

# Električna svojstva polimera

---

**Vuletić, Bruno**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Bjelovar University of Applied Sciences / Veleučilište u Bjelovaru**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:144:057075>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository of Bjelovar University of Applied Sciences](#)



VELEUČILIŠTE U BJELOVARU  
PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ MEHATRONIKA

## **ELEKTRIČNA SVOJSTVA POLIMERA**

Završni rad br. 06/MEH/2018

Bruno Vuletić

Bjelovar, rujan 2018.



**Veleučilište u Bjelovaru**  
Trg E. Kvaternika 4, Bjelovar

## 1. DEFINIRANJE TEME ZAVRŠNOG RADA I POVJERENSTVA

Kandidat: **Vuletić Bruno**

Datum: 22.05.2018.

Matični broj: 001449

JMBAG: 0246054505

Kolegij: **TEHNIČKI MATERIJALI**

Naslov rada (tema): **Električna svojstva polimera**

Područje: **Tehničke znanosti**

Polje: **Strojarstvo**

Grana: **Proizvodno strojarstvo**

Mentor: **mr.sc. Stjepan Golubić**

zvanje: **viši predavač**

Članovi Povjerenstva za ocjenjivanje i obranu završnog rada:

1. Tomislav Pavlic, mag.ing.mech., predsjednik
2. mr.sc. Stjepan Golubić, mentor
3. Božidar Hršak, mag.ing.mech., član

## 2. ZADATAK ZAVRŠNOG RADA BROJ: 06/MEH/2018

U radu je potrebno opisati:

- polimerne materijale općenito
- vrste polimera s obzirom na električna svojstva
- karakteristična svojstva polimera
- električne kvarove polimera
- primjenu polimera u mehatronici

Zadatak uručen: 22.05.2018.

Mentor: **mr.sc. Stjepan Golubić**



## *Zahvala*

Zahvaljujem se mentoru mr.sc. Stjepanu Golubiću na pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada. Te se na poseban način zahvaljujem mojoj dragoj Ani koja me bodrila i poticala tijekom čitavog studija.

# Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. UKRATKO O POLIMERIMA .....	2
3. DIELEKTRIČNA KONSTANTA.....	5
4. POLARIZACIJA POLIMERA.....	7
5. ELEKTRIČNI I TOPLINSKI GUBICI U DIELEKTRIKU .....	10
6. ELEKTRIČNA OTPORNOST .....	12
7. FIZIČKI UZROCI VOLUMNE PROVODNOSTI.....	16
8. PROBLEMI S PRIMJENOM – ELEKTRIČNI KVAROVI.....	18
9. ELEKSTROSTATSKI NABOJ .....	26
10. ELEKTRETI .....	28
11. MAGNETSKA SVOJSTVA .....	30
11.1 Magnetska rezonanca.....	30
12. VODLJIVI POLIMERI.....	32
13. UPORABA POLIMERA U MEHATRONICI.....	37
14. ZAKLJUČAK.....	40
15. LITERATURA .....	41
16. OZNAKE I KRATICE.....	42
16.1 Fizikalne veličine .....	42
16.2 Polimeri.....	43
17. SAŽETAK.....	45
18. ABSTRACT .....	46

## 1. UVOD

Cilj ovog završnog rada je naglasiti općenitosti električnih svojstava polimera i njihove vodljivosti, a ne specifičnosti svakog pojedinog materijala. Dielektrična svojstva, zajedno sa povoljnim svojstvima obrade, čine polimere dobar izbor za izolacijske primjene i imaju ulogu u mnogim električnim primjenama. Primjena polimera u mehatronici je široka i najčešće se izrađuju od polietilena, polizoprena i PVC-a, najviše zbog svojih izolacijskih svojstva i toplinske postojanosti. Ovaj završni rad obrađuje temu iz područja tehničkih materijala. Na samom početku rada opisane su glavne značajke, prednosti i nedostaci polimera te njihova podjela. U drugom dijelu rada su opisana električna svojstva polimera, počevši od dielektrične konstante, koja je najbitnija značajka polimera, i provlači kroz sva poglavlja, polarizacije polimera, pa sve do njihove vodljivosti, naboja, magnetskih svojstava i primjene.

## 2. UKRATKO O POLIMERIMA

Polimeri su prirodne i sintetičke, organske i anorganske tvari i materijali kod kojih su osnovni sastojak makromolekule pa se stoga nazivaju i makromolekulni spojevi. Sustav makromolekula koji nastaje kao rezultat polimerizacije naziva se polimerizat i kao takav koristi se kao tehnički materijal. Polimerizat je u najvećem broju slučajeva tek osnovni sastojak polimernog materijala te mu se dodaju raznovrsne niskomolekulne tvari i dodaci (ojačala, punila, omekšivala). Dodaci mogu imati vrlo velik utjecaj na svojstva polimera i najčešće se i dodaju kako bi se naglasilo neko poželjno svojstvo, odnosno kako bi se smanjio utjecaj nekoga nepoželjnog svojstva [1].




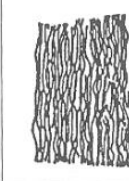



U prošlosti, do početka 20. stoljeća, u primjeni su bili gotovo isključivo prirodni polimerni materijali (kaučuk, celuloza). Danas u tehničkoj primjeni uvelike prevladavaju sintetički polimerni materijali, prvenstveno zahvaljujući svojstvima koja su superiorna onima prirodnih materijala [1].

Polimeri su zbog svojih svojstava vrlo zanimljivi i kao alternativni konstrukcijski materijali u sve više područja, iako prilikom njihove primjene treba biti svjestan i njihovih ograničenja i razlika u odnosu na klasične konstrukcijske materijale, prvenstveno mislimo na metale. U osnovi polimere odlikuju niska gustoća, vrlo dobra električna i toplinska izolacijska svojstva, uz odgovarajuće dodatke i otpornost na atmosferske utjecaje, otpornost na djelovanje agresivnih medija i agenasa i lako oblikovanje. Glavni nedostatak polimernih materijala koji ograničava njihovu primjenjivost jest nedovoljna toplinska postojanost. Toplinska postojanost najčešće se formalno označava kao sposobnost zadržavanja željenog oblika pri povišenoj temperaturi. Drugi vrlo važan nedostatak su mehanička svojstva. Polimeri imaju nisku tvrdoću, pa je upitna njihova primjena za konstrukciju dijelova koju su izloženi povišenim površinskim pritiscima. U svrhu povišenja tog svojstva polimerima se dodaju razna tekstilna vlakna koja povisuju prekidanu čvrstoću. Od ostalih svojstava koja se mogu opisati kao nepoželjna može se navesti sklonost nekih polimera upijanju tekućina i bubrenju prilikom kontakta s vodom, benzinom, mineralnim uljima i raznim otapalima. Neke vrste polimera sklone su pužanju i kad su izložene malim opterećenjima i to već pri sobnim temperaturama [1].

Kako je već spomenuto, osnovna svojstva materijala mogu se modificirati i poboljšavati dodavanjem pojedinih dodataka koji ih tada čine prikladnima za neke primjene za koje inače ne bi bili upotrebljivi. Svojstva koja se uobičajeno modificiraju tj. poboljšavaju jesu: vlačna

čvrstoća, udarna žilavost, toplinska postojanost, dielektrična svojstva, klizna svojstva i toplinska provodnost jer su ona najzanimljivija za praktičnu primjenu. U tu se svrhu osnovnom polimeru dodaju razni kemijski spojevi kao što su stabilizatori, emulgatori i sl. koji djeluju na molekularnoj razini, kao i razina vlakna te punila koja postaju dio tvorevine i pridonose promjeni svojstava [1].

Opće prihvaćena podjela polimera koja se zasniva na njihovu ponašanju pri povišenim temperaturama prikazana na slici 2.1.

Vrste polimera Struktura	PLASTOMERI				ELASTOMERI		DUROMERI
	amorfni		kristalasti		elasto-plastomeri	umreženi	
	linearna	granata	linearna		rahlo umrežena		
shematski prikaz strukture							
strukturna svedenost	amorfna		djelomice kristalna, izotropna	djelomice kristalna, anizotropna	amorfna do slabo sredena		amorfna

Slika 2.1 Podjela polimera ovisno o strukturi i vrsti [2]

S obzirom na ponašanje pri povišenoj temperaturi razlikujemo:

- Duromere – u određenim fazama dobivanja i prerade mekšaju ako ih se zagrijava; pri zagrijavanju neumreženog duromera dolazi do ubrzavanja njegovog umrežavanja tako da nakon nekog vremena, usprkos povišene temperature, duromer više nije omekšan. Daljnje povišenje temperature vodi do razlaganja duromera bez prethodnog mekšanja.
- Elastomere – mogu podnijeti velika rastezanja (do više stotina % pri sobnoj temperaturi), a nakon rasterećenja vraćaju se u izvorni oblik. Rahlo umrežavanje elastomera (prirodnog ili sintetičkih kaučuka) vodi do izvjesnog smanjenja istezljivosti (na oko 100%) ali i do poboljšanja nekih svojstava značajnih za primjenu, a da pritom ostaje sačuvana sposobnost elastičnog vraćanja nakon rasterećenja.
- Plastomeri – pri zagrijavanju omekšavaju, porastom temperature raste nepravilno gibanje atoma oko njihovih ravnotežnih položaja, te konačno dolazi do prekida veza među atomima. Pri zagrijavanju najprije slabe sekundarne veze čime je omogućeno lakše uzajamno pomicanje lanaca makromolekula – tečenje plastomera. Pri hlađenju



sekundarne veze se ponovno uspostavljaju, te se materijal vraća u prvobitno stanje. Na ovoj pojavi temelji se prerada plastomera, kao i njihova osjetljivost na povišenje temperature. Pri prekoračenju određene temperature dolazi do njihova razlaganja [1].

### 3. DIELEKTRIČNA KONSTANTA

Polimeri su već dugo poznati kao izolacijski materijali i često se koriste za izoliranje kablova ili električnih uređaja. Oni se nazivaju i dielektrici. Važno svojstvo polimera je njezina dielektrična konstanta ili relativna permitivnost. Ona opisuje sposobnost materijala za pohranjivanje električnog naboja. To je parametar bez dimenzija, definiran kao omjer vanjskog (primijenjenog) polja  $E_0$  (polje bez dielektrika) i električnog polja unutar dielektrika,  $E$  [3]:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad (3.1)$$

gdje je:  $\varepsilon$  – relativna permitivnost

$E_0$  – vanjsko polje (polje bez dielektrika)

$E$  – unutarnje polje (polje unutar dielektrika)

Polje unutar dielektrika,  $E$ , je zbroj vektora  $E = E_0 + E_p$ , vanjskog polja  $E_0$  i polja  $E_p$  uzrokovanog polarizacijom tvari  $P$

$$E_p = -\frac{P}{\varepsilon_0} \quad (3.2)$$

gdje je:  $\varepsilon_0$  – permitivnost vakuuma

$P$  – polarizacija tvari

$E_p$  – polje uzrokovano polarizacijom tvari

Polarizacija je obično proporcionalna makroskopskom polju, osobito ako je slabo:

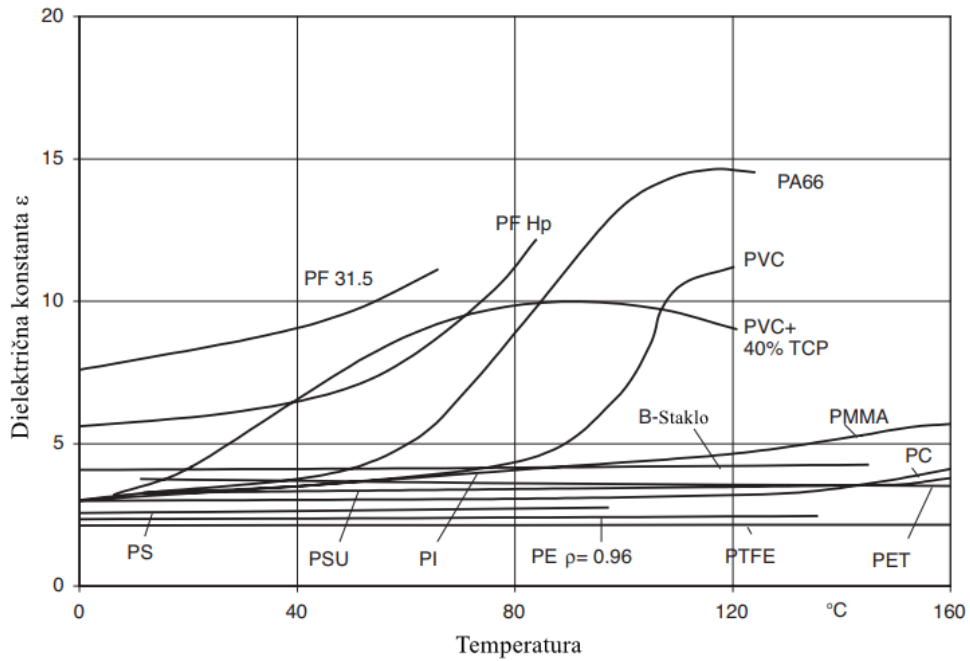
$$E_p = -X^E \quad (3.3)$$

ili

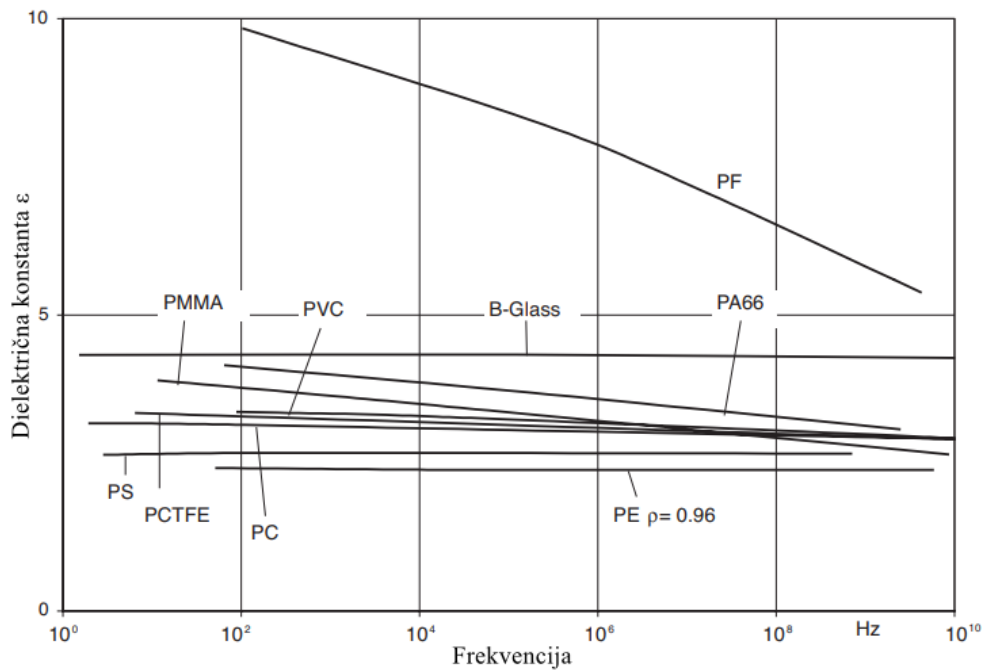
$$\varepsilon = 1 + X \quad (3.4)$$

gdje je:  $X$  - električna susceptibilnost koja opisuje svojstvo dielektrika da se u električnom polju mogu polarizirati.

Slike 3.1 i 3.2 prikazuju dielektrični koeficijent odabranih polimera u funkciji temperature i frekvencije, tj. njihovih odnosa.



