

# Organski dielektrični materijali

---

Oreški, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:382913>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-30**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**ORGANSKI DIELEKTRIČNI MATERIJALI**

**Završni rad**

**Josip Oreški**

**Osijek, 2020.**

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| <b>1. UVOD</b> .....  | 1  |
| <b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....                     | 2  |
| <b>2. DIELEKTRIČNI MATERIJALI</b> .....                     | 3  |
| <b>2.1. Relativna dielektrična konstanta</b> .....          | 3  |
| <b>2.2. Polarizacija</b> .....                              | 5  |
| <b>2.2.1. Tipovi polarizacije</b> .....                     | 6  |
| <b>2.3. Specifična dielektrična otpornost</b> .....         | 8  |
| <b>2.4. Dielektrična čvrstoća</b> .....                     | 9  |
| <b>2.5. Dielektrični gubici</b> .....                       | 9  |
| <b>2.6. Starenje dielektrika</b> .....                      | 10 |
| <b>2.7. Podjela dielektričnih materijala</b> .....          | 11 |
| <b>3. PREGLED ORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA</b> .....  | 15 |
| <b>3.1. Mineralna ulja</b> .....                            | 15 |
| <b>3.2. Biljna ulja</b> .....                               | 18 |
| <b>3.3. Voskovi</b> .....                                   | 19 |
| <b>3.4. Smole</b> .....                                     | 21 |
| <b>3.5. Drvo</b> .....                                      | 24 |
| <b>3.6. Prirodni vlaknasti materijali</b> .....             | 25 |
| <b>3.6.1. Svila</b> .....                                   | 26 |
| <b>3.6.2. Lan</b> .....                                     | 26 |
| <b>3.6.3. Juta</b> .....                                    | 27 |
| <b>3.6.4. Konoplja</b> .....                                | 28 |
| <b>3.6.5. Pamuk</b> .....                                   | 29 |
| <b>3.6.6. Papir</b> .....                                   | 29 |
| <b>4. PRIMJENA ORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA</b> ..... | 31 |

|  |    |
|--|----|
| <b>4.1. Uljni Transformator</b> .....                  | 31 |
| <b>4.1.1. Transformatorsko ulje</b> .....              | 32 |
| <b>4.2. Uljni kondenzator</b> .....                    | 34 |
| <b>4.3. Papirnati kondenzatori</b> .....               | 35 |
| <b>4.4. Električni kablovi</b> .....                   | 36 |
| <b>4.4.1. Uljni kabeli</b> .....                       | 38 |
| <b>4.5. Razvoj organskih izolacijskih ulja</b> .....   | 39 |
| <b>4.6. Dielektrični elektroaktivni polimeri</b> ..... | 40 |
| <b>5. ZAKLJUČAK</b> .....                              | 42 |
| <b>LITERATURA</b> .....                                | 43 |
| <b>SAŽETAK</b> .....                                   | 47 |
| <b>SUMMARY</b> .....                                   | 48 |

## 1. UVOD

Pojam dielektrika prvi je definirao Michael Faraday. Dielektrik je električni izolator koji može biti polariziran prisustvom električnog polja što se može vidjeti kada između ploča kondenzatora gdje se nalazi dielektrik prolazi električno polje. Električni naboji ne teku kroz materijal kao u vodiču nego samo lagano odstupaju od njihovog prosječnog ravnotežnog položaja što uzrokuje dielektričnu polarizaciju. Ovaj efekt stvara unutarnje električno polje, koje smanjuje cjelokupno polje unutar samog dielektrika i u ranim danima je znatno utjecalo na izvedbu kondenzatora i transformatora. Dok se u posljednje vrijeme može vidjeti da ta ista svojstva imaju značajnu ulogu u nanoelektronskim uređajima. Zahvaljujući F. M. Clarku godine 1945. nastao je odjel za električne izolatore. Godine 1952. izdan je Dnevnik Elektrokemijskog Društva (Journal of The Electrochemical Society) koji je bio namijenjen širenju znanja o dielektrcima i svojstvima svih električnih izolatora. Danas se taj odjel naziva Odjel za Dielektričnu Znanost i Tehnologiju (Dielectrics Science and Technology). Svrha tog odjela je poticanje temeljnih istraživanja sadašnjih i budućih dielektričnih materijala te također teži razmjeni podataka koje se odnose na sve aspekte znanosti i tehnologija dielektričnih materijala.

Općenito materijali za primjenu u elektrotehnici mogu se podijeliti na vodiče, poluvodiče i izolatore ili dielektrični materijal. Elektrotehnički izolacijski materijali su tvari koje imaju vrlo nisku električnu vodljivost i služe nam za izradu električnih izolacija i izolacijskih konstrukcijskih elemenata električnih uređaja. Njihova svrha je spriječiti gubitak električne energije i zaštititi ljude u okolini uređaja koji su pod naponom. Izolacijski materijali se nazivaju i dielektrcima jer oboje su u vezi s odsutnošću slobodnih elektrona. Izolator bi bio idealan kada bi imao beskonačan velik otpor odnosno kada bi mu vodljivost bila jednaka nuli. Dok kod realnih izolatora zbog malih onečišćenja i poremećaja u strukturi imamo prisutnost slobodnih elektrona zbog kojih postoji vrlo mala vodljivost električne struje. Najbolji izolatori imaju vodljivost oko 10 do 5 S/m [1].

Primjena izolacijskih materijala u elektrotehnici ovisi o njihovim električnim i mehaničkim svojstvima koja se nekim materijalima mogu znatno promijeniti tijekom vremena, pri povišenim temperaturama, kod struja viših frekvencija i dr. Kao na primjer površinska električna otpornost zbog vlage, onečišćenja i ostalih utjecaja može biti znatno smanjena i to za nekoliko redova veličine manja od unutrašnje električne otpornosti materijala. Zbog toga izbor izolacijskog

materijala ne smije ovisiti samo o otpornosti materijala nego treba biti prikladan za specifičnu primjenu.

Osnovna karakteristika dielektričnih materijala je njihova podložnost polarizaciji pod djelovanjem električnog polja, po čemu se razlikuju od vodiča, kod kojih električno polje dovodi do prijenosa mase i energije. Karakteristike koje su zajedničke svim dielektricima su vrijednost specifične dielektrične otpornosti ( $\rho$ ) od  $10^6 \Omega\text{m}$  do  $10^{18} \Omega\text{m}$  i širine zabranjene zone od  $3.5\text{eV}$  [2].

## **1.1. Zadatak završnog rada**

Cilj ovog rada je prikazati značaj i rasprostranjenost organskih dielektričnih materijala. Prikazat će se fizikalna svojstva organskih dielektričnih materijala i njihova kategorizacija. Također, prikazati će se najrašireniji organski dielektrični materijali te će se dati uvid u suvremene organske dielektrične materijale.

## 2. DIELEKTRIČNI MATERIJALI

Dielektrik je materijal koji ima lošu vodljivost električne energije. Na osnovi trakaste strukture, dielektrični materijali imaju energetska razmaka od 3 eV ili više. Ova veličina energetske raspora isključuje mogućnost da se elektron prebaci iz valentnog pojasa u vodljivi pojas termičkim putem. Dielektrik je električni izolator koji se može polarizirati primijenjenim električnim poljem. Kada se dielektrik postavi u električno polje, električni naboji se malo pomaknu iz svojih prosječnih položaja ravnoteže uzrokujući dielektričnu polarizaciju. Zbog dielektrične polarizacije pozitivni naboji se pomiču prema polju, a negativni u suprotnom smjeru. To stvara unutarnje električno polje koje smanjuje ukupno polje unutar samog dielektrika. Ako je dielektrik sastavljen od slabo vezanih molekula, te molekule ne samo da se polariziraju, nego mijenjaju čak i smjer tako da se njihova os simetrije poravnava s poljem. Idealni dielektrični materijal ne pokazuje električnu vodljivost kada se primjeni električno polje. U praksi, svi dielektrici pokazuju određenu vodljivost koja se općenito povećava s porastom temperature i primijenjenog polja. Odabir dielektričnog materijala za upotrebu u elektrotehnici u većini slučajeva ovisi o njegovim svojstvima. Da bi odabrali dielektrični materijal koji nam najviše odgovara moramo znati njegova svojstva poput: relativne dielektrične konstante, specifične dielektrične otpornosti, dielektrične čvrstoće i dielektričnih gubitaka.

### 2.1. Relativna dielektrična konstanta

Dva naelektrizirana tijela međusobno djeluju Coulombovom silom koja može biti privlačna ili odbojna ovisno o pozitivnom ili negativnom naboju [Q]. Coulombova sila je proporcionalna umnošku tih nabojâ, a obrnuto proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti.

$$F \sim \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad [2-1]$$

Kada se uvede konstanta proporcionalnosti dobije se jednakost (u volumenu):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad [2-2]$$

Gdje je:

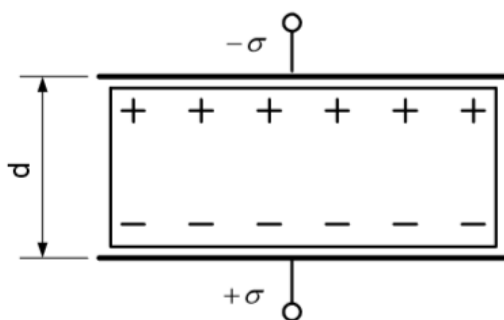
$\epsilon_0$ - električna permitivnost (propustljivost) vakuuma.

Isto tako ova jednadžba se može primijeniti ako se tijelo nalazi u nekoj drugoj dielektričnoj sredini gdje umjesto električne permitivnosti vakuuma imamo dielektričnu permitivnost te sredine. Pa Coulombova sila između njih je:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad [2-3]$$

Na osnovu ovoga relativnu dielektričnu permitivnost [ $\epsilon_r$ ] nekog materijala možemo odrediti kao odnos Coulombove sile između dva tijela u vakuumu i kao odnos Coulombove sile između dva tijela u određenom materijalu [3].

Na slici 2.1. prikazan je pločasti kondenzator s dielektričnim materijalom



**Slika 2.1.** Pločasti kondenzator s dielektričnim materijalom [3]

Lokalno promatrano  $\epsilon_r$  moguće je definirati kao odnos jakosti električnog polja u dielektriku i jakosti električnog polja u vakuumu. Dodavanjem između ploča kondenzatora određeni dielektrik, jakost električnog polja, a time i potencijal između elektroda kondenzatora će se smanjiti za vrijednost relativne dielektrične konstante.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \quad [2-4]$$



Gdje je:

$\sigma$  - površinski elektricitet

To se događa tako što se na površini dielektrika stvara elektricitet koji ima suprotan predznak onome na elektrodama kondenzatora te umanjuje električno polje. Elektricitet koji umanjuje električno polje određen je vektorom polarizacije  $P$  [2].

$$|P| = \sigma \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right) \quad [2-5]$$

Kako bi potpuno definirali lokalnu dielektričnu konstantu potrebno je odrediti i vektor djelomičnog pomjeranja. Dielektrično pomjeranje (dielektrična indukcija)  $[D]$  je omjer površinskog elektriciteta i dielektrične permitivnosti vakuuma.

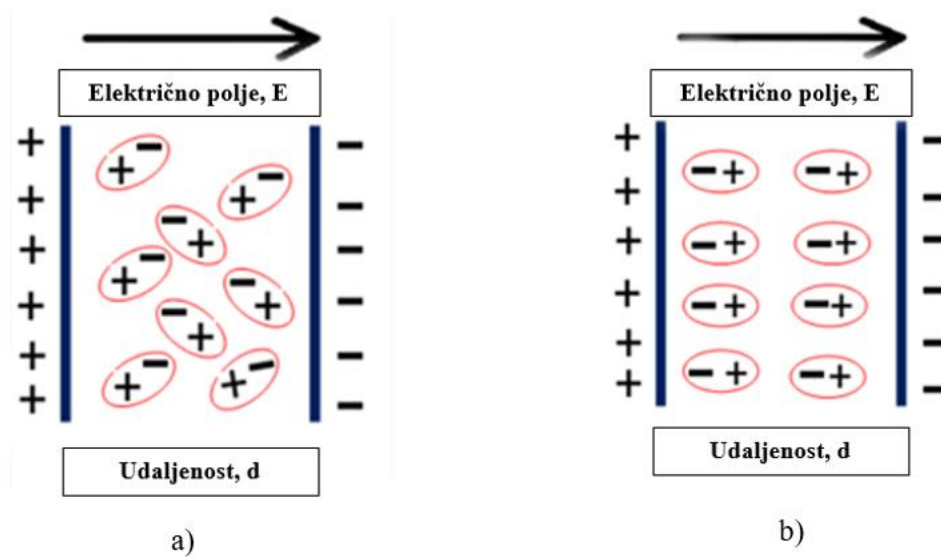
$$|D| = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad [2-6]$$

Treba još napomenuti da kod izotropnih dielektrika  $\epsilon_r$  je isti u svim pravcima i smjerovima za dani dielektrik dok kod anizotropnih dielektrika  $\epsilon_r$  ima različite vrijednosti u različitim smjerovima.

