije* su: „KEM SŠ B.1.1. Objašnjava vrste i svojstva kemijskih veza.“ i „KEM SŠ B.1.2. Analizira fizikalne i kemijske promjene.“ Nakon obrade ovog nastavnog bloka, učenik bi trebao biti sposoban razlikovati kemijske veze i međumolekulske interakcije te povezati svojstva tvari s međučestičnim interakcijama. Pritom će razvijati sposobnost rješavanja problema i primjenjivati stečena znanja o strukturi i svojstvima tvari. Razumijevanje kemijskih veza i međumolekulskih interakcija ključno je za shvaćanje osnovnih znanstvenih principa koji objašnjavaju strukturu, svojstva i ponašanje tvari. Za uspješno razumijevanje i izvođenje predviđenih pokusa te povezivanje opažanja s teorijskim znanjem, učenik prvog razreda srednje škole treba imati određena prethodna znanja, vještine i sposobnosti. U tablici M1. prikazana su potrebna prethodna znanja kroz odgojno-obrazovne ishode i njihovu razradu.<sup>39,40</sup>

Tablica M1. Pregled prethodnih znanja kroz odgojno-obrazovne ishode učenja i njihovih razrada za nastavni sat „*Međumolekulske interakcije*“.<sup>40-44</sup>

ODGOJNO-OBRAZOVNI ISHOD	RAZRADA ISHODA
KEM OŠ A.7.1. Istražuje svojstva i vrstu tvari.	<p>Učenik navodi fizikalna svojstva tvari poput boje, agregacijskog stanja, toplinske vodljivosti, električne vodljivosti, magnetičnosti, gustoće, tališta, vrelišta i topljivosti.</p> <p>Učenik navodi kemijska svojstva tvari poput reaktivnosti, kiselosti i lužnatosti.</p> <p>Učenik opisuje fizikalne i kemijske promjene.</p> <p>Učenik razvrstava tvari kao čiste tvari i</p>

	<p>smjese; čiste tvari razvrstava na elementarne tvari i kemijske spojeve, a smjese na homogene i heterogene.<sup>43,44</sup></p>
<p>KEM OŠ A.7.2. Primjenjuje kemijsko nazivlje i simboliku za opisivanje sastava tvari.</p>	<p>Učenik opisuje građu atoma te navodi definicije atoma, kemijskog elementa, izotopa i elementarne tvari.</p> <p>Učenik opisuje strukturu periodnoga sustava elemenata.</p> <p>Učenik razumije što predstavljaju simboli kemijskih elemenata i njihovu povezanost s periodnim sustavom elemenata.</p> <p>Učenik razlikuje pojmove molekule, atoma, iona i kemijskih formula.</p> <p>Učenik ispravno zapisuje kemijske simbole elemenata i kemijske formule jednostavnih tvari.</p> <p>Učenik pravilno određuje valencije atoma (I i II skupina, C, N, O, S, F, Cl, Br, I) na temelju položaja elementa u periodnome sustavu elemenata.</p> <p>Učenik kategorizira spojeve na anorganske (oksidi, kiseline, baze, soli) i organske (ugljikovodici, alkoholi).<sup>43,44</sup></p>
<p>KEM OŠ A.7.3. Kritički razmatra upotrebu tvari i njihov utjecaj na čovjekovo zdravlje i okoliš.</p>	<p>Učenik kritički analizira učinke kemikalija na ljudsko zdravlje i okoliš.</p> <p>Učenik razumije načine sigurne uporabe kemikalija u svakodnevnom životu i industriji.<sup>43,44</sup></p>
<p>KEM OŠ D.7.1. Povezuje rezultate i zaključke istraživanja s konceptualnim spoznajama.</p>	<p>Učenik povezuje novostečena znanja s onima koja su prethodno stečena kroz teorijske lekcije.</p> <p>Učenik je sposoban interpretirati rezultate istraživanja na temelju kemijskih principa, razumjeti uzročno-posljedične veze između promatranih fenomena i teorijskih koncepata.</p>

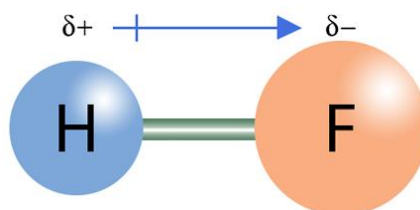
	<p>Učenik koristi kemijske zakone i teorije kao temelje za objašnjenje rezultata svojih istraživanja.<sup>43,44</sup></p>
<p>KEM SŠ A.1.1. Analizira svojstva, sastav i vrstu tvari.</p>	<p>Uspoređuje tvari po sastavu, vrsti i svojstvima.</p> <p>Učenik razlikuje fizikalna svojstva čistih tvari: gustoća, talište, vrelište, agregacijska stanja, fazni dijagrami, krivulja zagrijavanja čvrstih tvari.</p> <p>Učenik navodi fizikalna svojstva tekućina (viskoznost, napetost površine tekućina, isparavanje tekućina) i smjesa (vrste otopina i topljivost tvari u vodi – čvrste tvari, tekućine i plinovi, krivulje topljivosti čvrstih tvari i plinova).</p> <p>Učenik uspoređuje kemijska svojstva tvari (reaktivnost, sklonost stvaranju spojeva, promjene tvari tijekom kemijskih reakcija).</p> <p>Analizira dipolni moment molekula.<sup>41,42</sup></p>
<p>KEM SŠ A.1.2. Primjenjuje kemijsko nazivlje i simboliku za opisivanje sastava tvari.</p>	<p>Prikazuje Lewisovom simbolikom atome, molekule i ione.</p> <p>Učenik opisuje atom pomoću protonskog i nukleonskog broja, neutralne atome kemijskih elemenata prikazuje Lewisovom simbolikom uz pomoć pojma valentnih elektrona.</p> <p>Učenik povezuje agregacijska stanja tvari s kinetičkom energijom čestica.</p> <p>Imenuje i kemijskim formulama prikazuje anorganske spojeve (metali, nemetali, kiseline, baze, soli, oksidi) te odabrane organske spojeve (ugljikovodici, alkoholi, karboksilne kiseline).<sup>41,42</sup></p>
<p>KEM SŠ A.1.3. Povezuje građu tvari s njihovim svojstvima.</p>	<p>Objašnjava građu atoma, iona, molekula elementarnih tvari i kemijskih spojeva.</p>

	<p>Objašnjava prostorni raspored čestica u elementarnim tvarima, kemijskim spojevima i kristalima.</p> <p>Povezuje čestičnu građu anorganskih i organskih tvari s njihovim fizikalnim i kemijskim svojstvima.</p> <p>Učenik uočava utjecaj vrste čestičnih međudjelovanja na agregacijsko stanje, reaktivnost, kiselost, lužnatost.<sup>41,42</sup></p>
KEM SŠ A.1.4. Kritički razmatra upotrebu tvari i njihov utjecaj na okoliš.	Kritički razmatra upotrebu anorganskih i organskih tvari te njihov utjecaj na okoliš. <sup>41,42</sup>
KEM SŠ B.1.1. Objašnjava vrste i svojstva kemijskih veza.	Učenik poznaje vrste međumolekulskih interakcija.

\* KEM – Kemija; OŠ – osnovna škola; A – koncept ishoda (A – Tvari, B – Promjene i procesi, C – Energija, D – Prirodnoznanstveni pristup)

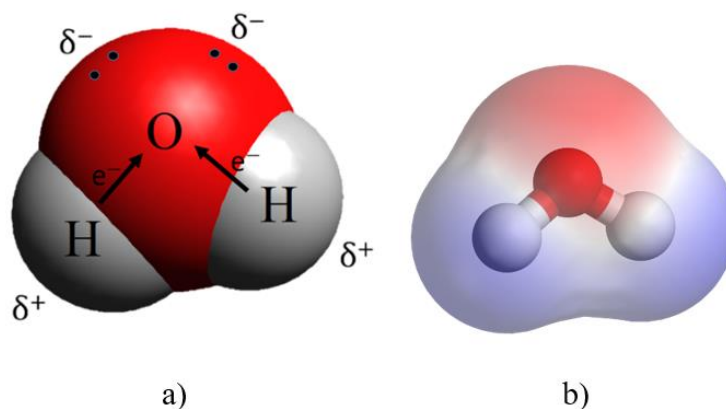
### 9.3.2. Polarnost veze – dipolni moment

Polarnost kovalentne veze nastaje kao posljedica razlike u elektronegativnosti atoma unutar veze. Kada su elektronegativnosti atoma slične, veza je slabo polarna. S povećanjem razlike u elektronegativnosti, veza postaje polarnija. Primjer polarne kovalentne veze je molekula fluorovodika, HF. Zbog velike razlike u elektronegativnosti između atoma fluora i vodika, zajednički elektronski par u vezi povlači se bliže fluorovom atomu. Stvara se parcijalni negativni naboj ( $\delta^-$ ), smješten bliže jezgri fluorova atoma, dok se na drugom kraju, bliže jezgri vodikova atoma, posljedično pojavljuje po apsolutnoj vrijednosti jednak parcijalni pozitivni naboj ( $\delta^+$ ). Tako molekula fluorovodika ima „pozitivni“ i „negativni“ kraj, odnosno težište pozitivnog i negativnog naboja nije u jednoj točki pa se za molekulu fluorovodika kaže da je polarna molekula. Dipolni karakter molekule često se prikazuje strelicom orijentiranom prema negativno nabijenom dijelu molekule.



Slika M2. Dipolni karakter molekule fluorovodika.<sup>45</sup>

Mjera za polarnost veze je dipolni moment ( $\mu$ ). Svaka dvoatomna molekula s polarnom vezom ima dipolni moment, a neke višeatomne molekule također ga posjeduju. Primjer je molekula vode, gdje kisikov atom, kao elektronegativniji, privlači elektrone zajedničkog para u vezi O–H. Zbog tog dolazi do neravnomjerne raspodjele naboja, pri čemu molekula vode ima dva težišta parcijalnoga pozitivnog i jedno težište parcijalnog negativnog naboja. Ova raspodjela naboja rezultira dipolnim momentom molekule vode, koji je ključan za njezina jedinstvena svojstva. Polarnost molekula vode ključna je za održavanje života na Zemlji. Uobičajeni prikaz polarne molekule prikazan je na slici M3. b). Veličina polarnosti određena je električnim dipolnim momentom. Negativni naboj predstavljen je crvenom bojom, dok je pozitivni naboj prikazan plavom bojom. Bijela boja označava neutralno područje.



Slika M3. Raspodjela naboja u molekuli vode.<sup>46,47</sup>






Polarna veza ne znači nužno da je i molekula polarna. Kod nekih molekula polariteti pojedinih veza mogu se međusobno poništiti zbog simetrije. Takve molekule, unatoč postojanju polarnih veza, nemaju dipolni moment i smatraju se nepolarnima. Dakle, simetrija ili oblik molekule dodatni je čimbenik koji utječe na to hoće li molekula imati dipolni moment.

### 9.3.3. Međumolekulske interakcije

Privlačne sile koje djeluju između molekula nazivaju se međumolekulske (intermolekulske) sile ili interakcije. Iako su ove sile znatno slabije od unutarmolekulskih (intramolekulskih) sila, njihov utjecaj na svojstva tvari je izuzetno značajan. Međumolekulske interakcije utječu na svojstva tvari, kao što su agregacijsko stanje, talište, vrelište, topljivost, površinska napetost, tlak pare. U plinovitom agregacijskom stanju, kinetička energija čestica je vrlo velika. Molekule plina gibaju se kaotično i međusobno su vrlo udaljene. U takvim uvjetima, međumolekulske interakcije imaju zanemariv utjecaj jer su molekule previše udaljene da bi njihova privlačna ili odbojna sila imala značajan učinak. S druge strane, u čvrstim tvarima, čestice titraju oko

položaja ravnoteže. Zbog blizine čestica, privlačne sile između čestica su znatno jače nego u plinovima ili tekućinama. Vrsta interakcija ovisi o građi čestica. Međumolekulske interakcije se mogu podijeliti u nekoliko vrsta. Svaka vrsta će biti posebno detaljno opisana. U tablici M2. prikazana je podjela međumolekulskih interakcija, shematski prikaz i njihova jakost.

