

# Utjecaj magnetskog polja na površinsku napetost nekih tekućina

---

Kisić, Lucija

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:868160>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-26**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Lucija Kisić

**Utjecaj magnetskog polja na površinsku napetost nekih tekućina**

**ZAVRŠNI RAD**

**1. Voditelj rada:** Dr. sc. Vladimir Dananić, izv. prof.

**Članovi ispitnog povjerenstva:**

1. Dr. sc. Vladimir Dananić, izv. prof.
2. Dr. sc. Zoran Mandić, izv. prof.
3. Dr. sc. Ante Jukić, izv. prof.

**Zagreb, rujan 2017.**

## SAŽETAK

Površinska napetost je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo površine tekućine zbog kojega se ploština (površina) slobodne površine tekućine smanjuje. Uzrok je površinske napetosti asimetrični raspored među molekularnih sila na granici faza. Kako bi vidjeli kako magnetsko polje utječe na površinsku napetost zadanih tekućina, radi se niz mjerenja, da bi se rezultati mogli usporediti. U istraživanju smo koristili dvije polarne tekućine, redestiliranu vodu i formamid i jednu nepolarnu tekućinu, dijodometan. Ispitivane tekućine nanose se na uzorke aluminijska, bakra, željeza i teflona i pomoću goniometra se dobivaju vrijednosti kontaktnog kuta. Ista mjerenja se ponavljaju u prisutstvu magneta. Na temelju dobivenih rezultata kontaktnog kuta, promatraju se interakcije između hifrofilnosti i hidrofobnosti uzoraka i tekućine. Uporaba dvije polarne i jedne nepolarne tekućine, omogućava izračun vrijednosti slobodne površinske energije po Owens Wendt i Wu modelu. Vanjsko magnetsko polje može smanjiti doprinos polarne komponente slobodne površinske energije, a vrlo malo utječe na disperznu komponentu slobodne površinske energije. Polarna komponenta slobodne površinske energije se najviše mijenja kod teflona. Taj podatak nam govori da magnetsko polje kod teflona djeluje samo na tekućinu, dok kod drugih materijala djeluje i na tekućinu i na materijal.

## **Ključne riječi**

Površinska energija

Površinska napetost

Kohezivna energija

Kontaktni kut

Goniometar

Magnet

Magnetsko polje

Hidrofobnost

Susceptibilnost

## SUMMARY

Surface tension is a physical size that describes the property of the liquid surface for which the surface of the free surface of the liquid is reduced. The cause of surface tension is the asymmetric distribution of intermolecular forces at the phase boundary. To see how the magnetic field affects the surface tension of given liquids, a series of measurements are used to compare the results. In the study, we used two polar solvents, redistilled water and formamide, and one nonpolar fluid, Diiodomethane. Examined fluids are applied to aluminum, copper, iron and teflon samples, and by using goniometer the values of the contact angle are obtained. The same measurements are repeated in the presence of magnets. Based on the results of the contact angle results, interactions between the hyphrophilicity and the hydrophobicity of the samples and the fluid are observed. Using two polar and one nonpolar fluids allows the calculation of the free surface energy values by Owens Wendt and Wu model. The outer magnetic field can reduce the contribution of the polar component of free surface energy and have very little effect on the dispersant component of free surface energy. The polar component of free surface energy changes most with teflon. This information tells us that the magnetic field in teflon only acts on the liquid, while in other materials it acts also on the liquid and on the material.

## **Key words**

Surface energy

Surface tension

Cohesion energy

Contact angle

Goniometer

Magnet

Magnetic field

Hydrophobicity

Susceptibility

*Iznimno se zahvaljujem mentoru, izv. prof. dr. sc. Vladimiru Dananiću, na odabranoj temi, organiziranosti, pomoći i strpljenju koje mi je pruženo tijekom procesa pisanja i ispravljanja završnog rada.*

*Također se zahvaljujem prof. dr. sc. Mireli Leskovic na velikoj potpori, stručnoj susretljivosti, pomoći i korisnim savjetima tijekom izvođenja i pisanja eksperimentalnog dijela završnog rada.*

## SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	6
<b>1. UVOD</b> .....	7
<b>2. TEORIJSKI DIO</b> .....	9
<b>2.1 SLOBODNA POVRŠINSKA ENERGIJA</b> .....	9
<b>2.2. POVRŠINSKA NAPETOST</b> .....	10
<b>2.3 KOHEZIJA</b> .....	13
<b>2.4 ADHEZIJA</b> .....	14
<b>2.5 MATERIJALI I TEKUĆINE IZ EXPERIMENTA</b> .....	14
<b>2.6 KONTAKTNI KUT</b> .....	17
<b>2.7 METODE MJERENJA KONTAKTNOG KUTA</b> .....	19
<b>2.8 ODREĐIVANJE SLOBODNE POVRŠINSKE ENERGIJE POMOĆU KONTAKTNOG KUTA</b> .....	20
<b>2.9 MAGNETSKO POLJE</b> .....	24
<b>3. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	30
<b>3.1 PRIPREMA MATERIJALA</b> .....	30
<b>3.2 PRIPREMA TEKUĆINA</b> .....	30
<b>3.3 KORIŠTENI MJERNI UREĐAJI</b> .....	30
<b>3.4 KORIŠTENI MAGNET</b> .....	32
<b>3.5 MJERENJE KONTAKTNOG KUTA</b> .....	32
<b>4. REZULTATI I RASPRAVA</b> .....	34
<b>4.1 REZULTATI KONTAKTNOG KUTA ZA STANDARDNE OTOPINE</b> .....	34
<b>4.2 REZULTATI SLOBODNE POVRŠINSKE ENERGIJE UZORAKA</b> .....	40
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	48
<b>6. POPIS SIMBOLA:</b> .....	49
<b>7. POPIS LITERATURE</b> .....	50



## 1. UVOD

Molekula u unutrašnjosti tekućine sa svih je strana okružena istovrsnim molekulama s kojima među djeluje. Rezultantna sila koja djeluje na nju stoga je jednaka nuli. Oko molekule na površini tekućine istovrsne molekule se poslože u obliku polukugle. Zbog takvog rasporeda, rezultantna sila nad spomenutom molekulom usmjerena je prema središtu tekućine. Ona je to veća što su svojstva susjednog fluida različitija od svojstava promatrane tekućine, budući da određena interakcija postoji i između površinskih molekula i molekula tvari s kojom dotična tekućina graniči.

Površinska napetost ( $\sigma$ ) može se definirati kao mjera za silu kojom bi valjalo djelovati na molekule na površini tekućine da one pokazuju jednaku silu međudjelovanja kao i molekule u njenoj unutrašnjosti. Ova fizička veličina izražava koliko je rada odnosno energije potrebno uložiti da bi se nadvladale kohezivne sile na površini tekućine kako bi se površina povećala za određen iznos.

$$dw = \sigma dA$$

gdje je  $w$  rad, a  $A$  površina tekućine.

Mjerna jedinica kojom se iskazuje vrijednost površinske napetosti jest  $\text{N m}^{-1}$ .

Ovaj fenomen se javlja na granici dva fluida. Ukoliko su oba tekućine koje se ne miješaju, govori se o među površinskoj odnosno interfacijalnoj napetosti. Ako je jedan od njih tekućina, a drugi plin govori se o površinskoj napetosti. Ona je zapravo posebni slučaj interfacijalne napetosti. Napetost površine ovisi obrnuto proporcionalno o temperaturi te o prirodi tekuće čiste tvari i tvari s kojom ona graniči, najčešće njenom zasićenom parom u zraku.

Površina tekućina teži biti što manja.

Kada bi se tekućina promatrala kao niz vodoravnih slojeva debljine jedne molekule, utvrdilo bi se da je površinski sloj „najsiriromašniji“ molekulama upravo zbog sile koja molekule vuče u niže slojeve. Kao posljedica jake kohezije, njegove molekule su toliko gusto zbijene da tvore glatku i napetu površinu neprobojnu za jednu suhu iglu.

Na temelju iznesenih činjenica o broju sastavnih jedinica i gustoći sloja može se zaključiti da taj sloj ima manju površinu od ostalih slojeva ovako iscjepkane tekućine.

Termodinamički gledano, potrebno je uložiti energiju da bi se površina povećala. Dakle, sustav ima najmanju potencijalnu energiju ako ima najmanju površinu.

Pri konstantnom volumenu i temperaturi rad potreban za stvaranje površine može se poistovjetiti s promjenom Helmholtz-ove energije. Budući da se ona smanjuje smanjivanjem površine, površine imaju prirodnu tendenciju da se smanje.

Kako je geometrijsko tijelo najmanjeg omjera površine i volumena kugla, tekućine su sferične. U prirodi sila teža preobrazila te kuglice u kapljice kiše ili pak oceane.

Kada se govori o kapljicama, mjehurićima i šupljinama treba napomenuti da je težnja za smanjenjem njihove površine izbalansirana porastom tlaka s njihove konkavne strane. Kap. Razliku tlakova s vanjske i unutarnje strane zakrivljene površine izražava Laplace-ova jednadžba:

$$p_u = p_v + 2\sigma/r$$

u kojoj  $p_u$  označava tlak s konkavne strane zakrivljene površine,  $p_v$  tlak s konveksne strane zakrivljene površine, a  $r$  je polumjer zakrivljenosti.

Na površini drva, papira i odjeće ne formiraju se vodene kapljice, već se ti materijali navlaže. U tim je slučajevima adhezija jača od kohezije. Posljedica toga je i pojava konkavnog meniskusa većine tekućina u staklenoj kapilarnoj cjevčici.

Koliki će biti kut između površine tekućine i stjenke kapilare ovisi o ravnoteži između sila na liniji kontakta između tekućeg i čvrstog:

$$\cos\alpha = (\sigma_{sg} - \sigma_{sl}) / \sigma_{lg}$$

gdje  $\sigma_{sg}$  predstavlja napetost na granici stjenke kapilare i zraka,  $\sigma_{sl}$  napetost na granici stjenke kapilare i tekućine (adhezija), a  $\sigma_{lg}$  površinsku napetost tekućine.

Kada se govori o permanentnim magnetima, magnetizam je pojava koju primjećujemo kao odbojnu ili privlačnu silu između magneta i sličnih feromagnetskih materijala. Djelovanje magnetizma je puno raširenije od klasičnih primjera s permanentnim magnetima, njegova primjena je u brojnim dnevnim aktivnostima ljudi. Magnetizam sila međudjelovanja između električki nabijenih čestica u gibanju; brzine gibanja čestica su bliske brzini svjetlosti ( $c=299,792,458\text{km/sec}$ ). Na atomskom nivou dakle radi se o relativnom gibanju elektrona - negativno nabijenih subatomskih čestica. Kao i planete u sunčevom sustavu, elektroni se

gibaju i oko svoje osi i oko jezgre atoma. Oba vrsta gibanja proizvode magnetsko polje između elektrona, a elektroni poprimaju svojstva mikroskopskih štapićastih magneta sa sjevernim i južnim polom. Oko ovako 'beskonačno' malog magneta nalaze se magnetske silnice, koje 'izviru' iz sjevernog pola, te zakrivljuju u obliku elipse da bi završile u južnom polu. Magnetizam je jedna od četiri osnovne sile u prirodi (elektromagnetska, gravitacijska, slaba nuklearna i jaka nuklearna sila). Magnetsko polje oko vodiča stvara se dok kroz njega teče struja.