Slika 3.1 Dielektrična konstanta kao funkcija temperature za različite polimere [4]

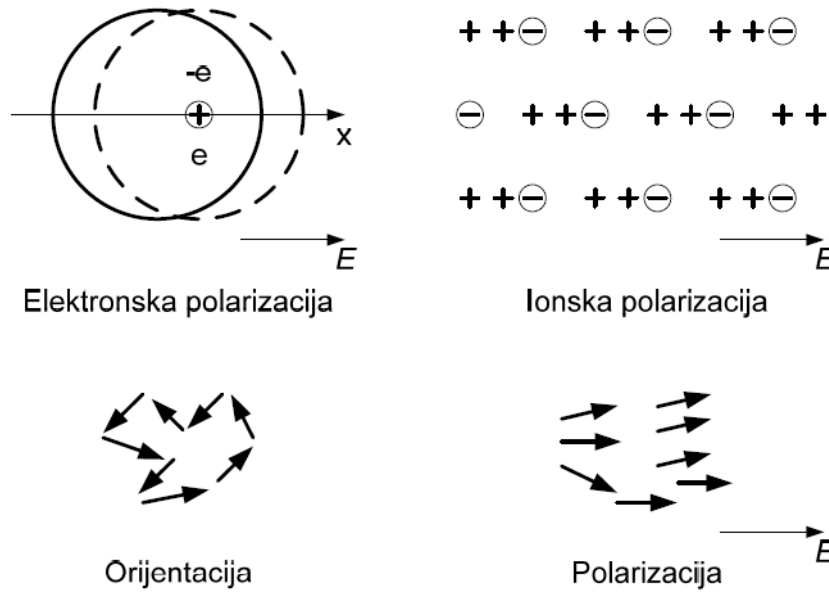


Slika 3.2 Dielektrična konstanta kao funkcija frekvencije za različite polimere [4]

## 4. POLARIZACIJA POLIMERA

Dielektrična svojstva polimernih materijala ovise o kemijskom sastavu i strukturi polimera. Većina polimera su izolatori što znači da ti materijali sprječavaju strujanje električne struje. Takav materijal se naziva dielektrični ili izolator. Ipak, treba istaknuti da električna svojstva svih polimera nisu jednaka nego ovise o polarnosti, odnosno ne polarnosti njihovih makromolekula. Polarni polimeri kao što su PMMA, PVC, PA, ili PC su, zbog dipolne polarizacije i gibanja dipola, samo umjereno dobri izolatori. Napolarni polimeri, primjerice PTFE i većina drugih fluoropolimera, te PE, PP i PS imaju visoku električnu otpornost i nisku permitivnost te su dobri izolatori. Budući da struktura makromolekula određuje jesu li polimeri polarni ili nisu ona ujedno određuje i električna svojstva polimera i polimernih materijala. Na električna svojstva polimernih materijala, a posebice polarnih, bitno utječu uvjeti okoline kao što su vlaga i/ili temperatura. Naime, polarni polimeri rado apsorbiraju vlagu iz okoline, pa ona može često sadržavati znatnu količinu vode pri sobnoj temperaturi. Prisutnost vode općenito snižava permitivnost te specifičnu električnu otpornost i električnu otpornost površine. Porastom temperature polarnih polimera dolazi do bržeg gibanja polimernih lanaca i bržeg poravnavanja dipola. Naravno, to se događa pri temperaturi iznad staklišta jer je tada puno veća gibljivost molekula. Porastom temperature raste permitivnost polarnih polimera. Napolarni polimeri ne apsorbiraju vlagu, a porast temperature ne utječe na polarizaciju elektrona pa nisu osjetljivi na te čimbenike [6].

Dva najvažnija molekularna tipa za polarizaciju dielektrika u električnom polju su orijentacijska polarizacija i polarizacija pomaka. Pod utjecajem električnog polja, naboji deformiraju smjer polja i pri tome poprimaju smjer atomske jezgre (elektronska polarizacija) ili iona (ionska polarizacija). To često nazivamo polarizacijom pomaka i prikazan je na slici 4.1. Zbog svoje strukture, neke molekule posjeduju dipolni moment u prostorima bez električnog polja. Kada te molekule uđu u električno polje, oni će se orijentirati prema snazi polja. Ovo se općenito naziva orijentacijska polarizacija i shematski je prikazana na slici 4.1 [4].



Slika 4.1 Proces polarizacije [4]

Potrebno je neko vrijeme da se molekularni dipoli pomaknu ili deformiraju u smjeru polja, a još dulje vrijeme za orijentacijsku polarizaciju. Što je okolni medij viskozniiji, pojava traje duže. U izmjeničnim područjima visokih frekvencija, premještanje dipola može zaostajati za određenom frekvencijom. Ova pojava se zove dielektrična relaksacija, što dovodi do dielektričnih gubitaka koji se pojavljuju kao dielektrično zagrijavanje polarnih molekula. Nasuprot tome, promjene se u polarizaciji pomaka događaju tako brzo da čak može slijediti brzinu svjetlosti. Indeks loma svjetlosti  $n$ , određen je o udjelu pomaka,  $\epsilon_v$ , dielektrične konstante. Odnos između  $n$  i  $\epsilon_v$  dan je izrazom :

$$n = \sqrt{\epsilon_v} \quad (4.1)$$

Postoji način mjerenja polarizacijskih svojstava kod polimera tako da polarizacija elektrona određuje indeks loma svjetlosti. Treba napomenuti da se ionski ili molekularni segmenti polimera uglavnom stimuliraju u sredini infracrvenog spektra. Nekoliko polimera ima trajne dipole. Najpoznatiji takav polimer je polivinil klorid, jer C = O predstavlja trajni dipol. Pojam dipol označava manje molekule građene od raznovrsnih atoma, u kojima se, zbog razlike u elektronegativnosti atoma, težišta pozitivnog i negativnog naboja ne poklapaju. Atom koji je više elektronegativan jače privlači zajedničke elektrone u kovalentnoj vezi od drugog atoma, time elektronegativniji atom poprima negativni naboj od

manje elektronegativnog atoma koji poprima pozitivni naboj. Takvi polimeri trpe od dielektričnih gubitaka u izmjeničnim poljima određenih frekvencija.

Slika 4.2 prikazuje frekvencijsku ovisnost o susceptibilnosti.



Slika 4.2 Frekvencijska ovisnost različitih slučajeva polarizacije [4]

Osim toga, utjecaj punila na relativni dielektrični koeficijent ima značajan praktični interes. Pravilo mješavina može se koristiti za izračunavanje efektivnog dielektričnog koeficijenta matrice s pretpostavljenim sferičnim oblikovanim punilima. Materijali s nepropusnim zrakom, kao što su npr. pjene, dielektrični koeficijent punila iznosi 1,  $\epsilon_{\text{zraka}} = 1$ . Da li je molekula stimulirana na njegovu rezonantnu frekvenciju u izmjeničnim poljima ili ne ovisi o vremenu relaksacije. Vrijeme opuštanja ovisi o viskoznosti, temperaturi i radijusu molekule [4].

## 5. ELEKTRIČNI I TOPLINSKI GUBICI U DIELEKTRIKU

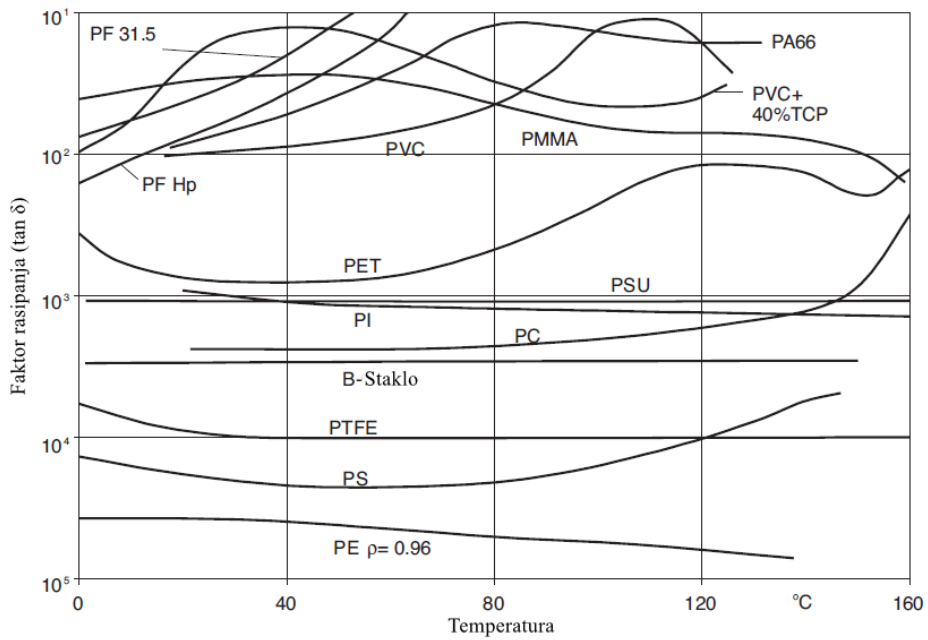
Električni gubici kroz žičanu izolaciju kroz koju protječu visoke frekvencijske struje moraju biti što manji. Izolatori se nalaze u prijenosnim vodovima ili u visoko frekventnim područja kao što su kućišta radarskih antena. Tako bi trebali odabrati materijale koje imaju niske električne gubitke za tu vrstu uporabe. S druge strane, u nekim slučajevima želimo generirati toplinu pri visokim frekvencijama kao npr. toplinsko brtvljenje polarnih polimera. Važna tehnika pri visokim frekvencijama koja se koristi u izradi mekih PVC ploča kao što su oni koji se susreću u pokrovima sjedišta automobilskih vinila. Pri višim frekvencijama dielektrično zagrijavanje može postati veliki problem kod polimera koji su skloni velikim gubicima. Da bi procijenili da li je materijal pogodan za bilo koju primjenu, moramo znati svojstva gubitaka materijala i izračunati stvarni gubitak električne energije. Polietilen i polistiren su savršeno prikladni kao izolatori u korištenju pri visokoj frekvenciji [4].

Tipični rasponi za dielektrični disipacijski faktor različitih polimernih skupina su:

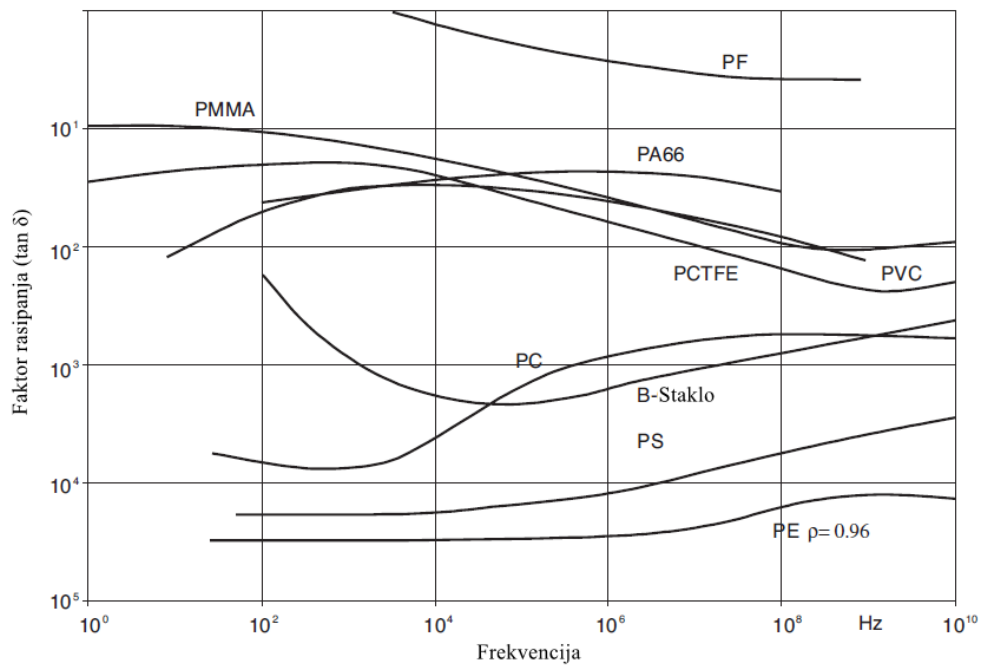
- nepolarni polimeri ( PS, PE, PFE)  $\tan\delta < 0,005$
- polarni polimeri  $\tan\delta = 0,001 - 0,02$
- Duromeri - smole ispunjene staklom, papirom ili celulozom :  $\tan\delta = 0.02 - 0.5$  [4].

Niska vrijednost faktora disipacije ukazuje na visokokvalitetne i visoke performanse elektroničkih ili električnih uređaja. To je važno za polimere u visokofrekventnim primjenama kao što su radarska oprema ili mikrovalni dijelovi. Niske vrijednosti znače bolji dielektrični materijali s manje dielektričnog grijanja. Visok faktor disipacije je važan za polimere koji se trebaju zagrijati u radijskoj frekvenciji ili mikrovalnoj peći za zavarivanje ili sušenje. Također, materijal koji se koristi za velike kapacitete zahtjeva visoku dielektričnu konstantu i niski faktor disipacije. Faktor disipacije može se koristiti i za procjenu karakteristika ili kvalitete izolacijskog materijala u primjenama kao što su kablovi, spojevi itd. za sadržaj vlage [4].

Slike 5.1 i 5.2 prikazuju faktor disipacije  $\tan \delta$  kao funkciju temperature i frekvencije.



Slika 5.1 Dielektrični disipacijski faktor kao funkcija temperature za različite polimere [4]



Slika 5.2 Dielektrični disipacijski faktor kao funkcija frekvencije za različite polimere [4]



## 6. ELEKTRIČNA OTPORNOST

Otpornost toku električne struje,  $R$ , u uzorku u obliku ploče u istosmjernom naponskom polju, definiran je Ohmovim zakonom :

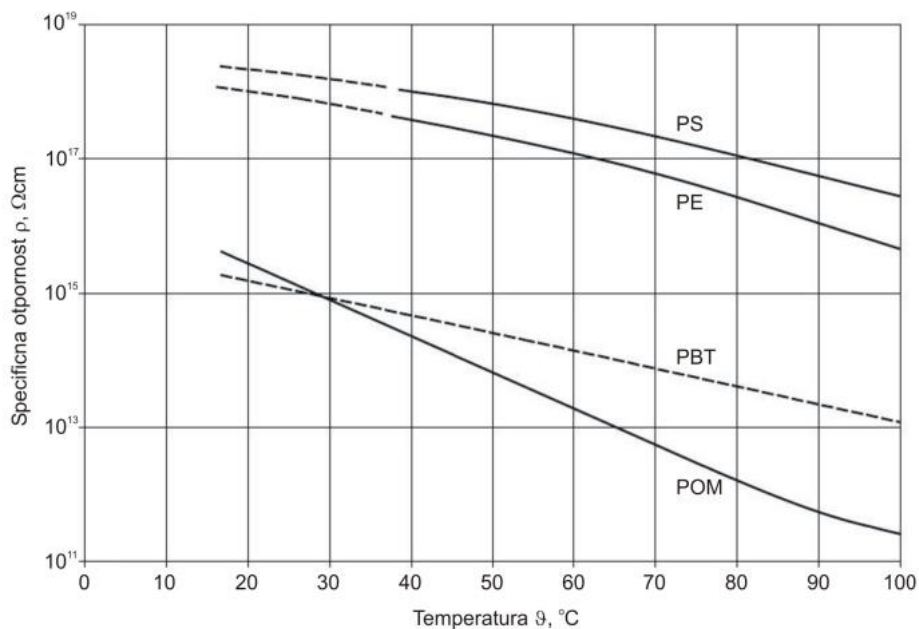
$$R = \frac{U}{I} \quad (6.1)$$

Gdje je:  $U$  - utrošeni napon  
 $I$  - jakost struje.