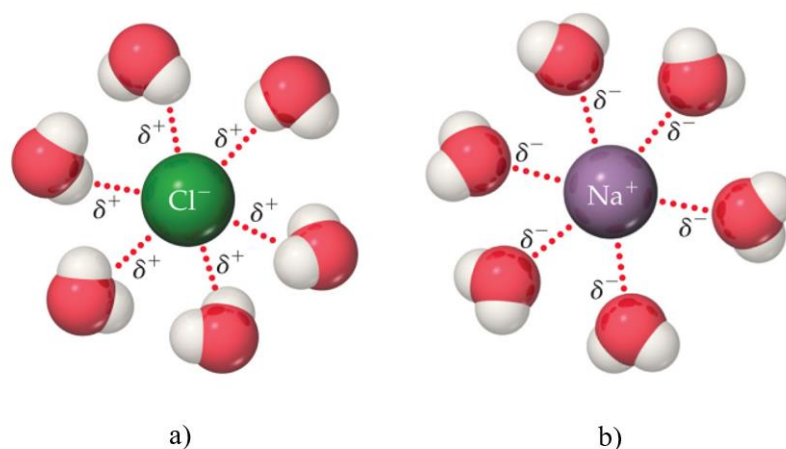
Tablica M2. Vrste međumolekulskih interakcija, shematski prikaz i njihova jakost.<sup>48</sup>

vrsta međumolekulskih interakcija	shematski prikaz	$E / \text{kJ mol}^{-1}$
ion-dipol		40–600
vodikova veza	$\delta^- \delta^+ \delta^-$ —A—H·····:B—	10–40
dipol-dipol		5–25
ion-inducirani dipol		3–15
dipol-inducirani dipol		2–10
disperzijske sile		0,05–40

### ION-DIPOL INTERAKCIJE

Ion-dipol interakcije nastaju kada se ion (pozitivno ili negativno nabijen) približi polarnoj molekuli, koja ima dipolni moment. Dipolna molekula ima pozitivne i negativne krajeve, a ion se privlači prema suprotnim krajevima dipola. Na primjer, anion (poput  $\text{Cl}^-$ ) privlači pozitivan kraj molekule vode (vodik) (slika M4. a)), dok će kation (poput  $\text{Na}^+$ ) privlačiti negativni kraj polarne molekule vode (kisik) (slika M4. b)). Snaga ion-dipol interakcije ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući veličinu i naboj iona te dipolni moment polarnih molekula. Manji ioni

s većim nabojem stvaraju snažnije ion-dipol interakcije. Slično tome, molekule s većim dipolnim momentom također stvaraju jače ion-dipol interakcije.

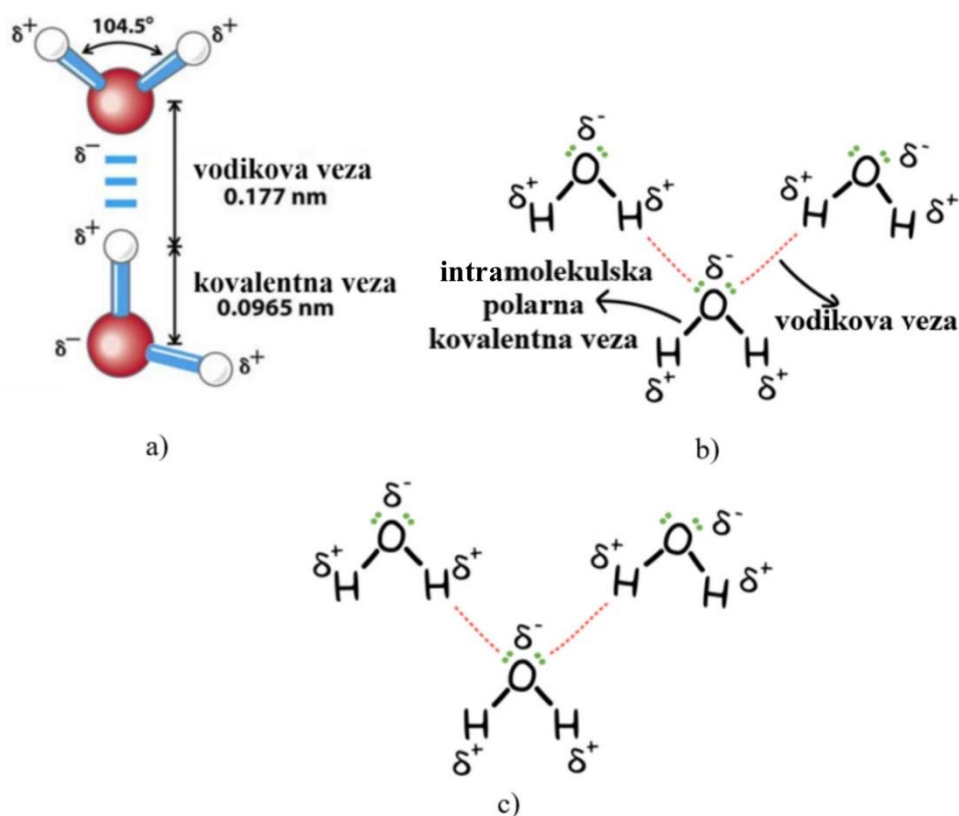


Slika M4. Ion-dipol interakcije između: a) iona klora i molekula vode i b) natrijevih iona i molekula vode.<sup>49</sup>

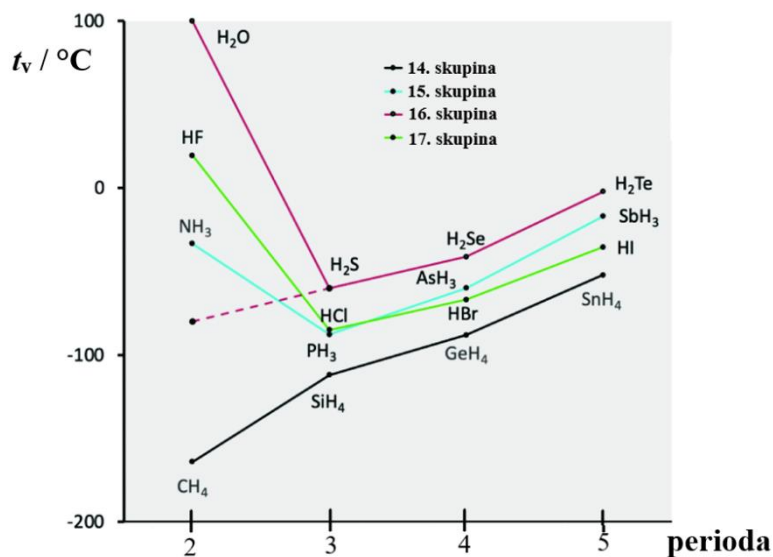
### VODIKOVE VEZE

Vodikove veze su privlačne interakcije između atoma vodika povezanog na elektronegativni atom jedne molekule s elektronegativnim atomom druge molekule (F, O ili N). Vodikova veza se označava općom formom  $\text{R}-\text{D}-\text{H}\cdots\text{A}-\text{R}'$ , gdje D predstavlja donora protona koji je elektronegativan atom (poput F, O, N, C, S, Cl ili Br), dok A predstavlja akceptora protona, koji može biti drugi elektronegativan atom. Tri točkice označavaju dio vodikove veze između atoma vodika i akceptora vodikove veze. Vodikove veze imaju značajan utjecaj na različita fizikalna svojstva tvari, uključujući vrelište, talište i topljivost. Primjer molekule kod koje dolazi do stvaranja vodikovih veza je voda (slika M5.). Elektronski par koji dijele atomi vodika i kisika privlači se snažnije prema kisiku zbog njegove veće elektronegativnosti, što rezultira parcijalnim negativnim nabojem na atomu kisika ( $\delta^-$ ) i parcijalnim pozitivnim nabojem na atomu vodika ( $\delta^+$ ). Kada se u blizini nađe druga molekula vode, uspostavlja se elektrostatska interakcija između parcijalno negativnog kisika prve molekule i parcijalno pozitivnog vodika druge molekule, što dovodi do stvaranja vodikove veze. Vrelište vode mnogo je više nego što bi se očekivalo prema vrelištima hidrida drugih elemenata iz iste skupine periodnog sustava (slika M6.). Zbog prisutnosti vodikovih veza među molekulama potrebno je više energije za kidanje veze.





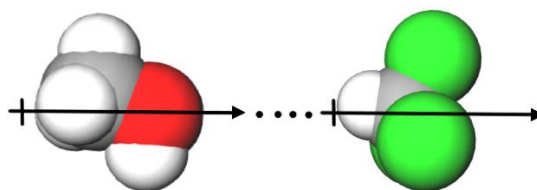
Slika M5. Učestali literaturni prikazi intermolekulskih vodikovih veza između molekula vode i mogući izvor učeničkih pogrešnih shvaćanja. (a) Uzevši u obzir simbolički zapis vodikove veze  $D-H\cdots A$ , naziv vodikova veza samo za jedan njen dio ( $H\cdots A$ ) nije najsretniji grafički prikaz.<sup>50</sup> (b) Strukturno bolji prikaz vodikove veze, ali s istom temeljnom pogreškom da se elektrostatski dio veze ( $H\cdots A$ ) naziva vodikovom vezom i (c) poželjan prikaz vodikove veze.<sup>51</sup>

Slika M6. Vrelišta hidrida elemenata 14. do 17. skupine.<sup>52</sup>

Vodikove veze se mogu pojavljivati i između dviju funkcijskih skupina unutar iste molekule. Takve veze nazivamo intramolekulskim vodikovim vezama. U tom slučaju, donor i akceptor protona nalaze se unutar iste molekule. Takve intramolekulske interakcije prisutne su u složenijim molekulama poput proteina.

### DIPOL-DIPOL INTERAKCIJE

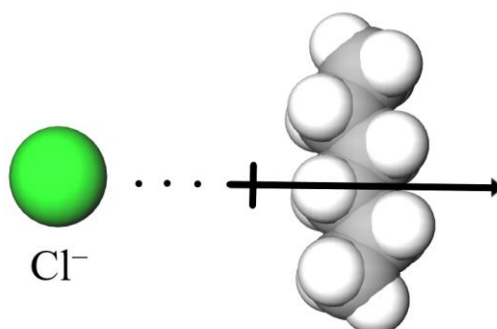
Dipol-dipol interakcije jesu privlačna međudjelovanja polarnih molekula. U dipol-dipol interakcijama, pozitivni kraj jedne polarne molekule privlači negativni kraj druge polarne molekule. Ove interakcije nastaju zbog elektrostatske privlačnosti između suprotnog naboja na dvjema molekulama. Na primjer, u molekuli klorovodika (HCl), atom vodika ima parcijalno pozitivan naboj, dok atom klora ima parcijalno negativan naboj. Ove molekule su polarne te se privlače jedna prema drugoj zahvaljujući dipol-dipol interakciji. Snaga dipol-dipol interakcije ovisi o dipolnom momentu i udaljenosti molekula. Što je dipolni moment molekula veći, privlačne su sile među njima jače. Ako su molekule blizu jedna drugoj, interakcije su snažnije. Molekule koje mogu stvarati dipol-dipol interakcije obično imaju viša vrelišta i tališta u usporedbi s nepolarnim molekulama slične veličine i  $M_r$ .