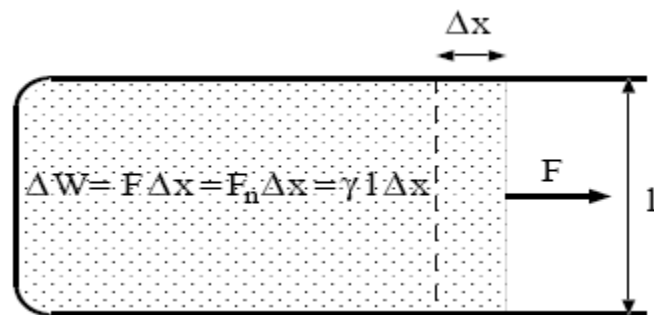
## **2. TEORIJSKI DIO**

### **2.1 SLOBODNA POVRŠINSKA ENERGIJA**

Na molekule u unutrašnjosti neke tekućine sa svih strana djeluju sile drugih molekula. One su okružene drugim istovrsnim molekulama, pa se sile kompenziraju, te je rezultatna sila jednaka nuli. Ipak, one molekule koje se nalaze na granici faza nisu sa svih strana okružene česticama iste faze, te nemaju kompenzirane sve sile. Postoje istovrsne molekule na lijevoj i desnoj strani te u unutrašnjosti koje kompenziraju sile, no na molekule sa gornje strane ne djeluje jednaka privlačna sila. Kao rezultat se javlja suvišak sila, koji rezultira slobodnom površinskom energijom. Ona kvantificira poremećaj intermolekularnih veza koje nastaju pri stvaranju površine. Ako je rezultanta sila manja od nule, molekule su usmjerene prema unutrašnjosti tekućine, a ako je veća od nule, sila djeluje prema vani. Stoga se površinska energija može definirati kao suvišna energija na površini materijala u usporedbi s rasutom ili je rad potreban za izgradnju područja određene površine.

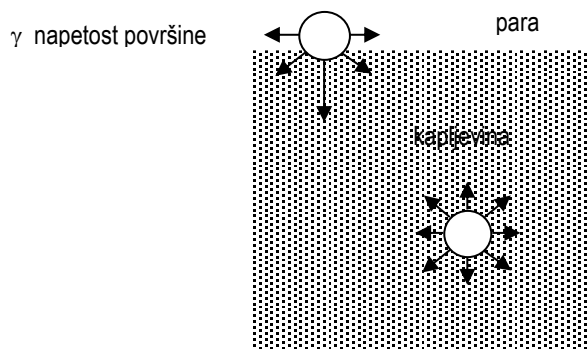
## 2.2. POVRŠINSKA NAPETOST

Za povećanje površine tekućine potreban je rad (slika 1).



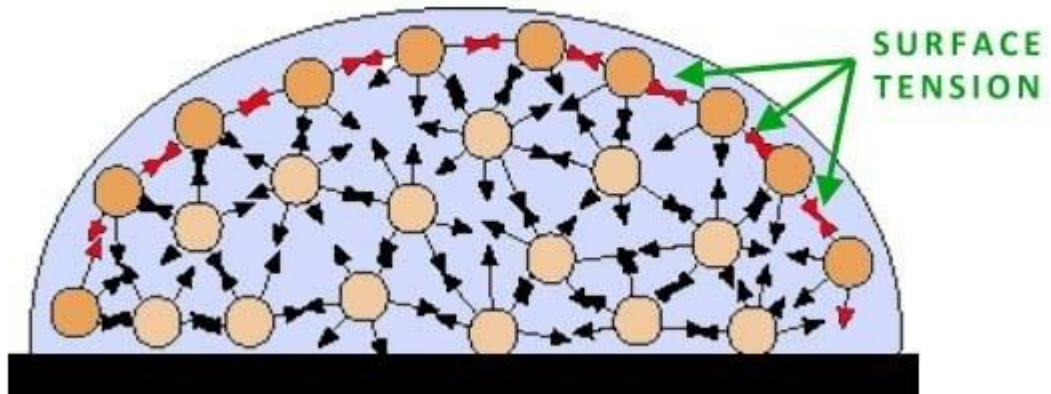
**Slika 1.** Rad vanjske sile  $F$  potreban za povećanje površine tekućine za iznos  $Alx\Delta=\Delta$

Specifičnu površinsku energiju možemo shvatiti i kao silu  $nF$  koja djeluje okomito na rub tekućine duljine  $l$ , tangencijalno površini tekućine. Tada tu veličinu nazivamo napetost površine.



**Slika 2.** Sile koje djeluju u unutrašnjosti i na površini kapljevine

Neka količina kapljevine određenog volumena zauzima najmanju površinu ako ima kuglast oblik. Svaka kapljevina uistinu nastoji zauzeti taj oblik ukoliko tome ne smetaju gravitacijske ili druge vanjske sile. Zato se kapi kapljevine formiraju u obliku kugle jer je površina kugle najmanja površina tog volumena, a time će i površinska energija biti najmanja. To je u skladu s činjenicom da u prirodi svi sustavi teže minimumu energije. Veća količina kapljevine stvara međutim uslijed gravitacijskih sila horizontalnu glatku površinu. Sila koja djeluje protiv povećanja površine, odnosno sila koja djeluje na jedinicu dužine u površinskom sloju kapljevine naziva se napetost površine.



**Slika 3.** Prikaz površinske napetosti na površini kapljice

Mjerna jedinica za površinsku napetost;

SI sustav: N/m, cgs sustav: dyne/cm

Možemo pokazati vezu između ove dvije mjerne jedinice:

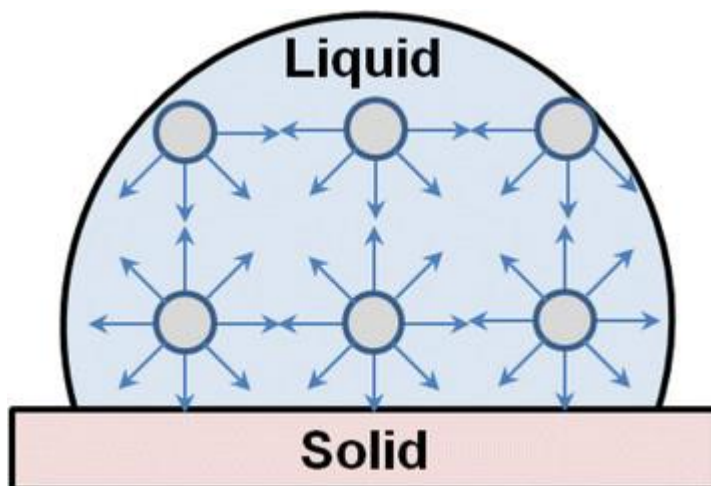
$$1 \text{ dyne/cm} = 10^{-3} \text{ N/m} = 1 \text{ mN/m}$$

Napetost površine ovisi obrnuto proporcionalno o temperaturi te o prirodi tekuće čiste tvari i tvari s kojom ona graniči, najčešće njenom zasićenom parom u zraku. U većine tekućina iznosi otprilike  $25 \text{ mN m}^{-1}$ . Zbog polarnosti i jakih vodikovih veza ona u slučaju vode iznosi  $72 \text{ mN m}^{-1}$ .

Površina tekućina teži biti što manja. Kada bi se tekućina promatrala kao niz vodoravnih slojeva debljine jedne molekule, utvrdilo bi se da je površinski sloj „najsiriromašniji“ molekulama upravo zbog sile koja molekule vuče u niže slojeve. Termodinamički gledano, potrebno je uložiti energiju da bi se površina povećala. Dakle, sustav ima najmanju potencijalnu energiju ako ima najmanju površinu. Pri konstantnom volumenu i temperaturi rad potreban za stvaranje površine može se poistovjetiti s promjenom Helmholtz-ove energije. Budući da se ona smanjuje smanjivanjem površine, površine imaju prirodnu tendenciju da se smanje.

## 2.3 KOHEZIJA

**Kohezija** je privlačna međuatomska ili međumolekularna sila koja djeluje između susjednih čestica tvari. Najjača je u tvarima koje su u čvrstom stanju, slabija u tekućina (jedno je od očitovanja djelovanja kohezije površinska napetost), a najslabija u realnim plinovima (u idealnim je plinovima jednaka nuli). U vodi na primjer, djeluju jake kohezivne sile jer je voda jako polarna molekula. U organskim tvarima rijetko djeluju jake kohezivne sile jer organske tvari rijetko su polarne. Kohezija se koristi u objašnjavanju površinske napetosti.



**Slika 4.** Shematski prikaz površinske napetosti tekućine zbog asimetrije interakcija na površini tekućine

Kohezijske sile su rezultat intermolekulnog privlačenja jednakih molekula, dok su adhezijske sile rezultat intermolekulnog privlačenja različitih molekula. Tako se npr. molekule kapi vode drže zajedno zbog jakih kohezijskih sila na površini, odnosno napetosti površine.

Kohezijske sile posljedica su djelovanja sila između atoma ili molekula. Te sile su rezultat različitog naboja privlačenja između molekula. Pozitivni dio jedne molekule privlačiti će negativni dio susjedne molekule. Što su veće razlike između pozitivnog i negativnog naboja, i što su molekule bliže, jače će biti sile privlačenja. Adhezijske ili kohezijske sile mogu se pripisati molekulnim interakcijama kratkog i dugog djelovanja, odnosno djelovanju primarnih i sekundarnih sila.

## **2.4 ADHEZIJA**

**Adhezija** je pojava međusobnog privlačenja površina dvaju tijela načinjenih od različitih tvari, ili tijela i tekućine, zbog djelovanja elektromagnetskih sila među molekulama. Privlačne sile kratka su dosega, a vrijednost im ovisi o vrsti tvari u dodiru. Prianjanje je izraženije ako je jedna od tvari tekućina. Adhezija vodenih otopina je bolja ako na površini postoje polarne, hidrofilne skupine nego ako je površina hidrofobna. Adhezija ovisi o hrapavosti podloge veća hrapavost označava slabija adhezija.

## **2.5 MATERIJALI I TEKUĆINE IZ EXPERIMENTA**

Napetost površine ovisi o njezinim karakteristikama, ali i o karakteristikama tvari s kojom je u kontaktu - njihovim međusobnim adhezijskim silama, te o temperaturi. Povećanjem temperature povećava se kinetička energija čestica, one se brže gibaju, slabe veze među molekulama, te se površinska napetost smanjuje. Obrnuto, ukoliko se smanjuje temperatura, bit će manje sile djelovanja, te više nekompenzirane energije, čime će se površinska napetost povećati.

Površinska napetost može se mijenjati zavisno o tome koje su tvari u doticaju. Primjerice, voda u kontaktu sa zrakom ima određenu vrijednost površinske napetosti, dok u kontaktu s etanolom



površinska napetost je jednaka nuli, jer se obje tekućine miješaju, pa granica između tekućina nestaje.

Zbog neravnomjerne raspodjele elektrona unutar molekula nastaje polarnost molekule, odnosno jedan dio molekule ima suvišak negativnog, a drugi dio suvišak pozitivnog naboja. Takve molekule se usmjerenom orijentiraju prema površini, odnosno one su polarne. Najveću površinsku napetost među tekućinama imaju taline metala, te nakon toga voda i različita polarna otapala. Tekući ugljikovodici imaju najmanju napetost površine jer su njihove molekule nepolarne, te među njima djeluju slabe Van der Waalsove privlačne sile.

Eksperiment se izvodio na uzorcima aluminijske, bakra, željeza, i teflona na koje se nanese voda, formaamid i diodometan.

Aluminij(Al) je kemijski element koji pripada 13. skupini i 3. grupi periodnog sustava elemenata. On spada u slabe metale i atomska masa mu je 26,98 g/mol. Gustoća mu je 2,70 g cm<sup>-3</sup>, a talište 660,32°C. Vrijednost relativne magnetske permeabilnosti ( $\mu_r$ ) aluminijske je 1.000022.

Bakar(Cu) je kemijski element koji pripada 11. skupini i 4. grupi periodnog sustava elemenata. Spada u prijelazne metale i atomska masa mu je 63,55 g/mol. Gustoća mu je 8,92 g cm<sup>-3</sup>, a talište 1083°C. Vrijednost relativne magnetske permeabilnosti ( $\mu_r$ ) bakra je 0.999994.

Željezo(Fe) je kemijski element koji pripada 8oj skupini i 4toj grupi periodnog sustava elemenata. Spada u prijelazne metale i atomska masa mu je 55,85 g/mol. Gustoća mu je 7,874 g cm<sup>-3</sup>, a talište 1538°C. Vrijednost relativne magnetske permeabilnosti ( $\mu_r$ ) željeza je 5 000.