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \rightarrow \frac{D_i}{\epsilon_0} = \epsilon_{rij} E_j : i, j = 1, 2, 3 \quad [2-7]$$

## 2.2. Polarizacija

Polarizacija je raspoređivanje pozitivnog i negativnog naboja i čestica koje čine dielektrični materijal. To je zapravo poravnavanje dipolnih trenutaka stalnog ili induciranog dipola u smjeru perifernog električnog polja.



*Slika 2.2. a) Raspored polarnih molekula kada nema perifernog električnog polja, b) Raspored polarnih molekula pod utjecajem električnog polja [4]*

Kada nema utjecaja električnog polja polarne molekule u dielektričnom materijalu biti će nasumično poravnate (Slika 2.2. a). Dok pod utjecajem električnog polja dolazi do polarizacije molekula i električna energija se prenosi pomicanjem struje, a ne procesom provođenja (Slika 2.2. b)) [4].

### 2.2.1. Tipovi polarizacije

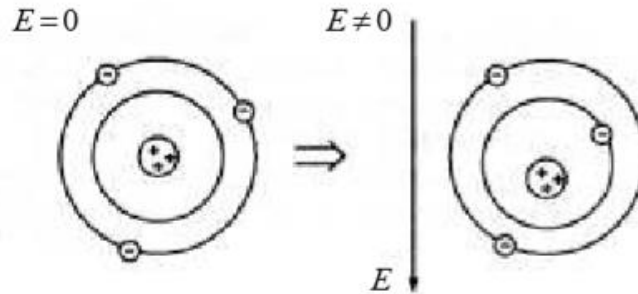
Elektronska polarizacija – Neutralni dielektrici bez djelovanja vanjskog električnog polja nemaju stalne električne dipole. Ako razmotrimo jedan atom kojem je +e kulon svakog protona u jezgri i –e kulon svakog elektrona u elektronskom omotaču. Elektroni u orbiti tvore sferni oblak koji kruži oko pozitivno nabijene jezgre. Kada je  $E=0$  središte jezgre i elektronskog omotača se podudaraju. No kada se na atom primjeni vanjsko električno polje jezgra atoma se pomakne prema negativnom djelu polja, dok se elektronski omotač pomakne prema pozitivnom dijelu vanjskog električnog polja. Zbog pomicanja jezgre i elektronskog omotača razvija se električni dipolni moment intenziteta [5]:

$$p = q \cdot \Delta l \quad [2-8]$$

Gdje je:

$\Delta l$  – razmak između središta jezgre i elektronskog omotača.

Na slici 2.3. prikazana je elektronska polarizacija.



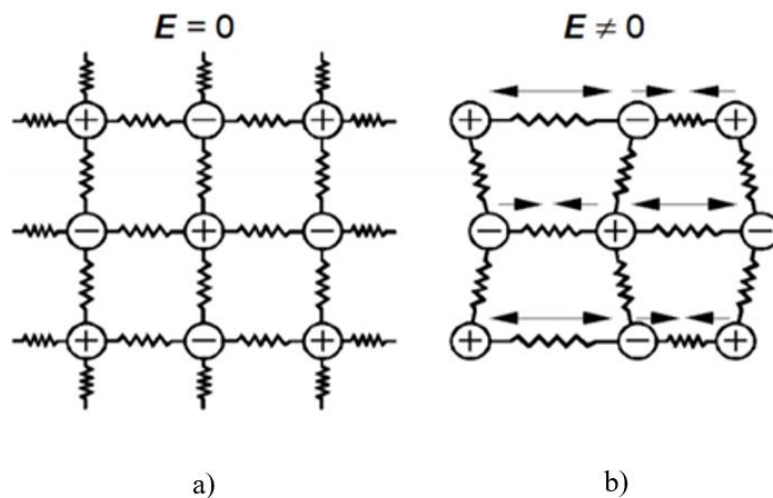
*Slika 2.3. Elektronska polarizacija [3]*

Molekularna polarizacija ili tzv. Ionska polarizacija nastaje kada električno polje uzrokuje udaljavanje iona u dielektričnom materijalu za male udaljenosti od svojih položaja u kristalnoj rešetki. Na slici 2.4. može se vidjeti raspored iona u kristalnoj rešetci kada nema električnog polja i vidi se kako se svi ioni nalaze na međusobno jednakoj udaljenosti, dok pod utjecajem električnog polja ionska rešetka se deformira i nastaje ionska polarizabilnost ( $\alpha_j$ ) [5] :

$$p = \alpha_j E_{lok} \quad [2-9]$$

Gdje je:

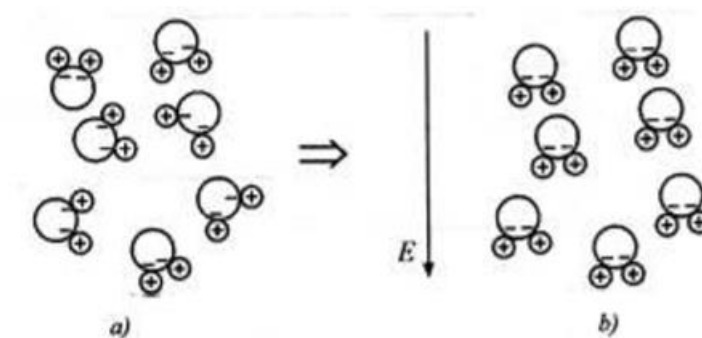
$E_{lok}$  – lokalno električno polje



*Slika 2.4. a) Prikaz ionske polarizacije u ionskom kristalu u odsustvu električnog polja, b) Prikaz ionske polarizacije u prisustvu električnog polja [5]*

Orijentacijska polarizacija javlja se većinom kod plinovitih, tekućih i nekih amorfni viskoznih čvrstih dielektričnih materijala. Nastaje usmjeravanjem trajnih električnih dipola dielektričnih materijala u smjeru električnog polja [7].

Na slici 2.5 prikazana je orijentacijska polarizacija bez vanjskog polja (a) i s vanjskim utjecajem električnog polja (b).



*Slika 2.5. Orijentacijska polarizacija, a) bez vanjskog utjecaja b) s vanjskim utjecajem električnog polja [3]*

### 2.3. Specifična dielektrična otpornost

Dielektrična otpornost je vrlo slična električnoj otpornosti vodiča i poluvodiča. Samo što za razliku od vodiča i poluvodiča kod kojih se nositelji električne struje sudaraju sa strukturom materijala što predstavlja električnu otpornost kod dielektričnih materijala, nositelji naelektriziranosti mogu strujati kroz volumen dielektrika ili po površini između promatranog dielektrika i dielektričkog medija u kojem se dielektrik nalazi. Zbog toga možemo reći da se dielektrik promatra kao paralelna veza unutarnje i površinske otpornosti. Unutarnja specifična električna otpornost karakterizira nesavršenost izolacijskih svojstava po volumenu dielektrika dok površinska

specifična električna otpornost karakterizira nesavršenost izolacijskih svojstava po površini dielektrika [3].

## **2.4. Dielektrična čvrstoća**

Dielektrična čvrstoća karakterizira sposobnost dielektrika da izdrži homogenu električno polje bez naglog povećanja provodnosti. Pri prevelikom električnom polju dolazi do kratkog spoja što uzrokuje proboj dielektrika. Dielektrična čvrstoća se određuje eksperimentalno tako što se dielektrik stavi između elektroda koje osiguravaju pseudohomogenu električno polje. Polagano se povećava istosmjerni napon dok se ne dogodi proboj. U tom trenutku smo dobili probojni napon mjerenog dielektrika [kV/cm]. Dielektrična čvrstoća je najvažnije svojstvo dielektrika zato što može doći do velikih posljedica ako se dogodi proboj dielektrika tj. kratki spoj. Nakon što se dogodi kratki spoj dielektrici se dijele na reverzibilne i ireverzibilne. Reverzibilni dielektrični materijali se nakon proboja vraćaju u prvobitno stanje tj. vraćaju svoja dielektrična svojstva dok ireverzibilni dielektrici gube svoja svojstva ili ih mogu samo djelomično vratiti [3].

## **2.5. Dielektrični gubici**

Dielektričnim gubicima se naziva onaj dio energije koji se nepovratno pretvori u dielektričnom materijalu u neki drugi oblik energije, većinom je to toplina.

Dielektrične gubitke uzrokuju:

- Joulovi (omski) gubici – javljaju se u svim dielektričnim materijalima gdje je provodnost veća od nule. Joulovi gubici znatno rastu s porastom temperature zato što povećava električna provodnost dielektričnih materijala
- Polarizacijski gubici – javljaju se u dielektričnim materijalima s orijentacijskom polarizacijom i u nekim materijalima s ionskom polarizacijom. Ti gubici su uzrokovani određenim frekvencijama i imaju svoj maksimum na temperaturi karakterističnoj za pojedini dielektrik.

- Gubici zbog ionizacije – većinom se javljaju u plinovitim dielektričnim materijalima. U jakim električnim poljima dolazi do gubitka energije zbog ionizacije molekula.
- Gubici zbog nehomogenosti materijala – nastaju u slojevitim dielektričnim materijalima i najviše ovise o njihovom sastavu i nečistoćama.

## 2.6. Starenje dielektrika

Mijenjanje svojstva dielektričnog materijala kroz određeni vremenski period se zove starenje dielektrika. Pod starenjem dielektrika podrazumijevamo niz kemijskih, fizikalno-kemijskih, električnih i strukturnih promjena materijala koje se javljaju pri normalnom radu dielektrika nakon određenog vremenskog perioda. Svojstva dielektrika se mogu toliko promijeniti da dielektrik postane neupotrebljiv. Naravno starenje dielektrika ovisi dosta o tome u kojem se agregatnom stanju nalazi dielektrik. Za vakuum i plinove možemo reći da nemaju velike posljedice starenja dok dielektrici u čvrstom i tekućem stanju stare s većim posljedicama. Zbog toga smo definirali pojam trajanje dielektrika koji nam govori koliko dugo će nam dielektrik biti upotrebljiv.

Starenje tekućina – većinom tekućine koje se koriste kao dielektrični materijali su ulja. Na njih starenje može utjecati fizikalno i kemijski. Fizikalno utječe tako da u ulje dođu nečistoće poput prašine, vlakana, vode. No te nečistoće se mogu otkloniti filtriranjem i time im produžiti vijek trajanja. Kemijsko starenje ulja obuhvaća uglavnom kemijske pojave poput oksidacije i polimerizacije. U ulju se pojavljuje zrak koji uzrokuje stvaranje zrnastog ili katranastog taloga koji može varirati od smeđe do crne boje. Taj efekt smanjuje dielektričnu čvrstoću ulja zbog vode koja se veže za prisutne nečistoće [2].

Starenje čvrstih dielektrika – najveći utjecaj na starenje čvrstih dielektrika ima električno polje i temperatura. Utjecaj jačine električnog polja na vijek trajanja dielektrika dan je izrazom:

$$\tau_s = AE^{-m} \quad [2-10]$$

Gdje su:

A i m konstante.