Slika M7. Dipol-dipol interakcija između molekule etanola i molekule kloroforma.

### ION- INDUCIRANI DIPOL INTERAKCIJE

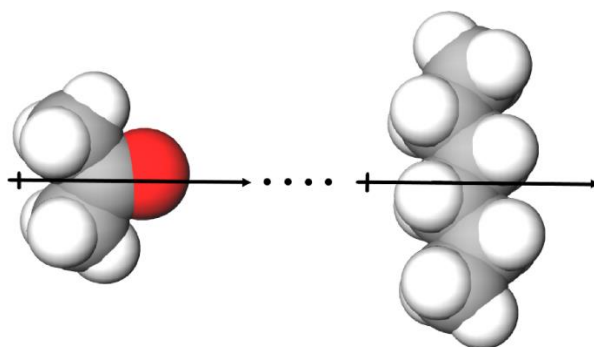
Ion-inducirane dipolne interakcije su međumolekulske sile koje nastaju između iona (kation ili anion) i nepolarne molekule (nema stalni dipolni moment) koja je privremeno inducirana. Ion djelovanjem električnog polja poremeti elektronsku gustoću nepolarne molekule te dolazi do privremenog razdvajanja naboja (dipol) unutar nje. Jačina ion-induciranih dipolnih interakcija ovisi o naboju iona i polarizabilnosti molekule. Molekule s većim i lako polarizirajućim elektronskim oblacima stvaraju jače interakcije.



Slika M8. Ion-inducirani dipol interakcija između klorovog iona i molekula heksana.

### DIPOL-INDUCIRANI DIPOL INTERAKCIJE

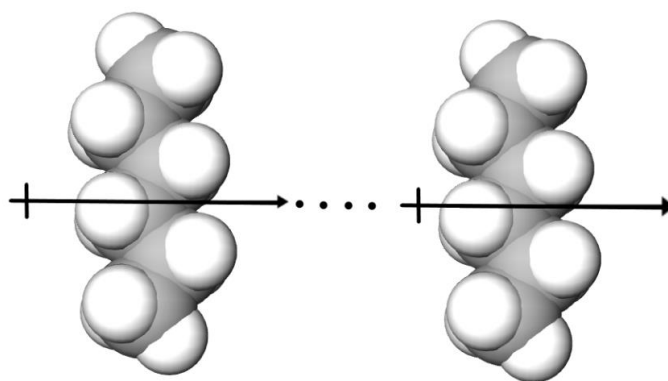
Kada polarna molekula (ima stalni dipolni moment) svojim električnim poljem inducira privremeni dipol u nepolarnoj molekuli (nema stalni dipolni moment) nastaju privlačne međumolekulske sile koje se nazivaju dipol-inducirani dipol interakcijama. Djelovanjem električnog polja polarne molekule dolazi do privremene deformacije elektronskog oblaka nepolarne molekule, što rezultira razdvajanjem naboja unutar nje i formiranjem inducirano dipola. Slično kao kod ion-inducirani dipol interakcija, jačina dipol-inducirani dipol interakcija ovisi o veličini stalnog dipola polarne molekule i polarizabilnosti nepolarne molekule.



Slika M9. Dipol-inducirani dipol interakcija između molekule acetona i molekule heksana.

### LONDONOVE SILE ILI DISPERZIJSKE SILE

Londonove sile, poznate i kao disperzijske sile, najslabija su vrsta međumolekulskih sila. Javljaju se između svih molekula, ali njihov utjecaj se najčešće razmatra između nepolarnih molekula. Zbog svoje prostorne građe, nepolarne molekule nemaju stalan dipolni moment. Privremena kretanje elektronskog oblaka unutar molekula ili atoma uzrokuje trenutnu polarizaciju. Zbog nejednake raspodjele elektrona stvara se privremeni dipol koji može inducirati dipol u susjednoj molekuli. Ova interakcija dovodi do privlačnih sila između molekula, čak i ako su one nepolarne.



Slika M10. Londonove disperzijske sile između dviju molekula heksana.

#### 9.3.4. Kritički osvrt na udžbenike

Za pripremu metodičkog dijela diplomskog rada korišteno je nekoliko srednjoškolskih udžbenika. U većini udžbenika, nastavnoj jedinici *Međumolekulske interakcije* prethodi nastavna tema *Polarnost molekula*. Uvođenje dipolnog momenta, mjere za polarnost veze, ključno je za razumijevanje pojmova povezanih s međumolekulskim silama. Nastavna cjelina

*Međumolekulske interakcije* obično započinje usporedbom jakosti intermolekulskih i intramolekulskih interakcija. Naglašava se utjecaj međumolekulskih sila na svojstva tvari poput agregacijskog stanja, tališta, vrelišta, viskoznosti i površinske napetosti. Da bi objasnili razlike u svojstvima tvari, međumolekulske interakcije u udžbenicima<sup>53</sup> su često podijeljene na dvije skupine:

1. van der Waalsove interakcije (dipol-dipol, dipol-inducirani dipol, inducirani dipol-inducirani dipol)
2. vodikove veze (specifične dipol-dipol veze)

Van der Waalsove interakcije predstavljaju slaba elektrostatska međudjelovanja dipolnih molekula. Njima se u udžbenicima često ne pridaje previše pažnje. U kratkim crtama objašnjene su vrste van der Waalsovih interakcije, najčešće bez navedenih konkretnih primjera. Kod dipol-dipol interakcija ukazuje se na specifične interakcije molekula vode, tj. vodikove veze. U mnogim udžbenicima ion-inducirani dipol i dipol-inducirani dipol interakcije su stavljene zajedno pod naziv dipol-inducirani dipol interakcije. Nerazdvajanje naziva koji se odnose na utjecaj iona ili polarne molekule na nepolarnu molekulu ili atom može smanjiti razumijevanje specifičnih razlika među tim interakcijama. Razumijevanje i vizualizacija vrsta van der Waalsovih interakcija često predstavlja učenicima izazov. Dodatno pojednostavljenje njihovih prezentacija dovodi do površnog razumijevanja ključnih koncepata. Udžbenici bi trebali više stavljati naglasak na shematski prikaz van der Waalsovih interakcija, povezujući ih s konceptom dipolnog momenta te dodatno vizualizirati elektronske oblake i njihove deformacije. Uz to, bilo bi korisno ove interakcije ilustrirati kroz konkretne primjere.

Dok su vrste van der Waalsovih interakcija često opisane vrlo ograničeno, vodikove veze zauzimaju značajno mjesto u udžbenicima. Njihova učestalost i važnost u svakodnevnom životu razlog su za detaljnije objašnjenje ovog tipa interakcija. Obrada nastavne teme *Vodikove veze* se često izdvaja kao poseban naslov u obradi nastavne jedinice. U gotovo svim udžbenicima detaljno su prikazane vodikove veze između molekula vode kroz dobru vizualizaciju i shematske prikaze. U udžbenicima, utjecaj vodikovih veza na svojstva tvari se najčešće prikazuje različitim dijagramima, kao što je dijagram prikazan u poglavlju 3.1.1. (slika M6.) koji prikazuje povezanost između vrelišta nemetala s vodikom i njihovog položaja u periodnom sustavu elemenata. Korištenjem ovih dijagrama, učenici mogu jasno vidjeti kako međumolekulske sile, posebno vodikove veze, utječu na fizikalna svojstva tvari, poput vrelišta. Na primjer, usporedba vrelišta vode, amonijaka i drugih tvari čije molekule mogu međusobno

stvarati vodikove veze pokazuje kako jačina tih veza povećava vrelište u odnosu na tvari čije molekule nemaju ovu vrstu interakcije, čak i kada su u pitanju molekule slične mase i strukture. Ovaj primjer omogućava prijelaz makroskopskog opisa svojstava tvari na čestični opis, temeljen na međumolekulskim interakcijama. Svakako, u udžbenicima i svim nastavnim materijalima treba pokušati željeni koncept prikazati na sve tri razine – makroskopskoj, čestičnoj i simboličkoj. Koncepti građe molekula i međumolekulskih interakcija idealni su za povezivanje makroskopske i čestične razine.

#### 9.3.5. Učenička kriva shvaćanja u nastavnoj jedinici Međumolekulske interakcije

U procesu usvajanja novog nastavnog gradiva učenici mogu razviti pogrešna shvaćanja. Ona mogu nastati iz različitih razloga, uključujući površno učenje, pojednostavljenja u udžbenicima i nepravilne interpretacije informacija. Svakodnevna iskustva učenika dovode do pretpostavki koje mogu biti u suprotnosti s idejama koje iznosi kemijska znanost. Pogrešna shvaćanja mogu ozbiljno ometati pravilno razumijevanje kemije, što može dovesti do poteškoća u učenju, rješavanju računskih zadataka ili primjeni kemijskih koncepata u svakodnevnim situacijama. Kemijski pojmovi, uključujući i koncept međumolekulskih interakcija, često su učenicima apstraktni. Budući da je kemija konceptualni predmet, kako bi bolje objasnili kemijske koncepte, nastavnici bi trebali koristiti različite modele za opisivanje submikrosvijeta i povezivanje njih s makrosvojstvima tvari.<sup>54</sup>

Proces smanjenja pogrešnih shvaćanja u kemiji sastoji se od nekoliko ključnih koraka. Prvi korak je identifikacija pogrešnih shvaćanja, što se može ostvariti korištenjem različitih metoda kao što su anketni upitnici, inicijalni testovi, ispitivanja, diskusije u učionici i analiza pogrešaka u zadacima. Nakon što su pogrešna shvaćanja identificirana, slijedi faza razumijevanja izvora tih pogrešnih shvaćanja te njihovo korigiranje. Provedena su brojna istraživanja<sup>55-60</sup> u otkrivanju učenčkih pogrešnih shvaćanja povezanih s temom *kemijskih veza i međumolekulskih interakcija*. Rezultati istraživanja trebaju poslužiti kao temelj za unaprjeđenje nastavne prakse i razvoj učinkovitijih nastavnih strategija. Koristeći različite nastavne strategije, nastavnici nastoje suočiti učenike s njihovim pogrešnim shvaćanjima i potaknuti promjenu.

Pogrešna shvaćanja povezana s međumolekulskim interakcijama najčešće započinju sa uvjerenjem učenika da veze među molekulama ne postoje. Učenici ponekad vjeruju da između molekula ne postoje nikakve veze, već da su one potpuno odvojene. Cooper i suradnici<sup>59</sup> proveli su istraživanje učenikova razumijevanja međumolekulskih interakcija. Najmanje 55 %

ispitanika u istraživanju je predstavilo svaku međumolekulska interakciju kao vezu ili intra-interakciju unutar iste molekule. Ovo su samo neka od osnovnih pogrešnih shvaćanja koja se javljaju kod učenika prilikom usvajanja koncepta međumolekulskih interakcija. Ostatak identificiranih pogrešnih shvaćanja, zajedno s pripadajućom literaturom, sažet je u tablici M3. radi lakše analize.