Teflon je politetrafluoretilen( F<sub>2</sub>C=CF<sub>2</sub> ) je polukristalna polimerna plastika, koja se sastoji od fluora i ugljika. Visokoga je tališta (320 do 345 °C) i jedan od najstabilnijih organskih spojeva. Dobiva se polimerizacijom plina tetrafluoretilena, F<sub>2</sub>C=CF<sub>2</sub>. Vrijednost relativne magnetske permeabilnosti ( $\mu_r$ ) teflona je 1.0000.

Redestilirana voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ) je polarna tekućina koja se sastoji od 2 atoma vodika(H) i 1 atoma kisika(O). Molna masa joj je 18,02 g/mol, gustoća  $1 \text{ g cm}^{-3}$ , a talište  $0^\circ\text{C}$ .

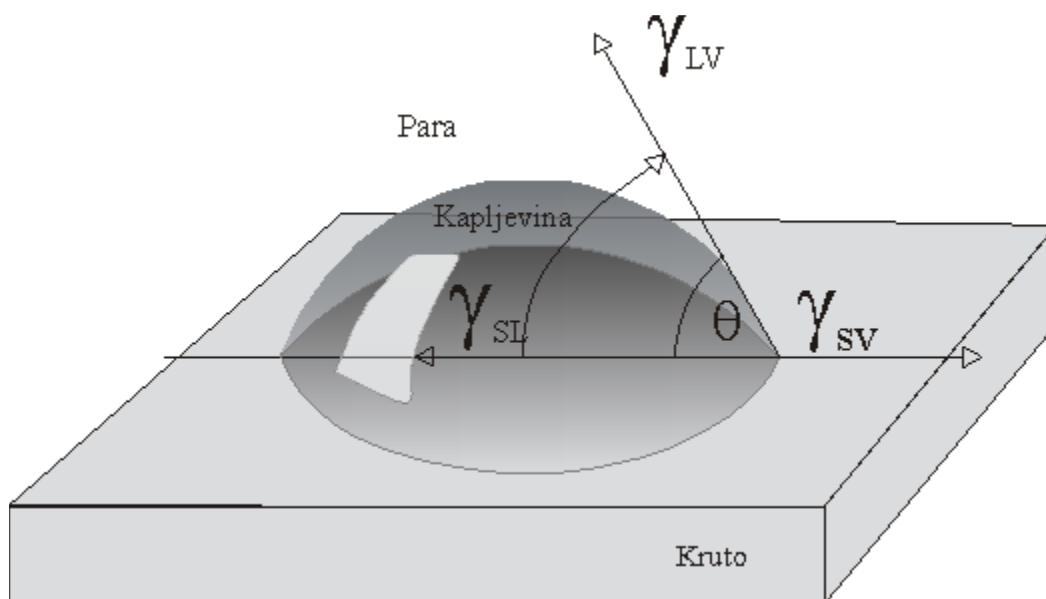
Formamid je amid mravlje kiseline ( $\text{HCONH}_2$ ) najjednostavniji kiselinski amid. Bezbojna je uljasta higroskopna tekućina bez mirisa, gustoće  $1,13 \text{ g cm}^{-3}$ . Pripravljaju se izravnom katalitičkom reakcijom ugljikova monoksida i amonijaka pod tlakom ili destilacijom amonijeva formijata. Molna masa mu je 45,04 g/mol, a talište  $279,25^\circ\text{C}$ .

Dijodmetan ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ ) je organski spoj molarne mase 267.84 g/mol. Gustoća mu je  $3,32 \text{ g/cm}^3$ , a talište 5.4 do  $6.2^\circ\text{C}$ .

## 2.6 KONTAKTNI KUT

### TEORIJA KONTAKTNOG KUTA

Mogućnost usporedbe teorijske i praktične ili eksperimentalne adhezije zahtjeva poznavanje rada adhezije. Nužan uvjet ostvarivanja adhezijske veze je uspostava kontakta između dviju faza, što se s termodinamičkog stanovišta može definirati teorijom kontaktnog kuta kapljice postavljene na krutu površinu (Slika 5.)



Slika 5. Kap kapljevine na krutoj površini

Kapljica se razlijeva po krutoj površini dok se ne uspostavi ravnotežno stanje. Sile koje djeluju na periferiji kapljice čine kontaktni kut  $\theta$  s krutom površinom, kao što je prikazano na *Slici 1*. Ovisnost površinskih napetosti komponenata i ravnotežnog kontaktnog kuta  $\theta$  definirana je Youngovom jednadžbom:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta$$

gdje je:  $\gamma_{sv}$  - slobodna među površinska energija među površine kruto-para,  $\gamma_{sl}$  - slobodna među površinska energija među površine kruto-kapljevina, energije  $\gamma_{lv}$  - slobodna među površinska energija među površine kapljevina-para,  $\theta$  kontaktni kut.

Adsorpcija para na krutoj površini mijenja vrijednost slobodne površinske krute površine. Taj utjecaj je jače izražen za nisku vrijednost kontaktnog kuta, tj. kada se kapljevina više razlijeva po površini krutine. Takvo sniženje slobodne površinske energije krutine definirano je ravnotežnim pritiskom razlijevanja,  $\pi_e$ :

$$\pi_e = \gamma_s - \gamma_{sv}$$

gdje je  $\gamma_s$  - slobodna površinska energija krutine u vakuumu, a  $\gamma_{sv}$  - slobodna površinska energija krutine u ravnoteži sa zasićenim parama kapljevine. Član  $\pi_e$ , obično se može zanemariti kada je  $\theta > 10^\circ$ . Ravnotežni pritisak razlijevanja može se eksperimentalno odrediti mjerenjem adsorpcije para kapljevine na krutini i proračunati prema jednadžbi:

$$\pi_e = \int_0^{p_0} \Gamma d\mu = RT \int_0^{p_0} \Gamma d\ln(p)$$

gdje je  $p$ -pritisak para,  $p_0$ -ravnotežni pritisak para,  $R$ -opća plinska konstanta,  $T$ -apsolutna temperatura,  $\Gamma$ -koncentracija adsorbiranih para na krutoj površini.

Uključivanjem relacija ravnotežnog pritiska, dobiva se relacija:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta + \pi_e$$

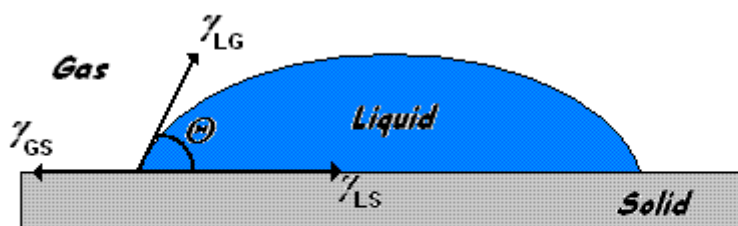
Kada je  $\theta > 0^\circ$  kapljevina se ne razlijeva po površini, a kada je  $\theta = 0^\circ$ , kapljevina potpuno vlaži površinu i spontano se razlijeva preko površine, brzinom koja ovisi o različitim faktorima, kao što je viskoznost kapljevine i hrapavost krute površine.

## 2.7 METODE MJERENJA KONTAKTNOG KUTA

Metode mjerenja kontaktnog kuta dijele se na optičke (pomoću goniometra) i tenziometrijske (mjerenjem sila)

### The Sessile Drop Method (Metoda položene kapi)

Optička metoda se još naziva statičkom, Sessile drop metodom ili metodom viseće kapi, a ona je i najčešće korištena metoda mjerenja kontaktnog kuta, a korištena je i u ovom radu. Kada kap tekućine dođe u kontakt s čvrstom ravnom površinom, kapljica formira određeni oblik (slika 5). Kontaktni kut se mjeri između osnovne ravnine (dodirne površine tekućine i krute tvari) i tangente kapljice na granici triju faza (čvrsto, tekuće i plinovito).



$$\gamma_{LS} + \gamma_{LG} \cos \theta - \gamma_{GS} = 0$$

**Slika 6.** Shema kapljice koja pokazuje rezultat prema Youngovoj jednadžbi

Svaka od triju faza, tekućina, čvrsta tvar i plinovita (zrak), ima određenu površinsku napetost koja utječe na veličinu kontaktnog kuta. Te površinske napetosti povezane su Youngovom jednadžbom:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \cos \theta_C = 0$$

gdje je:

$\sigma_s$  - površinska napetost krute tvari,

$\sigma_L$  - površinska napetost tekuće tvari i 37

$\sigma_{LS}$  - površinska napetost između tekućine i krute tvari.

Tenziometrijske metode mjerenja kontaktnog kuta uključuju metodu Wilhelmy ploče, metodu mjehurića zraka, metodu kapilarnog uspona i metodu nagnute kapi.

## **2.8 ODREĐIVANJE SLOBODNE POVRŠINSKE ENERGIJE POMOĆU KONTAKTNOG KUTA**

### **Slobodna površinska i među površinska energija**

Problem interpretacije kontaktnog kuta riješen je uvođenjem pretpostavki koje omogućavaju isključivanje člana slobodne među površinske energije  $\sigma_{sl}$ , između krute i kapljevite faze u Youngovoj jednadžbi.

Owens-Wendtov model se zasniva na pretpostavci aditivnosti komponenata slobodne površinske energije, tj. da je slobodna površinska energija površine čiste faze  $i$  jednaka sumi doprinosa disperzijske,  $\gamma_i^d$ , i polarne komponente,  $\gamma_i^p$  i slobodne površinske energije.

$$\gamma_i = \gamma_i^d + \gamma_i^p$$

Owens-Wendtov model uključuje i pretpostavku prema kojoj je slobodna među površinska energija među površine kruto-kapljevine,  $\gamma_{sl}$  jednaka geometrijskoj sredini slobodnih površinskih energija pojedinih faza,  $s$  i  $l$  koje su međusobno u kontaktu.

Uvođenjem ove pretpostavke u Youngovu jednadžbu definira se slobodna površinska energija krutine,  $\gamma_s$ , uz pretpostavku da je poznata vrijednost slobodne površinske energije kapljevine,  $\gamma_{lv}$  i dobiva se izraz:

$$\gamma_{lv} (1 + \cos(\theta)) = 2 (\gamma_l^d \gamma_s^d)^{\frac{1}{2}} + 2 (\gamma_l^p \gamma_s^p)^{\frac{1}{2}}$$

Određivanje disperzijske i polarne komponente slobodne površinske energije zasniva se na mjerenju kontaktnog kuta dvije kapljevine poznatih vrijednosti slobodne površinske energije. Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti kontaktnog kuta u sustav dviju jednadžbi, proračunaju se vrijednosti disperzijske i polarne komponente ispitivane krutine.

Comyn koristi modificirani oblik Owens-Wendtove jednadžbe, koji omogućava određivanje komponenta slobodne energije površine grafičkom metodom.