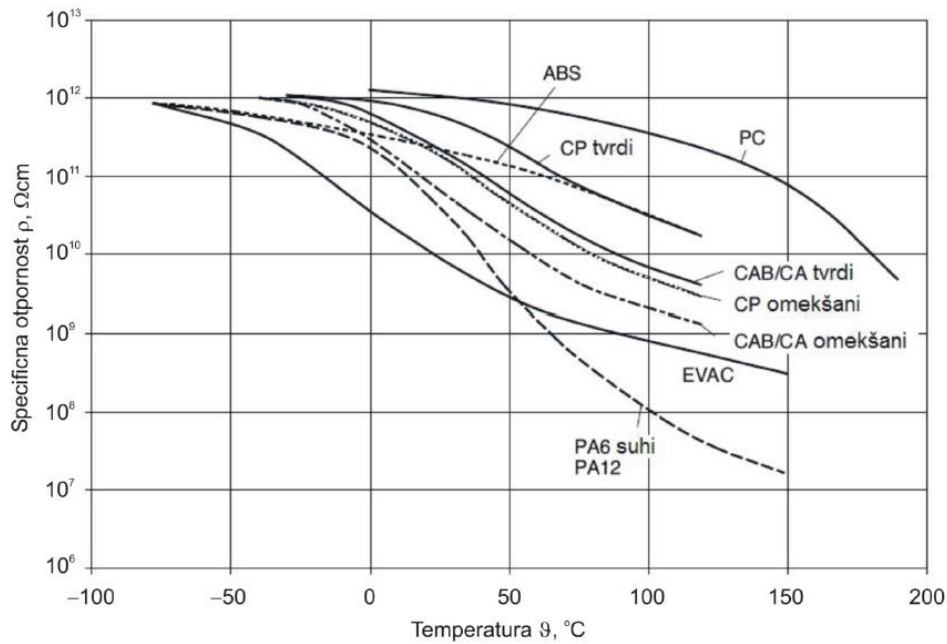
Otpor je često opisan kao obrnuta provodnost,  $G$

$$R = \frac{1}{G} \quad (6.1)$$

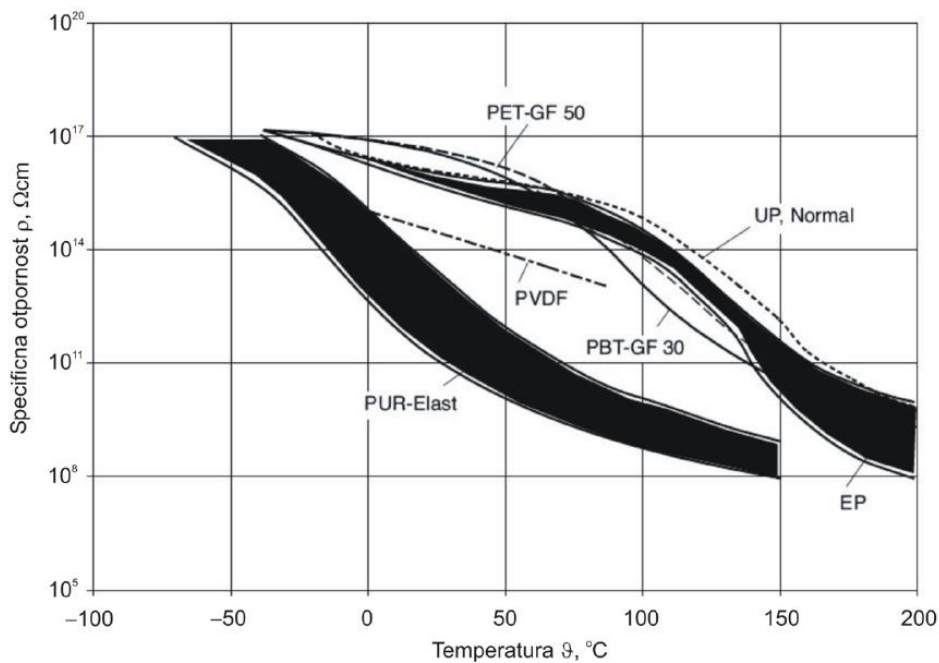
Jednostavna relacija dana u prethodnom izrazu rijetko se susreće jer je napon  $U$  rijetko kada stabilan. Slike 6.1- 6.3. prikazuju usporedbu specifičnih otpornosti raznih polimera i njihovu ovisnost o temperaturi [4].



Slika 6.1 Specifična električna otpornost polimera kao funkcije temperature [4]



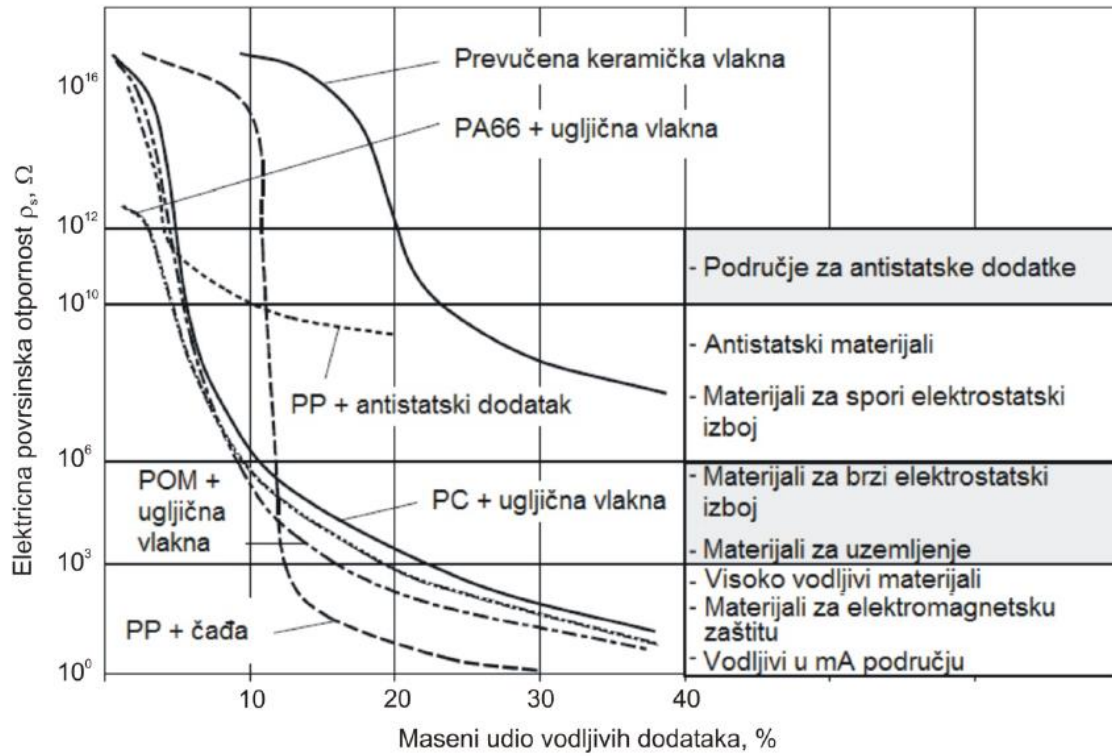
Slika 6.2 Specifična električna otpornost polimera kao funkcije temperature [4]



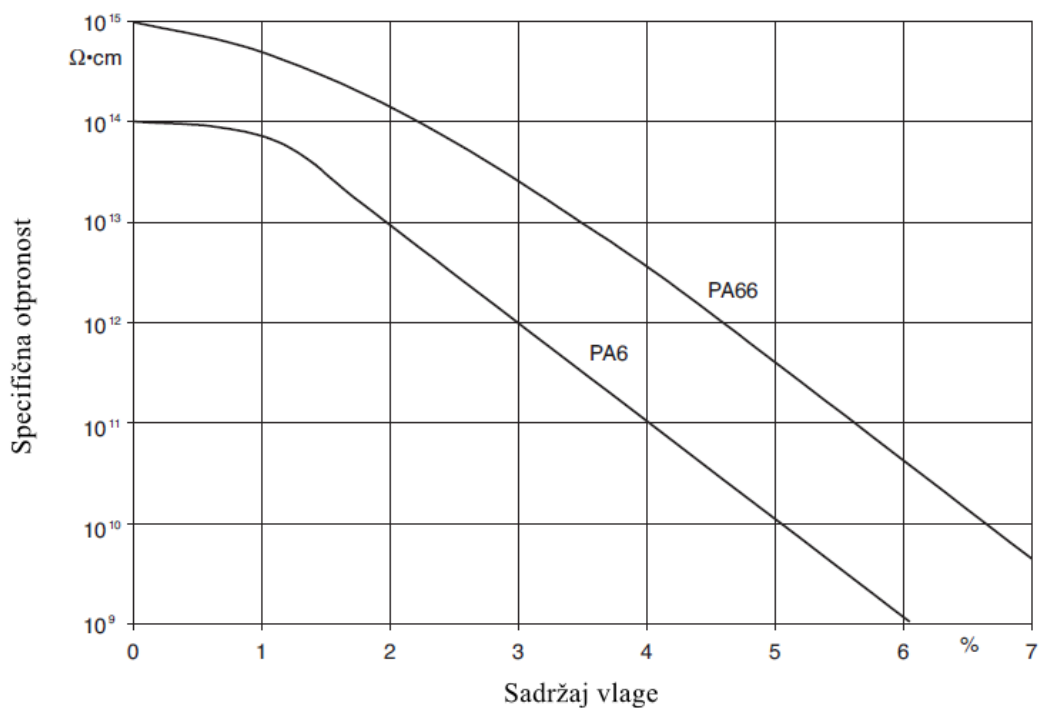
Slika 6.3 Specifična električna otpornost polimera kao funkcije temperature [4]

Na slikama se može vidjeti da, slično ostalim svojstvima polimera, kao što je model relaksacije, specifična otpornost smanjuje s vremenom ali također i s temperaturom. Površina polimernih dijelova često pokazuju različitu vrijednost električne otpornosti od njihovog volumena. Glavni uzrok je površinska kontaminacija (npr. prašina ili vlaga). Stoga moramo mjeriti površinsku otpornost koristeći različite tehnike. Površinski otpor raznih

polimera prikazan je na slici 6.4 kao funkcija masenog udjela punila. Slika 6.5. prikazuje učinak sadržaja vlage na specifičnu električnu otpornost poliamida [4].

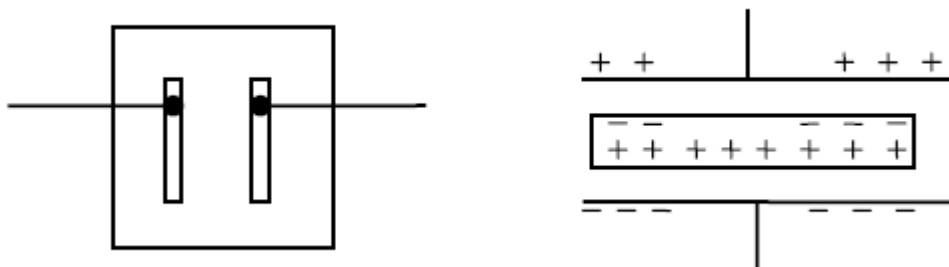


Slika 6.4 Površinska otpornost nekih polimera u ovisnosti o masenom udjelu punila [4]



Slika 6.5 Specifična električna otpornost za PA6 i PA66 kao funkciju sadržaja vlage [4]

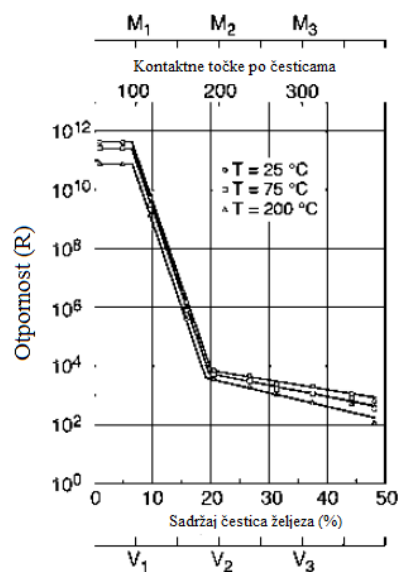
Slobodni ioni na površini provode struju između elektroda. Površinski otpor se mjeri tako što se na površinu nanese dvije linije od srebra ili staniola koje predstavljaju dvije suprotne strane kvadrata, stave pod napon i mjeri otpor, prikazano na slici 6.6.



Slika 6.6 Shema postupka mjerenja površinskog otpora [5]

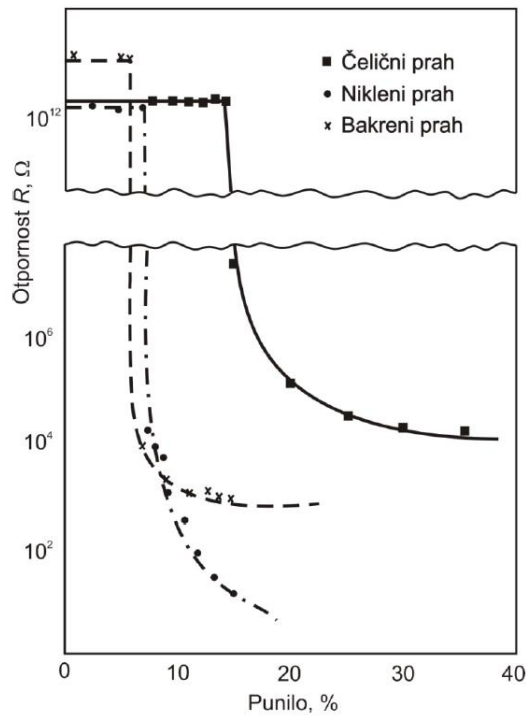
## 7. FIZIČKI UZROCI VOLUMNE PROVODNOSTI

Polimeri s kovalentnim atomskim vezama, koja vodi do uparivanja elektrona, nemaju slobodnih elektrona i ne smatraju se vodljivim. Vodljivi polimeri – omogućuju kretanje elektrona duž nakupina molekula. Potencijalna uporaba električnih vodljivih polimera u elektrotehnici uključuju fleksibilne električne vodiče, grijače trake i antistatičku opremu pogodnu za rad s elektroničkim komponentama. U elektrokemiji primjenjuju se baterije s visokom energijom i gustoćom snage, te elektrode za elektrokemijske. Zbog svoje strukture, polimeri možda neće provoditi ione. Ipak, vrlo slaba električna vodljivost polimera na sobnoj temperaturi i brzo smanjenje vodljivosti s povećanjem temperature je pokazatelj da se ioni kreću. Kreću se zbog toga što ti polimeri uvijek sadrže određenu količinu dodanih nisko molekularnih sastojaka koji djeluju kao pokretni nosači naboja. Ovo je proces difuzije koji djeluje u smjeru polja i preko polja. Ioni „prelaze“ od potencijalne rupe na potencijalnu rupu kako se aktiviraju višim temperaturama. Istodobno, niža gustoća ubrzava ovaj proces difuzije. Snažan pad specifične otpornosti uzrokovano je ionskom vodljivošću. Vodljivi polimeri su korisni za određene svrhe. Kada izoliramo kablove koji provode energiju, npr. kao prvi prijelazni sloj koristimo polietilen napunjen sa vodljivim česticama poput čađe. Kada se dodiruju tragovi kontakata, otpornost spontano pada. Broj kontakata između čestica,  $M$ , određuje specifičnu otpornost kompozita. Na  $M_1$  ili  $M=1$ , postoji jedan kontakt po čestici. U tom trenutku otpornost počinje padati. Nagli pad krivulje otpora ukazuje zašto je teško dobiti srednje specifičnu otpornost dobiven punjenjem polimera, prikazano na slici 7.1 [4].



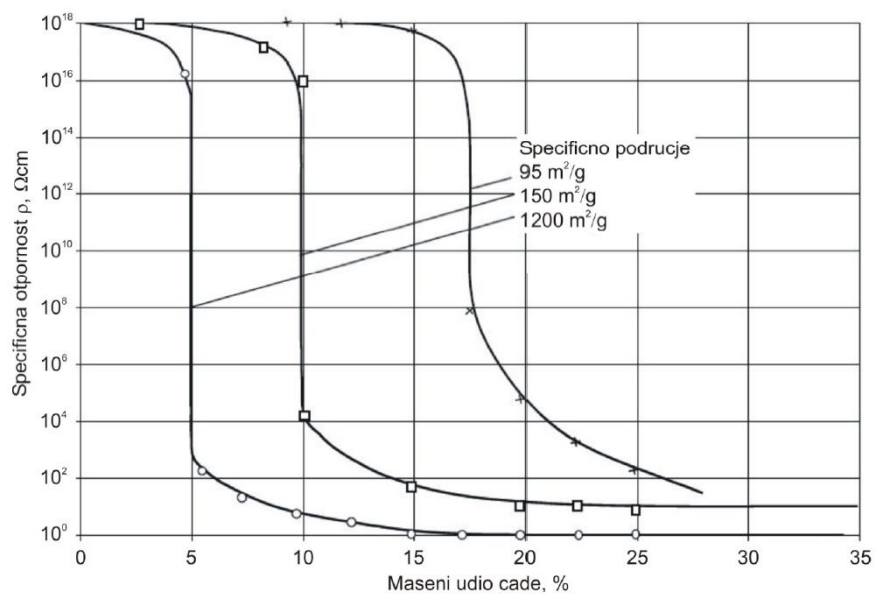
Slika 7.1 Otpornost  $R$  polimera napunjenog metalnim praškom (željezo) [4]

Slika 7.2 prikazuje otpornost epoksidne smole ispunjene metalnim prahovima, te kritičnu koncentraciju volumena za epoksidne sustave napunjene bakrenim ili nikalnim prahom, oko 7% koncentracije, a kritična koncentracija volumena za epoksid punjena čelikom u prahu je oko 15%. Sličan učinak je vidljiv u polipropilenu koji je ispunjen čađom [4].