Tablica M3. Primjeri najčešćih pogrešnih shvaćanja učenika o međumolekulskim interakcijama.

pogrešno shvaćanje	opis pogrešnog shvaćanja učenika
definicija vodikovih veza	Učenici smatraju da su vodikove veze kovalentne veze između atoma O i H unutar iste molekule. Smatraju da bilo koja molekula koja ima atome vodika i kisika mora imati i vodikove veze. <sup>57</sup> Učenici vezu između atoma O i H u hidroksilnoj funkcionalnoj skupini smatraju vodikovom vezom. <sup>60</sup>
nepostojanje međumolekulskih interakcija i kriva definicija	Učenici misle da ne postoje interakcije između molekula. Smatraju da su međumolekulske interakcije veze unutar jedne molekule. <sup>55,59</sup>
nepovezivanje međumolekulskih interakcija i svojstava tvari (vrelšte, talište, agregacijsko stanje...)	Učenici imaju poteškoća pri opisivanju trendova vrelšta. Najčešće uopće ne koriste pojmove vodikove veze i ostale međumolekulske interakcije ili ih koriste u krivim primjerima pri opisivanju svojstava tvari. <sup>56</sup> Polarnost i oblik molekule teško povezuju s jakošću međumolekulskih interakcija. <sup>58</sup>
jakost međumolekulskih interakcija	Učenici razliku u jakosti međumolekulskih sila povezuju kao posljedicu različitih jakosti kovalentnih veza u molekulama. <sup>58</sup>
definicija Londonovih disperzijskih sila	Učenici imaju poteškoća s definicijom Londonovih disperzijskih sila. Smatraju da one nastaju između pozitivnih i negativnih iona na molekuli. Često smatraju da nepolarne molekule mogu razviti trajni dipol. <sup>60</sup>

neuporaba dipol-dipol interakcija	Budući da je molekula HCl polarna, učenici zaključuju da interakcija između HCl molekula nosi naziv polarna (međumolekulska) sila. <sup>60</sup>
-----------------------------------	--

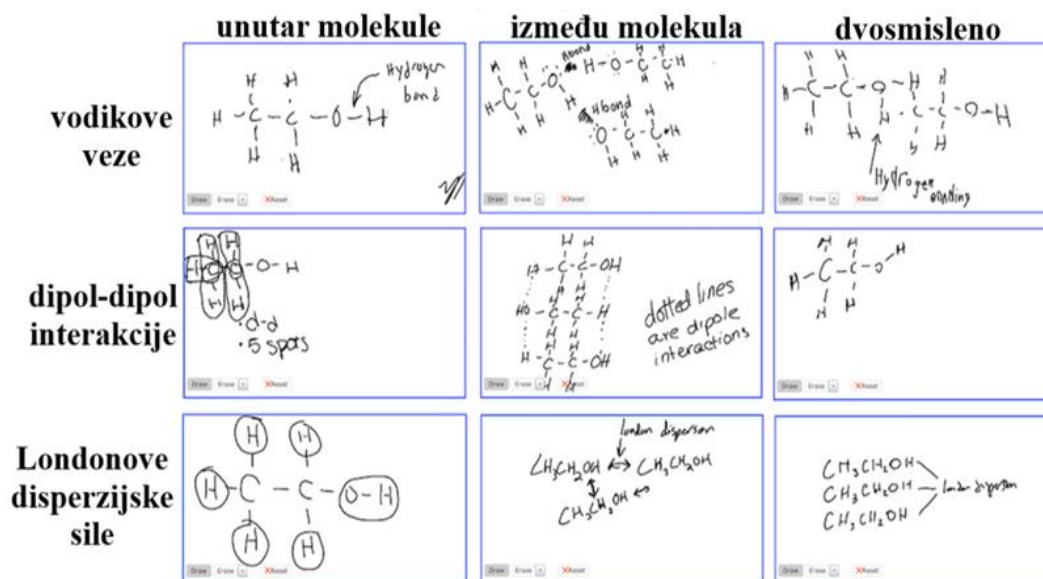
### 9.3.6. Pristupi ispravljanju pogrešnih shvaćanja u učenju međumolekulskih interakcija

Ispravljanje pogrešnih shvaćanja u kemiji zahtijeva pažljiv pristup koji kombinira osnove teorije, praktične primjere te odgovarajuće obrazovne strategije. Razumijevanje jednog koncepta u kemiji može olakšati usvajanje drugog, stoga je važno nastavu usmjeriti na njihovo povezivanje. Učenje kemije je iterativan proces koji zahtijeva stalno povećanje znanja određenog koncepta. Nastavnici se često suočavaju s izazovom prilagodbe zadataka različitim sposobnostima učenika. Učenje koncepta međumolekulskih interakcija nije jednostavno. Nema univerzalne lekcije koja je pogodna za sve učenike, jer svaki učenik ima svoj vlastiti tempo i stil učenja. Prilikom podučavanja, nastavnici ponekad podcjenjuju kompleksnost zadataka zbog vlastitog poznavanja gradiva. To može dovesti do neprepoznavanja prepreka s kojima se učenici suočavaju. Izuzetno je važno da nastavnici razvijaju svijest o poteškoćama s kojima se učenici susreću u procesu učenja.

Kako bi se izbjegla pogrešna shvaćanja učenika, obrazovne strategije trebaju biti usmjerene na aktivno uključivanje učenika. Učenje otkrivanjem, gdje učenici aktivno sudjeluju u postavljanju pitanja, formuliranju hipoteza i analiziranju rezultata, dodatno doprinosi razvoju njihovih kritičkih vještina i dubljem razumijevanju gradiva. Učinkovite metode, poput učenja s podrškom (engl. *scaffolding*), modeliranja, davanja povratnih informacija i suradničkog učenja, doprinose savladavanju koncepta međumolekulskih interakcija. *Scaffolding* ili „učenje na skelama“ se odnosi na obrazovnu strategiju koja uključuje pružanje nastavničke podrške učenicima kroz postupno usvajanje složenih koncepata. Razumijevanje predmeta poput kemije može se usporediti s izgradnjom zgrade. Baš kao što zgrada treba čvrste temelje, tako i učenje treba čvrste osnove. Nedostatak potrebnog predznanja može onemogućiti daljnje učenje ili rezultirati neadekvatnim razumijevanjem. Cooper i suradnici<sup>59,61,62</sup> su proveli niz istraživanja o međumolekulskim interakcijama u različitim vremenskim razmacima. Jedan od zaključaka im je da je *scaffolding* imao dugoročni učinak na neke učenike i smanjio pojavu pogrešnih shvaćanja. Osim toga, izuzetno važno se pokazalo korištenje vizualnih prikaza. Ipak, u istraživanjima koja su zahtijevala povezivanje napisanih objašnjenja i crteža pokazalo se da



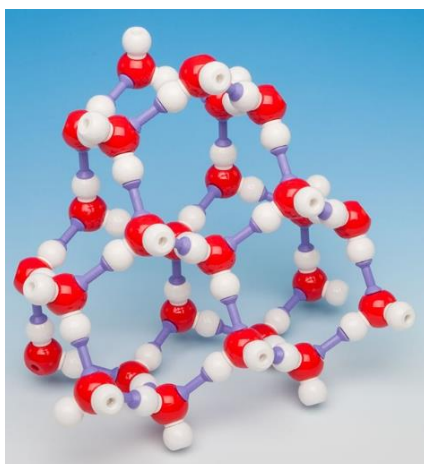
učenici i dalje imaju poteškoća (slika M11.). Ponekad njihovi napisani odgovori nisu bili u skladu s ilustracijama. Vizualni prikazi, poput dijagrama ili crteža, imaju ključnu ulogu u olakšavanju prepoznavanja odnosa među molekulama i vrstama međumolekulskih sila. Oni ne samo da pomažu učenicima da bolje razumiju apstraktne koncepte, već i nastavnicima pružaju uvid u njihovo znanje. Na temelju tih uvida, nastavnici mogu ciljano intervenirati kako bi ispravili pogrešna shvaćanja i unaprijedili razumijevanje.



Slika M11. Primjeri crteža učenika koji demonstriraju razumijevanje odabranih vrsta međumolekularnih sila. Slika je preuzeta i dorađena iz reference 59.

Kako bi se unaprijedilo razumijevanje međumolekulskih interakcija, nastavu treba obogatiti izvođenjem pokusa koji povezuju makroskopska svojstva tvari s njihovim čestičnim svojstvima. Uz to, bitno je uključiti interaktivne nastavne metode koje omogućuju učenicima da vizualiziraju i analiziraju međumolekulske interakcije. Računalne simulacije mogu pomoći pri povezivanju apstraktnih koncepata s konkretnim vizualnim prikazima. Na primjer, simulacije koje prikazuju stvaranje vodikovih veza, dipol-dipol interakcija i slično. Kao dobar primjer u nastavi pokazalo se korištenje gotovih molekularnih modela. Model na slici M12. jasno prikazuje kako specifična orijentacija molekula vode u kristalnoj strukturi dovodi do povećanja volumena tijekom smrzavanja. Elektrostatski dio vodikove veze prikazan je ljubičastom poveznicom, dok su kovalentne veze između atoma unutar molekula vode prikazane kratkim bijelim linijama, čime se ističe razlika između ovih dvaju dijelova vodikove veze, O-H...O. Međutim, komercijalni molekularni modeli za nastavu često nisu jeftini. Kao

ekonomičnija alternativa, modeli se mogu izraditi korištenjem kuglica od stiropora. Kuglice od stiropora mogu poslužiti kao molekule, dok se veze mogu predstaviti magnetima ili čičak trakom. Kako bi se ukazalo na jakost interakcija, za jače međumolekulske interakcije (poput dipol-dipol interakcija, vodikovih veza) može se koristiti jači čičak (slika M13. a)), a za slabije sile (na primjer Londonove disperzijske sile) slabiji čičak (slika M13. a)).




Slika M12. *Molymod* model kristalne strukture leda.<sup>63</sup>



a)

b)

Slika M13. Modeli izrađeni od kuglica od stiropora i čičak trake. Kuglice od stiropora predstavljaju molekule, a čičak veze između molekula: a) spojene dvije molekule ugljikova monoksida (CO) jačim čičkom (  ) kao demonstracija jakih dipol-dipol interakcija, b)

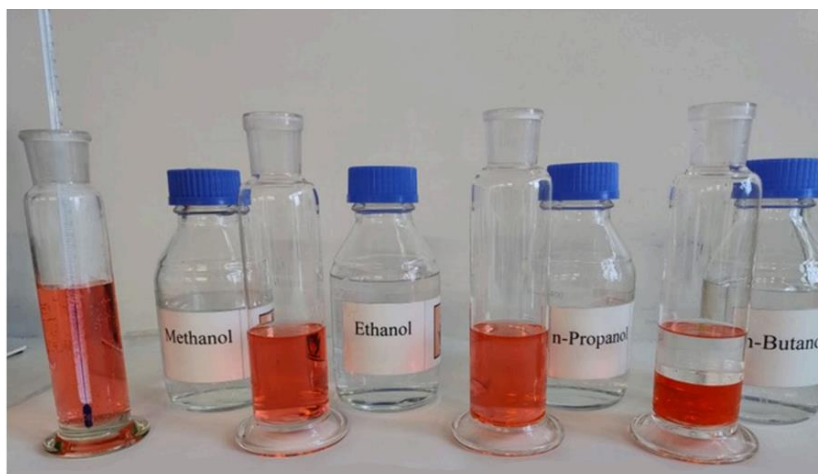
odvojene molekule metana ( $\text{CH}_4$ ) s jednim slabijim čičkom(○) koji predstavlja slabe Londonove disperzijske sile.<sup>64</sup>

#### 9.4. Priprema nastavnog sata

U ovom diplomskom radu predložen je 90-minutni nastavni sat posvećen obradi nastavne jedinice *Međumolekulske interakcije*, koja je dio nastavne cjeline *Kemijske veze*. Plan pripreme nastavnog sata temelji se na odabranim obrazovnim ishodima, navedenim u poglavlju 3.1., te na analizi najčešćih učeničkih pogrešaka (tablica M3.).