Wu predlaže model koji uz pretpostavku aditivnosti komponenta slobodne površinske energije, uključuje i pretpostavku da je slobodna međupovršinska energija,  $\gamma_{sl}$ , jednaka harmonijskoj sredini slobodnih površinskih energija pojedinih faza  $\gamma_s$  i  $\gamma_l$  koje su međusobno u kontaktu:

$$\gamma_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - \frac{4\gamma_s^d \gamma_l^d}{\gamma_s^d + \gamma_l^d} - \frac{4\gamma_s^p \gamma_l^p}{\gamma_s^p + \gamma_l^p}$$

Uvođenjem ove pretpostavke u Youngovu jednadžbu. definira se slobodna površinska energija krutine,  $\gamma_s$ , uz pretpostavku da je poznata vrijednost slobodne površinske energije kapljevine,  $\gamma_{lv}$  i slijedi jednadžba modela:

$$\gamma_{lv} (1 + \cos(\theta)) = \frac{4\gamma_s^d \gamma_l^d}{\gamma_s^d + \gamma_l^d} - \frac{4\gamma_s^p \gamma_l^p}{\gamma_s^p + \gamma_l^p}$$

## OWRK metoda

Jedna od metoda koja se koristila u ovom radu je tzv. OWRK metoda, koja je dobila ime po svojim tvorcima, Owensu, Wendtu, Rabelu i Kaelbleu. Prema toj teoriji, površinska napetost  $\sigma$  svake faze se može rastaviti na polarnu  $\sigma^P$  i disperznu  $\sigma^D$  površinsku napetost kako slijedi:

$$\sigma_1 = \sigma_1^P + \sigma_1^D$$

$$\sigma_2 = \sigma_2^P + \sigma_2^D$$

Owens i Wendt upotrebljavaju jednadžbu za površinsku napetost i uvrštavaju ju u Youngovu jednadžbu napisanu na način  $\sigma_s = \sigma_{LS} + \sigma_L \cdot \cos\theta$ :

$$\sigma_{sl} = \sigma_s + \sigma_l - 2(\sqrt{\sigma_s^D \cdot \sigma_l^D} + \sqrt{\sigma_s^P \cdot \sigma_l^P})$$

Tako su ova dva autora dobili rješenje za kontaktni kut na granici dvaju faza uvrštavajući u Youngovu jednadžbu poznate vrijednosti disperzne i polarne površinske napetosti. Kaelble je jednadžbu riješio kombinirajući dvije tekućine računajući srednje vrijednosti dobivenih vrijednosti površinske napetosti. Rabel računa polarni i disperzni dio površinske napetosti pomoću male digresije s kontaktnog kuta – kombinirao je jednadžbe njihovog zbroja s linearnom jednadžbom koja opisuje pravac  $y = mx + b$ , te dobio

$$\sqrt{\gamma_{sv}^d \gamma_{lv}^d} + \sqrt{\gamma_{sv}^p \gamma_{lv}^p} = 0.5 \gamma_{lv} (1 + \cos\theta_Y) \quad (11)$$

Budući da postoje dvije nepoznate,  $\gamma_{sv}^d$  i  $\gamma_{sv}^p$ , u jednadžbi (11) dvije tekućine s poznatim raspršivajućim i polarnim komponentama potrebne su za njegovo rješavanje. Tekućina s dominantnom polarnom komponentom bi trebala biti odabrana kao jedna mjerna tekućina i disperzivna tekućina kao druga. Voda, glicerol i formamid mogu se upotrijebiti kao polarne tekućine i diodmetan i a-bromnaftalen kao disperzivne. Najčešće se koriste voda i diodmetan.



Prema dvokomponentnom modelu, granična napetost ovisi o tome mogu li polarni i raspršeni dijelovi oblikovati interakcije s odgovarajućim dijelovima susjedne faze. Na primjer, površinska napetost s obzirom na vodu kao polarna tekućina manja je kada je krutina također polarna. Ako je s druge strane polarni dio čvrste supstance mali, onda je kvadratni korijen ( $\sigma_{PI} \cdot \sigma_P$ ) 1/2 položaja niske vrijednosti. Polarne interakcije tada samo daju mali doprinos smanjenju naponske granice; to odgovara slabom vlaženju i visokom kutu kontakta.

### Wu metoda

Svoja razmatranja o napetosti između dviju faza je Wu započeo također uzimajući u obzir polarni i disperzni dio površinske energije dvaju dodirujućih faza. Ipak, nasuprot Fowkesu i Owensu, Wendtu, Rabelu te Kaelbleu, koji su u svojim izračunima koristili geometrijsku srednju vrijednost, Wu upotrebljava harmonijsku srednju vrijednost. Na ovaj način postiže preciznije rezultate, posebice za visokoenergetske sisteme. Kod ove metode je potrebno koristiti najmanje dvije tekućine s poznatim polarnim i disperznim dijelom, a barem jedna od tih tekućina mora imati polarni dio veći od 0.

$$\gamma_{sl} = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - 4 \left[ \frac{\gamma_{sv}^d \gamma_{lv}^d}{(\gamma_{sv}^d + \gamma_{lv}^d)} + \frac{\gamma_{sv}^p \gamma_{lv}^p}{(\gamma_{sv}^p + \gamma_{lv}^p)} \right]$$

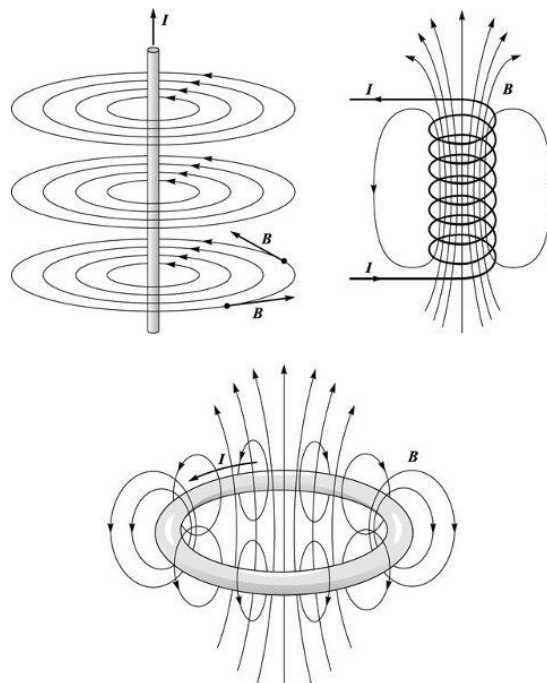
I ako se kombinira s Youngovom jednadžbom ( $\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta$ ), Wu jednadžba se može pisati kao:

$$\left[ \frac{\gamma_{sv}^d \gamma_{lv}^d}{(\gamma_{sv}^d + \gamma_{lv}^d)} + \frac{\gamma_{sv}^p \gamma_{lv}^p}{(\gamma_{sv}^p + \gamma_{lv}^p)} \right] = 0.25 \gamma_{lv} (1 + \cos \theta_Y)$$

Kao u OWRK metodi, Wu metoda zahtijeva uporabu najmanje dvije tekućine, jedna uglavnom polarna i jedna disperzivna. Ponovno se često koristi voda i diodmetan. S teoretskog gledišta, geometrijska sredina je točnija nego harmonijska.

## 2.9 MAGNETSKO POLJE

Magnetsko polje je prostor oko prirodnih i umjetnih magneta i unutar njih u kojem djeluju magnetske sile. Magnetsko polje postoji također u prostoru oko toka električne struje, pa se najčešće obrađuje kao elektromagnetsko polje. Razlikuju se magnetostatičko polje, na primjer u okolini stalnoga magneta, i magnetodinamičko polje, na primjer kod asinkronog električnoga motora. Općenito, magnetsko polje slično je električnom polju s obzirom na matematičku obradu, ali je bitna razlika u tome što ne postoje slobodni magnetski naboji kao što postoje slobodni elektroni. Magnetsko polje nastaje oko niza električnih naboja u gibanju, to jest oko električnog vodiča kojim teče električna struja. Magnetsko polje stvaraju i elementarne čestice koje posjeduju magnetski moment.



**Slika 7.** MAGNETSKO POLJE, I – struja, B – magnetska indukcija; polje oko ravnoga vodiča (gore lijevo); polje zavojnice (gore desno); polje oko kružnoga vodiča (dolje)

Općenito, magnetsko polje analogno je električnom polju s obzirom na matematičku obradbu, ali je bitna razlika u tome što ne postoje slobodni magnetski naboji kao što postoje slobodni elektroni. Maxwellove jednadžbe za magnetsko polje proizvedeno stacionarnom raspodjelom struja  $\mathbf{J}$  u linearnome, homogenom, izotropnome materijalu poprimaju oblik:

$$\mathbf{rot} \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \quad \mathbf{div} \mathbf{B} = 0,$$

gdje je  $\mathbf{B}$  vektor magnetske indukcije, a  $\mu$  magnetska permeabilnost materijala. Dakle, magnetostatičko polje ima obilježja vrtložnoga solenoidnog polja i može se kao i svako statičko polje prikazati silnicama, kojima je jednadžba u pravocrtnome koordinatnom sustavu.

Poissonova i Laplaceova jednadžba za to polje glase:

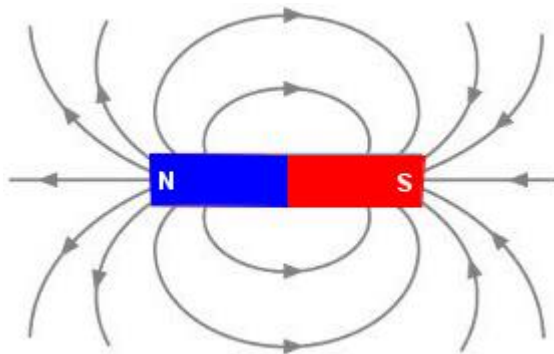
$$\Delta \mathbf{B} = -\mathbf{rot} (\mu \mathbf{J}) \quad \Delta \mathbf{B} = 0$$

sukcesivno za prostor sa zadanom raspodjelom neovisnih struja gustoće  $\mathbf{J}$  i za prostor bez struja ( $\mathbf{J} = 0$ ). Magnetsko polje je i relativistički efekt koji se opaža u sustavu u kojem se neki naboj  $Q$  giba. Magnetsko polje  $\mathbf{B}$  očituje se u nekoj točki prostora oko dotičnoga naboja  $Q$  na taj način da proizvodi magnetski dio Lorentzove sile  $\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$  na probni naboj  $q$  koji prolazi danom točkom brzinom  $\mathbf{v}$ . Magnetsko polje zato nastaje oko niza naboja u gibanju, tj. oko vodiča kojim teče električna struja. Magnetsko polje stvaraju i elementarne čestice koje posjeduju magnetski moment.

## MAGNET

Magnet je svako tijelo koje stvara magnetsko polje u sebi i oko sebe, te ima svojstvo da može djelovati privlačnom silom na feromagnetske materijale (na primjer željezo). Trajni ili permanentni magnet to svojstvo ne mijenja tijekom vremena, osim ako se vanjskim djelovanjem ne demagnetizira. Privremeni ili promjenljivi magnet to svojstvo ima dok je izložen utjecaju magnetskog polja što ga stvara neki drugi magnet u okolini. Magnetsko polje nastaje i u okolini električnog vodiča kojim teče električna struja. Strujna petlja ili mnoštvo namotaja u obliku zavojnice ponaša se kao magnet.

Djelovanje magnetskog polja u nekoj točki može se ustanoviti magnetskom iglom, koja se lako zakreće na svojem uporištu u smjer magnetskog polja. Tako označeni smjerovi od točke do točke u prostoru čine magnetsku silnicu. Magnetsko polje što ga stvara neki magnet obično se prikazuje skupom magnetskih silnica. One izlaze iz sjevernoga magnetskog pola i ulaze u južni, a unutar magneta silnice idu od južnoga prema sjevernom polu tako da ukupno čine zatvorene linije. Magnetske silnice mogu se pokusom (eksperimentalno) zapaziti ako se iznad magneta postavi staklena ploča i na nju pospe željezna pilovina te se ploča lagano potrese.



**Slika 8.** Polje cilindričnog magneta

## MAGNETSKA PERMEABILNOST

**Magnetska permeabilnost** je elektromagnetna osobina materijala koja pokazuje intenzitet magnetizacije tijela kada su ona izložena vanjskim magnetnom polju. Magnetska permeabilnost se označava grčkim slovom *mi* ( $\mu$ ). Pojam *magnetska permeabilnost* osmislio je Oliver Heaviside 1885. U jedinicama SI sustava, permeabilnost se izražava u Henrijima po metru (H/m), ili u Newtonima po Amperu na kvadrat ( $\text{N/A}^2$ ) ili Volt · sekunda na Amper · metar {Vs/Am}.

**Magnetska permeabilnost vakuuma** ili **univerzalna magnetska konstanta** ( $\epsilon_0$ ) je prirodna konstanta magnetske permeabilnosti za vakuum, koja iznosi:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m ili  $\mu_0 = 12.566370614 \cdot 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>. Jednaka je recipročnoj vrijednosti umnoška dielektrične permitivnosti vakuuma  $\epsilon_0$  i kvadrata brzine svjetlosti  $c$  u vakuumu:  $\mu_0 = 1/(\epsilon_0 c^2)$ .