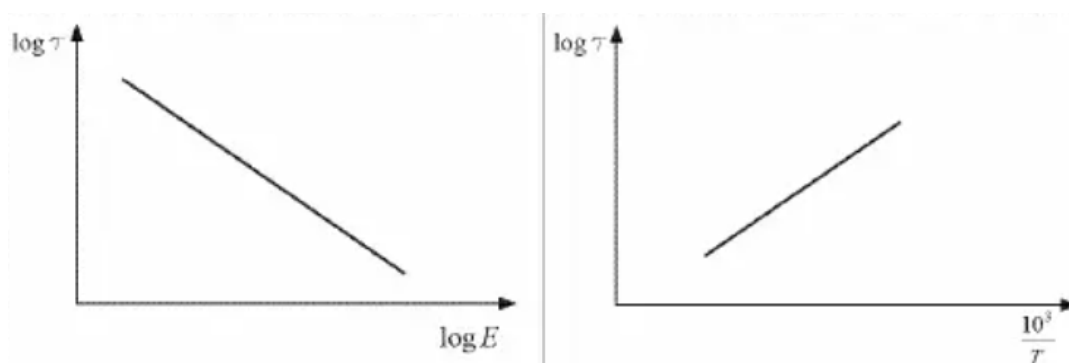
Ovisnost trajanja dielektrika o temperaturi isto tako je dana izrazom:

$$\tau_s = \tau_{0s} e^{\frac{C}{kT}} \quad [2-11]$$

Gdje je:

$\tau_{0s}$  vijek trajanja pri normalnoj radnoj temperaturi, a C-konstanta.

Na slici 2.6. prikazano je mijenjanje električnog polja i temperature tijekom određenog vremena.



*Slika 2.6. Ovisnost vijeka trajanja dielektrika od električnog polja i temperature [2]*

Iz slike 2.6. se može vidjeti kako električno polje s vremenom opada dok temperatura dielektrika raste.

## 2.7. Podjela dielektričnih materijala

Prema brojnosti i širini primjene, dielektrični materijali tvore najznačajniju skupinu elektrotehničkih materijala te ih možemo podijeliti po različitim svojstvima [7].

Prema ovisnosti električnog pomaka o vektoru jakosti električnog polja moguće ih je podijeliti na:

- Linearne (elektroizolacijski materijal)
- Nelinearne

Prema kemijskom sastavu moguće ih je podijeliti na:

- Organske
- Anorgansk

*Tablica 2.1. Pregled organskih dielektričnih materijala [3]*

| <b>Organski dielektrični materijali</b> |  |
|---|--|
| <b>Od sirove nafte</b>                  | Mineralna ulja, vazelin, parafin, bitumen, asfalt            |
| <b>Biljna ulja</b>                      | Laneno ulje, sojino ulje, ricinusovo ulje, terpentinsko ulje |
| <b>Vlaknasti materijali</b>             | Svila, juta, lan, konoplja, pamuk, papir                     |
| <b>Umjetni materijali</b>               | Termoplasti, duroplasti                                      |

*Tablica 2.2. Pregled anorganskih dielektričnih materijala [3]*

| <b>Anorganski dielektrični materijali</b> |  |                |                 |                |            |    |    |    |    |
|---|--|----------------|-----------------|----------------|------------|----|----|----|----|
| <b>Plinovi</b>                            | Zrak   | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | He         | Ne | Ar | Kr | Xe |
| <b>Plinovite halogene veze</b>            | Sumpor heksa florid (SF <sub>6</sub> )                                 |                |                 |                | bromovodik |    |    |    |    |
| <b>Prirodno kamenje</b>                   | Mramor, škriljac, kvarc, azbest, liskun, muskovit, staklo              |                |                 |                |            |    |    |    |    |
| <b>Keramički materijali</b>               | Aluminijski silikati (tvrđi porculan), magnezijski silikati (steatiti) |                |                 |                |            |    |    |    |    |

Prema agregatnom stanju ih je moguće podijeliti na:

- Plinovite
- Tekuće
- Čvrste



Opća svojstva plinovitih dielektričnih materijala u odnosu na tekuće i čvrste su:

- Mala relativna dielektrična konstanta
- Velika električna otpornost
- Naglašeno mali tangens kuta dielektričnih gubitaka
- Mala dielektrična čvrstoća

Od tekućih dielektrika većinom se očekuje :

- Velika dielektrična čvrstoća
- Velika električna otpornost
- Mali tangens kuta dielektričnih gubitaka
- Dobra kemijska i termička postojanost
- Nezapaljivost
- Niska cijena.

Dijele se u tri grupe:

- Mineralna ulja
- Sintetički tekući dielektrici
- Biljna ulja

Čvrsti dielektrični materijali dijele se na:

- Organski: tinjac, azbest kamen, staklo, keramički materijali, tanki slojevi
- Anorganski: voskovi, bitumen i asfalt, smole silikonske smole, kaučuk i gume, vlaknasti i tekstilni elektroizolacijski materijali, elektroizolacijski lakovi, zalivne mase.

Također ih je moguće podijeliti na:

- Prirodne
- Sintetičke (umjetni)

**Tablica 2.3.** Redovi veličine dielektričnih parametara slabih, dobrih i odličnih izolatora, kao i ekstremnih vrijednosti tih parametara [2]

| <b>Parametri</b>  | <b>Slabi izolatori</b> | <b>Dobri izolatori</b> | <b>Odlični izolatori</b> | <b>Ekstremne vrijednosti</b>                          |
|---|------------------------|------------------------|--------------------------|---|
| Specifična električna otpornost $\rho$ , $\Omega\text{cm}$        | $10^8 - 10^{12}$       | $10^{12} - 10^{16}$    | $>10^{16}$               | $10^{20}$   |
| Faktor dielektričnih gubitaka $\text{tg}\zeta$ , $\times 10^{-4}$ | $>100$                 | $<100$                 | $>10$                    | $<(\text{čvrsti i tekući})$<br>$<10^{-4}$ (plinoviti) |
| Relativna dielektrična konstanta, $\epsilon_r$                    | $>10$                  | $<10$                  | $<3$                     | 15000   |
| Dielektrična čvrstoća $E_{kr}$ , $\text{Kv/mm}$                   | $<25$                  | 25 - 50                | $\geq 50$                | 160 (folija)<br>800 (film)                            |

Prema dielektričnim svojstvima dielektrici se mogu podijeliti na slabe dobre i odlične dielektrike. U Tablici 2.3. prikazana je usporedba vrijednosti dielektričnih parametara za slabe, dobre i odlične dielektrike. Svaka skupina izolatora međusobno je uspoređena i prikazana su najbitnija svojstva poput: specifičnu električnu otpornost, faktor dielektričnih gubitaka, relativnu dielektričnu konstantu i dielektričnu čvrstoću [2].

### 3. PREGLED ORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA

Područje primjene organskih dielektričnih materijala izuzetno je široko. Organska se kemija od samog početka bavila isključivo ugljikovim spojevima koje proizvode biljni i životinjski organizmi odakle i naziv organski spojevi. Danas organska kemija se podrazumijeva kao opća kemija koja proučava ugljikove spojeve od kojih neki imaju dielektrična svojstva. Prirodni izolatori ove vrste uključuju naftne derivate (mineralna ulja, vazelin, parafin i bitumen), asfalt, biljna ulja, vosak, prirodne smole, drvo i prirodna organska vlakna.

#### 3.1. Mineralna ulja

Sirovina koja se koristi za proizvodnju mineralnih ulja je nafta. Većinom se sastoji od zasićenih ugljikovodika parafinske ili naftne strukture, s manje nečistoća nezasićenih aromatskih ugljikovodika, smola, asfalt te organski sumpor i dušični spojevi. Takozvani derivati dobiju se postupkom frakcijske destilacije nafte, kao što su: benzin, kerozin, lagana i teška ulja. Mineralna ulja se dobivaju kombinacijom uljnih frakcija destilacije nafte. Prozirna su i bistra, a gotovo da uopće ne podliježu spontanom starenju. Kako bi povećali otpornost prema funkcionalnom starenju, sintetičkim materijalima često se dodaju mineralna ulja, takozvani inhibitori.

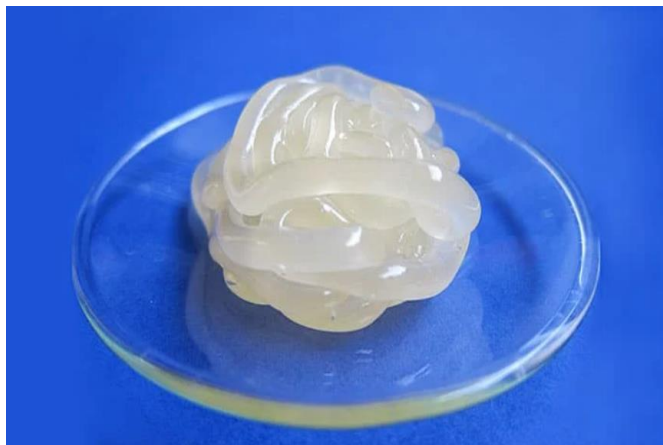
Izolacijska mineralna ulja ne smiju biti izložena trajnim učincima visoke temperature, zbog mogućnosti kemijskih promjena razvoja plinske faze i paljenja. Inače dobro provode toplinu i gase električni luk. Mineralna ulja lako apsorbiraju zrak što uzrokuje oksidativne procese u njima i povećava količinu prisutne vlage. Imaju dobre dielektrične karakteristike. To se može objasniti odsustvom dipola u njihovoj molekularnoj strukturi. Imaju relativno visoku dielektričnu čvrstoću, a zanimljivo je da je ekstremno visoka u slučaju tankih slojeva. Dakle 1 $\mu$ m mineralnog ulja ima dielektričnu čvrstoću preko 300 kV/mm. Dielektrična konstanta im je nezavisna o temperaturi. Faktor dielektričnih gubitaka je mal, nezavisan o frekvenciji ali zavisna o temperaturi.

Sva svojstva mineralnih ulja, a naročito ona električna uveliko ovise o njihovom sastavu i čistoći. Čak kada bi imali i malo vlage značajno bi smanjilo njihovu dielektričnu čvrstoću, a isti takav učinak ima i prisustvo čvrstih čestica. Također na dielektrična svojstva utječe i funkcionalno starenje. Povišena temperatura, nečistoće, a osobito parcijalno pražnjenje i djelovanje električnog luka dovode do slabljenja dielektričnih karakteristika mineralnih ulja. Pošto nakon nekog

određenog vremenskog perioda može doći do neispravnosti mineralnih ulja, odnosno njihova svojstva više nisu ista, čestim uzimanjem uzoraka gdje se mjeri faktor dielektričnih gubitaka i dielektrična čvrstoća provjerava se njihova ispravnost [2].

**Vazelin** – polutvrda smjesa tekućih i krutih ugljikovodika. Dobiva se destilacijom nafte. Bijele je boje i proziran je.

Na slici 3.1 prikazan je vazelin.



*Slika 3.1. Vazelin [11]*

Vazelin je kemijski slabo aktivan i ne rastvara se u vodi. Najčešće se koristi kod izrade liskunskih kondenzatora i nekih telekomunikacijskih kablova.

**Parafin** – dobiva se destilacijom nafte, ugljena ili parafinskih škriljevaca. Bijele je boje, ima nisko talište (od 50 do 55 °C), ne otapa se u vodi ili alkoholu (otapa se u benzinu, benzolu i drugim tekućim ugljikovodicima) i najjeftiniji je vosak.

Na slici 3.2 prikazan je parafin.



*Slika 3.2. Parafin [12]*

Parafin se najviše koristi za impregniranje papira, tkanina, drvenih dijelova i zalivanje kondenzatora, malih transformatora i svitaka. Unatoč izvrsnih elektroizolacijskih svojstava parafin ima ograničenu primjenu u elektrotehnici zbog niskog tališta i zapaljivosti.

**Bitumen** – nastaje kao nusproizvod frakcijske destilacije nafte. Mješavina je makromolekularnih ugljikovodika. Ima amorfnu strukturu. Sastoji se od dvije baze, pa se u ovisnosti od njihovog postotnog udjela i primijenjenog tehnološkog procesa dobivaju razne vrste bitumena i uglavnom se razlikuju po njihovim mehaničkim svojstvima. Crne je boje, ne rastvara se u vodi i kemijski je aktivan. Lomljiv je pri nižim temperaturama i nema određenu temperaturu topljenja, nego postepeno omekšava i prelazi u tekuće stanje nakon određenog temperaturnog intervala te ga je onda lakše oblikovati. Bitumeni se koriste kao komponente pri izradi izolacijskih lakova i kao zalivna masa vodiča, kondenzatora, električnih strojeva i drugih uređaja.