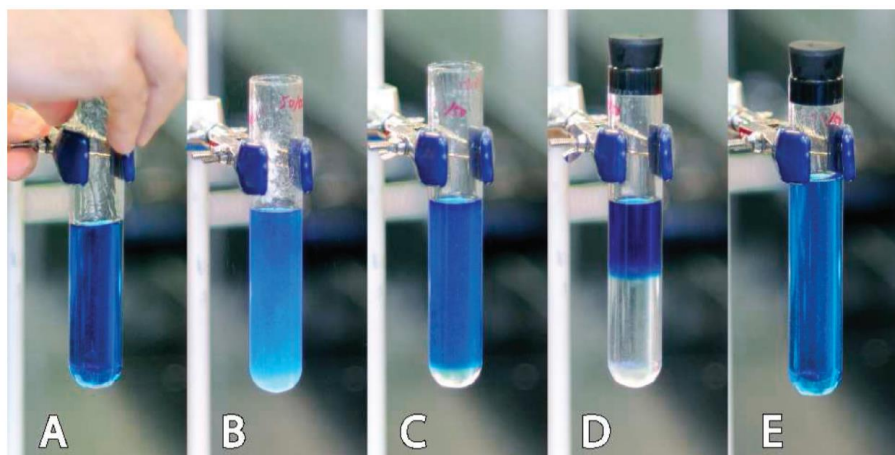
Učenici već posjeduju osnovna znanja o međumolekulskim interakcijama, uključujući klasifikaciju i definicije vrsti. 90-minutni nastavni sat kontinuirano je praćen s *Radnim listićem*. On im omogućuje ponavljanje i proširivanje postojećeg znanja kroz dobro odabrane zadatke i pokuse. Početak *Radnog listića* obuhvaća zadatke prepoznavanja različitih vrsta međumolekulskih interakcija kroz analizu specifičnih primjera, kao i zadatke usmjerene na ispravljanje najčešćih pogrešnih shvaćanja učenika.

Pri odabiru glavnih demonstracijskih pokusa za središnji dio sata razmatrana su brojna istraživanja, a kao inspiracija najviše su poslužila dva rada. Rad naslova „*Solubility and extractability in the pharmaceutical sciences: a demonstration to address these essential concepts*“, autora J. Liégeois, J. Hayen i H. Taouba<sup>65</sup>, demonstrira osnovne principe topljivosti i ekstrakcije na praktičan, interaktivan način. U navedenom radu proučavana je topljivost niza alkohola (metanol, etanol, propan-1-ol, butan-1-ol) u vodi i promjena temperature nakon njihovog miješanja (slika M14.). Navedena topljivost i temperatura ovisi o brojnim svojstvima, uključujući omjer polarnog/nepolarnog dijela molekule i sposobnosti stvaranja vodikovih veza. Po uzoru na navedeni rad, osmišljen je pokus za grupni rad koji se provodi tijekom nastavnog sata. Dodatnu inspiraciju za oblikovanje nastavnog sata pružio je rad pod naslovom „*A colorful solvent extraction demonstration for teaching the concept of “like dissolves like”*“, autora D. Dobberpuhl, L. Johnson i B. Mattson<sup>66</sup>, koji kroz demonstraciju ekstrakcije otapala prikazuje utjecaj međumolekulskih sila. Uloga ovog pokusa je povezati čestičnu razinu, odnosno građu molekula i međumolekulske interakcije s makroskopskim, fizikalnim svojstvima tvari. Odabrani pokus idealan je za nastavu jer odlikuje impresivnim vizualnim učinkom. Svi koraci pokusa i pripadni zadaci praćeni su *Radnim listićem*.



Slika M14. Topljivost alkohola (metanol, etanol, propan-1-ol, butan-1-ol) u vodi.<sup>65</sup>

U *Radnom listiću* uključen je zadatak s učinkom soljenja na jakost međumolekulskih interakcija. Za inspiraciju poslužio je članak Persona i suradnika.<sup>67</sup> Njihove „plave epruvete“ ukazuju da nakon dodavanja usitnjenog amonijevog sulfata u prahu, jakog elektrolita, otopini propan-2-ola i vode dolazi do razdvajanja slojeva (slika M15. D)). Vodi je prethodno dodana prehrambena plava boja. Do razdvajanja u dva sloja dolazi jer su vodikove veze između molekula vode i molekula propan-2-ola zamijenjene jačim interakcijama između iona i molekula voda (ion-dipol). Istovremeno, dipol-dipol interakcije između molekula vode i boje bivaju zamijenjene ion-dipol interakcijama između iona i molekula vode. Molekule plave prehrambene boje prelaze u gornji sloj epruvete te stvaraju dipol-dipol interakcije s molekulama propan-2-ola. Dodatkom vode u suvišku, cijela otopina je ponovo plave boje (slika M15. E)).



Slika M15. Glavni koraci postupka: A) 30 mL otopine propan-2-ola i vode s jednom kapljicom plave prehrambene boje, B) otopina alkohola nakon dodavanja 7 g usitnjelog amonijevog sulfata u prahu, C) otopina nakon snažnog mućkanja kako bi se sol bolje otopila, D) otopina nakon što su se slojevi razdvojili i E) otopina nakon dodatka dodatnih 15 mL vode.<sup>67</sup>

#### 9.4.1. Priprema pokusa

Za provedbu učeničkog i demonstracijskog pokusa korištene su kemikalije i ostali materijali, navedeni u tablici M4.

Tablica M4. Kemikalije i ostali materijali potrebni za pripremu nastavnog sata.

	<b>kemikalije</b>	<b>ostali materijali</b>
<b>učenički pokus (Pokus 1. u Radnom listiću)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• metanol</li> <li>• etanol</li> <li>• propan-1-ol</li> <li>• butan-1-ol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• epruvete</li> <li>• stalak za epruvete,</li> <li>• termometar</li> <li>• staklena čaša (100 mL)</li> <li>• žličica</li> </ul>
<b>demonstracijski pokus (Pokus 1'. u Radnom listiću)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vodena otopina metil crveno</li> <li>• vodena otopina bakrovog(II) sulfata (<math>c = 0,4 \text{ mol dm}^{-3}</math>)</li> <li>• pentan-1-ol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• željezni stalak</li> <li>• kolut-klema</li> <li>• lijevak za odijeljivanje (100 mL)</li> <li>• čep</li> </ul>

Napomena: Vodena otopina metil crveno pripremljena je otapanjem 25 mg pigmenta metil crvenog u 100 mL vode.

#### Učenički pokus (Pokus 1. u *Radnom listiću*)

U epruvete E1–E4 prvo je dodano 5 mL destilirane vode, a zatim jednak volumen odgovarajućeg alkohola (navedenih u tablici M4.). Kako bi se olakšala vizualizacija fenomena, voda je obojena s prehrambenom bojom. Za prva tri člana serije (metanol, etanol, propan-1-ol) odmah se dobiva homogena smjesa. Jasno se primjećuje smanjenje topljivosti između propan-1-ola i butan-1-ola. U pokusu s butan-1-olom dolazi do razdvajanja slojeva. U epruveti E2 dodatno se mjerila početna temperatura i temperatura smjese (etanol + voda). Učenici u tom pokusu uočavaju porast temperature smjese uslijed preraspodjele postojećih i stvaranja novih vodikovih veza između molekula oba spoja.

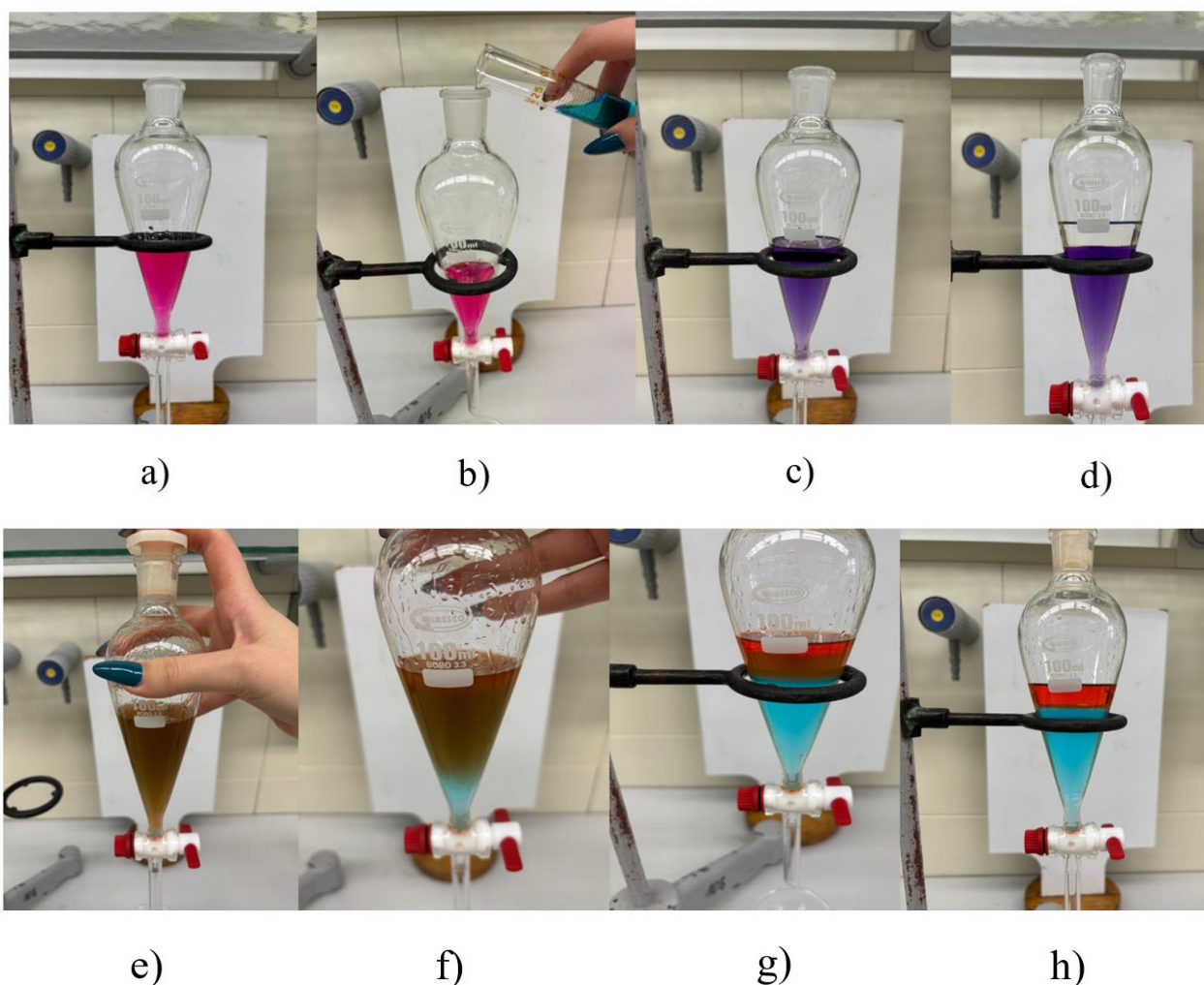
#### Demonstracijski pokus (Pokus 1'. u *Radnom listiću*)

Jednaki volumeni vodenih otopina metil crveno i plave otopine bakrova(II) sulfata miješaju se i stvaraju ljubičastu otopinu. Potom se dodaje pentan-1-ol, koji zbog svoje manje gustoće i niske topljivosti u vodi ostaje plutati na površini kao prozirni sloj. Nakon nekoliko sekundi snažnog mućkanja, alkohol se miješa s ostalim komponentama otopine. Nakon stajanja par sekundi, razdvoje se slojevi. Gornji sloj u lijevku za odjeljivanje sadrži pentan-1-ol i boju metil crveno, dok donji sloj je intenzivno plave boje jer sadrži  $\text{Cu}^{2+}$  ione (slika M17.).