**Dielektrična permitivnost vakuuma, permitivnost vakuuma, dielektričnost vakuuma ili dielektrična konstanta vakuuma** (znak  $\epsilon_0$ ) je prirodna konstanta koja je jednaka recipročnoj vrijednosti umnoška magnetske permeabilnosti vakuuma  $\mu_0$  i kvadrata brzine svjetlosti  $c$  u vakuumu:  $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2) = 8.854187817 \cdot 10^{-12}$  F/m.

## MAGNETIZAM

**Magnetizam** je skup pojava povezanih s magnetskim poljem i s ponašanjem tvari u magnetskom polju. Magnetska svojstva tvari potječu od magnetskih momenta atoma i njihovih međudjelovanja koja mogu stvoriti kolektivno magnetsko uređenje. Magnetizam atoma posljedica je magnetizma elektrona i atomske jezgre i njihovih međudjelovanja. Razlikuje se orbitalni magnetski moment, zbog gibanja elektrona oko atomske jezgre, i spinski magnetski moment, kao vlastito kvantnomehaničko svojstvo elektrona i jezgre. S obzirom na ponašanje u magnetskom polju, sve se tvari odlikuju svojom magnetskom permeabilnošću. Tako se mogu razlikovati dijamagnetične, paramagnetične, feromagnetične, ferimagnetične i anti-feromagnetične tvari.

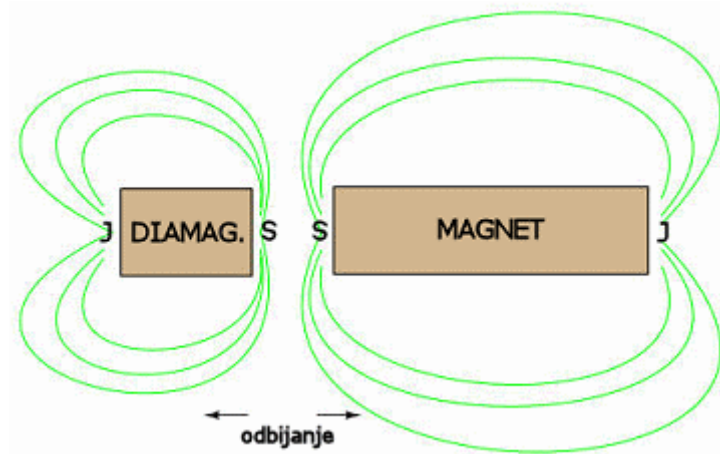
Feromagnetizam je svojstvo materijala, poput željeza (ferro), da 'zapamti' učinak magnetskog polja kojem je bio izložen. Feromagnetni se sastoje od mnoštva mikroskopskih domena (područja) – skupine atoma promjera cca.  $5 \times 10^{-5}$  m. U pojedinim domenama magnetski momenti mogu biti sinkronizirani ali smjerovi magnetskih sila različitih domena ostaju nasumično raspoređeni (slika lijevo gore). Domene se sinkroniziraju pod utjecajem vanjskog magnetskog polja (slika lijevo dolje). Ako maknemo prineseni magnet, domene će se obično ponovno vratiti u prvobitne položaje a svojstva magneta će nestati. Ukoliko feromagnet stavimo u izuzetno jako magnetsko polje kroz određeno vrijeme, domene će ostati trajno sinkronizirane čime dobivamo permanentni magnet. Ovaj efekt je još poznat pod nazivom histereza.

Feromagnetni imaju visoku relativnu magnetsku permeabilnost. Magnetska permeabilnost ( $\mu$ ) je konstanta proporcionalnosti između magnetske indukcije i intenziteta magnetskog polja i za vakuum iznosi  $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$  H/m. Magnetska permeabilnost se obično izražava kao

relativna vrijednost. Ako  $\mu$  predstavlja magnetsku permeabilnost tražene tvari, relativna magnetska permeabilnost je dana izrazom  $\mu_r = \mu / \mu_0$ , reda veličine 500-1000000, znači da je utjecaj magnetskog polja na takve materijale jako velik (reda veličine 10000x veći nego na zrak/vakuum). Najpoznatiji materijali s izraženim feromagnetskim svojstvima su željezo, kobalt i nikal.

Na subatomske nivou magnetsko polje izaziva gibanje elektrona, rotacija elektrona oko svoje osi je glavni izvor magnetskog polja, a orbitalno gibanje koje je u stvari mnogo kaotičnije i teško se može nazvati orbitalnim, se uglavnom poništava (elektronski parovi). Iako je atomski magnetni moment prisutan kod paramagneta i feromagneta, magnetske sile su daleko jače kod feromagneta. Razlog tome nije razlika u atomskom magnetskom momentu već u kristalnoj strukturi feromagneta kod kojeg međusobne veze uzrokuju sinkronizaciju magnetskih momenata susjednih atoma čime je omogućeno jako privlačenje feromagneta magnetima. Ovo je potpuna suprotnost paramagnetima kod kojih su magnetski momenti slučajno orijentirani i tako se međusobno poništavaju (osim kada se nalaze u polju jakog magneta).

Dijamagnetizam je jako slab oblik magnetizma koji se može registrirati samo uz prisustvo vanjskog magnetskog polja. Nastaje promjenom orbitalnog kretanja elektrona uslijed prinesenog magnetskog polja. Ovako nastali magnetski moment je jako mali i smjerom suprotan od prinesenog polja:



**Slika 9.** Prikaz dijamagneta

Kada se smjesti između dva pola jakog magneta, dijamagnetni materijal se postavlja u područje gdje je polje najslabije. Dijamagnetizam postoji kod svih materijala ali zbog male sile može se promatrati samo kod materijala koji nemaju ostala magnetska svojstva.

Permanentni magneti spadaju u skupinu feromagneta koji imaju izraženo široku krivulju histereze tako da je permanentni magnetizam izražen. Upravo to svojstvo im omogućuje da postanu permanentni magneti nakon izlaganja snažnom magnetskom polju kroz vrijeme koje je potrebno za postizanje trajnog magnetizma. Permanentni magneti su sposobni dalje privremeno magnetizirati druge feromagnetne tvari, kao npr. kada se kontaktom između permanentnog magneta i spajalice za papir postigne magnetičnost spajalice, čime ona postaje sposobna dodiranjem podignuti i druge nemagnetizirane spajalice. Ako se komad željeza prinese permanentnom magnetu, domene unutar željeza će se orijentirati u istom smjeru i željezo postaje magnetizirano. Magnetizirati će se na način da produžuje magnetske silnice koje će ga privući prema magnetu, bez obzira koji pol magneta je okrenut prema željezu.

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

#### **3.1 PRIPREMA MATERIJALA**

Korišteni su uzorci aluminija, bakra, željeza i teflona. Uzorak aluminija je pločica dimenzija 4x5 mm. Uzorak bakra je pločica dimenzija 10x10 mm. Uzorak željeza je pločica dimenzija 4x5 mm . Ovi uzorci su prije početka mjerenja obrađeni brusnim papirom i obrađeni ručnom tehnikom brusnim papirima različite gradacije, te zatim su odmašćeni u alkoholu. Uzorak teflona je dimenzija 2,5x6 mm . Za uzorak teflona nije bila potrebna obrada brusnim papirom, nego smo ga prije mjerenja samo odmastili u alkoholu. Svi navedeni uzorci su jednake debljine i ona iznosi 1 mm.

#### **3.2 PRIPREMA TEKUĆINA**

U eksperimentu su korišteni čisti uzorci redestilirane vode, formamida i dijodometana.

#### **3.3 KORIŠTENI MJERNI UREĐAJI**

Kontaktni kut za pripremljene otopine određivan je eksperimentalno mjerenjem na granici faza čvrsto-kapljevito-plinovito pri čemu su čvrstu fazu predstavljale Aluminijska, bakrena, željezna i teflonska podloga.

Uređaj za mjerenje kontaktnog kuta, tzv. goniometar (DataPhysics OCA –20) prikazan je na slici 10. Na površinu ispitivane plohe (aluminij,bakar,željezo,teflon) ispušta se kap tekućine (vode, formamida, dijodometana) te se nakon par sekundi fotografira uzorak. Računalnom obradom određen je kontakti kut na granicifaza čvrsto-kapljevito-plinovito. Mjerenja su provedena pri sobnoj temperaturi. Uređaj je poluautomatski, upravljjan pomoću računala, a služi za proučavanje i mjerenje kuta između krutina i tekućina.





**Slika 10.** Uređaj za mjerenje kontaktnog kuta (goniometar)

Kontaktni kut može se mjeriti pomoću više metoda. Također je softverski moguće analizirati oblik kapi i odrediti slobodnu površinsku energiju materijala. Doziranje tekućine je kontrolirano elektronički, dok je pozicioniranje uzorka softverski kontrolirano u smjeru x i z osi, a ručno u smjeru y osi. Visokokvalitetan sustav leća i video sustav velike brzine s CCD kamerom jamči kvalitetnu snimku procesa kvašenja.

### 3.4 KORIŠTENI MAGNET

Magnet koji so koristili u eksperimentu je kocka dimenzija 15x15x15 mm, N35/Ni neodimijski magnet jakosti 0,48 T (Tesla), proizvođač ARTAS d.o.o. Zagreb (4800 G (Gaussa)).

Vrijednost u teslama (T) je gustoća magnetskog toka na površini magneta koji se nalazi u zraku. Tesla (T) prema SI sustavu a Gauss (CGS sustav).

$$1\text{T} = 10.000 \text{ Gausa}$$

### 3.5 MJERENJE KONTAKTNOG KUTA

Površinske karakteristike ispitivanih metala i teflona određene su mjerenjem kontaktnog kuta na uređaju DataPhysics OCA 20 Instruments GmbH, slika 10. Mjerenja kontaktnog kuta provedena su na pločicama metala ugljičnog čelika, bakra i aluminijske i pločici polimera teflona (PTFE – politetrafluoroetilen) s testnim tekućinama poznatih vrijednosti slobodne površinske energije: voda (redestilirana voda,  $\kappa = 1,33 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), Aldrich), formamid (p.a. 99,5 %, Fluka) i dijodometan (p.a. 99 %). Mjerenja su provedena pri temperaturi  $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  s kapljicom volumena 1  $\mu\text{l}$ . Provedeno je 5 mjerenja (u području 1,5x1,5 cm) na različitim mjestima istog uzorka te su izračunate srednje vrijednosti kontaktnog kuta. Standardno odstupanje podataka iznosilo je  $\pm 2^\circ$ . Vrijednosti slobodne površinske energije proračunate su primjenom modela geometrijske sredine (Owens Wendt) i modela harmonijske sredine (Wu).

**Tablica 1.** Vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka Al, Cu, Fe i teflona

Uzorak	<i>Owens Wendt</i>			<i>Wu</i>		
	<i>Slobodna energija površine (mJ m<sup>-2</sup>)</i>			<i>Slobodna energija površine (mJ m<sup>-2</sup>)</i>		
	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$
<b>Al</b>	32,66	5,50	38,16	33,66	8,16	41,82
<b>Cu</b>	34,83	9,61	44,44	34,88	12,96	47,84
<b>Fe</b>	33,79	17,18	50,97	33,99	19,95	53,94
<b>teflon</b>	22,58	0,22	22,80	28,18	0,00	28,18

## 4. REZULTATI I RASPRAVA

### 4.1 REZULTATI KONTAKTNOG KUTA ZA STANDARDNE OTOPINE

**Tablica 2.** Vrijednosti kontaktnih kutova dobivenih mjerenjem s vodom, formamidom i dijodometanom na uzorcima Al, Cu, Fe i teflona.