Na slici 3.3. prikazani su bitumen i asfalt.



*Slika 3.3. Bitumen i asfalt [7]*

**Asfalt** – prirodni bitumen fosilnog podrijetla, sadrži različite minerale. Postoji više različitih vrsta prirodnog asfalta koji se razlikuju po sastavu, odnosno prema nalazištu. Čvršći je od bitumena, ne rastvara se u vodi nije higroskopan, ali je kemijski aktivan. Oblikuje se kao i bitumen i dosta je jeftin. Koristi se kao dielektrična masa za nalijevanje kondenzatora i suhih baterija.

U tablici 4. prikazane su karakteristike dielektričnih materijala nastalih destilacijom nafte.

*Tablica 4. Karakteristike dielektričnih materijala nastalih destilacijom nafte [2]*

| Svojstva  |         | Mineralna ulja | Vazelin           | Parafin | Bitumen |
|---|---------|----------------|-------------------|---------|---------|
| Dielektrična čvrstoća, $E_{kr}$ , (kV/mm)             |         | 25             |                   | 30      | 25-35   |
| Specifična električna otpornost, $p$ , ( $\Omega m$ ) |         | 1012           |                   | 1015    | 1012    |
| Relativna dielektrična konstanta, $\epsilon_r$ ,      | f=50 Hz | 2.0            | 2.16              | 2.2     | 2.7-2.8 |
|   | f=1MHz  | 2.2            | 2.16              | 2.3     |         |
| Koeficijent dielektričnih Gubitaka $tg\delta$         | f=50 Hz | 10–3           | $3 \cdot 10^{-4}$ | 10–4    | 10–2    |

### 3.2. Biljna ulja

Koriste se za posebne namjene i sastoje se od glicerinom zasićenih masnih kiselina. Dije se na suha ulja, polusuha ulja i ulja koja nisu suha. Imaju dobra dielektrična svojstva, kemijski su aktivna, lako se polimeriziraju i zapaljiva su. Specifična otpornost je reda veličine  $10^{12} \Omega cm$ , dielektrična konstanta oko 3 i faktor dielektričnih gubitaka je reda veličine  $10^{-3}$ . Biljna ulja se ne koriste u većim količinama zbog cijene koja je visoka. Najčešće korištena biljna ulja su laneno ulje, drveno ulje, ricinusovo ulje i terpentinsko ulje. [2]

Na slici 3.4. prikazana su različita biljna ulja.



*Slika 3.4. Biljna ulja [13]*

Laneno i drveno ulje spadaju u sušiva ulja pošto nakon određenog vremena iz tekućeg prelaze u čvrsto stanje. Sušiva ulja su sastavni dio sintetičkih lakova. Laneno ulje se dobije iz sjemenki lana, dok se drveno ulje dobije od koštica ploda kineskog uljnog drveta. Imaju boju između zelene i tamno smeđe.

Ricinusovo ulje se koristi za impregniranje nekih vrsta papira (dielektrici kondenzatora) i kao sastavni dio nekih vrsta voskova i lakova. Dobije se iz sjemena ricinusa, bez boje je i pripada grupi ne suhih ulja.

Terpentinsko ulje je bezbojna, hlapljiva, kremasta i aromatična tekućina. Dobije se iz smolastih izlučevina kora destilacijom. Pripada u nesuha ulja i jako je zapaljivo.

### **3.3. Voskovi**

Voskovi su visokomolekularne kiseline s dugim lancima jednorodnih alkohola. Čvrsti su pri sobnoj temperaturi i krenu se topiti na temperaturi između 45 °C i 90 °C. Propuštaju vodenu paru, a ne propuštaju vodu. Većinom su topljivi u alkoholu, eteru i drugim organskim materijalima.

Imaju vrlo složen kemijski sastav i glavna svojstva su im mala mehanička čvrstoća, nisko talište i mala higroskopnost. Lako se oblikuju kad su u mekšem stanju i zapaljivi su. Mogu biti životinjskog, biljnog i mineralnog podrijetla. Tipovi voskova koji se upotrebljavaju su karnauba vosak, vosak za svijeće, vosak kineskih insekata, pčelinji vosak, kitov vosak, planinski vosak i ozokerit.

Primjena u elektrotehnici im je kao komponenta kompozitnih dielektričnih materijala i kao masa za zalivanje. Također se koriste za izradu izolacije telekomunikacijskih kablova i kao matrična sirovina za izradu galvanoplastika [2].

**Karnauba vosak** je svijetložute boje, temperatura pri kojoj se krene topiti je između 80 °C i 85 °C i dobije se od biljke zvane karnauba koja je visoka 30m i podrijetlom iz tropskih područja Brazila. Površina listova pogotovo s donje strane prekrivena je voštanom kožicom.

Na slici 3.5. prikazan je karnauba vosak.



*Slika 3.5. Karnauba vosak [14]*

**Vosak za svijeće** ima slična svojstva kao karnauba vosak, ali samo što mu je temperatura topljenja između 82°C i 84°C. Najpoznatiji životinjski vosak je pčelinji vosak može biti bijele ili žute boje. Žuti pčelinji vosak je nepročišćen što znači da sadrži i druge sastojke poput cvjetnog praha i propolisa. Topliv je na temperaturi od 62°C do 65°C, a sadrži 70 do 80% estera, 10 do 16% parafina i do 15% slobodnih masnih kiselina. Kitov vosak je topljiv na temperaturi između 45°C i 52°C. Dobije se iz lubanje kita i bijele je boje. Planinski vosak je topljiv na temperaturi između 80°C i 90°C. Tamne je boje i fosilnog je podrijetla. Ozokerit je isto tako fosilnog podrijetla i može biti zelene, žute, smeđe ili crne boje. Ima slična svojstva pčelinjem vosku i topljiv je na temperaturi



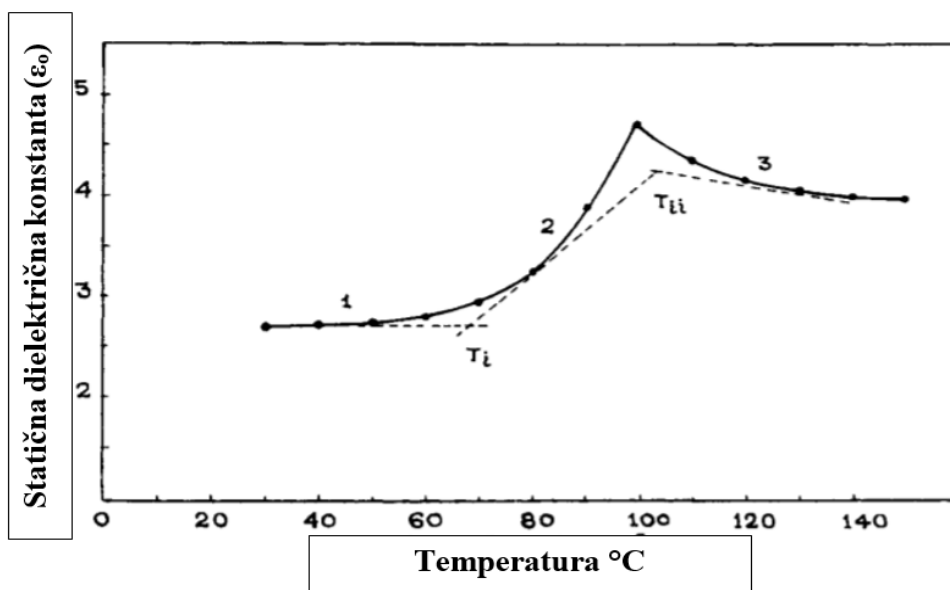
između 60°C i 80°C. Lakši je u vodi i u njoj netopljiv, ali se lako otapa u benzinu, alkoholu, kloroformu i terpentinskom ulju. Čišćenjem zemnog voska ozokerita nastaje cerezin koji ima bolja električna svojstva i veću temperaturu topljenja od 70°C do 80°C. Pa ga unatoč većoj cijenu u mnogim primjenama zamjenjuje [2].

### 3.4. Smole

Smole su organske tvari s visokom molekularnom težinom. Amorfne su strukture s posebnim kemijskim i fizikalnim svojstvima. Mogu biti oblikovane po želji tijekom i nakon proizvodnje. Najviše radne temperature smola koje se koriste u elektrotehnici su od 70°C do 130°C. Na sobnoj temperaturi su čvrsti materijal i otapaju se samo u organskim otapalima. Zbog male higroskopičnosti i dobrih elektroizolacijskih svojstava smole imaju različitu primjeru i koriste se kao komponente za izradu elektroizolacijskih lakova, masa za zalivanje, plastičnih masa, vlaknastih materijala, itd. Kategorizirane su u dvije skupine: prirodne smole i sintetičke. Prirodne smole su sekrecije biljnog i životinjskog podrijetla koje se formiraju ili stvaraju u uvjetima normalnog metabolizma u prirodi ili kao odgovor na oštećenje kora biljaka. Sastoje se uglavnom od smolne kiseline i hidrantnih ugljikovodika. U elektrotehnici od prirodnih smola koristimo kalofonijum, kopal i jantar [2].

Kalofonijum je prirodna smola, koja se dobiva destilacijom tekućih dijelova smole crnogoričnog drveća. Kolofonij je najjeftinija prirodna smola, žute je boje, otapa se u alkoholu, benzinu, benzolu, mineralnim i biljnim uljima. Koristi se kao komponenta za izradu lakova i masa za zalijevanje. Lomljiv je, ljušturasta loma, zagrijavanjem postaje ljepljiv, na 70 do 80 °C omekša, tali se na 110 do 130 °C. Topljiv je u organskim otapalima i lužinama, netopljiv u vodi. Specifična otpornost mu je  $10^{15} \Omega\text{cm}$ , a relativna dielektrična konstanta 2,5. Služi za pravljenje lakova i kao stabilizirajući dodatak izolacijskih ulja. Još se koristi kao pasta za lemljenje i upotrebljava se za impregniranje papira u energetske kablovima.

Na slici 3.6. prikazana je ovisnost dielektrične konstante o temperaturi (manila kopal).



*Slika 3.6. Varijacija statičke dielektrične konstante u ovisnosti o temperaturi [15]*

Kopal je zajednički naziv za smole biljnog podrijetla koje sadrže terpeneske spojeve. Tipovi kopala dijele se prema geografskom podrijetlu i najpoznatiji tipovi su hugokopal, konzikopal i manila kopal. Kopal je mehanički čvrst i kreće se topiti tek na temperaturi od  $80^{\circ}\text{C}$ . Probojni napon mu je  $10\text{kV/mm}$ , specifična otpornost  $1017\Omega\text{cm}$  i relativna dielektrična konstanta 2,8. U elektrotehnici se koristi za izradu izolacijskih lakova [10].

**Jantar** je amorfni mineral iz skupine fosilnih smola, često je žute boje, ali ima ga smeđeg i crvenoga, dok je rijetko modar ili zelen. Biljna je smola tercijarnog crnogoričnog drveća i sadrži oko 78% ugljika, 10% vodika, 11% kisika, 0,4% sumpora i dr. Jedan je od najboljih čvrstih izolatora, ali zbog njegove visoke cijene rijetko se koristi.

Na slici 3.7. prikazan je jantar.



*Slika 3.7. Jantar [16]*

Topi se na temperaturi od 375°C. Zapaljiv je, otporan na vodu i kiseline. Djelomično se otapa u alkoholu, eteru, acetonu i ostalim otapalima. Ima jako dobra dielektrična svojstva. Dielektrična čvrstoća mu je 20kV/mm, specifična dielektrična otpornost  $10^{18} \Omega\text{cm}$ . Relativna dielektrična konstanta se nalazi između 2,8 i 2,9 i faktor dielektričnih gubitaka je oko  $10^{-3}$  [2,10].