Slika M16. Otopine korištene u demonstracijskom pokusu; s lijeva na desno: otopina bakrova(II) sulfata ( $c = 0,4 \text{ mol dm}^{-3}$ ), otopina metil crveno, pentan-1-ol.





Slika M17. Redoslijed događanja u demonstracijskom pokusu: a) otopina metil crveno, b) dodavanje otopine soli koja sadrži  $\text{Cu}^{2+}$  ione otopini metil crvenog, c) nakon dodavanja otopine s  $\text{Cu}^{2+}$  ionima otopini metil crvenog, d) nakon pažljivog dodavanja pentan-1-ol otopinama, e) i f) otopina neposredno nakon snažnog mućkanja otopine, g) nakon 10 sekundi stajanja i h) nakon 30 sekundi stajanja.

### Mjere opreza

Prilikom izvođenja demonstracijskog pokusa i pokusa u grupama potrebno je nositi zaštitne naočale. Iako otopina metil crveno nije klasificirana kao opasna, može izazvati iritaciju dišnih puteva ako se udiše. Pentan-1-ol je tekućina s relativno niskim tlakom para na sobnoj temperaturi (200 Pa pri 20 °C). Zapaljiv je, a njegove pare mogu izazvati iritaciju dišnih puteva. Također, pentan-1-ol može uzrokovati iritaciju kože, stoga je potrebno pažljivo rukovati njime,

kao i ostalim alkoholima koji se koriste u grupnom radu. Osiguravanje opreza prilikom rukovanja ovim kemikalijama ključno je za sigurnost svih sudionika.

#### 9.4.2. Nastavna priprema

U tablici M5. naveden je detaljan tijek nastavnog sata *Međumolekulske interakcije*, prikazan preko etapa nastavnog sata. Posebno su navedene aktivnosti nastavnika i učenika te sociološki oblici rada.

Tablica M5. Tijek nastavnog sata *Međumolekulske interakcije*.

ETAPE NASTAVNOG SATA	Aktivnosti učitelja/nastavnika	Aktivnosti učenika	Sociološki oblici rada
Uvodni dio 15 minuta	Nastavnik počinje nastavni sat ponavljanjem osnovnih definicija i primjera međumolekulskih interakcija. Učenicima zadaje da riješe 1. i 2. Zadatak u <i>Radnom listiću</i> . Odgovore na zadatak zajedno komentira s učenicima na ploči.	Učenici rješavaju zadatke u <i>Radnom listiću</i> , predviđene za ponavljanje stečenog znanja o međumolekulskim interakcijama. Sudjeluju u komentiranju rješenja zadataka.	Individualni, razredna rasprava
Središnji dio 60 minuta	Središnji dio sata započinje grupnim radom učenika. S ciljem motivacije i primjenjivanja znanja o međumolekulskim interakcijama pred učenike je stavljen pokus o topljivosti alkohola u vodi. Nastavnik demonstracijski pokazuje sav pribor i kemikalije koje će učenici koristiti u pokusu. Zadaje učenicima da provedu 1. i 2. Korak iz <i>Radnog listića</i> te pažljivo nakon svakog koraka provjerava rad svake grupe u razredu. Nakon 2. Koraka, nastavnik proziva predstavnika svake grupe da kažu kolika im je početna temperatura u drugoj epruveti. Zajedno uspoređuju temperature.  Nastavnik zadaje učenicima da riješe 3. Zadatak i odrade 3. i 4. Korak. Nastavnik traži od učenika da međusobno između grupa podijele opažanja i rezultate. Zadaje učenicima da riješe 4. – 6. Zadatak. Nastavnik sumira stečena opažanja i zaključke o Pokusu 1.	Učenici prema koracima iz <i>Radnog listića</i> , u grupnom radu, izvode Pokus 1 o topljivosti alkohola u vodi. Među grupama uspoređuju opažanja i rezultate.  Učenici rješavaju 3. Zadatak i odraduju sljedeće korake pokusa. Između grupa uspoređuju rezultate i opažanja. Učenici rješavaju 4. – 6. Zadatak.	Grupni rad, radni listić  Individualni rad, grupni rad, radni listić



	<p>Nastavnik zajedno s učenicima rješava 7. zadatak o učinku soljenja na jakost međumolekulskih interakcija. Razrednom raspravom dolazi do odgovora na pitanja.</p> <p>Nastavnik izvodi demonstracijski pokus – ekstrakciju otopina karakterističnih boja (Pokus 1'. u <i>Radnom listiću</i>). Cilj pokusa je ukazati na različite međumolekulske interakcije. Nastavnik demonstracijski pokazuje sav pribor i kemikalije koje će biti korištene u pokusu.</p> <p>Nakon što su učenici riješili Zadatak 1'., odnosno opisali polazne kemikalije, nastavnik izvodi 1'. i 2'. Korak. Traži od učenika da na osnovu provedenog pokusa o topljivosti alkohola pretpostave što će se dogoditi kada se otopini metil crvenog i bakrova(II) sulfata doda pentan-1-ol.</p> <p>Nastavnik zajedno komentira o pretpostavkama. U 3'. Koraku, nastavnik pažljivo dodaje pentan-1-ol, a učenici zapisuju opažanja i komentiraju pretpostavke. Nastavnik naglašava da se slojevi ne miješaju.</p> <p>Nastavnik povezuje 3'. Zadatak s zadatkom o učinku soljenja. Zajedno s učenicima komentira odgovore.</p> <p>Nastavnik pažljivo izvodi 4'. Korak i komentira opažanja. Zadaje učenicima da sumiraju promjene boja bojanjem sadržaja lijevka u 4'. Zadatku.</p> <p>Nastavnik provjerava imaju li svi učenici dobro obojene sadržaje lijevka za odjeljivanje. Nakon što provjeri imaju li svi ista opažanja, nastavnik prelazi na teorijsku podlogu eksperimenta. Zadaje učenicima da samostalno probaju riješiti 5'. i 6'. Zadatak. Potom razrednom raspravom dolazi s učenicima zajedno do rješenja. Nastavnik povezuje opažanja s</p>	<p>Učenici nude rješenja za 7. Zadatak i sudjeluju u raspravi.</p> <p>Učenici bilježe opažanja o polaznim kemikalijama u 1'. Zadatak. Učenici sve korake pokusa pažljivo prate koristeći <i>Radni listić</i>.</p> <p>Zapisuju pretpostavke o ishodima pokusa na osnovu zaključaka iz pokusa u grupnom radu. Nekoliko učenika čita svoje pretpostavke.</p> <p>Nakon demonstracijskog pokusa zapisuju opažanja. Jedan učenik skicira pokus na ploču. Odgovaraju na nastavnikova pitanja i sudjeluju u razrednoj raspravi o pokusu.</p> <p>Učenici prvo samostalno rješavaju 3'. Zadatak te onda s nastavnikom komentiraju odgovore.</p> <p>Učenici bilježe opažanja za 4'. Korak u <i>Radni listić</i>, te rješavaju 4'. Zadatak.</p> <p>Učenici rješavaju 5'. i 6'. Zadatak i komentiraju s razredom i nastavnikom.</p>	<p>Individualni rad, razredna rasprava</p> <p>Frontalni rad, individualni rad</p> <p>Individualni rad</p> <p>Individualni rad, razredna rasprava</p> <p>Individualni rad, razredna rasprava</p> <p>Individualni rad</p> <p>Individualni rad, razredna rasprava</p>
--	--	--	--

	međumolekulskim interakcijama i građom molekula.		
Završni dio 15 min	Nastavnik zajedno s učenicima sistematizira stečeno znanje o međumolekulskim interakcijama rješavajući tablicu u 7'. Zadatku. Tablicu piše na ploču te nakon što je učenici pokušaju samostalno riješiti proziva nekoliko učenika da je nadopune na ploči.	Učenici rješavaju 7'. Zadatak. Nekoliko učenika dolazi na ploču popuniti tablicu.	Razredna rasprava, individualni rad

#### 9.4.3. Prijedlog radnog listića za nastavni sat Međumolekulske interakcije

**Razred:** 1. razred srednje škole

**Nastavna cjelina:** Kemijske veze

**Nastavna jedinica:** Međumolekulske interakcije

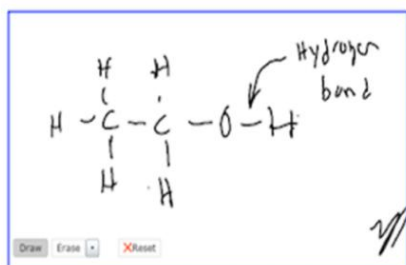
**ZADATAK 1** Odredite koje vrste međumolekulskih interakcija djeluju između navedenih čestica.

otopljena tvar (A)	otapalo (B)	A-A	B-B	A-B
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	H <sub>2</sub> O	vodikove veze	vodikove veze	vodikove veze
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	CHCl <sub>3</sub>	vodikove veze	dipol-dipol	dipol-dipol
I <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Londonove disperzijske sile	vodikove veze	dipol-inducirani dipol
I <sub>2</sub>	CCl <sub>4</sub>	Londonove disperzijske sile	Londonove disperzijske sile	Londonove disperzijske sile
NaCl	H <sub>2</sub> O	/	vodikove veze	ion-dipol

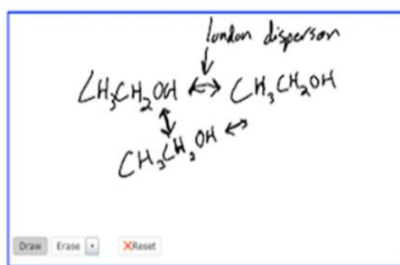
**ZADATAK 2** Učenici su dobili zadatak da crtežom prikažu kako se povezuju tri molekule etanola (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) i navedu dominantnu međumolekulsku interakciju. Proučite izdvojene odgovore, te:

- ako smatrate da je odgovor točan, opravdajte ga uz objašnjenje,

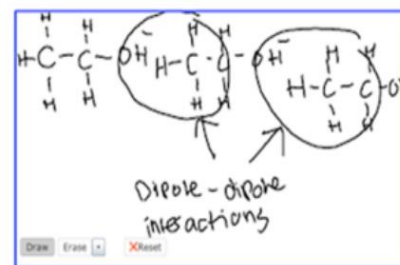
- ako smatrate da je odgovor netočan, ispravite ga uz objašnjenje.



a)



b)



c)

- a) \_\_\_\_\_
- b) \_\_\_\_\_
- c) \_\_\_\_\_

- a) Odgovor je netočan. Učenik je nacrtao samo jednu molekulu etanola. Označio je vodikovu vezu unutar molekule, između atoma O i H.

**Ispravno:** Na crtežu je potrebno nacrtati još dvije molekule etanola i pravilno označiti vodikovu vezu. Vodikova veza je privlačna međumolekulska interakcija između atoma vodika povezanog na elektronegativni atom jedne molekule etanola s elektronegativnim atomom kisika druge molekule etanola,  $\text{O}-\text{H}\cdots\text{O}$ .

- b) Odgovor je netočan. Učenik smatra da su dominantne međumolekulske interakcije između molekula etanola Londonove disperzijske sile. Iz strelica na crtežu nije jasno između kojih dijelova molekule smatra da se stvaraju interakcije.

**Ispravno:** Londonove disperzijske sile su prisutne između svih molekula, uključujući etanol, ali su relativno slabe i svakako nisu dominantne međumolekulske interakcije u ovom primjeru. Vodikova veza je dominantna međumolekulska interakcija između molekula etanola.