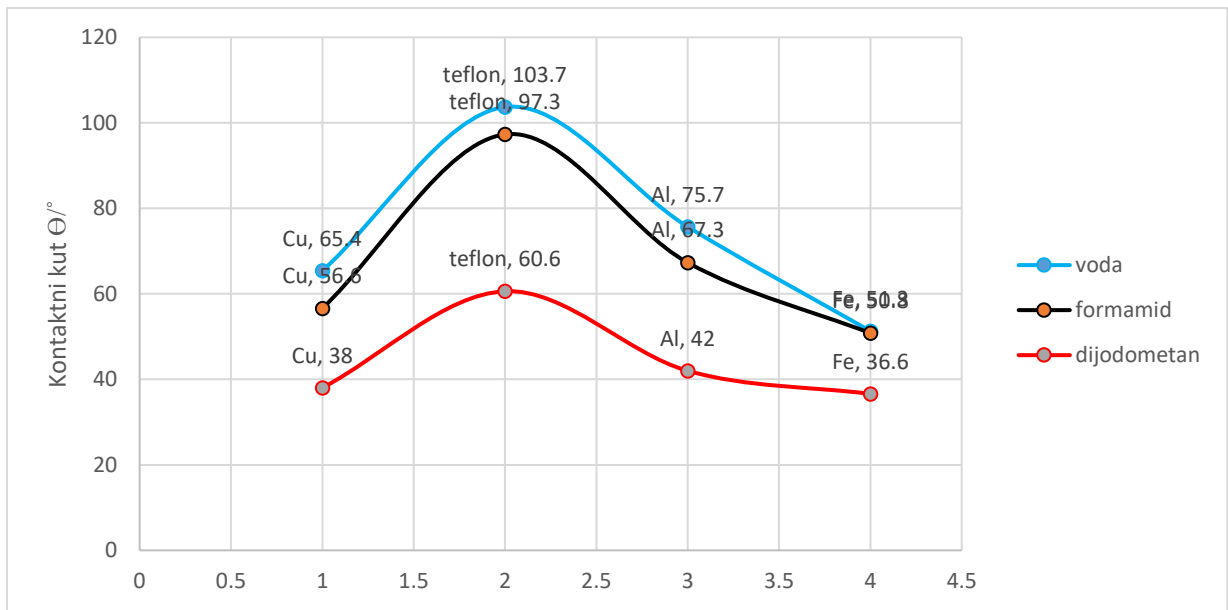
Uzorak	Kontaktni kut $\theta/^\circ$		
	Voda	Formamid	Dijodometan
Al	75,7	67,3	42,0
Cu	65,4	56,6	38,0
Fe	51,3	50,8	36,6
teflon	103,7	97,3	60,6

Najmanji kontaktni kut sa vodom ima željezo (Fe)  $51,3^\circ$ , zatim se kontaktni kut povećava redom za bakar (Cu)  $65,4^\circ$ , aluminij (Al)  $75,7^\circ$  i na kraju teflon  $103,7^\circ$ , koji ima najveći kontaktni kut. Porast vrijednosti kontaktnog kuta između željeza, bakra i aluminija nije drastičan, dok je porast vrijednosti kontaktnog kuta između aluminija i teflona dvostruko veći. Između željeza i bakra porast kontaktnog kuta je za  $14,1^\circ$  a između bakra i aluminija je  $10,3^\circ$ . Porast kontaktnog kuta između aluminija i željeza iznosi  $28^\circ$ . Voda je polarna molekula te dobiveni rezultati prikazuju najveću hidrofilnost vode prema željezu, dok su bakar i aluminij manje hidrofobni. Teflon

pokazuje hidrofobnost prema vodi što se očituje povećanjem kontaktnog kuta kod teflona. Interakcija vode sa uzorcima rezultat je hidrofilitnosti ili hidrofobnosti tog uzorka sa vodom.

Vrijednosti kontaktnog kuta za uzorke kod formamida prati isti trend kao kod vode. Najmanji kontaktni kut pokazuje željezo  $50,8^\circ$ , zatim slijedi bakar  $56,6^\circ$ , pa aluminij  $75,7^\circ$  i najveći kontaktni kut pokazuje teflon i on iznosi  $97,3^\circ$ . Formamid je polarna tekućina te njene ukupne vrijednosti kontaktnog kuta sa zadanim uzorcima su malo manje nego kod vode.

Trend porasta kontaktnog kuta od željeza, pa preko bakra i aluminija pa sve do teflona koji se vidio kod vode i formamida, vidljiv je i kod dijodometana. Najmanji kontaktni kut ima željezo  $36,6^\circ$ , pa bakar  $38,0^\circ$  i aluminij  $42,0^\circ$ , te zatim najveći kontaktni kut ima teflon. Dijodometan je izrazito nepolarna tekućina, što se i očituje u manjim vrijednostima kontaktnog kuta za razliku od polarne vode i formamida. Najveće vrijednosti kontaktnog kuta su izmjerene za teflonsku površinu. Teflon ima široku primjenu u strojogradnji, elektro i kemijskoj industriji, služi za izradu brojnih izolatora i dr. Iz ovih rezultata je vidljivo da zbog interakcija između uzoraka vode, formamida, dijodometana i teflonske površine dolazi do povišenja površinske energije, a time i do većih vrijednosti kontaktnog kuta. Iz tablice 2 je vidljivo da su željezo, bakar i aluminij zatvarali manji kut od teflona sa danim tekućinama.



**Slika 11.** Vrijednosti kontaktnog kuta dobivenih mjerenjem s vodom, formamidom i dijodometanom na uzorcima aluminijsa, bakra, željeza i teflona

Iz slike 11 općenito se vidi da su vrijednosti kontaktnog kuta najmanje kod dijodometana, zatim veće kod formamida i da voda ima najveće vrijednosti kontaktnog kuta. To se može objasniti sa polarnošću tekućina kao što su voda i formamid, pa zaključujemo da polarne tekućine sa površinama zatvaraju veći kontakti kut. Dijodometan je izrazito nepolarna tekućina te zato ima manje vrijednosti kontaktnog kuta.

**Tablica 3.** Vrijednosti kontaktnih kutova dobivenih mjerenjem s vodom, formamidom i dijodometanom na uzorcima Al, Cu, Fe i teflona s magnetom

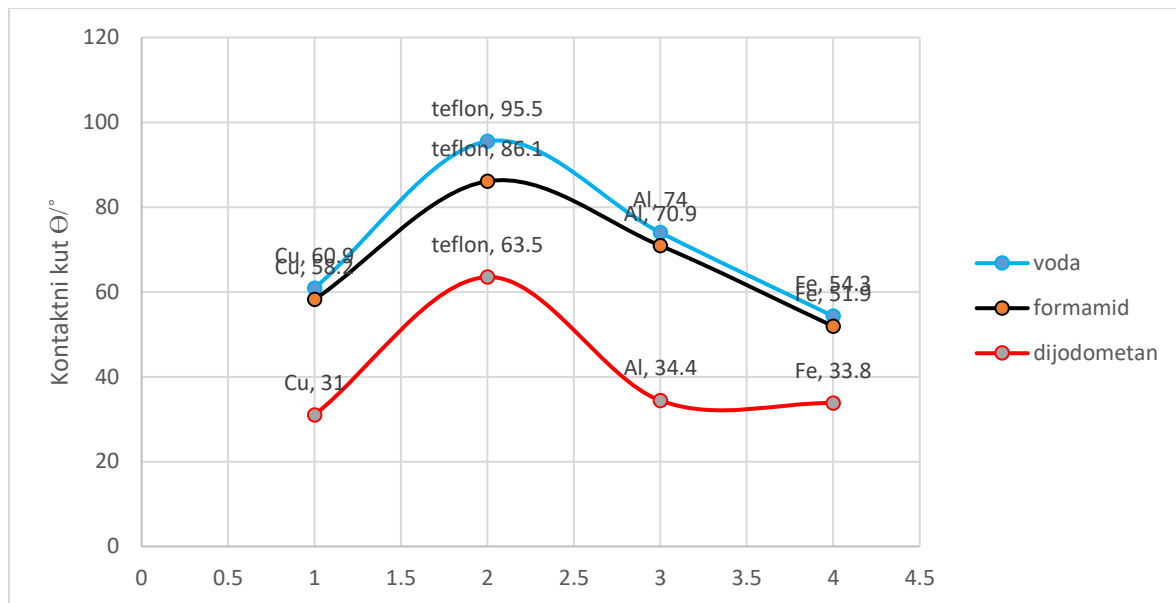
Uzorak	Kontaktni kut $\theta/^\circ$		
	Voda	Formamid	Dijodometan
Al	74,0	70,9	34,4
Cu	60,9	58,2	31,0
Fe	54,3	51,9	33,8
teflon	95,5	86,1	63,5

S magnetom vrijednosti kontaktnog kuta za vodu su najmanje kod željeza  $54,3^\circ$ , pa zatim kod bakra  $60,9^\circ$ , te aluminijsa  $74,0^\circ$  i najveći je kod teflona i iznosi  $95,5^\circ$ . Kontakti kut s magnetom prati isti trend kao i bez njega. Najveći kontaktni kut je kod teflona, pa vidimo da su i s magnetom hidrofobne interakcije između teflona i vode izražene.

Kod formamida s magnetom najmanji kontaktni kut ima željezo  $51,9^\circ$ , pa zatim slijede bakar  $58,2^\circ$ , aluminij  $70,9^\circ$  i najveći kut kontakta ima teflon  $86,1^\circ$ . Porast kontaktnog kuta s magnetom prati isti trend kao i bez magneta.

Dijodometan s magnetom ima najmanji kontaktni kut sa bakrom i on iznosi  $31,0^\circ$ , zatim slijedi željezo sa  $33,8^\circ$ , pa aluminij  $34,4^\circ$ . Najveći kontaktni kut ima dijodometan sa teflonom i on iznosi  $63,5^\circ$ . Porast kontaktnog kuta s magnetom kod dijodometana je drugačiji nego kod vode i formamida. Najmanji kontaktni kut dijodometan ima sa bakrom, pa zatim slijede željezo, aluminij i teflon, dok kod vode i formamida najmanji kontaktni kut ima željezo, pa zatim slijede bakar, aluminij i teflon. Vidljivo je iz tablice 3 da je kod dijodometana sa magnetom najmanji

kut kod bakra, za razliku od vode i formamida koji pokazuju najmanji kontaktni kut kod vode i formamida.



**Slika 12.** Vrijednosti kontaktnog kuta dobivenih mjerenjem s vodom, formamidom i dijodometanom na uzorcima aluminija, bakra, željeza i teflona pod utjecajem magnetskog polja

Iz slike 12. se vidi da polarna voda i formamid pokazuju veće vrijednosti kontaktnog kuta s magnetom, od nepolarnog dijodometana.



**Tablica 4.** Vrijednosti kontaktnih kutova dobivenih mjerenjem s vodom, formamidom i dijodometanom na uzorcima aluminija, bakra, željeza, teflona bez i s magnetom

Uzorak	Kontaktni kut $\theta/^\circ$		
	Voda	Formamid	Dijodometan
Al	75,7 74,0	67,3 70,9	42,0 34,4
Cu	65,4 60,9	56,6 58,2	38,0 31,0
Fe	51,3 54,3	50,8 51,9	36,6 33,8
teflon	103,7 95,5	97,3 86,1	60,6 63,5

Tablica 4 pokazuje vrijednosti dobivene mjerenjem s i bez magneta. Prva navedena vrijednost pokazuje izmjeren kontaktni kut bez magneta, a druga vrijednost pokazuje kontaktni kut s magnetom, tj. pod utjecajem magnetskog polja. Kontaktni kut vode sa željezom se povećava s magnetom, dok se sa bakrom, aluminijem i teflonom kontaktni kut smanjuje s magnetom. Kod formamida kontaktni kut se kod željeza, bakra, i aluminija povećava s magnetom, dok se kod teflona smanjuje. Kontaktni kut dijodometana sa željezom, bakrom i aluminijem se smanjuje s magnetom, dok se kod teflona povećava. Kod kontaktnog kuta sa vodom je najhidrofinost molekule vode u interakcijama sa uzorcima je najizraženija. Kod željeza sa vodom i formamidom je vidljiv trend da magnetsko polje snižava hidrofilnost što se očituje povećanjem kontaktnog kuta. Dijodometan je nepolarna tekućina pa se kontaktni kut sa željezom smanjuje i interakcije sa nepolarnom komponentom rastu. Kod teflona se zamjećuje da se kontaktni kut sa vodom i formamidom smanjuje dok kod dijodometana on raste.