Slika 7.2 Otpornost epoksidne smole ispunjene metalnim prahovima [4]

Slika 7.3 prikazuje specifičnu otpornost polipropilena ispunjenih čađom.



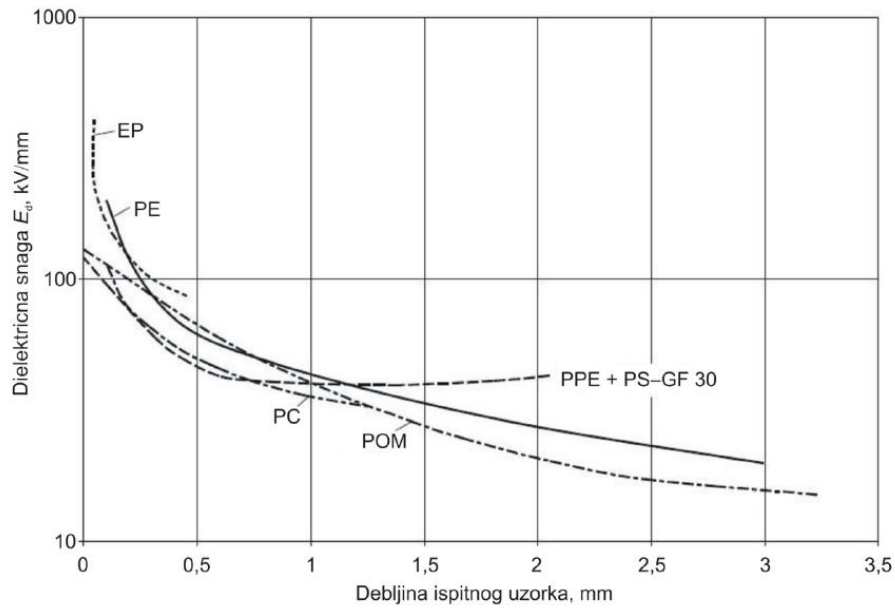
Slika 7.3 Specifična otpornost u polipropilenu ispunjenom čađom [4]

## 8. PROBLEMI S PRIMJENOM – ELEKTRIČNI KVAROVI

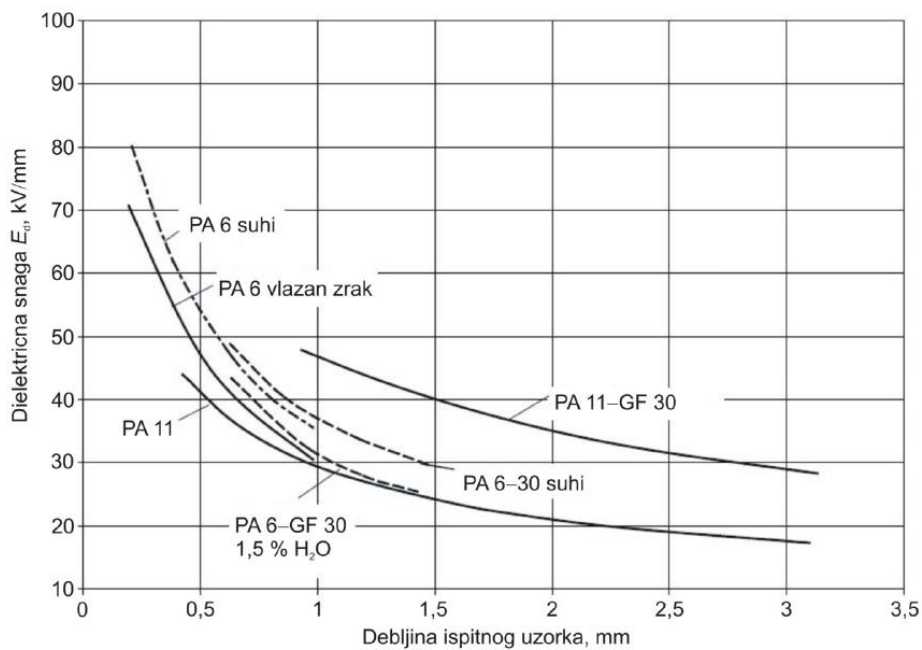
Važna električna svojstva izolatora je njihova dielektrična snaga. Ako se napon nanese na izolator i stalno se povećava, na kraju će se dosegnuti točka na mjestu gdje se događa električni kvar. Kvar se obično promatra kao električni luk preko elektroda koji uzrokuje katastrofalno smanjenje otpornosti. Dielektrična snaga ovisit će o tipu i obliku plastike i elektroda, brzini kojom se polje povećava i mediju koji okružuje izolator. Većina (čiste) plastike ima dielektričnu snagu u rasponu od 100 do 300 kV/cm. Prije kvara, trenutna se gustoća povećava gotovo eksponencijalno s električnim poljem, a pri kvaru, skoči na vrlo visoke vrijednosti kod kojih je dielektrik uništen. Dvije najpoznatije vrste kvarova su toplinski i električni kvarovi. Toplinski kvar je posljedica prekomjernog zagrijavanja izolatora električnom strujom koja uzrokuje, pri određenom naponu, da se polimer rastopi ili spali. U ovom slučaju, dielektrična snaga je proporcionalna kvadratnom korijenu omjera toplinske i električne vodljivosti polimera. Električni kvar obično uzrokuje udar ionizacije [7].

Budući da električni kvarovi izolacije mogu dovesti do oštećenja električne komponente ili može ugroziti osobe koja rukuju komponentama, zbog toga je nužno poduzeti mjere da se to spriječi. Dakle moramo znati kritično opterećenje izolacijskog materijala za dizajniranje izolacije za dugu kontinuiranu uporabu i visokim stupnjem pouzdanosti. Iz već opisanih svojstava poznato je da otpornost na električni kvar ili dielektrična snaga ovisi o vremenu, temperaturi, stanju materijala, učestalosti primjene i frekvencije.

Dielektrična snaga ovisi i o obliku elektrode i debljini uzorka kao što je prikazano na slici 8.1 i 8.2 koje predstavljaju dielektričnu snagu različitih polimera kao funkcija debljine ispitnog uzorka [4].



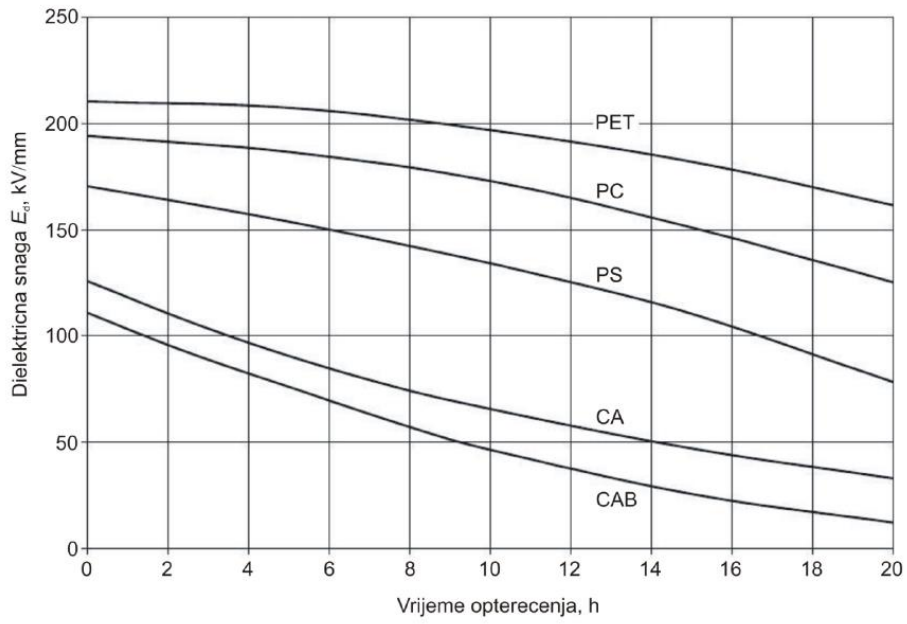
Slika 8.1 Dielektrična snaga raznih polimera u funkciji ispitnog uzorka [4]



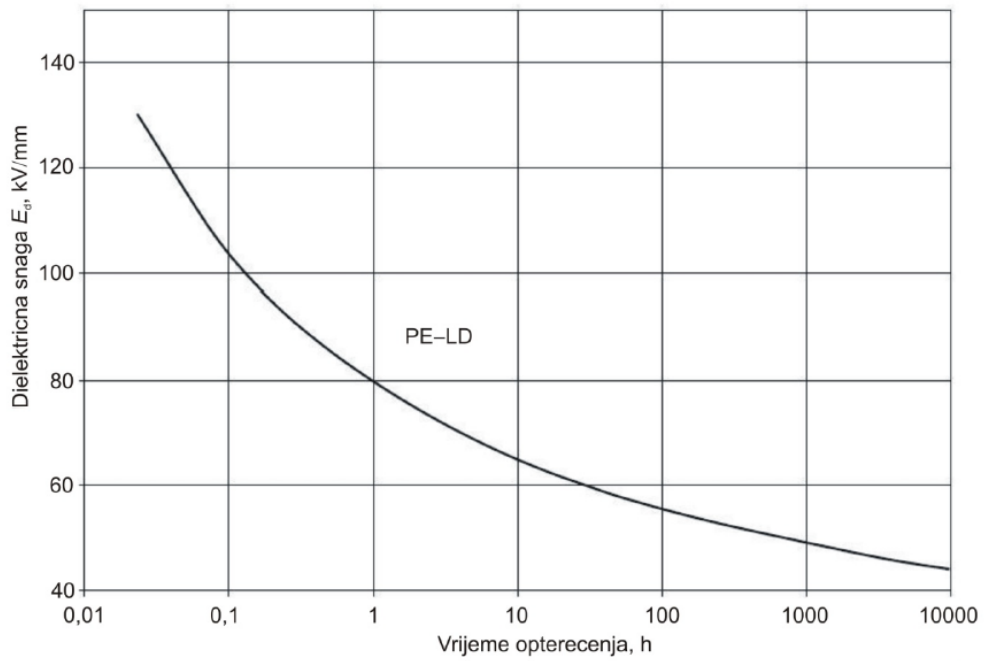
Slika 8.2 Dielektrična snaga raznih polimera masa u funkciji ispitnog uzorka [4]

Pravilo je da se koriste vrijednosti dugoročnog opterećenja od samo 10% kratkotrajnih laboratorijskih podataka. Slike 8.3 do 8.5 prikazuju dielektričnu snagu kao funkciju vremena punjenja za nekoliko polimera.

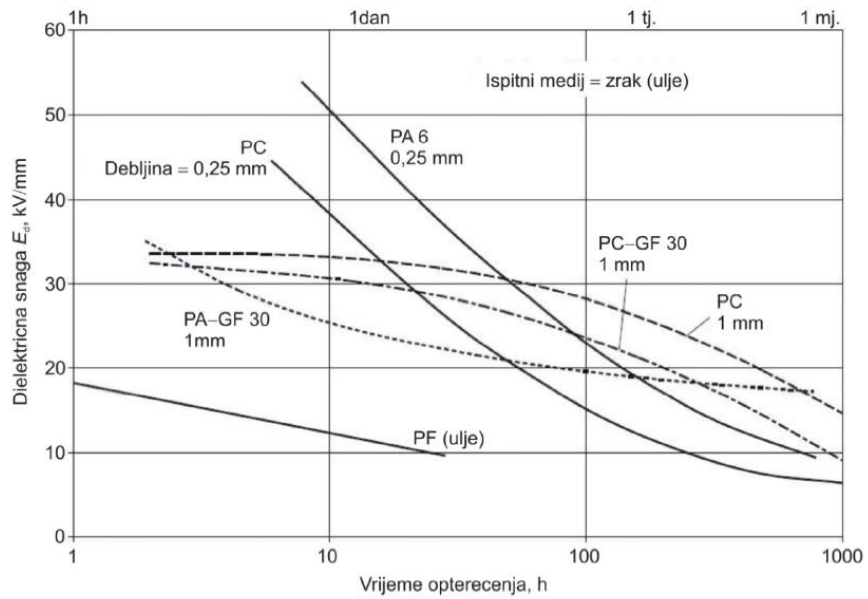




Slika 8.3 Dielektrična snaga različitih polimera kao funkcija vremena opterećenja [4]

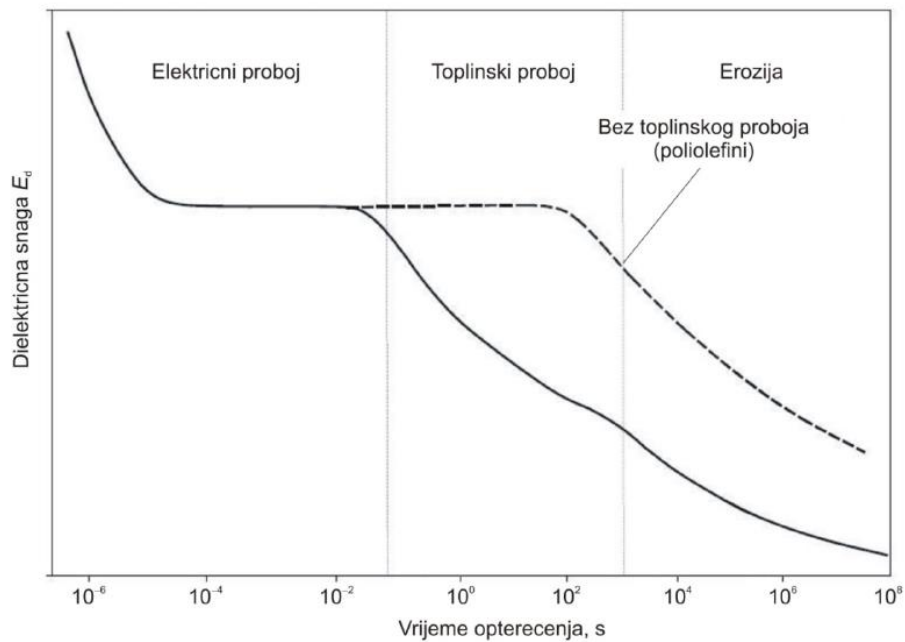


Slika 8.4 Dielektrična snaga PE-LD kao funkcije vremena opterećenja [4]



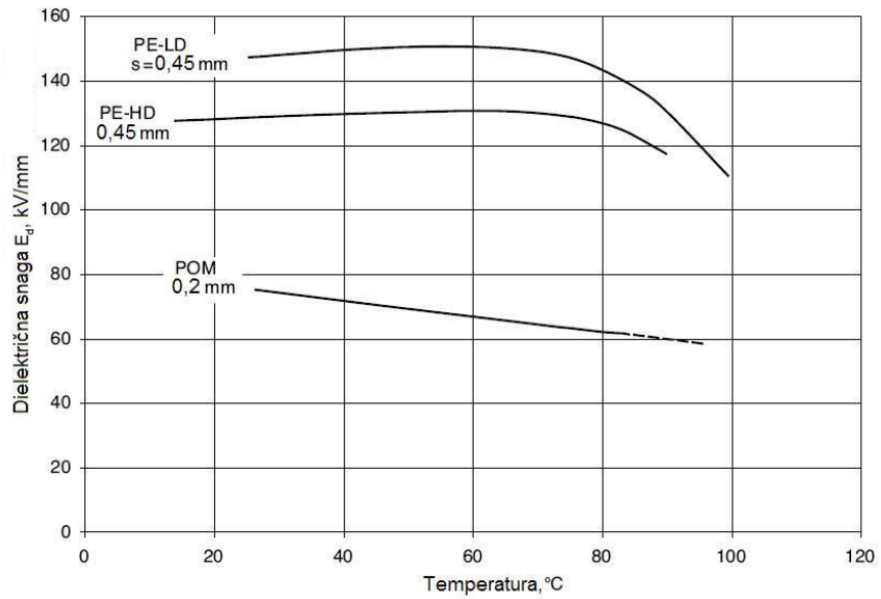
Slika 8.5 Dielektrična snaga različitih polimera kao funkcija vremena [4]

Slika 8.6 prikazuje napredovanje dielektričnog proboja kroz vrijeme; počevši od dielektričnog proboja, nakon čega slijedi proboj topline i erozije. Temperatura i frekvencija također znatno utječu na dielektričnu snagu polimera.