- c) Odgovor je netočan. Učenik smatra da su dominantne međumolekulske interakcije između molekula etanola dipol-dipol interakcije. Iz crteža se vidi da učenik nije upoznat s definicijom dipol-dipol interakcija. Prema njemu, one predstavljaju interakciju između molekula koje imaju pozitivan i negativan kraj, koji se međusobno privlače. Na učenikovom crtežu, molekula etanola ima negativni naboj.

**Ispravno:** Molekula etanola nema ukupni naboj. Iako postoji razlika u elektronegativnosti između atoma unutar molekule što za posljedicu ima njenu polarnost, molekula kao cjelina ostaje neutralna. Dominantne međumolekulske interakcije između molekula etanola su vodikove veze.

## POKUS 1. Čarolija alkohola

**Pribor:** epruvete, stalak za epruvete, termometar, staklena čaša (100 mL), žličica

**Kemikalije:** metanol, etanol, propan-1-ol, butan-1-ol, plava prehrambena boja, voda

**Procjena opasnosti i rizika:** Obavezno nositi zaštitne naočale!

**KORAK 1** U čašu ulijte 50 mL destilirane vode i par kapi prehrambene boje, te promiješajte žličicom. **Zabilježite opažanja.**

---

Nastaje otopina plave boje.

**KORAK 2** Termometrom izmjerite temperaturu vode iz **KORAKA 1.**

---

$t_{\text{vode}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$

**ZADATAK 3** Obrazložite promjenu u **KORAKU 1.**

---

Voda i boja se dobro miješaju. To ukazuje da su molekule „plave boje“ polarne molekule, kao i molekule vode. Miješanje je moguće uslijed stvaranja novih međumolekulskih interakcija.

**KORAK 3** U epruvete E1–E4 ulijte redom po 5 mL alkohola: metanola, etanola, propan-1-ola, butan-1-ola. Termometrom izmjerite temperaturu etanola (E2).

---

$t_{\text{etanol}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$

**KORAK 4** U epruvetu E2 stavite termometar. U epruvete E1–E4 potom dodajte 5 mL obojene vode iz čaše (iz **KORAKA 1**). Pažljivo pratite promjene i zabilježite opažanja.

E1: \_\_\_\_\_

E2: \_\_\_\_\_

E3: \_\_\_\_\_

E4: \_\_\_\_\_

E1: Plavo obojena voda i metanol su se pomiješali.

E2: Miješanjem vode i etanola povećava se temperatura otopine. Plavo obojena voda i etanol su se pomiješali.  $t_{\text{voda+etanol}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

E3: Plavo obojena voda i propan-1-ol su se pomiješali.

E4: Plavo obojena voda i butan-1-ol se ne miješaju, razdvajaju se slojevi. Donji sloj sadržava epruvete je plave boje, a gornji bezbojan.

**ZADATAK 4** Objasnite promjenu temperature smjese u epruveti E2.

---

Miješanje etanola s vodom dovodi do povećanja temperature smjese. To je rezultat preraspodjele postojećih i stvaranja novih vodikovih veza između molekula oba spoja.

**ZADATAK 5** Usporedite i objasnite sva opažanja u epruvetama E1–E4.

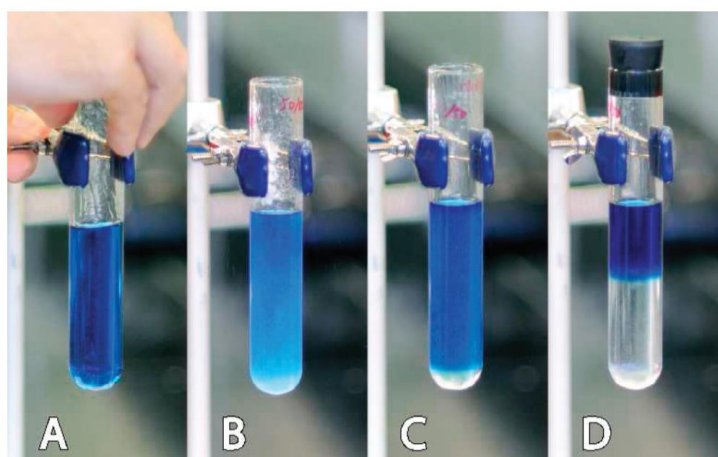
---

U pokusu s butan-1-olom došlo je do razdvajanja slojeva, dok s ostalim alkoholima nije. S povećanjem duljine ugljikovodičnog lanca alkohola, nepolarne osobine molekule alkohola postaju dominantne, što otežava miješanje s polarnim molekulama vode.

**ZADATAK 6** Na osnovu odgovora iz **ZADATKA 5** objasnite izreku „slično se otapa u sličnom“.

Izreka „slično se otapa u sličnom“ opisuje način otapanja tvari. Polarnost tvari ima značajan, ali ne i isključiv utjecaj na međusobnu topljivost. Polarne tvari se obično dobro otapaju u polarnim otapalima, dok se nepolarne tvari bolje otapaju u nepolarnim otapalima. Kada postoji veći nesklad u polarnosti između tvari i otapala, topljivost je najčešće slaba.

**ZADATAK 7** Učenik je proveo pokus „plave epruvete“, u kojem je u epruvetu dodao 15 mL propan-2-ola, 15 mL destilirane vode i jednu kap plave prehrambene boje. Nakon dodatka 7,0 g usitnjenog amonijevog sulfata u prahu i snažnog mućkanja, razdvojili su se slojevi. Glavni koraci pokusa prikazani su na slici 1.



Slika R1. Glavni koraci pokusa „plave epruvete“: A) 30 mL otopine propan-2-ola i vode s jednom kapljicom plave prehrambene boje, B) otopina alkohola nakon dodavanja 7 g usitnjenog amonijevog sulfata u prahu, C) otopina nakon snažnog mućkanja kako bi se sol bolje otopila, D) otopina nakon što su se slojevi razdvojili.

a) Navedite dominantne međumolekulske interakcije, prisutne među molekulama u sadržaju epruvete na slici 1 (A).

Vodikove veze su dominantne između molekula vode i molekula alkohola. Molekule boje s molekulama vode i alkohola ostvaruju dipol-dipol interakcije.

b) Nakon dodatka amonijevog sulfata u sadržaj epruvete, došlo je do razdvajanja slojeva. Napišite naziv ili kemijsku formulu značajne vrste, prisutne u sadržaju epruvete na slici 1 (D).

gornji sloj: plava boja,  $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_3$   
donji sloj: molekule vode,  $\text{NH}_4^+$  (aq),  $\text{SO}_4^{2-}$  (aq)

- c) Predložite eksperimentalni način kojim bi učenik mogao provjeriti sadržaj slojeva u epruveti na slici 1 (D).

---

Može se provjeriti električna vodljivost nastalih slojeva u epruveti ili zapaliti uzorak svakog sloja iz epruvete.

- d) Objasnite opažanja na slici 1 (D) te navedite koje su sada dominantne međumolekulske interakcije, prisutne među kemijskim vrstama u sadržaju epruvete. Usporedite s međumolekulskim interakcijama prisutnim među molekulama prije dodatka soli.

---

Dolazi do razdvajanja slojeva (alkoholni i vodeni sloj). Nakon dodatka soli, vodikove veze između molekula vode i molekula alkohola zamijenjene su jačim interakcijama između iona i molekula voda (ion-dipol). Također, dipol-dipol interakcije između molekula vode i molekula boje zamijenjene su jačim ion-dipol interakcijama između iona i molekula vode. Molekule plave boje zato prelaze u gornji sloj, gdje ostvaraju dipol-dipol interakcije s molekulama alkohola.

### **POKUS 1'. Čarolija slojeva (demonstracijski pokus)**

**Pribor:** željezni stalak, kolut-klema, lijevak za odjeljivanje (100 mL), čep

**Kemikalije:** vodena otopina metil crveno, vodena otopina bakrovog(II) sulfata, pentan-1-ol

**Procjena opasnosti i rizika:** Obavezno nositi zaštitne naočale! Pentan-1-ol je zapaljiv!

**ZADATAK 1'** Promotrite polazne kemikalije i zapišite opažanja.

---

Vodena otopina metil crveno je bistra otopina crvene/narančaste boje, bez mirisa. Vodena otopina bakrovog(II) sulfata je bistra otopina plave boje, bez mirisa. Pentan-1-ol je bezbojna tekućina, karakteristična mirisa.

**KORAK 1'** Učvrstite kolut-klemu na polovici visine željeznog stalka. U kolut-klemu postavite lijevak za odjeljivanje. Provjerite je li pipac na lijevku zatvoren.

**KORAK 2'** Ulijte u lijevak za odjeljivanje 20 mL vodene otopine metil crveno. Potom dodajte u lijevak 20 mL vodene otopine bakrovog(II) sulfata i lagano promiješajte sadržaj lijevka.

**Zabilježite opažanja.**

---

Miješanjem vodene otopine metil crveno i vodene otopine bakrovog(II) sulfata dobivena je otopina ljubičaste boje.

**ZADATAK 2'** Uz pomoć **POKUSA 1** „Čarolija alkohola“ pretpostavite što će se dogoditi kada se u lijevak pažljivo ulije 20 mL pentan-1-ola.

---

S obzirom da se butan-1-ol nije miješao s vodom, učenici pretpostavljaju da će se odvojiti alkoholni sloj pentan-1-ola i vodeni sloj.

**KORAK 3'** U lijevak pažljivo i bez potresanja ulijte 20 mL pentan-1-ola. **Zabilježite opažanja.**

---

Odvajaju se slojevi. Ljubičasta otopina se nalazi u donjem, a prozirna tekućina u gornjem dijelu lijevka.

**ZADATAK 3'** Opišite sastav slojeva koji su nastali u **KORAKU 3'**. Objasnite na temelju čega ste to zaključili. Pri tome se poslužite odgovorima iz **ZADATKA 7**, vezanima uz „plave epruvete“.

---

Sastav slojeva može se zaključiti usporedbom gustoće i boje otopina. Pentan-1-ol se ne miješa s ljubičastom otopinom. On čini gornji, prozirni sloj. Ima manju gustoću od vode, odnosno ljubičaste otopine. Donji sloj je ljubičasta vodena otopina, nastala miješanjem vodene otopine metil crvenog i vodene otopine bakrova(II) sulfata. Također, sastav sadržaja slojeva može se provjeriti tako da se uzorak svakog sloja zapali ili da se ispita električna vodljivost nastalih slojeva.

**KORAK 4'**

a) Začepite lijevak i snažno promućkajte njegov sadržaj. **Zabilježite opažanja.**

---

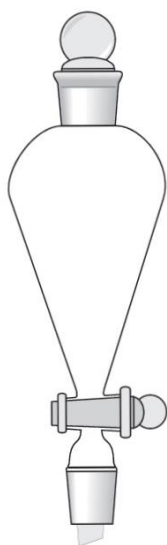
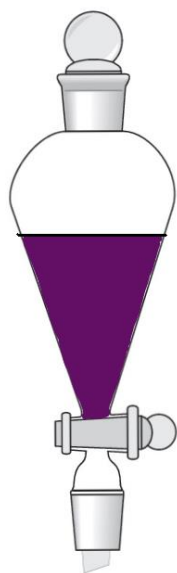
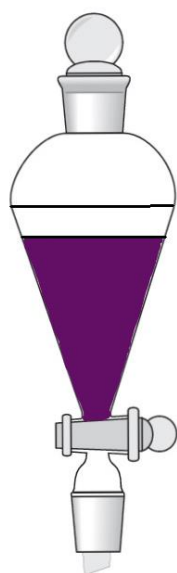
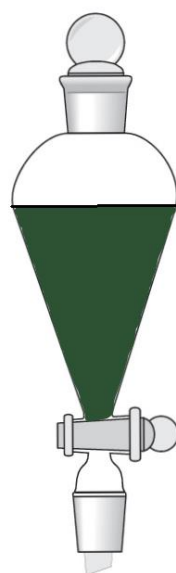
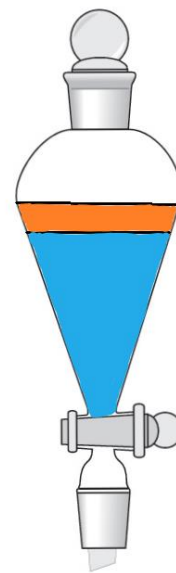
Nakon što je promućkan sadržaj, slojevi su se spojili. Otopina je zelene boje.

b) Okrenite lijevak vratom prema gore i otvorite pipac tako da se tlak u lijevku izjednači s atmosferskim tlakom. Stavite lijevak u kolut-klemu i pričekajte. **Zabilježite opažanja.**

---

Nakon nekog vremena slojevi su se ponovo odvojili. Donji sloj je intenzivno plave boje, a gornji sloj narančaste boje.