## 4.2 REZULTATI SLOBODNE POVRŠINSKE ENERGIJE UZORAKA

Srednje vrijednosti kontaktnog kuta triju standardnih kapljevina (dijodmetan, formamid i redistirana voda) koristile su se za softversko određivanje slobodne površinske energije, koristeći OWRK metodu. Pomoću softvera Dataphysics-a također se izračunao disperzni i polarni dio slobodne površinske energije za temperature u rasponu od temperaturi  $22 \pm 1$  °C.

**Tablica 5.** Vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka aluminijskog, bakra, željeza i teflona

Uzorak	<i>Owens Wendt</i>			<i>Wu</i>		
	<i>Slobodna energija površine (<math>mJ m^{-2}</math>)</i>			<i>Slobodna energija površine (<math>mJ m^{-2}</math>)</i>		
	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$
<b>Al</b>	32,66	5,50	38,16	33,66	8,16	41,82
<b>Cu</b>	34,83	9,61	44,44	34,88	12,96	47,84
<b>Fe</b>	33,79	17,18	50,97	33,99	19,95	53,94
<b>teflon</b>	22,58	0,22	22,80	28,18	0,00	28,18

Kako bi dobili vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka aluminijskog, bakra, željeza i teflona, koristili smo dvije polarne i jednu nepolarnu tekućinu. Voda i formamid su korišteni kao polarne tekućine, a dijodometan je korišten kao nepolarna tekućina. Ukupna vrijednost

slobodne površinske energije za svaki uzorak je zbroj polarne i nepolarne komponente. Za izračun slobodne površinske energije koriste se metode Owens Wendta i Wu. Iz tablice 5 zaključujemo da obje metode daju bliske rezultate, pri čemu metoda po Wu daje malo veće vrijednosti slobodne površinske energije u odnosu na metodu Owens Wendta.

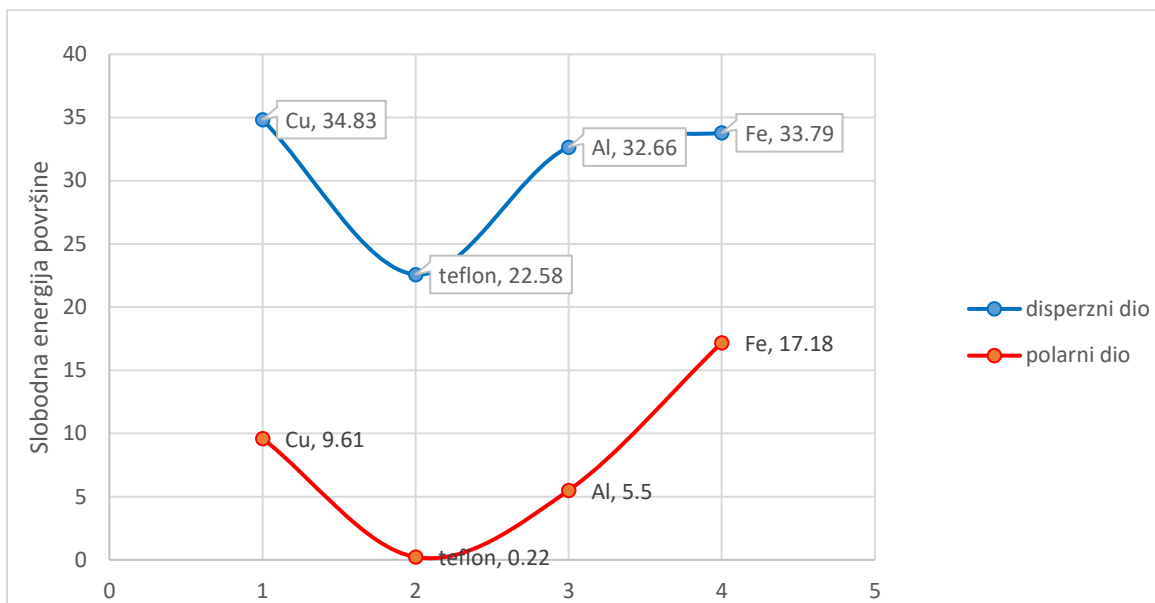
Metoda po Owens Wendtu pokazuje da je slobodna površinska energija najveća za uzorak željeza  $50,97 \text{ mJ m}^{-2}$ , pa se zatim lagano smanjuje na  $44,44 \text{ mJ m}^{-2}$  kod bakra, pa na  $38,16 \text{ mJ m}^{-2}$  kod aluminija i najmanju vrijednost pokazuje kod teflona  $22,80 \text{ mJ m}^{-2}$ .

Metoda po Wu pokazuje da je slobodna površinska energija najveća kod željeza i iznosi  $53,94 \text{ mJ m}^{-2}$ , pa da se smanjuje prema bakru  $47,84 \text{ mJ m}^{-2}$ , aluminiju  $41,82 \text{ mJ m}^{-2}$ , te najmanju vrijednost slobodne površinske energije ima teflon i ona iznosi  $28,18 \text{ mJ m}^{-2}$ .

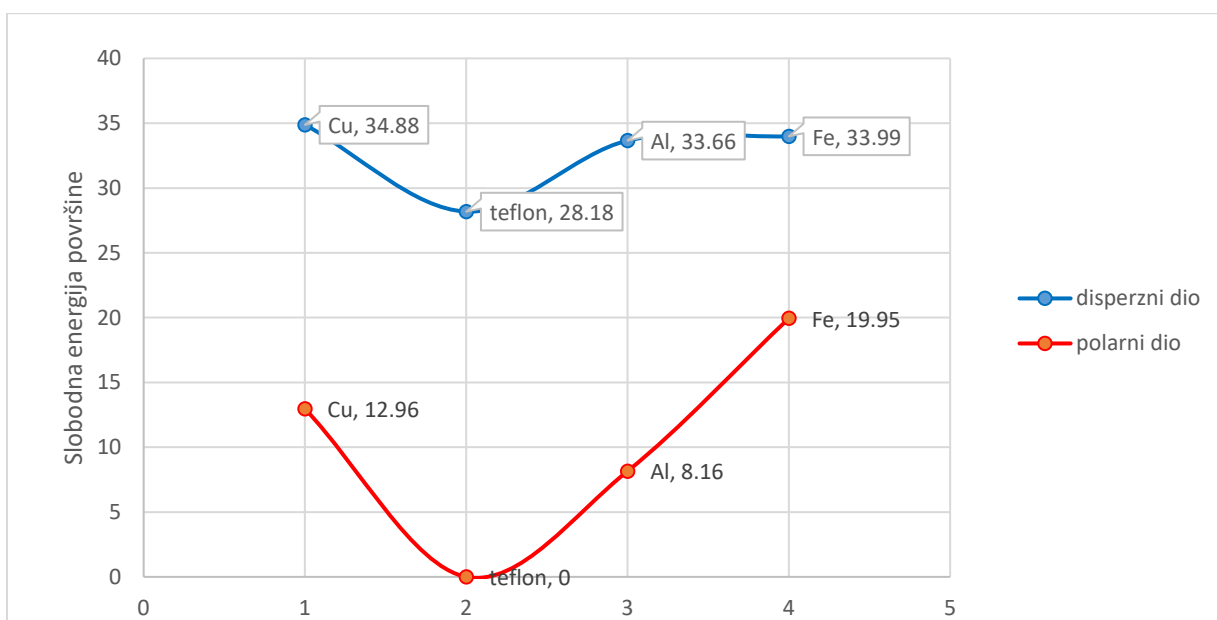
Može se primijetiti trend smanjena slobodne površinske energije od željeza preko bakra i aluminija i na kraju do teflona koji je vidljiv i kod modela po Owens Wendtu i kod modela po Wu-u.

Wu-ov model pokazuje veće vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka i to u intervalu od  $2,97 \text{ mJ m}^{-2}$  do  $5,38 \text{ mJ m}^{-2}$ . Vrijednosti slobodne površinske energije kod Wu-a prema vrijednostima Owens Wendta su veće za  $3,66 \text{ mJ m}^{-2}$  kod aluminija,  $3,4 \text{ mJ m}^{-2}$  kod bakra,  $2,97 \text{ mJ m}^{-2}$  kod željeza i  $5,38 \text{ mJ m}^{-2}$  kod teflona. Uočava se da je razlika najveća kod teflona, a najmanja kod željeza.

Uspoređujući disperznu i polarnu komponentu uočava se kako su vrijednosti disperzne komponente znatno veće nego vrijednosti polarne komponente. Kako bi se provjerila ova tvrdnja, napravljen je grafički prikaz disperznog i polarnog dijela slobodne površinske energije.



**Slika 13.** Prikaz vrijednosti disperznog i polarnog dijela slobodne površinske energije po Owens Wendt modelu



**Slika 14.** Prikaz vrijednosti disperznog i polarnog dijela slobodne površinske energije po Wu modelu

Iz grafičkog prikaza na slici 13 i slici 14 vidljivo je da je polarni udio manji i da čini manji dio slobodne površinske energije, dok je disperzni udio veći i čini veći dio površinske energije.

**Tablica 6.** Vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka aluminija, bakra, željeza i teflona pod utjecajem magnetskog polja

Uzorak	<i>Owens Wendt</i>			<i>Wu</i>		
	<i>Slobodna energija površine (mJ m<sup>-2</sup>)</i>			<i>Slobodna energija površine (mJ m<sup>-2</sup>)</i>		
	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$
<b>Al</b>	33,81	5,38	39,19	35,23	7,57	42,79
<b>Cu</b>	35,61	11,02	46,63	35,72	14,11	49,83
<b>Fe</b>	35,04	14,98	50,02	35,03	18,05	53,08
<b>teflon</b>	22,76	1,64	24,40	26,31	2,55	28,86

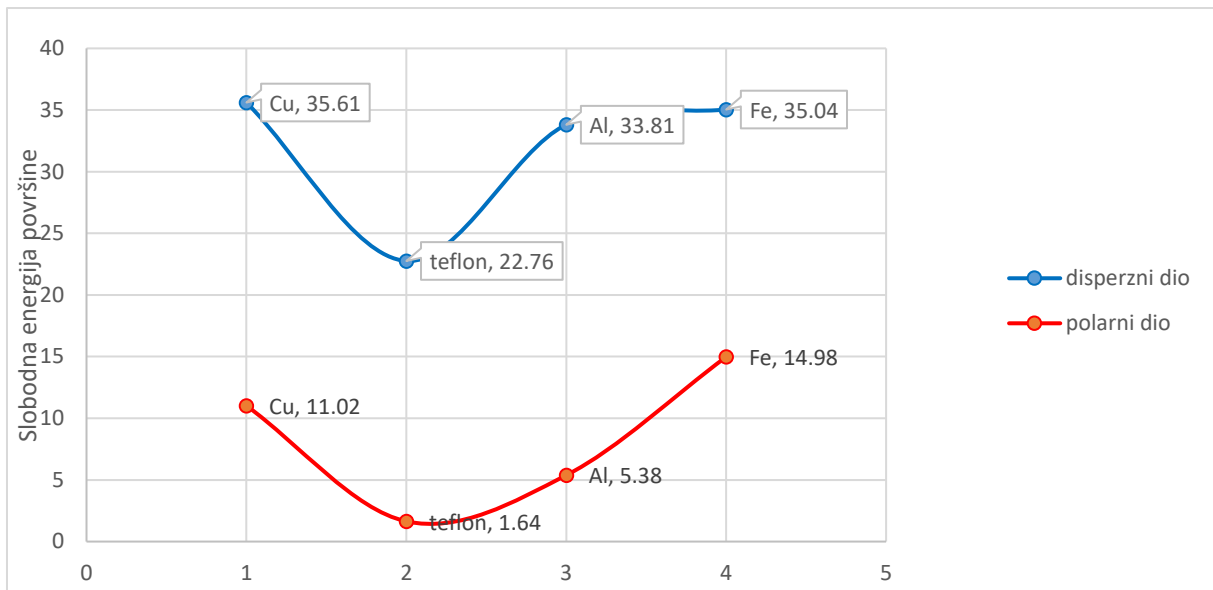
Metoda po Owens Wendtu pokazuje da je slobodna površinska energija pod utjecajem magneta najveća za uzorak željeza  $50,02 \text{ mJ m}^{-2}$ , pa se zatim lagano smanjuje na  $46,63 \text{ mJ m}^{-2}$  kod bakra, pa na  $39,19 \text{ mJ m}^{-2}$  kod aluminijsa i najmanju vrijednost pokazuje kod teflona  $24,40 \text{ mJ m}^{-2}$ .