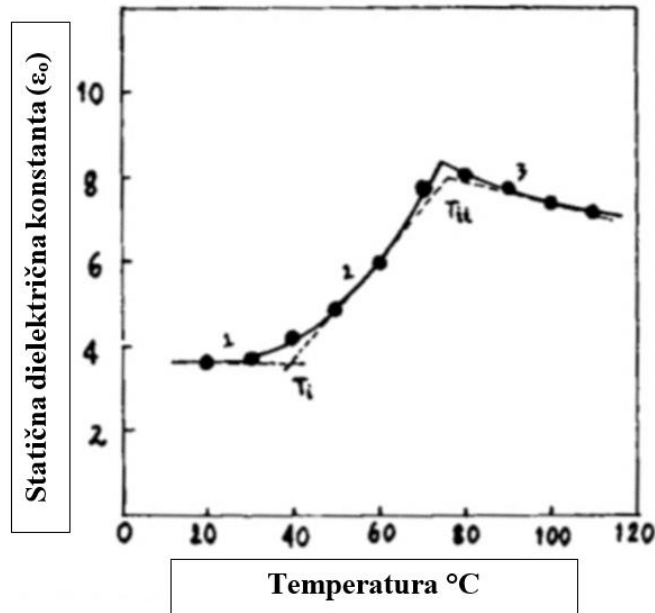
**Šelak** je smolasti proizvod koji je dobije lučenjem ženke „lac bug“ na lišća drveća, uglavnom u šumama Indije i Tajlanda. Suha kora koja je nastala lučenjem topi se u etanolu kako bi dobili tekući šelak koji se može koristiti za razne stvari. Šelak ima dobra izolacijska svojstva. Biopolimer je termoplastične strukture i omogućuje dobro prijanjanje na druge predmete. Alkoholna otopina šelaka ima dobru trajnost i izdržljivost. Šelak je također otporan na UV zračenja [8].

Na slici 3.8. prikazan je šelak u različitim bojama.



*Slika 3.8. Šelak u različitim bojama [17]*

Topi se na temperaturi između 70°C i 90°C. Dielektrična čvrstoća mu je 20 kV/mm, specifična otpornost reda veličine  $10^{13} \Omega\text{cm}$ , relativna dielektrična konstanta se nalazi u intervalu između 2,7 i 3,7 i faktor dielektričnih gubitaka  $10^{-2}$ . U elektrotehnici se koristi za spajanje liskunskih pločica. Još se koristi i kao osnova za proizvodnju visokomolekularnih poliestera i izolacijskih lakova [2].



*Slika 3.9. Varijacije dielektrične konstante šelaka u ovisnosti o temperaturi [18]*

Na slici 3.9. prikazan je utjecaj temperature na promjenu dielektrične konstante šelaka i možemo vidjeti da je jako slično ovisnosti dielektrične konstante o temperaturi smole manila copal (slika 3.6.). Razlika je u tome što dielektrična konstanta šelaka je znatno veća i doseže svoj maksimum pri manjoj temperaturi.

### 3.5. Drvo

Drvo je prirodni materijal koji ima široko područje primjene. Dielektrična svojstva drveta i njihove varijacije promjenom frekvencije i temperature su usko povezana sa strukturom drveta. Kako bi drvo zadovoljilo određeni kriterij za uporabu često se mora sušiti, grijati i lijepiti.

Na slici 3.10. prikazana su drvena vlakna.



**Slika 3.10.** *Drvena vlakna [19]*

Poznavanje osnovnih dielektričnih svojstava drveta poput dielektrične konstante, dielektrične čvrstoće i faktora dielektričnih gubitaka je vrlo bitna zbog primjene drveta kao dielektričnog materijala. Postoji nekoliko faktora koji utječu na dielektrična svojstva drveta kao raspored pora, sadržaj vlage, temperature i gustoća drveta [9]. Sastoji se od celuloze (40% do 60%), lignina (20% do 30%) i drugih sastojaka (smola, tanin, kamfor, ulja, šećer, itd.). Premazivanjem drveta smolama smanjuje mu se osjetljivost prema vlazi, insektima i bakterijama. Drvo koje se najčešće koriste u elektrotehnici je bukva, grab, javor i hrast. Drvo se u elektrotehnici koristilo za izradu električnih strojeva i kao konstrukcijski materijal pri izradi transformatora. Također koristilo se za izradu stupova koji nose telekomunikacijske kablove. Koristi se i kao komponenta kompozitnih materijala i za jačanje dielektričnih sustava od polimernih materijala [2].

### **3.6. Prirodni vlaknasti materijali**

Vlaknasti dielektrični materijali imaju dobra mehanička svojstva, lako se obrađuju i kombiniraju s drugim tekućim ili krutim elektroizolacijskim materijalima. Nedostatci su im mala dielektrična čvrstoća, mala toplinska vodljivost, velika higroskopnost i poroznost. Proizvode se od vlakana koja mogu biti biljnog i životinjskog podrijetla. Vlaknasti materijali koji se primjenjuju u elektrotehnici su svila, lan juta, konoplja, pamuk i papir [2].

### 3.6.1. Svila

Svila je životinjskog podrijetla, proizvode ga gusjenice nekih leptira pri izradi čahure. Dobiva se odmatanjem niti s čahure i jedino je prirodno vlakno velike duljine. Debljine je od  $10\mu\text{m}$  do  $15\mu\text{m}$ .

Na slici 3.11. prikazana su vlakna dudovog svilca.



**Slika 3.11.** *Vlakna od dudovog svilca [20]*

Svila ima izuzetno dobre mehanička svojstva te na temperaturama preko  $60^{\circ}\text{C}$  degradira. Nedostatci svile su velika higroskopnost i visoka cijena. Iako svila ima dobra svojstva zbog navedenih nedostataka rijetko se upotrebljava u elektrotehnici. Danas svila se koristi kao komponenta kompozitnih materijala samo kada su potrebna njezina dobra mehanička svojstva [2].

### 3.6.2. Lan

Lan je prehrambena i tekstilna biljka, danas pretežno korištena za proizvodnju vlakana i lanenog ulja. Lan je najstarija uzgajana tekstilna biljka, a vjerojatno i najstarija uljevita kultura i jedna od prvih ljekovitih biljaka. Lan koji se koristi za proizvodnju vlakna ima stabljiku visine 60 cm do 120 cm. Vlakna su mu duga od 5mm do 60mm i debljine oko  $20\mu\text{m}$ .

Na slici 3.12. prikazana su vlakna lana.





**Slika 3.12.** *Vlakna lana [19]*

Sastoji se 65% od djelomično polimerizirane celuloze. Lan je znatno jeftiniji od svile, ali je i dalje skup materijal. Ima jako dobra mehanička svojstva i danas se još uvijek koristi kao komponenta kompozitnih dielektričnih materijala. No zbog njegove cijene sve češće se zamjenjuje sintetičkim materijalima sličnih svojstava [2,10].

### **3.6.3. Juta**

Juta se pretežito uzgaja zbog svojih vlakana i najvažnije je prirodno vlakno poslije pamuka. Sadrži oko 65% djelomično polimerizirane celuloze. Higroskopna je te ima jako dobra mehanička svojstva.

Na slici 3.13 prikazana su vlakna jute.



**Slika 3.13.** *Vlakna jute [19]*

Ima zadovoljavajuća dielektrična svojstva i u elektrotehnici se koriste za povezivanje garnitura kablova i za zaštitu od korozije kablova s metalnim omotačem tako da se vlakna jute natope bitumenom [2,10].

#### **3.6.4. Konoplja**

Konoplja potječe iz sr. Azija, a uzgajala se 3000 god. pr. Kr. u Indiji, a u Europu je donesena 1500 god. pr. Kr. Danas se uzgaja u umjerenom pojasu. Vlakna konoplje ovise o visini stabljike koja varira od 20cm do 200cm. Vlakna su duljine od 1cm do 10cm, a debljine 18  $\mu\text{m}$  do 25 $\mu\text{m}$ .

Na slici 3.14. prikazana su vlakna konoplje.



**Slika 3.14.** *Konoplja [19]*

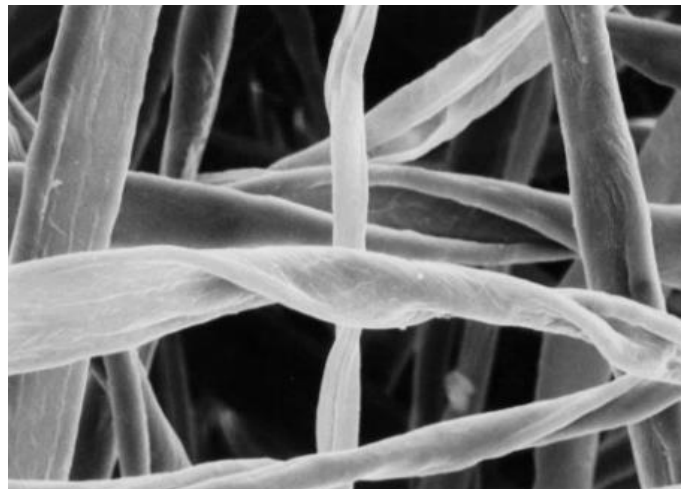
Vlakna konoplje se upotrebljavaju za proizvodnju užadi, konopa, tekstila i dr. U elektrotehnici, zbog svojih dobrih mehaničkih i dielektričnih karakteristika, koriste se kao komponenta kompozitnih dielektričnih materijala, natopljena obično tekućim derivatima nafte ili sintetičkim lakom [2,10].



### 3.6.5. Pamuk

Pamuk je najpoznatije prirodno vlakno i prvenstveno se koristilo za tekstil. Otkriven je u Indiji dok se danas proizvodi u 86 zemalja svijeta. U Europi se pamuk uzgaja u Grčkoj, Španjolskoj, Bugarskoj i Albaniji. Pamučno vlakno čini jedna izdužena stanica i osnovni dio vlakna je celuloza. Vlakno je najčešće dugo između 20mm i 40mm, a promjer vlakna je između 12 $\mu$ m i 20 $\mu$ m.

Na slici 3.15. prikazana su vlakna pamuka.



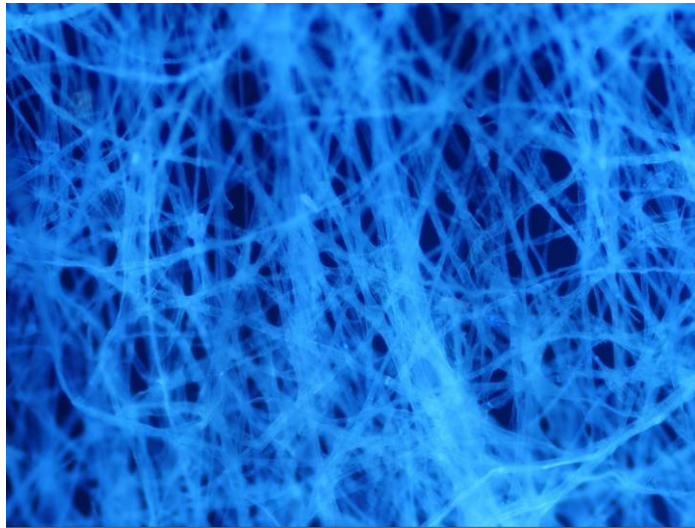
**Slika 3.15.** *Pamučna vlakna [19]*

Pamuk može trajno izdržati temperaturu od 100°C, dok pri temperaturi od 140°C dolazi do raspada njegove strukture. Higroskopan je i ima dobra mehanička svojstva zbog kojih se u elektrotehnici koristi kao komponenta kompozitnih izolatora tako da se natopi mineralnim uljima, prirodnim i umjetnim smolama. Još se koristi za izolaciju navoja transformatora i kao konstrukcijski dielektrični materijal [2,10].

### 3.6.6. Papir

Papir se prvi puta spominje 105. godine u Kini kada ga je Ts'ai Lun proizveo od nekoliko različitih sirovina i otpadaka biljnog podrijetla. Za proizvodnju papira osnovna je sirovina celuloza, a da bi se poboljšala fizikalna, kemijska i mikrobiološka svojstva papira dodaju se ljepila, punila i boje. Celulozno vlakna se proizvode od različitih biljnih vrsta (najčešće drvo, dok rjeđe jednogodišnje biljke).