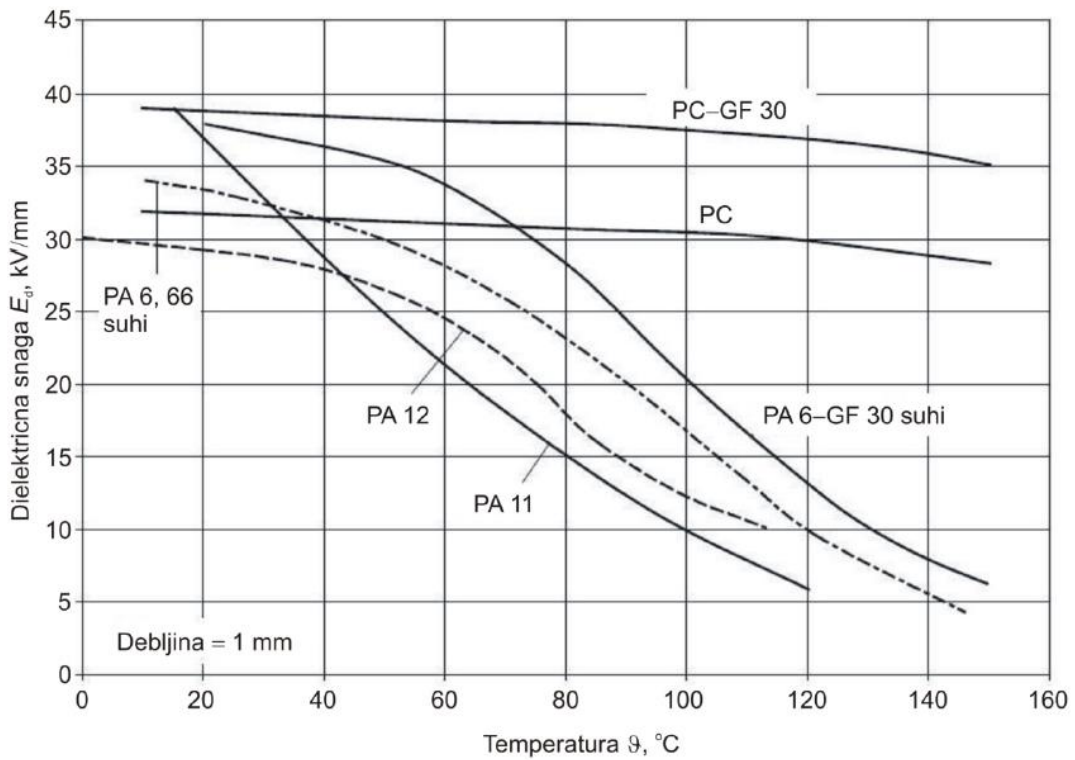


Slika 8.6 Napredak dielektrične snage u vremenu [4]

Slike 8.7 i 8.8 pokazuju učinak temperature na dielektričnu snagu odabranih polimera

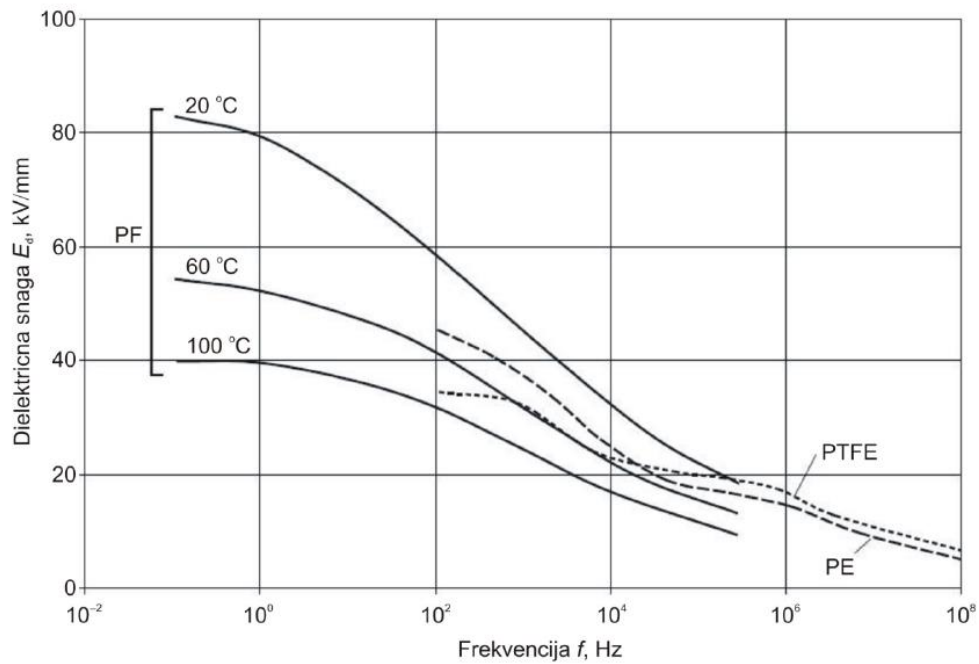


Slika 8.7 Dielektrična snaga PE i POM kao funkcije temperature [4]



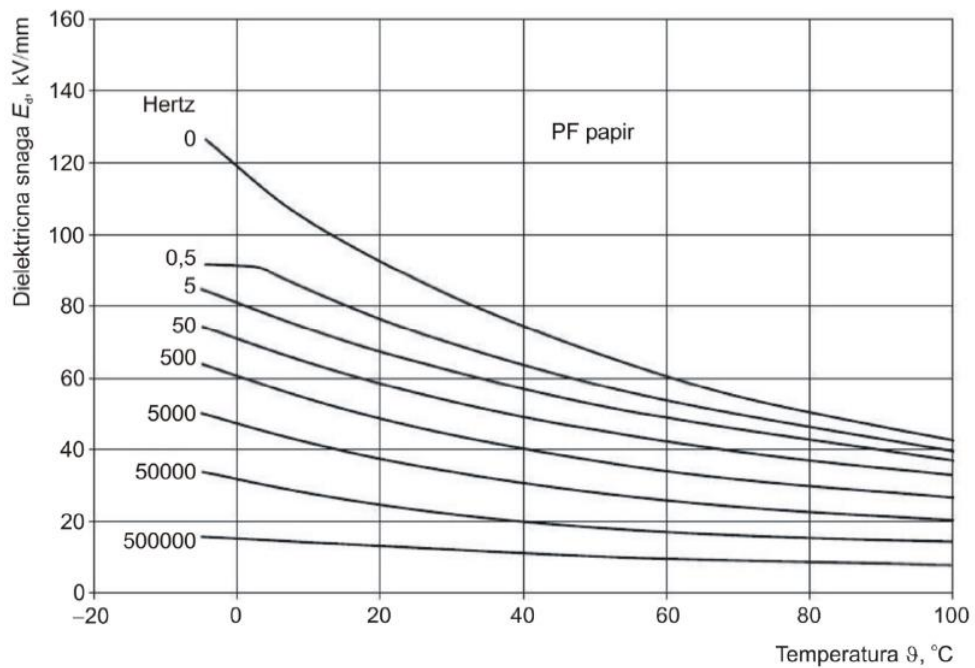
Slika 8.8 Dielektrična snaga odabrane plastike kao funkcije temperature [4]

Slika 8.9 prikazuje učinak frekvencije na dielektričnu snagu.



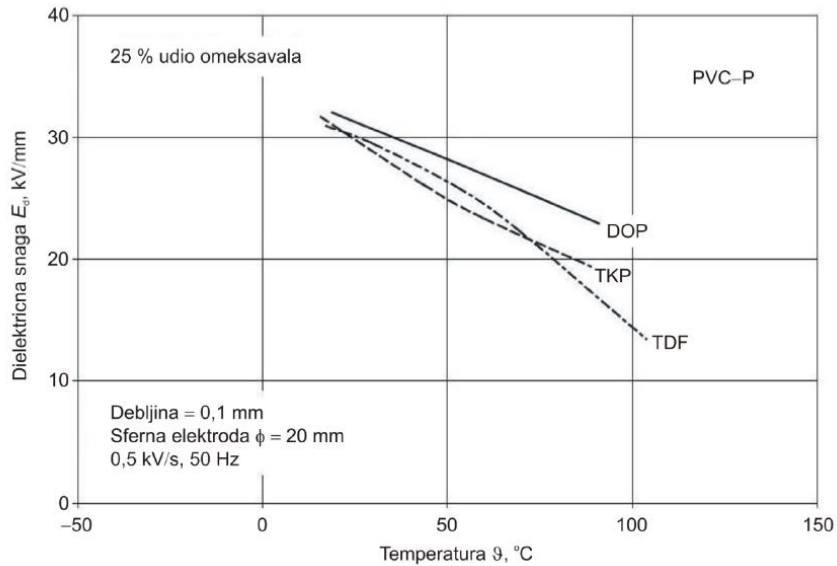
Slika 8.9 Dielektrična snaga odabranih polimera kao funkcije frekvencije [4]

Slika 8.10 prikazuje kombinirani učinak frekvencije i temperature na dielektričnoj snazi PF papira.



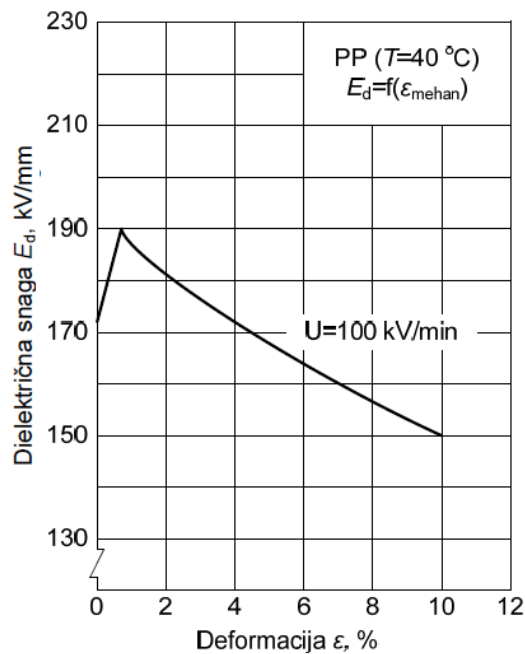
Slika 8.10 Dielektrična snaga PF papira mjerena na nekoliko frekvencija kao funkcija temperature [4]

Kao i kod drugih svojstava, aditivi poput plastifikatora mogu značajno utjecati na dielektričnu snagu polimernih ploča kao što je prikazano na slici 8.11 za PVC-P sa 25% plastifikatora.

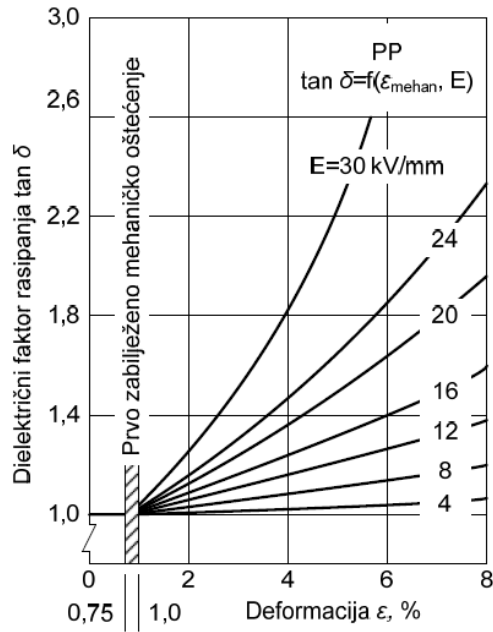


Slika 8.11 Dielektrična snaga PVC-P sa različitim plastifikatorima, ovisno o temperaturi [4]

Eksperimentalna ispitivanja pokazuju da se dielektrična snaga smanjuje s povećanjem napreznja. To je prikazano na 8.12. S druge strane, slika 8.13. pokazuje kako dielektrični disipacijski faktor,  $\tan \delta$ , raste s napreznjem.



Slika 8.12 Pad dielektrične čvrstoće PP filmova s povećanim napreznjem [4]

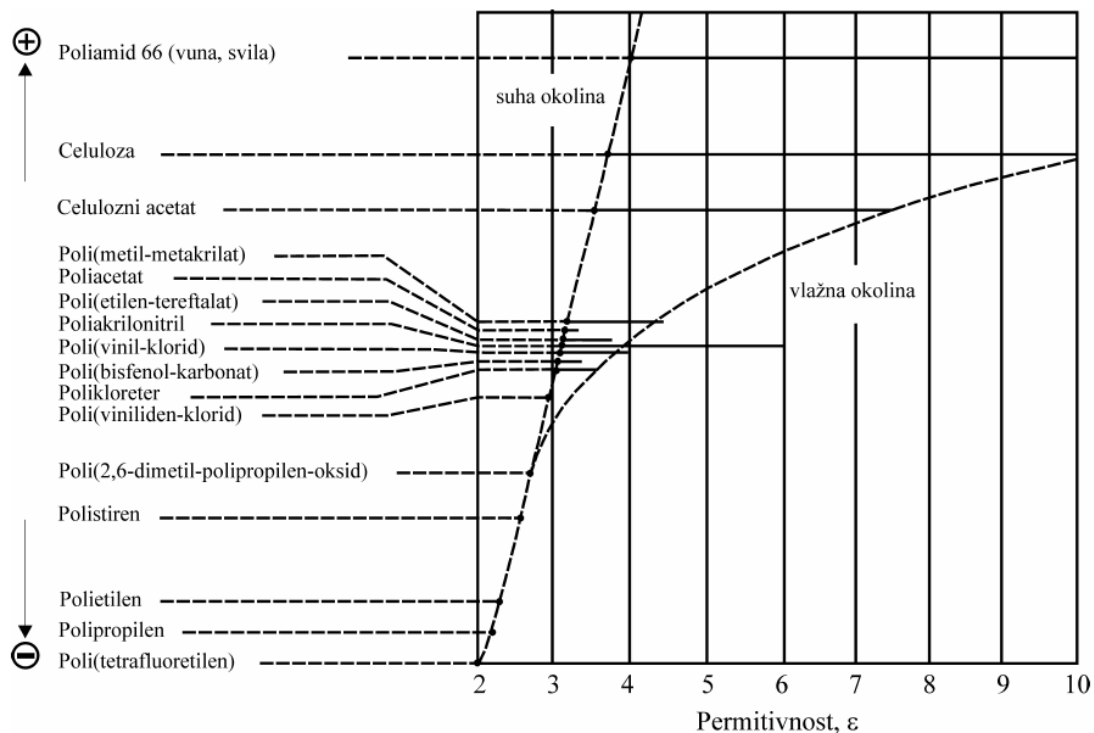


Slika 8.13 Povećanje dielektričnog rasipanja s povećanim naprezanjem u PP folijama [4]

Poznato je da amorfni polimeri djeluju povoljnije za električnu otpornost loma od djelomično kristalnih polimera. Dugotrajna razgradnja polukristalnih polimera javlja se kao raspad topline, spaljujući rupu u izolaciji. Općenito, s povećanjem temperature i frekvencije, dielektrična snaga kontinuirano pada. Izolacijski materijali – uglavnom LDPE – su posebno čisti i sadrže stabilizatore napona. Ti stabilizatori su nisko molekularni ciklički aromatski ugljikovodici. Oni se raspršuju u male nesavršenosti ili lomove, popunjavaju prazan prostor i na taj način štite od sloma [4].

## 9. ELEKTROSTATSKI NABOJ

Odlična izolacijska svojstva polimernih materijala, odnosno vrlo visoka električna otpornost površine i otpornost na protok struje, rezultiraju akumuliranjem elektrostatskog naboja. Naime, trenjem polimera i neke neutralne površine ili dvaju polimera nakon razdvajanja površina jedna od komponenata postaje pozitivno nabijena (djelovala je kao elektron donor) a druga negativno nabijena (djelovala je kao elektron akceptor). Pri tome vrijedi opće pravilo da će tvorevina najveće permitivnosti dobiti pozitivan naboj. Polimerni niz sastavljen prema svojstvima elektrostatskog nabijanja naziva se triboelektrička serija. Na slici 9.1. pokazana je triboelektrička serija polimera s naznakom predznaka elektrostatskog naboja nastalog kontaktom dvaju različitih polimera. Niz triboelektričnog naboja jednak je nizu permitivnosti. Budući da je dielektrična konstanta hidrofilnih polimera jako ovisna o vlazi, zbog velikog utjecaja visoke permitivnosti vode, jasno je da će ti polimeri biti antistatični u vlažnim uvjetima (vuna) ali statični u suhim uvjetima.