Metoda po Wu pokazuje da je slobodna površinska energija pod utjecajem magneta najveća kod željeza i iznosi  $53,08 \text{ mJ m}^{-2}$ , pa da se smanjuje prema bakru  $49,83 \text{ mJ m}^{-2}$ , aluminijsu  $42,79 \text{ mJ m}^{-2}$ , te najmanju vrijednost slobodne površinske energije ima teflon i ona iznosi  $28,86 \text{ mJ m}^{-2}$ .

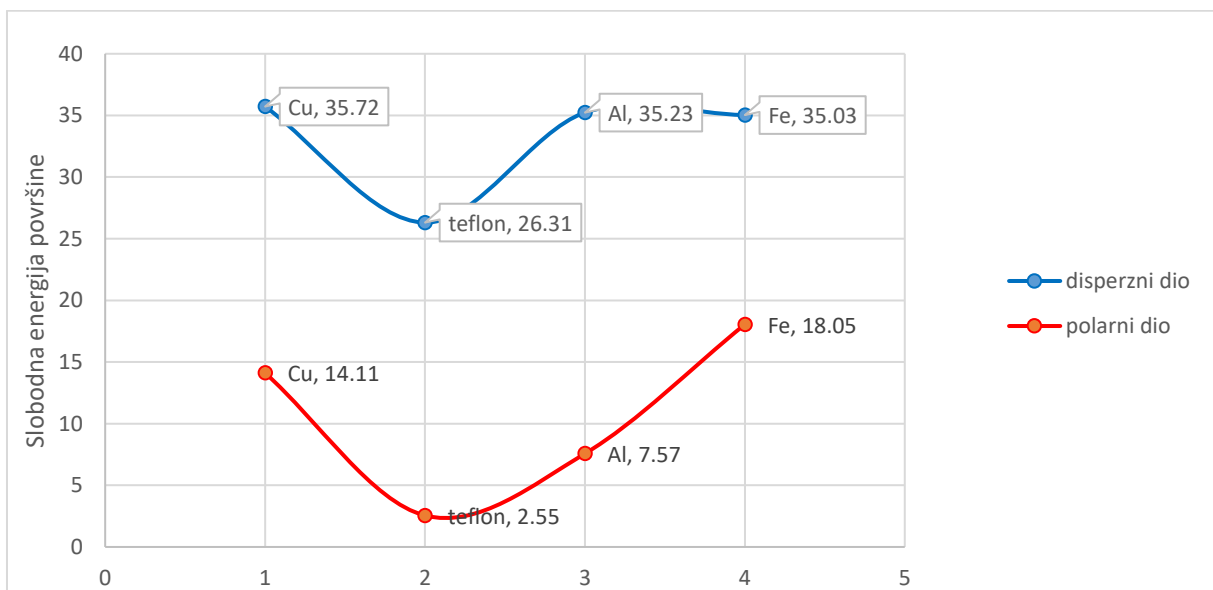
Kao i kod vrijednosti slobodne površinske energije bez magneta, sa magnetom se uočava trend smanjena slobodne površinske energije od željeza preko bakra i aluminijsa i na kraju do teflona. Taj trend je prisutan i kod modela po Owens Wendtu i kod modela po Wu-u.

Wu-ov model pod utjecajem magneta pokazuje veće vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka od Owens Wendt modela. Razlike u vrijednostima slobodne površinske energije kod Wu-a prema vrijednostima Owens Wendta kreću se u intervalu od  $3,06 \text{ mJ m}^{-2}$  do  $4,46 \text{ mJ m}^{-2}$ . Razlika je najveća kod teflona, a najmanja kod željeza, isto kako je i bio slučaj sa vrijednostima slobodne površinske energije dobivene bez utjecaja magneta. Razlike u vrijednostima slobodne površinske energije kod Wu-a prema vrijednostima Owens Wendta manje su kod mjerenja sa magnetom, nego što su bile bez njega.

Polarna komponenta pod utjecajem magneta ima znatno manji udio od disperzne komponente, što je isto bio slučaj kod vrijednosti dobivenih bez magneta. Kako bi se ti udjeli preglednije vidjeli napravljeni su grafički prikazi disperznog i polarnog dijela slobodne površinske energije za Owens Wendt model kao i za Wu model pod utjecajem magnetskog polja ( slika 14 i slika 15).



**Slika 14.** Prikaz vrijednosti disperznog i polarnog dijela slobodne površinske energije po Owens Wendt modelu s magnetom



**Slika 15.** Prikaz vrijednosti disperznog i polarnog dijela slobodne površinske energije po Owens Wendt modelu pod utjecajem magnetskog polja

**Tablica 7.**

Vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka aluminija, bakra, željeza i teflona bez i s magneta

Uzorak	<i>Owens Wendt</i>			<i>Wu</i>		
	<i>Slobodna površinska energija (mJ m<sup>-2</sup>)</i>			<i>Slobodna površinska energija (mJ m<sup>-2</sup>)</i>		
	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$	$\gamma^d$	$\gamma^p$	$\gamma$
Al	32,66	5,50	38,16	33,66	8,16	41,82
	33,81	5,38	39,19	35,23	7,57	42,79
Cu	34,83	9,61	44,44	34,88	12,96	47,84
	35,61	11,02	46,63	35,72	14,11	49,83
Fe	33,79	17,18	50,97	33,99	19,95	53,94
	35,04	14,98	50,02	35,03	18,05	53,08
teflon	22,58	0,22	22,80	28,18	0,00	28,18
	22,76	1,64	24,40	26,31	2,55	28,86

U tablici 7. navedene su vrijednosti slobodne površinske energije uzoraka aluminija, bakra, željeza i teflona bez i s magneta. Prve (crvene) vrijednosti označavaju vrijednost slobodne površinske energije uzoraka bez magneta. Druge (crne) vrijednosti označavaju vrijednost slobodne površinske energije uzoraka s magnetom.



Iz tablice 7. je vidljivo povećavanje vrijednosti slobodne površinske energije s magnetom. Točnije, vrijednosti slobodne površinske energije s magnetom se povećavaju za aluminij, bakar i teflon. Vrijednosti kod željeza se jako malo smanjuju i to za  $0,95 \text{ mJ m}^{-2}$  kod Owens Wendt modela i za  $0,86 \text{ mJ m}^{-2}$ .

## 5. ZAKLJUČAK

Na električni dipolni moment postoji ukupna vanjska sila, sila od homogenog magnetskog polja. Na magnetski dipol je ukupna sila 0. Vanjsko homogeno magnetsko polje ne djeluje ukupnom silom na magnetski dipolni moment. Za razliku od toga, vanjsko homogeno magnetsko polje djeluje nekom silom na električni dipolni moment. Zato što se vezani naboji gibaju, pa postoji ukupna sila. Dakle iz toga je jasno zašto vanjsko magnetsko polje može bitno smanjiti doprinos slobodne površinske energije polarne komponente, a vrlo malo i gotovo nimalo utjecati na disperznu komponentu slobodne površinske energije.

Disperzne sile također imaju svoj uzrok u el. Dipolnim momentima, ali su ti dipolni momenti međusobno inducirani i kao takvi su sami po sebi puno slabiji. Vanjsko magnetsko polje ima vrlo slabi utjecaj na disperznu komponentu, što je i vidljivo na slikama 12 i 13, te na slikama 14 i 15.

Kod teflona je najveća razlika u vrijednostima polarne komponente slobodne površinske energije i kod Owens Wendt modela i Wu modela. Relativna dielektrična permeabilnost  $\epsilon_r$  iznosi 2,1. Prema tome, teflon je magnetski gotovo neosjetljiv i sav magnetski utjecaj se prenosi na tekućine. Zato se i vidi da se polarna komponenta mijenja najviše kod teflona. Magnetsko polje djeluje praktički samo na tekućinu, dok kod drugih djeluje i na materijal. To može utjecati i na adheziju.

## 6. POPIS SIMBOLA:

$w$ - rad

$A$ - površina tekućine

$p_u$  - unutrašnji tlak

$p_v$  – vanjski tlak

$r$  - polumjer zakrivljenosti

$\sigma_{sg}$  - napetost na granici stjenke kapilare i zraka

$\sigma_{sl}$  -napetost na granici stjenke kapilare i tekućine

$\sigma_{lg}$  površinsku napetost tekućine

$F$ - sila

$l$ - duljina

$\mu_r$ - relativne magnetska permeabilnosti

$\theta$  -kontaktnog kuta

$\gamma_{sv}$  - slobodna među površinska energija među površine kruto-para

$\gamma_{sl}$  – slobodna među površinska energija među površine kruto-kapljevina

$\gamma_{lv}$  - slobodna među površinska energija među površine kapljevina-para

$\pi_e$  – ravnotežni pritisak razlijevanja

$\gamma_s$  – slobodna površinska energija krutine u vakuumu

$\gamma_{sv}$  – slobodna površinska energija krutine u ravnoteži sa zasićenim parama kapljevine

$p$ -pritisak para

$p_o$ -ravnotežni pritisak para

$R$ -opća plinska konstanta

$T$ -apsolutna temperatura

$\Gamma$ -koncentracija adsorbiranih para na krutoj površini

$\sigma_s$  - površinska napetost krute tvari,

$\sigma_L$  - površinska napetost tekuće tvari

$\sigma_{LS}$  - površinska napetost između tekućine i krute tvari

## 7. POPIS LITERATURE

1. <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~kupcic/praktikum/vjezba1a.pdf>
2. <https://www.artas.hr/magneti/magnetizam.htm>
3. <http://www.surface-tension.de/LIQUIDS/Diiodomethane3.htm>
4. [https://chem.libretexts.org/Core/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/States\\_of\\_Matter/Properties\\_of\\_Liquids/Contact\\_Angles](https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Liquids/Contact_Angles)
5. [http://www.trimen.pl/witek/ciecze/old\\_liquids.html](http://www.trimen.pl/witek/ciecze/old_liquids.html)
6. <http://www.firsttenangstroms.com/pdfdocs/STPaper.pdf>
7. <http://www.firsttenangstroms.com/pdfdocs/CAPaper.pdf>
8. [http://www.biolinscientific.com/attension/applications/?card=AA7&gclid=CjwKC-Ajw87PNBRBAEiwA0XAIr\\_yfqKjHBRPtbqYf18D-9nE3ciFDfSuf2UXN2zOzS0hqKN6iSCFPFRoCcnwQAvD\\_BwE](http://www.biolinscientific.com/attension/applications/?card=AA7&gclid=CjwKC-Ajw87PNBRBAEiwA0XAIr_yfqKjHBRPtbqYf18D-9nE3ciFDfSuf2UXN2zOzS0hqKN6iSCFPFRoCcnwQAvD_BwE)
9. "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), 2015.
10. <https://www.kruss.de/services/education-theory/glossary/owens-wendt-rabel-and-kaelble-owrk-method/>
11. <http://www.biolinscientific.com/>

## Lucija Kisić

████████████████████ Osnovnu školu „Tin Ujević“ pohađala je do 2008. godine, nakon čega upisuje X.tu gimnaziju „Ivan Supek“ u Zagrebu. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije upisuje 2012. godine, te je trenutno redoviti student 3. godine preddiplomskog studija Primijenjena kemija. Godine 2015te, radi praksu u tvrtki Franck d.d.