Na slici 3.16. prikazan je mikroskopski izgled papira. Promjer pojedinih vlakana je oko 10 $\mu$ m



**Slika 3.16.** *Mikroskopski izgled papira [21]*

Danas glavni izvor celuloznih vlakana su sekundarna reciklirana vlakna dobivena preradom otpadnog papira (74% u Europskoj uniji od 2003 god.). Ovisno o materijalima koje koristimo i koji tehnološki postupak koristimo za izradu papira, dobiva se papir različite kvalitete. Kvaliteta papira određena je strukturom, gustoćom i debljinom. Također kao posebnu vrstu papira trebamo spomenuti peršpan. Peršpan se sastoji od velikog broja slojeva tankog papira visoke gustoće. Papir ima dobra mehanička svojstva i higroskopan je. Ne podnosi trajno povišenu temperaturu i nije kemijski otporan. Pošto je papir podložan starenju dodavanjem stabilizatora to možemo poboljšati. Peršpan ima slične karakteristike kao i papir. Papir ima dobre dielektrične karakteristike. Relativna dielektrična konstanta mu je oko 5, probojni napon oko 10kV/mm i faktor dielektričnih gubitaka reda veličine  $10^{-3}$ . Za dobivanje boljih dielektričnih karakteristika papir se može natopiti u mineralnom ulju gdje mu je onda probojni napon 50kV/mm, relativna dielektrična konstanta 3,5 i faktor dielektričnih gubitaka  $10^{-3}$ . Papir se u elektrotehnici primjenjuje za izolaciju telekomunikacijskih kablova i kao komponenta kompozitnih dielektričnih materijala. Papir se najviše upotrebljava natopljen mineralnim uljem. Takozvana papir-ulje kombinacija zadovoljava zahtjeve visokonaponske tehnike pa se primjenjuje za izradu transformatora, visokonaponskih uvodnika, kondenzatora snage, visokonaponskih kondenzatora, mjernih kondenzatora i uljnih kablova. Kvalitetan tanki papir se koristi za izradu elektrolitskih kondenzatora. Kada papir natopimo raznim vrstama smola onda se koristi kao konstrukcijski i izolacijski materijal za izradu

transformatora i električnih strojeva. Iako peršpan ima drugačije dielektrične karakteristike, ima istu primjenu kao i papir [2,10].

## **4. PRIMJENA ORGANSKIH DIELEKTRIČNIH MATERIJALA**

Organski dielektrični materijali poput derivata nafte, biljnih ulja, voskova, prirodne smole i prirodnih organskih vlakana se primjenjuju u raznim električnim uređajima. Poput transformatora, ispravljača, naponskih uvodnica, kablovima, kondenzatorima, strojevima, prekidačima, baterijama. U ovom poglavlju prikazati će se njihova izravna primjena u određenim električnim uređajima. Svaki organski dielektrični materijal ima različita svojstva i zbog toga je izuzetno važno odabrati pravi materijal za određenu primjenu. Način odabira materijala nije jednostavan, materijal mora zadovoljavati sva fizikalna, kemijska i dielektrična svojstva kako bi iskoristivost uređaja u kojem se koriste bila što veća.

### **4.1. Uljni Transformator**

Transformator (slika 4.1.) je statički električni uređaj koji prenosi električnu energiju između dva ili više električnih krugova elektromagnetskom indukcijom. Ovisno o broju namota na primarnom i sekundarnom namotu, napon se može povećati ili smanjiti. Osnovna svrha transformatora pretvaranje izmjenične struje pod jednim naponom u izmjeničnu struju pod drugim naponom, ali sa nepromijenjenom frekvencijom i snagom [22].

Na slici 4.1. prikazan je trofazni uljni transformator.



**Slika 4.1.** *Trofazni uljni transformator [22]*

## **Osnovni dijelovi transformatora:**

Kotao predstavlja kućište u kojem se nalaze svi dijelovi transformatora. Kućište mora biti keramički zatvoreno zbog ulja koje se nalazi u njemu. Jezgra transformatora sastavljena je od limova debljine 0,3 mm koji su složeni jedan do drugoga kako bi se dobio aproksimativan cilindričan presjek. Namotaji se javljaju u nekoliko oblika: nisko naponski, visoko naponski i regulacijski. Namotaji su bakrene žice koje kod transformatora većih snaga mogu biti izolirane papirom, dok kod transformatora manjih snaga namotaji se izoliraju izolacijskim lakom. Između namotaja stavljaju se letvice da bi se stvorili procjepi gdje kasnije prolazi ulje za hlađenje namotaja. Ulje se koristi za hlađenje i izolaciju transformatora. Koristi se tako da se prvo izvuče zrak iz kotla i kada se napravi vakuum tada ulje ulazi u sve procjepa i u potpunosti popunjava prostor i nema zračnih mjehurića koji bi to onemogućavali.

### **4.1.1. Transformatorsko ulje**

Glavna funkcija transformatorskog ulja je da osigura električnu izolaciju između različitih dijelova koji su pod naponom, a djeluje još kao i zaštitni sloj za premazivanje i tako sprječava oksidaciju metalnih površina. Još jedna važna funkcija transformatorskog ulja je hlađenje. Jezgra i namotaji transformatora zagrijevaju se tijekom rada i nastaju veliki gubici. Ulje preuzima toplinu iz jezgre i namota i odvodi je do spremnika koji zrači toplinu van u atmosferu. Transformatori generiraju puno topline i ako se ta toplina ne ukloni može doći do taljenja bakrenih žica što bi uzrokovalo kvar transformatora. Još od početka mineralna ulja dominiraju u industriji, ali postoje određeni nedostaci korištenja mineralnih ulja u transformatorima kao npr. izlivanje ili curenje ulja. Danas većina transformatora koriste derivate nafte kao tekućinu za izolaciju i hlađenje. Glavni razlog korištenja mineralnih ulja je niska cijena i dostupnost. Iz tog razloga većina industrija mora razviti plan u slučaju nepredviđenih događaja koji bi mogli uzrokovati slučajno izlivanje i curenje tekućina za transformator. To je jedan od glavnih razloga zbog čega se traži ekološki prihvatljivija zamjena za mineralna ulja. Transformatorsko ulje služi za gašenje električnog luka, djeluje kao izolacija između namota i smanjuje gubitke koji nastaju zagrijavanjem namota tako da služi kao rashladno sredstvo. Također smanjuje šum zujanja stvoren u transformatoru što rezultira niskim vibracijama [23].

Zbog zagrijavanja transformatora na velike temperature, ulje mora biti otporno na visoke temperature i treba imati veliku dielektričnu čvrstoću. Kada je ulje u hladnom stanju mora biti dovoljno rijetko kako bi moglo strujati aktivnim dijelovima transformatora. U ulju ne smije biti vlaga zbog smanjenja probojne čvrstoće, ne smije sadržavati nikakve čvrste materijale zbog smanjenja izolacijskih svojstava i ne smije sadržavati nikakve kiseline ni sumpor zbog nagrizanja i razaranja izolacije [24].

Mineralno ulje koje okružuje jezgru transformatora povećava dielektričnu čvrstoću i sprečava oksidaciju jezgre. Ulje također uzima toplinu dok je u dodiru s vodičima i odvodi toplinu na površinu spremnika samokonvekcijom. Mineralna ulja su se pokazala kao pouzdani izolacijski medij, ali imaju određene nedostatke. Ona su zapaljiva i ekološki neprihvatljiva. Tretiraju se kao otrovni otpad i nisu biorazgradiva, skraćuju životni vijek papira i transformatora. Voda je minimalno topljiva u mineralnim uljima. Zbog navedenih nedostataka mineralnih ulja, prirodna esterska ulja izlučena iz sjemena određenih biljaka počela su se razmatrati kao potencijalna transformatorska tekućina 1890-ih. Ali zbog manje otpornosti na oksidaciju nisu se komercijalno prihvatila. Danas proizvođači transformatora istražuju uporabu prirodnih estera dobivenih iz biljnih sjemenki. Moguće je da će poljoprivredni esteri pružiti najbolju kombinaciju visoko temperaturnih svojstava, stabilnosti, biorazgradivosti i da će biti cjenovno prihvatljivi i služiti kao alternativa za mineralno ulje u distribucijskim transformatorima. Kod modernih transformatora problem s oksidacijom može se nadoknaditi fluidnim aditivima i izmjenom dizajna. Na temelju istraživanja i razvoja biljnih ulja, može se reći da su prirodni esteri sazreli u dielektrične materijale podobne za korištenje u visokonaponskim transformatorima zbog svojih sigurnosnih svojstava, netoksičnosti i biorazgradivosti [25].

Također kombinacijom ulja i celuloze najčešće se koristi zbog velike električne izdržljivosti i niske cijene. Njihov omjer ovisi o vrsti transformatora. Životni vijek izolacijskog sustava je zapravo životni vijek transformatora. Oko 85% kvarova na transformatorima se događa zbog propadanja izolacijskog sustava. Najčešće se za izolaciju koriste transformatorska ulja i čvrsta izolacija kao npr. kraft papir i peršpan ploče (slika 4.2).



a)



b)

**Slika 4.2.** a) Kraft papir, b) Peršpan ploče [22]

Impregniranjem se povećava dielektrična čvrstoća. Zbog male viskoznosti ulje prodire u čvrstu izolaciju i tako prenosi toplinu s jezgre prema hladnjacima i tako služi kao sredstvo za hlađenje. Važno je napomenuti kako ulje i celulozu nije moguće zamijeniti pa zbog toga životni vijek transformatora započinje proizvodnjom u tvornici.

## 4.2. Uljni kondenzator

Kondenzatori služe za pohranu električne energije koja je potrebna za rad nekog sustava. Ne pohranjuju velike količine energije, ali ju mogu brzo isporučiti. Ta energija skladišti se fizički na površini elektrode kao jednaka količina pozitivnog i negativnog naboja. Jedinica koja opisuje kondenzator je električni kapacitet i pokazuje koliko stvarnog naboja  $Q$  kondenzator može pohraniti na svojim elektrodama. Osim što kondenzator služi za pohranjivanje i otpuštanje električne energije, služi još za blokiranje toka istosmjerne struje i koristi se kada je potrebno filtrirati određenu strujnu frekvenciju. Kondenzatori se razlikuju prema vrsti izolatora (zrak, ulje, papir, keramika, staklo, plastika) i izvedbi elektroda (pločasti, sferni, cilindrični). Uloga dielektrika u kondenzatoru je propuštanje električnog polja, ali ne i elektriciteta [27].

Prvi kondenzator korišten u telefonskim krugovima sastojao se od isprepletenih listova papira i metalnih folija koji služe kao dielektrični materijal i parafinskog voska koji je korišten kao impregnat. Takvi kondenzatori su korišteni samo u niskonaponskim krugovima. Pri visokim naponima kvar nastaje zbog ionizacije u prazninama nastalih u vosku tijekom hlađenja. Nakon

toga zamijenjen je parafinski vosak vazelinom, ali i u tom slučaju dolazi do problema zbog stvaranja praznina. Stoga je vazelin zamijenjen mineralnim uljem. Uljni kondenzatori uglavnom su velike snage i / ili visokog napona. Često su većih dimenzija zbog energije koju mogu pohraniti.

Na slici 4.3. prikazan je uljni kondenzator.



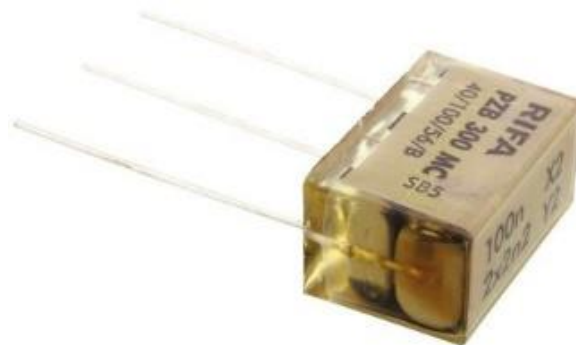
**Slika 4.3.** *Uljni kondenzator [28]*

Ulje u kondenzatoru ima više od jedne namjene. Koristi se za uklanjanje praznina u zraku te pomaže u hlađenju i uklanjanju topline od namotaja kondenzatora. Namotaji imaju tendenciju stvaranja prekomjerne količine topline kada dosegnu svoj kapacitet pražnjenja. Ulje snižava temperaturu kako bi kondenzator mogao nastaviti raditi optimalno. Za metalizirane filmske kondenzatore ulje ima još jednu prednost. Ulje pomaže u sprječavanju iskrenja između dviju ploča. Ako bi kojim slučajem nastalo iskrenje ulje bi zatvorilo rupu koja je nastala radi iskrenja. Mineralno ulje se koristi u većini slučajeva, ali može se koristiti i silicijsko ulje. Mineralno ulje se koristi u većini slučajeva isključivo zbog svoje ekonomičnosti [28].