Slika 9.1 Triboelektrička serija polimera [4]

Akumulacija elektrostatskog naboja može rezultirati velikim poteškoćama, primjerice u proizvodnji i uporabi tekstila (električni šok izazvan nabojem nastalim trenjem sintetičkih tepiha ili odjeće), a ponekad i opasnostima (opasnost od eksplozije kada električna iskra zapali zapaljive kapljevine ili plinove). Još jedan efekt izazvan elektrostatskim nabojem je privlačenje čestica prašine na površinu polimernog materijala.

Elektrostatski naboj često je rezultat izvrsnih izolacijskih svojstava polimera – vrlo visoka otpornost na površinu i otpor struje. Budući da su polimeri loši vodiči, zamjena naboja trljanjem tijela, koja se razvija mehaničkim trenjem, ne može se izjednačiti. Ta zamjena naboja rezultat je viška elektrona na jednoj površini i nedostatka elektrona na drugoj. Elektroni su nabijeni pozitivno ili negativno čak i do stotina volti. Oni oslobađaju površinski naboj samo ako dodiruju drugo vodljivo tijelo ili tijelo koje je obrnuto nabijeno. Nema opasnosti kada osoba pati od električno udara uzrokovanog nabojem od trenja sintetičkih tepiha ili vinila. Postoji opasnost od eksplozije, kada iskre zapala zapaljive tekućine ili plinove. Budući da otpor struje zraka općenito iznosi oko  $10^9 \Omega\text{cm}$ , nabijanje i pražnjenje nastaju samo ako polimer ima otpor strujanja  $>10^9$  do  $10^{10} \Omega\text{cm}$ . Drugi učinak elektrostatskih naboja je da privlače čestice prašine na polimernim površinama. Elektrostatski naboji mogu se smanjiti ili spriječiti pomoću sljedećih sredstava: smanjiti otpornost na vrijednosti  $< 10^9 \Omega\text{cm}$ , na primjer pomoću vodljivih punila kao što je grafit. Napraviti vodljive površine koristeći se higroskopskim punilima koji nisu kompatibilne sa polimerom i površinom. Također se može postići miješanjem higroskopskim materijalima, kao što jake otopine sapuna. U oba slučaja, voda apsorbirana kroz zrak djeluje kao vodljivi sloj. Treba naglasiti da ovaj tretman gubi svoj učinak tijekom vremena pa treba smanjiti otpor zraka ionizacijom kroz pražnjenje ili radioaktivno zračenje [4].

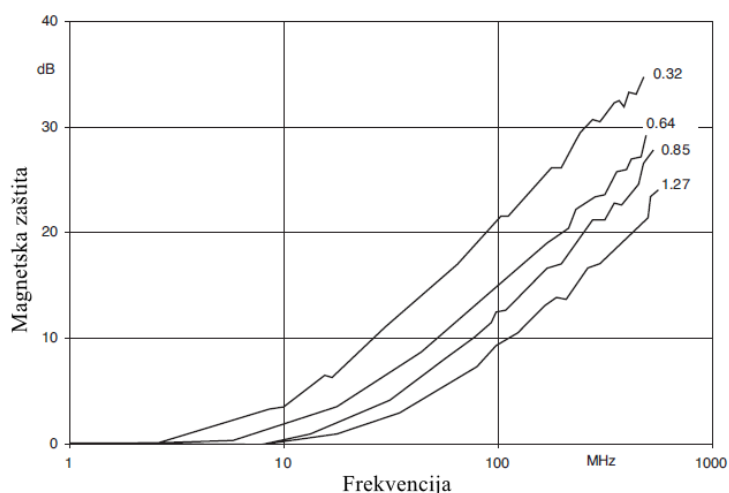


## 10. ELEKTRETI

Elektreti su čvrsto dielektrična tijela koja pokazuju trajnu dielektričnu polarizaciju. Elektreti se mogu proizvesti iz nekih polimera kada se učvršćuju pod utjecajem električnog polja, kada ih bombardiraju elektroni, ili ponekad putem mehaničkih procesa formiranja. Zagrijani polimer, polariziran u vrlo jakom električnom polju i zatim ohlađen može beskonačno zadržati svoju polarizaciju. Čvrsta dielektrična tijela koja su permanentno dielektrički polarizirana nazivaju se elektreti. Takvi polarizirani dielektrici su elektrostatska kopija magneta. Polimerne elektrete moguće je proizvesti od nekih polimera i to tako da se očvršćuju pod utjecajem električnog polja jakosti 30 kV/cm, da se bombardiraju elektronima ili katkada kroz procese mehaničkog oblikovanja. Oni pokazuju vrlo mali gubitak jakosti polarizacije, ali samo kroz razdoblje od par godina. Elektreti koji nose čisti električni naboj stabilan kroz dugo vremensko razdoblje mogu se pripremiti iz odgovarajućih polimernih materijala koji na svojoj površini imaju metalnu foliju. Upotrebljavaju se primjerice u mikrofonima ili za kondenzatore (poliester, polikarbonat ili fluorpolimer)

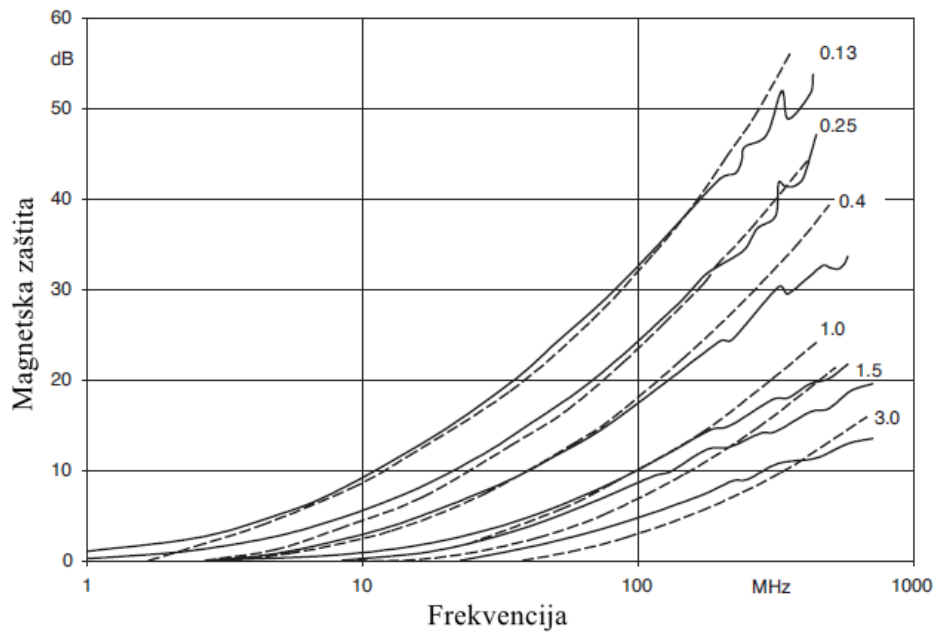
Osjetljiva oprema, poput računala, ne može se raditi u kućištima polimera. Takva kućišta moraju imati funkciju Faradayevih štitova. Poželjna je da se rabi višeslojna struktura – najjednostavnije rješenje je korištenje jednog metalnog sloja. Trebamo barem  $10^2 \Omega\text{cm}$  radi ispunjavanja svrhe zaštite. S karbonskim vlaknima ili nitratima obloženim ugljikovim vlaknima koja se koriste kao punila, postižu se najbolja zaštitna svojstva [4].

Slika 10.1 predstavlja magnetsku zaštitu kao funkciju frekvencije polimera obloženih aluminijem.



Slika 10.1 Elektromagnetska zaštita plastika obloženih aluminijem u funkciji frekvencije [4]

Slika 10.2 predstavlja magnetsku zaštitu kao funkciju frekvencije polimera obloženih čeličnim vlaknima punjeno plastikom.



Slika 10.2 Elektromagnetska zaštita čeličnih vlakana ispunjena plastikom u funkciji frekvencije [4]

## 11. MAGNETSKA SVOJSTVA

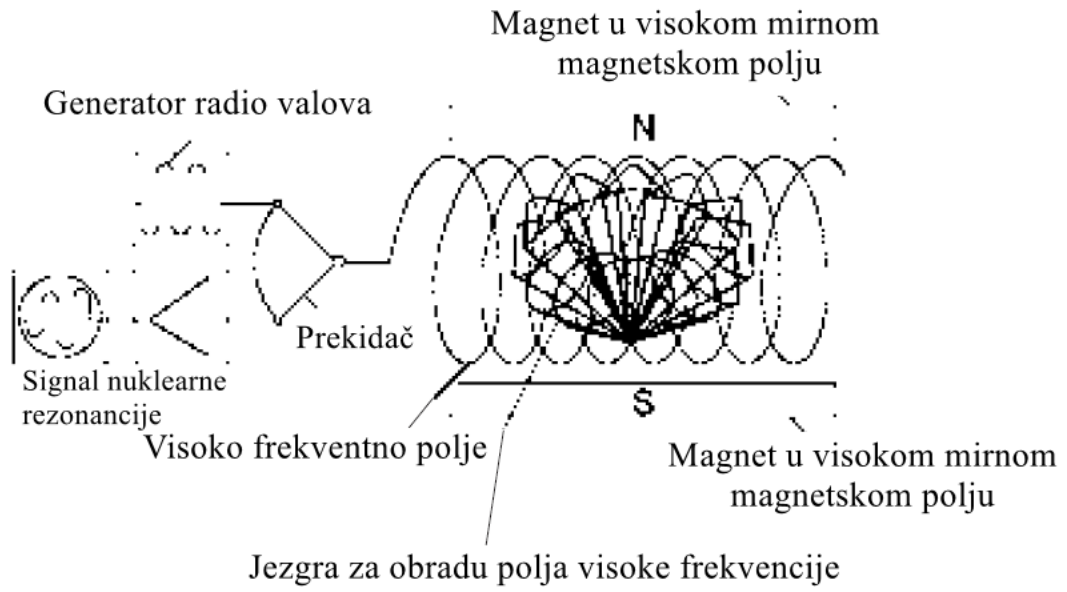
Vanjska magnetska polja imaju utjecaj na tvari koje su podložne njima, jer vanjsko polje ima interakciju sa unutarnjim poljima elektrona i atomskih jezgri. Čisto magnetizirani polimeri su diamagnetski, to jest, vanjsko magnetsko polje inducira moment. Međutim, permanentni magnetski momenti, koji se induciraju u feromagnetskim ili paramagnetskim supstancama, ne postoje u polimerima. Ta magnetičnost  $M$  tvari u magnetskom polju  $s$  poljem intenziteta  $H$  izračunat je s magnetskom osjetljivošću,  $X$ , kao

$$M = X H \quad (11.1)$$

Osjetljivost čistih polimera kao diamagnetskih supstanci imaju vrlo malo i negativnu vrijednost. Međutim u nekim slučajevima, koristimo činjenicu da punila mogu potpuno promijeniti magnetski karakter polimera. Magnetska svojstva polimera se često mijenjaju pomoću magnetskih punila. Poznate primjene su injekcijsko lijevani ili ekstrudirani magneti ili magnetski profili, i svi oblici elektronske pohrane poput snimke, diskete ili magnetske diskove [4].

### 11.1 Magnetska rezonanca

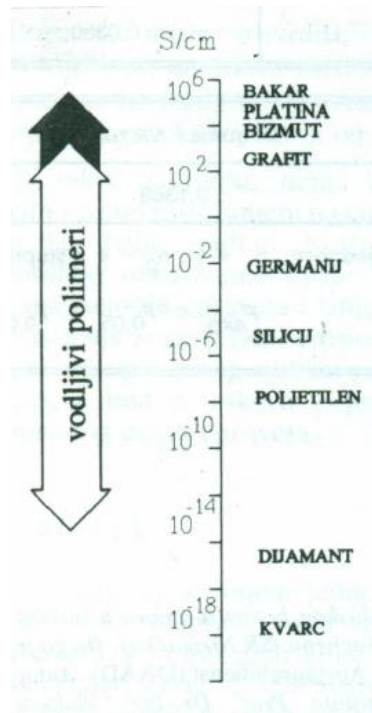
Magnetska rezonancija je pojačana apsorpcija elektromagnetskog zračenja pri prijelazu između magnetskih kvantnih stanja u nekom materijalu. Ova apsorpcija se razvija kao rezultat malih paramagnetskih molekularnih čestica koje su stimulirane do vibracija. Metode za postizanje toga uključuju rezonancija vrtećeg elektrona, i prije svega, spektroskopija nuklearne magnetske rezonancije. Rezonancija vrtećeg elektrona postaje vidljiva kada je intenzitet statičkog magnetskog polja promijenjen i mikrovalovi pri visokoj frekvenciji u promjenjivom polju se apsorbiraju. Budući da možemo samo otkriti ne uparene elektrone koristeći ovu metodu, koristimo je za određivanje radikalnih skupina molekula. Kada atomi imaju neparan broj jezgri, protona i neutrona, magnetska polja uzrokovana vlastitom vrtnjom ne mogu se izjednačiti. Usklađivanje nukleranih vrtnji u vanjskom magnetskom polju dovodi do magnetiziranja vektora koji se može mjeriti makroskopski kao što je prikazano na slici 11.1 [4].



Slika 11.1 Shema metode rada nuklearne vrtnje tomografa [4]

## 12. VODLJIVI POLIMERI

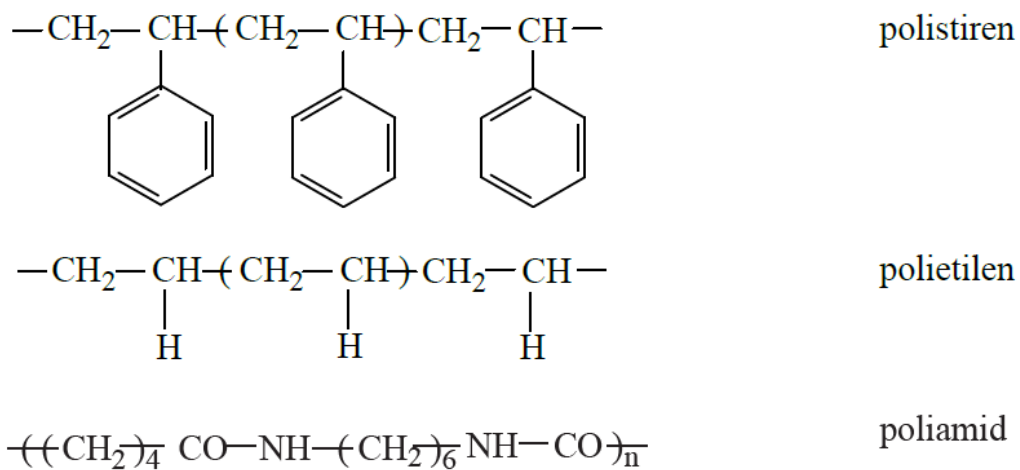
Glavnim odlikama polimernih materijala smatraju se njihova čvrstoća, plastičnost i trajnost, a s obzirom na svoja električna svojstva smatraju se dobrim izolatorima. Danas su, međutim, poznati polimeri kojih električna vodljivost pokriva područje od silicija do bakra, prikazano na slici 12.1.