**ZADATAK 4'** Opažanja iz **KORAKA 2', 3' i 4'** prikažite crtežom tako da obojite sadržaj lijevka za odjeljivanje odgovarajućom bojom.

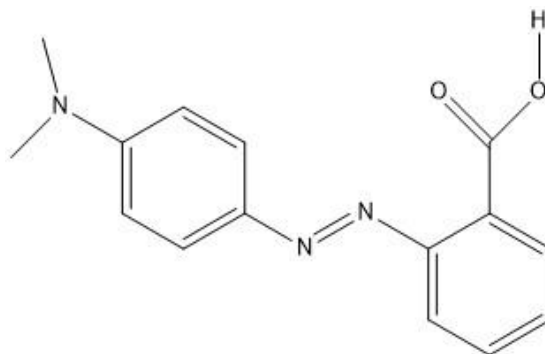
**KORAK 2'****KORAK 3'****KORAK 4' a)****KORAK 4' b)****KORAK 2'****KORAK 3'****KORAK 4' a)****KORAK 4' b)**



**ZADATAK 5'** Opišite sastav slojeva koji su nastali u **KORAKU 4' b)** i objasnite na temelju čega ste to zaključili. Provjerite ili dopunite dio svog odgovora nakon što riješite zadatak koji slijedi (**ZADATAK 6'**).

U Koraku 4' b) razdvajaju se slojevi; donji sloj postaje intenzivno plave boje, dok gornji sloj poprima narančastu boju. Ioni bakra(II) tvore ion-dipol interakcije s molekulama vode, čime se stabiliziraju u donjem vodenom sloju. Karakteristična plava boja potječe upravo od  $\text{Cu}^{2+}$  iona. Gornji sloj sadrži pentan-1-ol i boju metil crveno. Boja metil crveno je djelomično topljiva u vodi, ali ima veću sklonost prema pentan-1-olu zbog kompatibilnosti polariteta i disperzijskih sila. Narančasta boja je rezultat koncentracije metil crvenog u pentan-1-olu.

**ZADATAK 6'** Na slici 2. prikazana je strukturna formula molekule boje metil crveno. Usporedite topljivost metil crvenog u vodi i pentan-1-olu obzirom na polarnost i moguće međumolekulske interakcije.



Slika R2. Strukturna formula molekule boje metil crveno.

Sa slike 2. vidljivi su polarni dijelovi molekule (karboksilna skupina ( $-\text{COOH}$ ) i azo-skupina ( $-\text{N}=\text{N}-$ )) koji mogu sudjelovati u stvaranju vodikovih veza i dipol-dipol interakcija. Ti dijelovi čine molekulu djelomično topljivom u vodi.

Nepolarni dijelovi molekule boje su aromatski prstenovi i metilne skupine ( $-\text{CH}_3$ ). Molekula pentan-1-ola je manje polarna od molekule vode zbog dugačkog ugljikovodičnog lanca. Dipol-dipol interakcije prisutne između molekula boje i molekula vode nisu dovoljno jake da zadrže boju metil crveno da se ne odvaja u više nepolarniji pentan-1-ol. Tada prevladavaju disperzijske sile.

**ZADATAK 7'** Popunite tablicu nazivima dominantnih međumolekulskih interakcija između kemijskih vrsta u **KORAKU 4' b)**.

	molekule vode	molekule pentan-1-ola	molekule boje metil crveno	$\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$
molekule vode	vodikove veze	-	-	ion-dipol interakcije
molekule pentan-1-ola	-	vodikove veze, disperzijske sile	vodikove veze, disperzijske sile	X
molekule boje metil crveno	-	dipol-dipol (vodikove veze), disperzijske sile	dipol-dipol, disperzijske sile	-
$\text{Cu}^{2+}(\text{aq})$	ion-dipol interakcije	-	-	X

X – interakcije koje nisu razmatrane

## 9.5. Zaključak

Metodički dio ovog diplomskog rada ističe važnost pažljivog planiranja nastavnih aktivnosti koje omogućuju učenicima aktivno sudjelovanje u nastavi. Nastavna priprema za nastavnu jedinicu *Međumolekulske interakcije* temeljena je na odgojno-obrazovnim ishodima prema planu i programu prvog razreda gimnazije, uzimajući u obzir najčešća učenička pogrešna shvaćanja pojmova povezanih s međumolekulskim interakcijama. Pripremljeni radni listić, pokusi i nastavna sredstva osmišljeni su tako da potiču istraživački usmjerenu nastavu. *Radni listić* osmišljen je kao ključni alat za vođenje grupnog rada u kojem učenici istražuju, opažaju i dolaze do zaključaka temeljenih na vlastitim eksperimentima. Učenici se stavljaju u središte nastavnog procesa, čime se potiče njihova motivacija i razvijaju vještine poput timskog rada, samostalnog razmišljanja i rješavanja problema. Nastavnik u takvom pristupu treba djelovati kao mentor, pružati smjernice i podršku bez preuzimanja kontrole nad procesom otkrivanja. Korištenjem strategije učenja otkrivanjem, u nastavnom satu povezana je građa molekula i međumolekulske interakcije s fizikalnim svojstvima tvari. Povezivanje makroskopskih svojstava tvari s njihovim čestičnim svojstvima izuzetno je važno. Pri izradi metodičke pripreme, integracija makroskopske, čestične i simboličke razine bila je ključna za osiguranje

dubljeg razumijevanja kemijskih koncepata kod učenika. Svaka od ovih razina pruža jedinstveni uvid u kemijske pojave i zajedno doprinose stvaranju ciljanog koncepta.

## 9.6. Literaturni izvori

39. Kurikulum nastavnog predmeta kemija za osnovne škole i gimnazije, Ministarstvo znanosti i obrazovanja, Zagreb, 2019. (datum pristupa 29.12.2024.)
40. M. Sikirica, *Metodika nastave kemije*, Školska knjiga, Zagreb, 2003, str. 3–51.
41. M. Luetić, V. Petrović Peroković, T. Preočanin, S. Rupčić Petelinc, D. Turčinović, *Udžbenik kemije u prvom razredu gimnazije*, Školska knjiga, Zagreb, 2019.
42. Z. Popović, Lj. Kovačević, *Udžbenik iz kemije za prvi razred gimnazije*, Alfa, Zagreb, 2022.
43. T. Banović, K. Holenda, S. Lacić, E. Kovač-Andrić, N. Štiglić, *Kemija 7*, udžbenik kemije za sedmi razred osnovne škole, Profil, Zagreb, 2018.
44. M. Mamić, D. Mrvoš- Sermek, V. Peradinović, N. Ribarić, *Kemija 7*, udžbenik iz kemije za sedmi razred osnovne škole, Alfa, Zagreb, 2019.
45. <https://www.chemistrylearner.com/polarity/hf-polarity> (datum pristupa 2.1.2025.)
46. [https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Dipolna\\_molekula\\_vode.png](https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Dipolna_molekula_vode.png) (datum pristupa 2.1.2025.)
47. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Water-elpot-transparent-3D-balls.png> (datum pristupa 12.2.2025.)
48. M. S. Silberberg, *Chemistry, the molecular nature of matter and change (5ed)*, McGrawHill, New York, 2017.
49. [https://www2.chemistry.msu.edu/courses/cem151/Intramolecularforces\\_Ch11.pdf](https://www2.chemistry.msu.edu/courses/cem151/Intramolecularforces_Ch11.pdf) (datum pristupa 30.12.2024.)
50. D. Nelson, M. Cox, *Lehninger Principles of Biochemistry (8ed)*, W. H. Freeman, 2021.
51. <https://www.khanacademy.org/test-prep/mcat/chemical-processes/covalent-bonds/a/intramolecular-and-intermolecular-forces> (datum pristupa 12.2.2025.)
52. S. E. Harding, G. Channell, M. K. Phillips-Jones, *Biochem. Soc. Trans.* **46** (2018) 1171–1182.
53. M. Barić Tominac, A. Habuš, S. Liber, R. Vladušić, *Kemija 1*, udžbenik kemije za 1. razred gimnazije, Profil, 2019.
54. K. Taber, *Chemical misconceptions – prevention, diagnosis and cure; Volume I: theoretical background*, Royal Society of Chemistry, London, 2002, str. 1–83.
55. R. F. Peterson, D. F. Treagust, P. J. Garnett, *J. Res. Sci. Teach.* **26** (1989) 301–314.
56. H. J. Schmidt, B. Kaufmann, D. F. Treagust, *Chem. Educ. Research and Practice* **10** (2009) 265–272.

57. J. Henderleiter, R. Smart, J. Anderson, O. Elian, *J. Chem. Educ.* **78** (2001) 1126–1130.
58. R. Vladušić, *Metodičko znanje o kemijskim vezama s naglaskom na jezična pitanja u Republici Hrvatskoj*, Doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Splitu, 2017, str. 110.
59. M. M. Cooper, L. C. Williams, S. M. Underwood, *J. Chem. Educ.* **92** (2015) 1288–1298.
60. M. Ulfah, E. Erlina, F. M. Pratiwiningrum, A. F. Wafiq, Y. B. Juahir, *Jurnal IPA & Pembelajaran IPA* **8** (2024) 39–51.
61. K. Noyes, M. M. Cooper, *J. Chem. Educ.* **96** (2019) 1821–1832.
62. M. M. Cooper, L. M. Corley, S. M. Underwood, *J. Res. Sci. Teach.* **50** (2013) 699–721.
63. <https://gddizajn.hr/product/led-model-ledenog-kristala-mko-123-26/> (datum pristupa 3.1.2025.)
64. D. C. Bromfield Lee, G. A. Beggs, *J. Chem. Educ.* **98** (2021) 1328–1334.
65. J. F. Liégeois, J. L. Hayen, H. Taouba, *J. Chem. Educ.* (2024) **101** 5547–5555
66. D. Dobberpuhl, L. Johnson, and B. Mattson, *J. Chem. Educ.* **99** (2022) 3342–3345.
67. E. C. Person, D. R. Golden, and B. R. Royce, *J. Chem. Educ.* **87** (2010) 1332–1335.

## § 10. ŽIVOTOPIS

### Osobni podatci

Ime i prezime: Marina Bogdanović

Datum rođenja: 26. svibnja 2000.

Mjesto rođenja: Nova Gradiška

### Obrazovanje

2007.–2015. Osnovna škola Ljudevita Gaja Nova Gradiška

2015.–2019. Opća gimnazija Nova Gradiška

### Sudjelovanja u popularizaciji znanosti

2023. i 2024. “Dan i noć na PMF-u”, Fizika danas