### **4.3. Papirnati kondenzatori**

Papirnaty kondenzator je kondenzator koji koristi papir kao dielektrik za pohranu električnog naboja. Sastoji se od aluminijskih listova i listova papira. List papira prekriven je ili natopljen uljem. Također može biti natopljen voskom kako bi se zaštitio od negativnog utjecaja okoline. Papirnaty kondenzatori su fiksni tip kondenzatora, što znači da pružaju stalni kapacitet. Drugim riječima, papirnaty kondenzator je vrsta fiksnog kondenzatora koji pohranjuje fiksnu količinu električnog naboja [29].

Na slici 4.4. prikazan je papirnaty kondenzator.



**Slika 4.4.** *Papirnaty kondenzator [30]*

Kapaciteti su im reda veličine pF do približno reda veličine 100 nF. Posjeduju svojstvo regeneracije, odnosno oporavka nakon proboja dielektrika. Na mjestu proboja ispari dio vodiča, nakon čega kondenzator i dalje radi, ali ima smanjen kapacitet. Kod ovih kondenzatora nazivni napon određuje debljina papira, stoga mogu biti izrađeni za visoke napone. Kako papir apsorbira vlagu, što značajno narušava karakteristike kondenzatora. Ove kondenzatore su u novije vrijeme zamijenili folijski ili film kondenzatori. Kod papirnih kondenzatora, impregniranjem papira s parafinom poboljšavaju se svojstva kondenzatora. Probojna čvrstoća se povećava s 500 kV/cm na 2000 kV/cm, faktor gubitaka se smanjuje od  $20^{-4}$  na  $40^{-4}$ , a relativna dielektrična konstanta iznosi između 3,5 i 5,5.

#### **4.4. Električni kablovi**

Električni kablovi su proizvodi koji su presudni za suvremeno gospodarstvo. Njihova primjena povećava se uporabom računala, interneta, kableske televizije i porastom potrošnje električne energije širom svijeta. Konstrukcija kabla može biti jednostavna poput građevinske žice, do malo



kompliciranijih poput distribucijskih kabela i optičkih. Svaka vrsta kabela ima nekoliko uobičajenih elemenata, uključujući jezgru (bakrenu ili optičku), izolaciju i plašt (slika 4.5.).



**Slika 4.5.** Kabel [31]

Jedna od ključnih komponenti kabela je njegova izolacija. Odabir izolacije određen je nizom čimbenika kao što su stabilnost, dugovječnost, dielektrična svojstva, otpornost na visoke temperature, otpornost na vlagu, mehaničku čvrstoću i fleksibilnost. Ne postoji niti jedna izolacija koja je idealna u svakom od ovih područja, ali je potrebno odabrati kabel s vrstom izolacije koja u potpunosti udovoljava zahtjevima [31].

Do 1800-e, većina SN kabela instaliranih od strane industrija i poduzeća bila je izolirana papirom. Izolacija papirom mora biti impregnirana izolacijskim uljem ili smjesom kako bi se isključio zrak i pružila dobra električna svojstva. Zajednička značajka svih papirnatih kabela je metalni plašt koji zatvara jezgru izoliranu papirom. Glavna svrha metalne ovojnice je da papirnatim izoliranim jezgrama pruži potpunu zaštitu od okoliša izvan kabela [32].

Na slici 4.6. nalazi se prikaz kabela izoliranim papirom s olovnom ovojnicom i oklopom od čelične trake.



**Slika 4.6.** Kabel izoliran papirom s olovnom ovojnicom i oklopom od čelične trake [32]

U većini europskih zemalja kablove izolirane papirom zamjenjuju kablovi s polimernom (plastičnom) izolacijom. Izolacijski materijal u modernim kabelima je umreženi polietilen (XLPE) ili etilen propilen guma (EPR).

#### 4.4.1. Uljni kabeli

Uljni kabel definiran je kao kabel u kojem se ulje niske viskoznosti drži pod pritiskom unutar samog omotača kabela ili cijevi. Ulje služi kao izolator i ispunjava sve praznine unutar kabela pod svim uvjetima različitih opterećenja. U prošlosti su se tijekom godina koristila mineralna ulja, ali nedavno alkilati postaju popularni zbog svoje niske viskoznosti i sposobnosti upijanja vodenih para oslobođenih tijekom starenja celuloze. Kablovi napunjeni uljem koriste se za prijenos električne energije na mjestima gdje zračni kabel nije izvediv, poput mora, pozemlje, hidroelektrane ili u trafostanicama s vodenim preprekama. Također se koristi gdje je potrebno prenositi veliku količinu energije. Tlak u kabelu održava se povezivanjem kanala za ulje kabela sa spremnikom za ulje. Za održavanje tlaka, uljni kabel je smješten daleko od spremnika za ulje. Pritisak ulja smanjuje stvaranja praznina u izolatoru [33].

Na slici 4.7. se nalazi 3-žilni uljni kabel s olovnim plaštom oko svake žile.



**Slika 4.7.** 3-žilni uljni kabel s olovnim plaštom oko svake žile [34]

Prednosti uljnih kabela :

- Kablovi punjeni uljem imaju veće pogonsko dielektrično naprezanje
- Takav tip kabela ima veću radnu temperaturu i veću nosivost struje.

- Kabel ispunjen uljem ima bolju impregnaciju u odnosu na puni kabel.
- U kabelu ispunjenom ulje moguća je impregnacija čak i nakon oblaganja.
- U takvoj vrsti kabela nema praznina.
- Veličina kabela ispunjenih uljem je manja u odnosu na kabel s čvrstim dielektrikom jer je debljina dielektrika manja.
- U kabelu punjenom uljem, kvar se može lako otkriti curenjem ulja.

Električni kablovi napunjeni uljem stavljaju se pod zemlju još od 1960-e. godine. Takvi kabeli se mogu pokazati kao logističkim i ekološkim problemom ako se ostave u zemlji zbog izolacijskog ulja koje je štetno za okoliš. Izolacijsko ulje može iscuriti iz kabela i ući u okolno zemljište i vodotoke zbog prirodnog naprezanja uslijed pomicanja tla. Na kraju možemo zaključiti da najveća mana mineralnih ulja je njihov loš ekološki učinak, ali zbog svoje cijene i pristupačnosti i dalje imaju veliku primjenu kod električnih kabela i ostalih električnih uređaja.

#### **4.5. Razvoj organskih izolacijskih ulja**

Izolacijska ulja su ključni dio elektro izolacijskog sustava u mnogim vrstama elektroenergetske opreme, uključujući transformatore, kabele i kondenzatore. Svaka primjena zahtjeva izolacijsku tekućinu s određenim električnim, kemijskim i fizikalnim karakteristikama. Međutim istraživanja i razvoj prekidača i kabela punjenih uljem gotovo su zaustavljena. Ekstrudirani izolirani kabeli (uglavnom polipropilen ili umreženi polipropilen) zamijenili su kablove punjene uljem, i tehnologija prekidača razvila se prema upotrebom sumpornog heksa-fluorida (SF<sub>6</sub>) kod visokog napona i vakuuma kod srednjeg napona.

Mineralna ulja imaju dugu povijest korištenja u električnim uređajima. Zahtjevi za kvalitetom i stabilnošću postali su stroži, u posljednjih 50 godina došlo je do značajnog poboljšanja u kvaliteti kako je tehnologija rafiniranja napredovala. Zbog svojih izvrsnih performansi, dostupnosti i niske cijene mineralna ulja gotovo pa nisu imala konkurenciju. Zabrinutost oko sigurnosti od požara potaknula je razvoj visokotemperaturnih mineralnih ulja za kritične primjene. Poliklorirani bifenil (PCB – polychlorinated biphenyl) bio je promoviran zbog svojih izvrsnih protupožarnih svojstava, ali 1970-e. ustanovilo se da su opasni po zdravlje i okoliš. Njihova zabrana dovela je do razvoja nekoliko drugih nezapaljivih halogeniranih tekućina poput perkloroetilena, koji se više ne prodaje jer se javnost bunila protiv kloriranja. Zbog velikih zahtjeva za poboljšanje sigurnosti, održivosti materijala i ekološkom prihvatljivošću pokrenut je razvoj alternativnih izolacijskih tekućina. Od kraja 1970-e. prirodni/sintetski esteri koristili su se ispred mineralnih ulja kada je postojala veća

opasnost od požara. Tekućine na bazi ugljikovodika su samo 30% biorazgradiva, silikonska ulja imaju vrlo nisku biorazgradivost, dok esteri i biljna ulja na bazi pentaeritritola su u potpunosti biorazgradivi. Ipak mineralno izolacijsko ulje se i dalje intenzivno koristi. Istodobno razvoj novih materijala za visokotemperaturnu izolaciju poboljšat će pouzdanost uređaja punjenih izolacijskim uljem. Pouzdanost u biorazgradive izolacijske tekućine presudne su u bilo kojoj energetske opremi. Biorazgradive izolacijske tekućine moraju podnositi dovoljno visok napon barem 30 godina kako bi se uložene investicije vratile. Niti jedna izolacijska tekućina nije superiornija od ostalih. Svaka ima svoje prednosti i nedostatke i svaka se koristi u određenim primjenama.

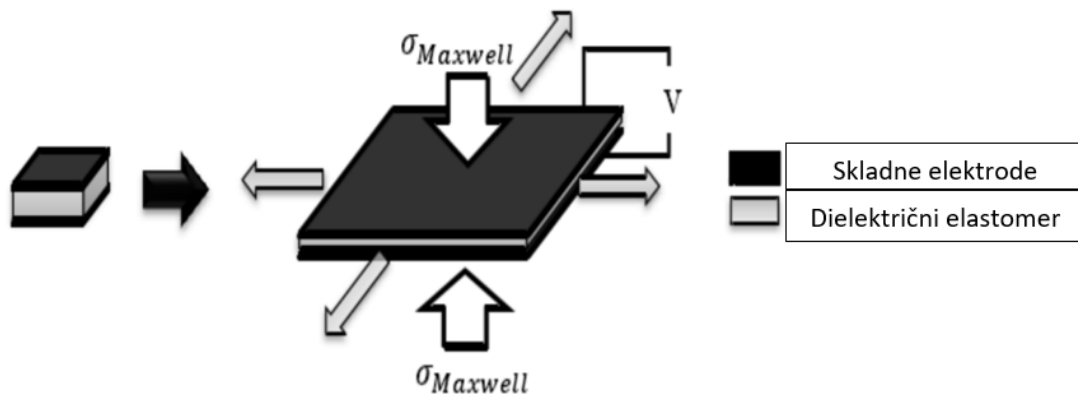
Jedinstvena svojstva mineralnih ulja, osigurala su im primjenu tijekom cijelog prošlog stoljeća i osigurat će im kontinuiranu uporabu u narednim desetljećima. Međutim dva su razloga zašto se treba potražiti alternativa u prirodnim izolacijskim tekućinama. Prvi razlog je loša biorazgradivost mineralnih ulja, a drugi rastuća potražnja za naftnim derivatima što bi moglo dovesti do ozbiljne nestašice već sredinom 21. stoljeća. S obzirom na rastuću zabrinutost za okoliš, potpuno biorazgradiva ulja poboljšana aditivima, bit će vrlo važna u budućnosti. Nanotehnologija će dramatično utjecati na industriju izolacijskih tekućina. Dielektrična svojstva nanotekućina nisu u potpunosti istražena. Iako se nanočestice poput metalnih oksida već široko koriste, istraživanja na ovom području još su u ranoj fazi. Pametne tekućine, čija se svojstva protoka mogu promijeniti primjenom upravljačkog signala male snage, također su se pojavile tijekom posljednjeg desetljeća. Dostupne su dvije glavne klase pametnih fluida, a to su elektoreološka i magnetoreološka. Vjeruje se da se pametne tekućine koje sadrže multifunkcionalne nanočestice mogu prilagoditi specifičnim svojstvima, npr. Smanjenim dielektričnim gubicima, za primjenu u energetske opremi punjenoj tekućinom. Superprovodljivost će također utjecati na budućnost izolacijskih tekućina. Kritične temperature nekoliko visokotemperaturnih supravodiča su oko 135 K. Diljem svijeta u tijeku su mnogi istraživački projekti za razvoj komercijalnih supravodljivih uređaja koji traže nove materijale s višim kritičnim temperaturama.