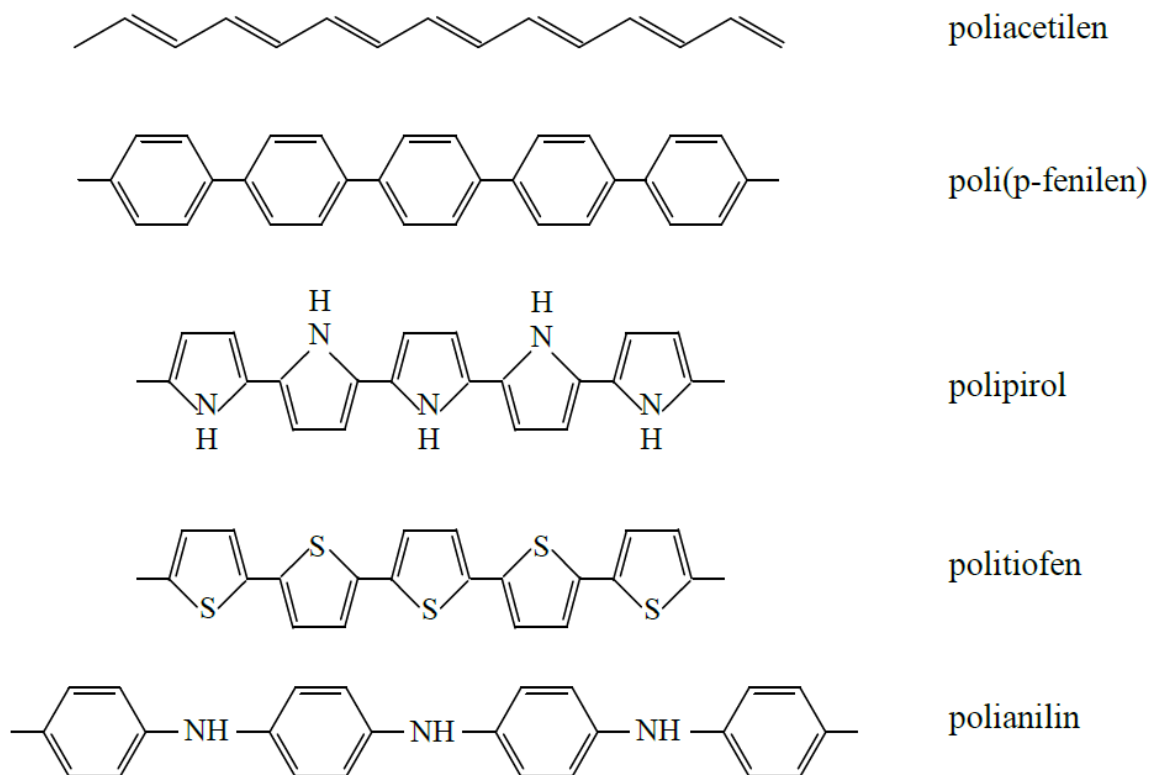
Slika 12.1 Električna vodljivost polimera [8]

Vodljivi polimeri su po svojoj strukturi dopirani polimeri s alternirajućim (konjugiranim) dvostrukim vezama. Dopiranjem nadzirano uvodimo primjese u polimere radi mijenjanja električnih svojstava, tj. da poboljšamo njihovu električnu vodljivost. Naime, otkrićem iz 80-tih godina 20. stoljeća da se poliacetilen može oksidirati ili reducirati i simultano dopirati različitim primjesama dovelo je do razvoja novih organskih polimera koji provode električnu struju i to razine provodljivosti metala. Zato se katkada nazivaju sintetskim metalima. Prvi i najjednostavniji vodljivi polimer bio je poliacetilen, a osim njega i drugi konjugirani polimeri mogu biti dopirani i prevedeni iz izolatora (ili bolje poluvodiča) u vodiče. Vodljivi polimeri upotrebljavaju se kao antistatički agensi, kao štitovi od nepoželjnog elektromagnetskog zračenja za kompjutorske zaslone (apsorbiraju elektromagnetsku energiju niskih frekvencija), za obnovljive baterije, za "pametne" prozore koji štite od sunčevog svjetla, za diode koje emitiraju svjetlo, za sunčeve ćelije, za elektronske zaslone, za proizvodnju optičkih vlakana i potencijalno za izradbu umjetnih

živaca ili kao dozatori lijeka. Usporedi li se molekularna struktura konvencionalnih polimera sa strukturom vodljivih polimera (slika 12.2 i 12.3) uočit će se bitna razlika u strukturi [8].

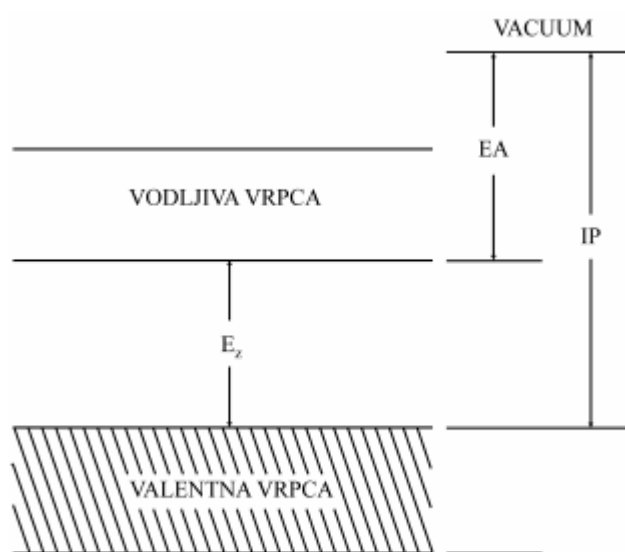


Slika 12.2 Kemijska struktura nekih konvencionalnih polimera [8]



Slika 12.3 Kemijska struktura najvažnijih polimera s konjugiranim dvostrukim vezama [8]

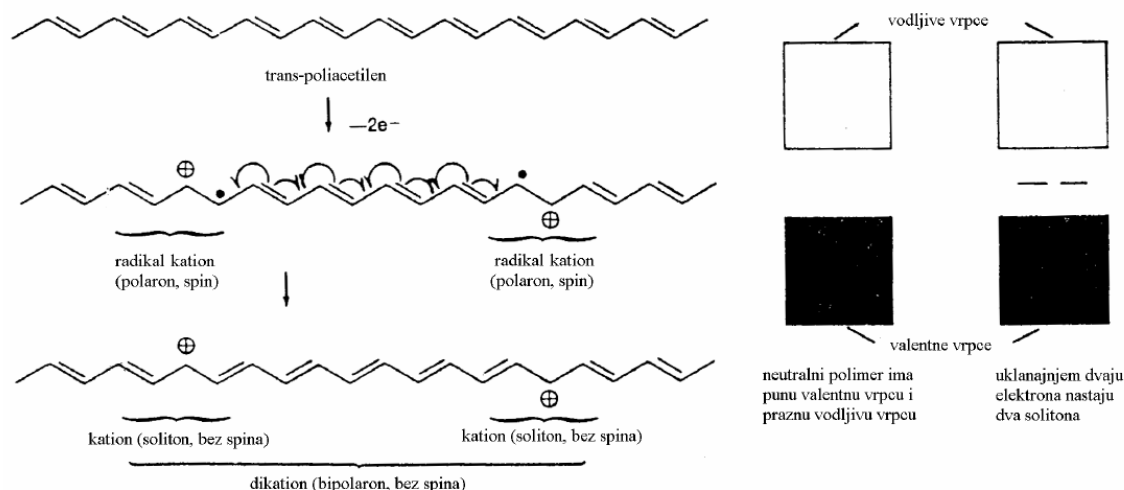
Kod konvencionalnih polimera ponavljane jedinice povezane su zasićenom kemijskom vezom, a za vodljive polimere tipična je konjugirana dvostruka veza. Vodljivost tih polimera potječe od konjugiranih  $\pi$ -elektrona raspoređenih uzduž polimernog lanca. Međutim, konjugirani organski polimeri u čistom stanju su izolatori ili poluvodiči jer nemaju slobodne nositelje naboja. Njihov elektronski spektar (vrpčasta struktura) sastoji se od potpuno popunjene valentne vrpce i potpuno prazne vodljive vrpce izmjenu kojih se nalazi zabranjena zona, slika 12.4., gdje je  $E_z$  energija zabranjene zone,  $EA$  afinitet elektrona (sposobnost primanja jednog elektrona, primjerice kroz dopiranje polimera) i  $IP$  ionizacijski potencijal. Za dobru vodljivost  $IP$  mora biti malen. Da bise konjugirani polimeri preveli u vodljivo stanje, u polimer se moraju uvesti slobodni nositelji naboja, priroda kojih ovisi o vrsti polimera. Slobodni nositelji naboja prenose se putovanjem uzduž segmenata konjugiranog polimernog lanca i tako se ostvaruje električna vodljivost [8].



Slika 12.4 Elektronske vrpce konjugiranih polimera [8]

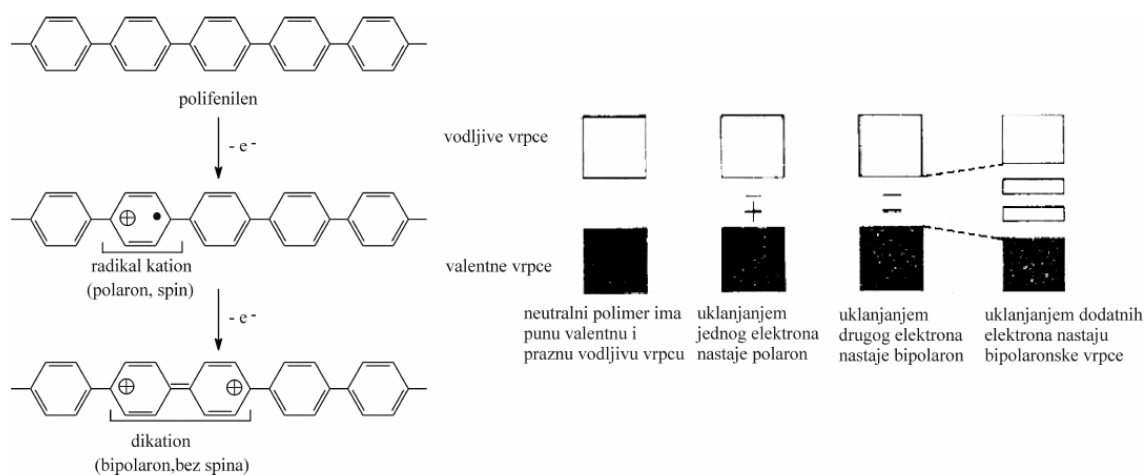
Slobodni nositelji naboja nastaju oksidacijom ili redukcijom polimera, tj. njihovim prevođenjem u polimerni kation ili polimerni anion. U oksidacijskom procesu iz vrpce se uklone 2 elektrona, vrpca ostaje djelomice popunjena i električna vodljivost postaje mogućom. Nastali radikal-ion delokaliziran je preko određenog dijela polimernog lanca stvarajući strukturni defekt. Takav defekt koji ima spin i pozitivni naboj nazvan je *polaron*

(u uobičajenom smislu čvrstog stanja polaron je elektron ili šupljina lokalizirana u deformiranom području kristalne rešetke.). Daljnjom oksidacijom polaron se može oksidirati u dikation nazvan *bipolaron*. Smatra se da kod dopiranog poliacetilena nadalje nastaje *soliton*, koji je u suštini karbo-kation (HC<sup>+</sup>), koji stvara faznu petlju u konjugiranom polienskom nizu, slika 12.5. Tako stvoreni pozitivni naboji nositelji su naboja kojima se ostvaruje električna vodljivost. Njihov se prijenos zbiva putovanjem uzduž segmenata konjugiranog lanca. Međutim, topološki defekti većine drugih polimera ne mogu rezultirati formiranjem solitona, nego dopiranjem nastaju polaroni i bipolaroni. Relativno visoka vodljivost ovih polimera pripisuje se difuzijskom gibanju bez-spinskih bipolarona, slika 12.6. Novija otkrića o vodljivosti dopiranog poliizoprena koji nije konjugirani polimer mogla bi rezultirati novom teorijom o vodljivosti polimera po kojoj dopant elektron-akceptor izvlači elektron iz izolirane dvostruke veze ostavljajući šupljinu koja može preskakati s lanca na lanac [8].



Slika 12.5 Shema stvaranja solitona za vrijeme oksidacije poliacetilena [8]





Slika 12.6 Shema stvaranja bipolarona za vrijeme oksidacije poli(*p*-fenilena) [8]

Istovremeno s oksidacijom, odnosno redukcijom događa se ugradnja odgovarajućeg protuiona radi postizanja ukupne električne neutralnosti polimera. Naime, tijekom oksidacije prijenos naboja zbiva se od polimera prema akceptoru A stvarajući polimer kation i A<sup>-</sup>, a za vrijeme redukcije od donora D prema polimeru stvarajući polimer-anion i D<sup>+</sup>. Istodobno se A ili D<sup>+</sup> protuioni ugrađuju u prostor između polimernih lanaca. Na taj su način mobilni nositelji naboja unijeti u elektronski sustav, što rezultira promjenom Fermijeve razine, tj. kemijskog potencijala i električnom vodljivošću. Budući da je stvaranje slobodnih nositelja naboja, odnosno postizanje vodljivosti praćeno ugradnjom protuiona proces se naziva dopiranje, analogno postizanju vodljivosti poluvodiča dopiranjem. Valja naglasiti da je analogija jedino u nazivu procesa, a mehanizam procesa je bitno različit. Kod poluvodiča se atom dopanta ugrađuje u kristalnu rešetku, dok kod vodljivih polimera proces dopiranja podrazumijeva prijenos naboja (oksidaciju ili redukciju polimera), ugradnju ion-dopanta (protuiona) u prostor između oksidiranih ili reduciranih makromolekula, te istodobnu kontrolu Fermijeve razine. U dopiranom polimeru prijenos elektrona se ostvaruje intra- i interlančano. Dopiranje se provodi izlaganjem polimera parnoj fazi oksidansa (elektron akceptora), ili reducensa (elektron donora), kemijskim prijenosom naboja u otopini ili elektrokemijskom oksidacijom ili redukcijom. Potrebna količina dopanta za polimerni sustav puno je veća (oko milijun puta) od uobičajene količine za anorganske poluvodiče na bazi Ge ili Si. Najčešći kemijski dopanti za oksidacijski proces su Lewisove kiseline i halogeni kao AsF<sub>5</sub> i I<sub>2</sub>, a za redukciju alkalni metali Li i K [8].

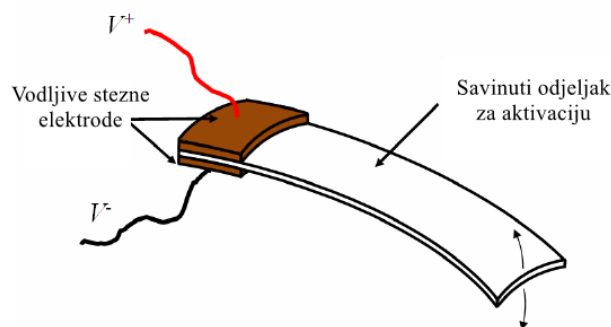
### 13. UPORABA POLIMERA U MEHATRONICI

Primjena polimera u mehatronici temelji se upravo na njihovom izolacijskom svojstvu. Na to područje otpada približno 30% od ukupne potrošnje polimera. Njihova uloga u elektrotehničkim proizvodima može biti:

- aktivna, upotrebljavaju se kao elektroizolacijski materijali (kabeli, prekidači i dr.)
- neaktivna, koriste se kao materijali za zaštitu ili dekoraciju (kućišta, dijelovi uređaja, stalci)
- pomoćna, stvari neophodno potrebne pri postupcima izrade elektrotehničkih proizvoda (lakovi, ljepila, kitovi).

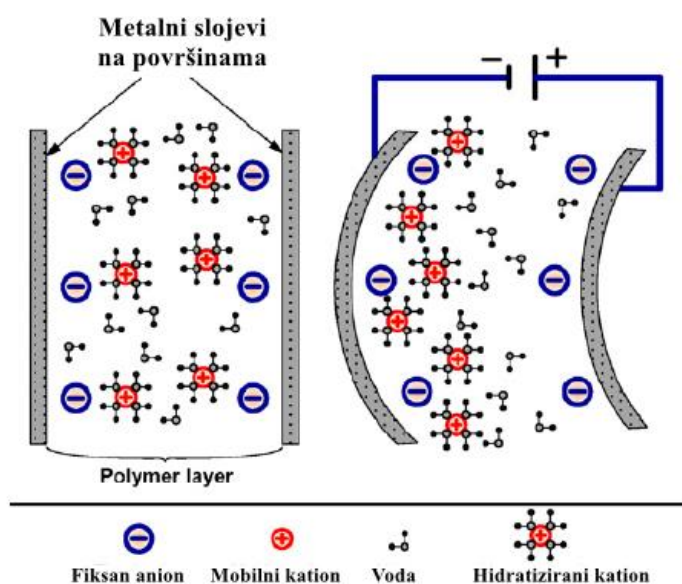
Budući da elektrostatski naboj često uzrokuje velike smetnje pri neaktivnoj primjeni polimernih materijala, propisi u mnogim zemljama zahtijevaju da se za tu primjenu koriste vodljivi polimeri. Danas se komercijalno proizvodi više tipova vodljivih ili poluvodljivih polimernih materijala kojih električna vodljivost pokriva područje od silicija do bakra, što se postiže primjerice premazivanjem polimerne tvorevine vodljivim premazom, metaliziranjem gotovih plastičnih dijelova ili dodatkom polimeru električki vodljivih punila kao što su: kratka metalna vlakna koja se međusobno dodiruju, vlakna iz nehrđajućeg čelika, ugljična vlakna, ugljična vlakna prevučena niklom, aluminijske pločice, bakreni ili prah od bronce, neke soli (vodljivost u ovom sustavu ovisi o sadržaju vlage u polimeru) te u novije vrijeme staklene pločice ili silikatne kuglice premazane srebrom. Nadalje, odgovarajućim postupcima polimerizacije dobiju se ionski polimeri i vodljivi polimeri, no danas je još uvijek najekonomičnije premazivanje gotovih proizvoda.