#### **4.6. Dielektrični elektroaktivni polimeri**

Elektroaktivni polimeri (EAP) predstavljaju novu klasu organskih materijala koji su sposobni na značajne promjene u veličini ili obliku pod utjecajem električne stimulacije. Mogu se svrstati u dvije glavne klase, „ionske“ i „elektroničke“. Elektronički EAP uključuju elektristrikijske

elastomere, feroelektrične polimere i dielektrične elektroaktivne polimere (DEAP), koji se nazivaju i dielektrični elastomeri (DE), (na primjer silikon, akril, poliuretan, itd.). Pokazalo se da su DEAP potencijalno korisni materijali za primjenu u aktuatorima, zbog mogućnosti velike deformacije, zajedno s brzim odzivom i visoko energetske gustoćom. Dosta je pozornosti posvećeno primjeni DEAP-a u tehnologiji pokretanja [35].

Osnovna struktura DEAP aktuatora sastoji se od dielektrične elastomerne membrane koja je stisnuta između dviju sukladnih elektroda. Između elektroda primjenjuje se električno polje što uzrokuje smanjenje debljine dielektričnog elastomera (slika 4.8.).



**Slika 4.8.** Deformacija dielektričnog elastomera pod utjecajem velikog napona [36]

DEAP aktuatori imaju visoku elastičnost i visoku dielektričnu konstantu. Očekivana prednost u odnosu na konvencionalne aktuatore je ta što oni mogu podnijeti veliku razinu naprežanja s velikim deformacijama, imaju visoku energetske konvencionalnu učinkovitost, lagani su i proizvode malo buke.

U posljednjim desetljećima DEAP materijali najviše su se koristili u razvoju DEAP aktuatora na temelju njihovih jedinstvenih svojstava. DEAP pokrivaju širok spektar primjene poput inteligentne robotike, bioinženjstva i automatizacije. Također imaju primjenu za akustiku i kontrolu vibracija [36].

## 5. ZAKLJUČAK

Dielektrik je materijal kroz koji prolazi električno polje, ali sam ne vodi električnu struju. Kako kroz dielektrike ne teče električna struja, oni pripadaju po električnim svojstvima u izolatore. Kod odabira dielektričnog materijala za određenu upotrebu vrlo su bitna svojstva dielektričnog materijala. Glavne karakteristike dielektričnog materijala su: Relativna dielektrična konstanta, specifična dielektrična otpornost, dielektrična čvrstoća i dielektrični gubici.

Organski dielektrični materijali najčešće se primjenjuju u ispravljačima, naponskim uvodnicima, strojevima, prekidačima, anodnim baterijama, kao pasta za lemljenje i kao komponenta kompozitnih dielektričnih materijala. Zbog svojih dobrih mehaničkih i dielektričnih svojstava, organski dielektrični materijali imaju široku uporabu u elektrotehničkom svijetu. Isto tako izuzevši mineralna ulja, organski dielektrični materijali nisu štetni za okoliš, te je to još jedan od razloga zbog kojeg im se u skorije vrijeme neće naći zamjena.

Izolacijska ulja u skorijoj budućnosti će se dosta razlikovati od onih koje danas koristimo. Iako mineralna ulja su organskog podrijetla njihova niska tolerancija na toplinu i ekološka neprihvatljivost, je dovela do traženja alternative koja će biti ekološki prihvatljiva i imati visoku toleranciju na toplinu. Biljna ulja bi u skorijoj budućnosti mogla postati ta alternativa, uz dodavanje određenih aditiva s kojima bi se riješili neki od problema biljna ulja mogla bi imati još značajniju ulogu u primjeni kao izolacijska ulja. Osim razvoja organskih izolacijskih ulja, razvoj organskih dielektričnih materijala znatno napreduje. Novi materijali poput elektroaktivnih polimera koji imaju mogućnost mijenjanja kemijskih i fizikalnih karakteristika imati će veliku ulogu u budućnosti i razvoju ostalih tehnologija poput inteligentne robotike, bioinženjerstva i automatizacije.

## LITERATURA

- [1] R. Podhorsky, Ž. Viličić, H. Požar, D. Štefanović: Tehnička enciklopedija, Dostupno na :  
[[https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnicki\\_materijali.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elektrotehnicki_materijali.pdf)]  
[20.6.2020.]
- [2] P. Osmokrović, Elektrotehnički materijali, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2003. [20.6.2020.]
- [3] P. Krčum, Materijali u elektrotehnici, Sveučilišni studijski centar za stručne studije, Split, 2007. [20.6.2020.]
- [4] <https://riverglennapts.com/hr/dielectric-materials/275-dielectric-materials.html>
- [5] Materijali u elektrotehnici, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2016.  
<http://nobel.etf.bg.ac.rs/studiranje/kursevi/of2mue/materijali/2016/05%20-%20Dielektrici.pdf> [22.6.2020.]
- [6] <https://riverglennapts.com/hr/dielectric-materials/279-electronic-polarization.html>  
[22.6.2020.]
- [7] Svojstva i primjena dielektričnih materijala, Dostupno na:  
[[http://brod.pfst.hr/~ivujovic/stare\\_stranice/pdf\\_zip\\_word/pred\\_dielek\\_mat.pdf](http://brod.pfst.hr/~ivujovic/stare_stranice/pdf_zip_word/pred_dielek_mat.pdf)]  
[22.6.2020.]
- [8] N. Karak, Biopolymers for paints and surface coatings, Tezpur University, Tezpur, 2016, Dostupno na:  
[<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081002148000154>]  
[22.6.2020.]
- [9] K. Pentoś, D. Łuczycka, T. Wysoczański, Dielectric properties of selected wood species in Poland, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Faculty of Life

- Sciences and Technology, Institute of Agricultural Engineering, Wrocław, Poland, 2017.  
[<http://www.woodresearch.sk/wr/201705/06.pdf>] [22.6.2020.]
- [10] Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod „Miroslav Krleža“, Zagreb, 1999.  
Dostupno na : [<https://www.enciklopedija.hr/>] [1.7.2020.]
- [11] <https://atma.hr/jeftin-i-koristan-12-stvari-za-koje-je-vazelin-fantastican/> [1.7.2020.]
- [12] <https://velikirecnik.com/2017/09/29/parafin/#prettyPhoto> [1.7.2020.]
- [13] <https://www.krenizdravo.hr/ljepota/imate-problematicnu-kozu-sklonu-nepravilnostima-saznajte-koja-prirodna-ulja-zacepljuju-pore-2> [1.7.2020.]
- [14] <https://hr.puntomarinero.com/karnaubsky-wax-advantage-and-harm/> [1.7.2020.]
- [15] Dipendra N. Goswami and Promode R. Bhattacharya, Division of chemistry, Indian lac research institute Namkum, The Dielectric Behavior of The Natural Resin Manila Copal ,Ranchi, Bihar, India, 1997. [2.7.2020.]
- [16] <https://nova-akropola.com/znanost-i-priroda/priroda/jantar-zlato-sjevera/> [2.7.2020.]
- [17] <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%A0elak> [2.7.2020.]
- [18] Goswami, D. N. (1979). The dielectric behavior of natural resin shellac. Journal of Applied Polymer Science, 529–537. doi:10.1002/app.1979.070230223 [2.7.2020.]
- [19] M. Kovač, Karakterizacija biokompozita primjenom skenirajućeg elektronskog mikroskopa, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.  
[http://repozitorij.fsb.hr/6991/1/Kova%C4%8D\\_2016\\_zavr%C5%A1ni.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/6991/1/Kova%C4%8D_2016_zavr%C5%A1ni.pdf) [2.7.2020.]
- [20] <http://www.lagea.net/materijali-svila> [4.7.2020.]
- [21] <https://www.wikiwand.com/hr/Papir> [4.7.2020.]



- [22] M. Benić, Modifikacija celuloznog papira za transformatore, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjstva i tehnologije, Zagreb, 2015  
<https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A100/datastream/PDF/view>  
[10.7.2020.]
- [23] <http://www.ho-cired.hr/3savjetovanje/SO1-08.pdf> [9.9.2020.]
- [24] Rouse, T. O. (1998). Mineral insulating oil in transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, 14(3), 6–16. <https://ieeexplore.ieee.org/document/675572> [9.9.2020.]
- [25] Properties of transformer oil that affect efficiency <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:829952/FULLTEXT01.pdf> [9.9.2020.]
- [26] Latest Trends In Use Of Transformer Oils B. Koti Reddy Electrical Engineer HWPM India <http://ijettjournal.org/Volume-67/Issue-7/IJETT-V67I7P207.pdf> [9.9.2020.]
- [27] J. Bunjevac: Dizajn, priprava i testiranje superkondenzatora na bazi ugljika, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjstva i tehnologije, Zagreb, 2016.  
<https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A303/datastream/PDF/view>  
[9.9.2020.]
- [28] Oil-Filled capacitor <http://www.electrotechnik.com/blog/oil-filled-capacitors/>  
[10.9.2020.]
- [29] <https://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/passive-components/capacitors/papercapacitor.html> [10.9.2020.]
- [30] <https://sa.rsdelivers.com/product/kemet/pzb300mc11r30/kemet-paper-capacitor-22-nf-100-nf-275v-ac-20/1215449> [10.9.2020.]
- [31] Liz Harriman , Environmental, Health and Safety Issues in the Coated Wire and Cable Industry, April 2002 University of Massachusetts Lowell [10.9.2020.]

- [32] MV paper insulated cables <https://www.powerandcables.com/cables-mv-paper-insulated-v-mv-polymeric-insulated-cables/> [10.9.2020.]
- [33] Oil filled cables <https://circuitglobe.com/oil-filled-cables.html> [11.9.2020.]
- [34] <https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/energy/global/productdocuments/Miscellaneous%20Locations/energy-epp0500-KabelskiPriborZaEnergetskeMreze-croatian.pdf> [11.9.2020.]
- [35] A.Ward, Dielectric materials for advance aplication, NRC 2015 [11.9.2020.]
- [36] Zhao, Z., Shuai, C., Gao, Y., Rustighi, E., & Xuan, Y. (2016). An application review of dielectric electroactive polymer actuators in acoustics and vibration control. Journal of Physics: Conference Series, 744, 012162. <https://sci-hub.tw/10.1088/1742-6596/744/1/012162> [11.9.2020.]

## SAŽETAK

Tema ovog rada su organski dielektrični materijali. U radu su opisana svojstva dielektričnih materijala te njihova uloga u elektrotehnici i električnim uređajima.

Također, u radu je dan pregled organskih dielektričnih materijala te su iskazana bitna svojstva i primjena svakog navedenog materijala. Na nekoliko primjera prikazana je primjena najčešće upotrebljivanih organskih dielektričnih materijala u električnim komponentama i uređajima.

Za kraj dan je uvid u suvremene organske dielektrične materijale i njihovu ulogu u budućem razvoju električnih uređaja.

**Ključne riječi:** organski dielektrični materijali, elektrotehnika, izolacijska ulja

## **SUMMARY**

The subject of this paper is organic dielectric materials. The paper describes the properties of dielectric materials and their role in electrical engineering and electrical devices.

An overview of organic dielectric materials is also presented in the paper and the essential properties and application of each of these materials are presented. Several examples show the application of most commonly used organic dielectric materials in electrical components and devices.

At the end, an insight is given into contemporary organic dielectric materials and their role in the future development of electrical devices.

**Keywords:** organic dielectric materials, electrical engineering, insulating oils