Pa tako je vrlo zanimljiv ionski polimer – metalni kompoziti koji je tip pametnog materijala transduktora. Oni su klasa elektroaktivnog polimera koja djeluje kao aktuator pod utjecajem električnog polja i obrnuto proizvodi električni potencijal kada se mehanički deformira. IMPC-ovi se rade u konzolnoj (slika 13.1) gdje se napon primjenjuje ili mjeri na bazi kroz skup steznih elektroda [9].



Slika 13.1 IPMC pretvarač u konzolnoj konfiguraciji [9]

Ionski polimer mora biti ionska izmjenjivačka membrana koja je propusna za katione, ali ne i anione koje se sastoje od fiksne mreže aniona s mobilnim kationima. IMPC su proizvedeni perfluoriranom ionskom membranom, koja je umetnuta između dvije elektrode plemenitog metala (platine ili zlata) s obje strane polimera (slika 13.2).



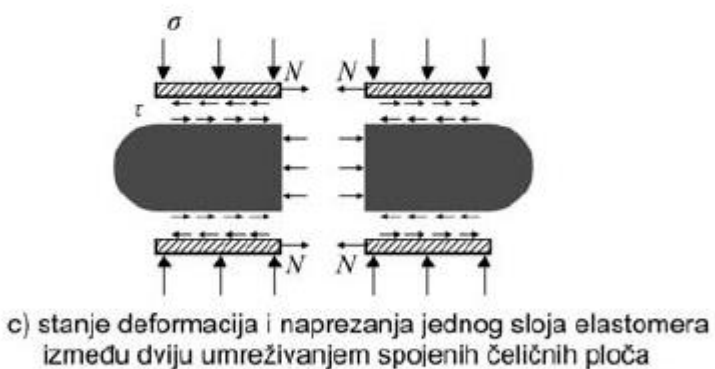
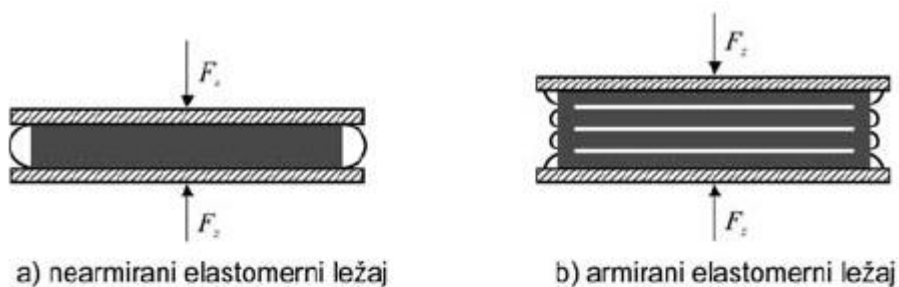
Slika 13.2 Presjek IPMC pretvornika [9]

Primjenom električnog polja na pričvršćene elektrode inducira se napon preko cijele dužine polimera, te to privlači hidratizirane katione da migriraju do katode. Akumulacija vode na jednoj strani polimera uzrokuje ekspanziju, što zauzvrat stvara stres prema anodi; tada taj neravnomjerni stres proizvodi mehaničku deformaciju. IMPC-ovi mogu biti prilagođeni raznim zahtjevima primjenama što ih čini prikladnim u bilo kojim mehatroničkim sustavima.

Ovo istraživanje bavi se provedbom IMPC-a kao mehaničkih aktuatora stvarajući korisne rezultate u obliku pomaka i snaga u stvarnom svjetskom inženjerskom sustavu. Implementacija IMPC pokretača u mehatroničke aplikacije s naprednim adaptivnim sustavima upravljanja čine sustave „pametnim“ i oni se mogu učinkovito prilagoditi svojem okolišu i postići vrhunske rezultate u usporedbi s drugim uređajima [9].

Polimeri se danas sve više koriste i kod izrade ležajeva zbog njihove trajnosti. Elastomerni ležajevi smatraju se neispravnima kada izgube svoju elastičnost i fleksibilnost koja je potrebna za dobro funkcioniranje ležajeva. Na slici 13.3 su prikazani elastomerni ležajevi

pri opterećenju. Čelične ploče sprečavaju vertikalne i poprečne deformacije elastomernog dijela kompozita od vertikalnog opterećenja te ležajevi postaju krući [10].



$F_z$  - vertikalna sila  
 $N$  - uzdužna sila  
 $\sigma$  - normalno naprezanje  
 $\tau$  - posmično naprezanje

Slika 13.3 Elastomerni ležaj i armirani elastomerni ležaj pri centričnom opterećenju [10]

## 14. ZAKLJUČAK

U završnom radu su opisane glavne značajke polimera, te njihova električna svojstva. U ta svojstva podrazumijevamo dielektričnu konstantu, elektrostatski naboj, polarizaciju, vodljivost, električne i toplinske gubitke u dielektriku i električne kvarove. Također su opisana i magnetska svojstva, te njegova primjena.

Polimere u ovisnosti o temperaturi dijelimo na duromere, elastomere i plastomere. Budući da su polimeri podložni daleko većem broju utjecaja na svojstva i drugačije se u primjeni ponašaju nego metalni materijali, stoga je posvećena i pozornost na njih. Električna svojstva polimera uglavnom ovise o njihovoj primarnoj kemijskoj strukturi. Električno ponašanje izolacijskih materijala ovisi o temperaturi, vremenu, vlazi, drugim nečistoćama, geometrijskim odnosima, mehaničkom stresu i elektrodama te frekvenciji i veličini primijenjenog napona. Najvažnije svojstvo polimera je dielektrična konstanta koja opisuje sposobnost materijala za pohranjivanje električnog naboja. Polarizacija polimera bitno utječe na električna svojstva polimera, te mogu smanjiti ili povećati vodljivost. Faktori disipacije polarnih polimernih materijala su općenito mnogo viši nego kod nepolarnih polimera, a mijenja se s temperaturom i frekvencijom kao i većina električnih svojstava. Polimeri imaju širok spektar primjene, u našem slučaju, primjena polimera se temelji na njihovom izolacijskom i dielektričnom svojstvu, pa se najčešće koriste kao izolatori. Polimeri se mogu oblikovati kao kruti elektroliti za baterije, piezoelektrične i piroelektrične senzore, elektronske i ionske vodiče, itd. Električna svojstva polimera mjeri se kako bi se odredila sposobnost izvedbe u električnim primjenama.

## 15. LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačiček F. i Indof J. : Svojstva i primjena materijala, 2002. godina
- [2] <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Podjela%20polimeria.pdf> (2018.)
- [3] <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Permitivity.html> (2018.)
- [4] Osswald A., Baur E., Brinkmann S., Oberbach K., Schmachtenberg E. : International Plastics Handbook, Hanser Publishers, Munich, 2006.
- [5] Kovačić T. : Struktura i svojstva polimera, Split, 2010. godina
- [6] <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Permitivity2.html>
- [7] <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Dielectric%20Strength.html>  
(2018.)
- [8] Duić Lj. : Vodljivi polimeri, Polimeri13, 1992. godina
- [9] J. Paulo Davim: Mechatronics, 2011.
- [10] Šimunić Ž., Dolanjski A. : Primjena polimera u graditeljstvu, Sveučilište u Zagrebu 2007. godina

## 16. OZNAKE I KRATICE

### 16.1 Fizikalne veličine

C Električni kapacitet

E Jakost električnog polja

$E_0$  Jakost polja bez dielektrika

$E_d$  Dielektrična snaga

$E_p$  Jakost polja uzrokovano polarizacijom

f Frekvencija

G Provodnost

I Jakost električne struje

M Molarna masa

n Indeks loma svjetlosti

P Polarizacija tvari

Q Naboj

R Električni otpor

t Vrijeme

$\tan\delta$  Dielektrični faktor disipacije

T Apsolutna temperatura

$T_g$  Staklište

$T_m$  Talište

U Napon

X električna susceptibilnost

$\epsilon_0$  Dielektrična konstanta podtlaka

$\epsilon_r$  Dielektrična konstanta

$\epsilon_v$  Dislokacijski udio dielektrične konstante

$\rho$  Specifična otpornost

$\rho_s$  Površinska otpornost

## 16.2 Polimeri

ABS	Akronitril/butadien/stiren
CA	Celulozni acetat
CAB	Celulozni acetobutirat
CP	Celulozni propionat
EP	Epoksidna smola
EVAC	Etilen/vinil-acetat
MF	Melamin-formaldehidna smola
PA	Poliamid
PAN	Poliakronitril
PANI	Polianilin
PBT	Poli(buten-tereftalat)
PC	Polikarbonat
PCTFE	Poliklorotrifluoretilen
PE	Polietilen
PE-HD	Polietilen visoke gustoće
PE-LD	Polietilen niske gustoće
PEEK	Poli-eter-eter-keton
PET	Poli(etilen-tereftalat)
PF	Fenol-formaldehidna smola
PI	Poliimid
PIB	Poliizobuten
PMMA	Poli(metil-metakrilat)
POM	Poli(oksimetilen) (poliformaldehid)
PP	Polipropilen
PPE	Poli(fenilen-eter)
PPV	Poli(fenilen-vinil)
PPY	Polipirol
PS	Polistiren
PSU	Polisulfon
PTFE	Politetrafluoretilen
PVAL	Poli(vinil-alkohol) VII
PVC	Poli(vinil-klorid)



PVDC Poli(viniliden-klorid)

PVDF Poli(viniliden-fluorid)

SAN Stiren/akrilonitril

UF Urea-formaldehidna smola

UP Nezasićena poliesterska smola

## 17. SAŽETAK

### Naslov: Električna svojstva polimera

Glavnim odlikama polimernih materijala smatraju se njihova čvrstoća, plastičnost i trajnost, a s obzirom na svoja električna svojstva smatraju se dobrim izolatorima. Važno svojstvo polimera je njihova dielektrična konstanta. Ona opisuje sposobnost materijala za pohranjivanje električnog naboja. Električna svojstva svih polimera nisu jednaka nego ovise o polarnosti. Dva najvažnija molekularna tipa za polarizaciju dielektrika u električnom polju su orijentacijska polarizacija i polarizacija pomaka. Da bi procijenili da li je materijal pogodan za bilo koju primjenu, moramo znati svojstva gubitaka materijala i izračunati stvarni gubitak električne energije. Niska vrijednost faktora disipacije ukazuje na visoke performanse električnih uređaja. Visok faktor disipacije je važan za polimere koji se trebaju zagrijati u radijskoj frekvenciji ili mikrovalnoj peći za zavarivanje ili sušenje. Površinski otpor polimera se mjeri tako što se na površinu nanese dvije linije od srebra, stave pod napon i mjeri otpor. Važna električna svojstva izolatora je njihova dielektrična snaga. Ako se napon nanese na izolator i stalno se povećava, na kraju će se dosegnuti točka na mjestu gdje se događa električni kvar. Kvar se obično promatra kao električni luk preko elektroda koji uzrokuje katastrofalno smanjenje otpornosti. Odlična izolacijska svojstva polimernih materijala, odnosno vrlo visoka električna otpornost površine, rezultiraju akumuliranjem elektrostatskog naboja. Elektrostatskim nabojem privlačimo čestice prašine na površinu polimernog materijala. Budući da elektrostatski naboj često uzrokuje velike smetnje pri neaktivnoj primjeni polimernih materijala, propisi u mnogim zemljama zahtijevaju da se za tu primjenu koriste vodljivi polimeri. Elektreti su čvrsto dielektrična tijela koja pokazuju trajnu dielektričnu polarizaciju. Mogu se proizvesti iz nekih polimera kada se učvršćuju pod utjecajem električnog polja ili putem mehaničkih procesa formiranja. Zagrijani polimer, polariziran u vrlo jakom električnom polju i zatim ohlađen može beskonačno zadržati svoju polarizaciju. Magnetska svojstva polimera se često mijenjaju pomoću magnetskih punila. Polimeri se najviše upotrebljavaju kao izolatori, ali i u građevini kao alternativni konstrukcijski materijali.

**Ključne riječi:** polimer, vodljivost, dielektrična konstanta, otpornost, izolator, polarizacija.

## 18. ABSTRACT

### **Title: Electrical properties of polymers**

The main characteristics of polymeric materials are considered to be their strength, plasticity and durability, and due to their electrical properties they are considered to be good insulators. The important property of the polymer is its dielectric constant. It describes the ability to store electrical charges. The electrical properties of all polymers are not the same because they depend on polarity. The two most important molecular types for polarization of dielectrics in the electric field are orientation polarization and polarization of the displacement. To assess whether the material is suitable for any application, we need to know the properties of material losses and calculate the actual loss of electricity. The low value of the dissipation factor indicates the high performance of electrical devices. High dissipation factor is important for polymers that need heating in a radio frequency or microwave oven for welding or drying. Surface resistance of the polymer is measured by applying two lines of silver to the surface, subjecting it to voltage and measuring the resistance. The important electrical properties of the insulator are their dielectric power. If the voltage is applied to the insulator and constantly increasing, the point at which electrical failure occurs will be reached. The failure is usually seen as an electric arc over an electrode which causes catastrophic reduction of resistance. Excellent insulating properties of polymeric materials, ie. very high electrical surface resistance, result in accumulation of electrostatic charge. With electrostatic charge we draw dust particles on the surface of polymeric material. Since electrostatic charge often causes major disturbances in the inactive application of polymer materials, regulations in many countries require that conductive polymers are used for this application. The electrets are strongly dielectric bodies that show permanent dielectric polarization. They can be made from some polymers when they are fixed under the influence of an electric field or by mechanical forming processes. The heated polymer, polarized in a very strong electrical field and then chilled, can endlessly retain its polarization. Magnetic properties of polymers are often changed by magnetic fillers. Most used as insulators, but also in construction as alternative construction materials.

**Keywords:** polymer, conductivity, dielectric constant, resistance, isolator, polarization.

## IZJAVA O AUTORSTVU ZAVRŠNOG RADA

Pod punom odgovornošću izjavljujem da sam ovaj rad izradio/la samostalno, poštujući načela akademske čestitosti, pravila struke te pravila i norme standardnog hrvatskog jezika. Rad je moje autorsko djelo i svi su preuzeti citati i parafraze u njemu primjereno označeni.

Mjesto i datum	Ime i prezime studenta/ice	Potpis studenta/ice
U Bjelovaru, <u>16. 09. 2018.</u>	Bruno Vuletić	Bruno Vuletić

Prema Odluci Veleučilišta u Bjelovaru, a u skladu sa Zakonom o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju, elektroničke inačice završnih radova studenata Veleučilišta u Bjelovaru bit će pohranjene i javno dostupne u internetskoj bazi Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu. Ukoliko ste suglasni da tekst Vašeg završnog rada u cijelosti bude javno objavljen, molimo Vas da to potvrdite potpisom.

Suglasnost za objavljivanje elektroničke inačice završnog rada u javno dostupnom nacionalnom repozitoriju

Bruno Vuletić

*ime i prezime studenta/ice*

Dajem suglasnost da se radi promicanja otvorenog i slobodnog pristupa znanju i informacijama cjeloviti tekst mojeg završnog rada pohrani u repozitorij Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu i time učini javno dostupnim.

Svojim potpisom potvrđujem istovjetnost tiskane i elektroničke inačice završnog rada.

U Bjelovaru, 16.09.2018.

Bruno Vuletić

*potpis studenta/ice*