

# Određivanje tangens delta i specifičnog otpora ulja

---

Vukić, Maja

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Chemistry / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za kemiju**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:182:894269>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Department of Chemistry, Osijek](#)



Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku

Odjel za kemiju

Preddiplomski studij kemije

Maja Vukić

## **Određivanje tangens delta i specifičnog otpora ulja**

Završni rad

Mentorica: izv.prof.dr.sc. Martina Medvidović-Kosanović

Neposredni voditelj: Dominik Goman

Osijek,2021

**Sažetak:**

Električni transformatori trebaju odgovarajuću izolaciju. Upravo je, transformatorsko izolacijsko ulje jedna od najvažnijih sastavnica izolacijskog sustava. Transformatorsko ulje je tekućina koja je uobičajena za transformatorski sustav, te je poznata kao najpopularniji izolacijski materijal u cijelom svijetu. Ulje može biti dio izolacijskog kompleksa ili njegova glavna komponenta. Neke od vrsta izolacijskih ulja su mineralna, parafinska, te silikonska ulja. Ono što je posebno važno je da transformatorsko ulje treba biti kvalitetno, tj. imati određena svojstva. Stoga je obavezno napraviti analizu ulja prije upotrebe, jer nije poželjno raditi s uljima sumnjive kvalitete. U ovom radu sam koristila transformatorska ulja različite kvalitete. Ispitivala sam vrijednosti specifičnog otpora i koeficijenta dielektričnih gubitaka, te prema tim svojstvima odredila je li ulje ispravno za korištenje.

**Ključne riječi:** transformator, transformatorsko ulje, specifični otpor, koeficijent dielektričnog gubitka

**Abstract:**

Electrical transformers need adequate insulation. Precisely, transformer insulation oil is one of the most important components of an insulation system. Transformer oil is a liquid common to the transformer system, and known as the most popular insulating material in the entire world. The oil can be part of the insulation complex or its main component. Some of the types of insulating oils are mineral, paraffin, and silicone oils.

First of all, transformer oil should be of good quality, i.e. have certain properties. Therefore an oil analysis must be performed before use, because it is not desirable to work with oils of dubious quality. In this work I have used transformer oils of different qualities. I have examined the values of specific resistance and dielectric loss coefficient, and according to these properties have determined whether the oil was suitable to be used.

**Keywords:** transformer, transformer oil, specific resistance, dielectric loss coefficient

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Literaturni pregled.....	2
2.1. Ulja.....	2
2.2. Transformatori.....	4
2.3. Uloga ulja u transformatoru.....	6
2.4. Vrste izolacijskih ulja.....	7
2.6. <b>Fizikalna</b> svojstva ulja u transformatoru.....	10
2.6.1. Čistoća i boja.....	10
2.6.2. Viskoznost.....	11
2.6.3. Gustoća.....	11
2.6.4. Površinska napetost.....	11
2.6.5. Točka paljenja.....	12
2.6.6. Refrakcijski indeks.....	13
2.7. Kemijska svojstva ulja.....	13
2.7.1. Kemijska stabilnost.....	14
2.7.2. Kiselost.....	14
2.7.3. Sadržaj vode.....	15
2.8. Električna svojstva ulja.....	15
2.8.1. Dielektrična snaga.....	15
2.8.2. Specifični otpor.....	16
2.8.3. Koeficijent dielektričnih gubitaka ( $\tan \delta$ ).....	16
3. Eksperimentalni dio.....	18
3.1. Materijali.....	18
3.2. Koeficijent dielektričnih gubitaka.....	18
3.3. Specifični otpor.....	19
4. Rezultati i rasprava.....	20
5. Zaključak.....	24
6. Literatura.....	25

## 1. Uvod

Transformator je električni uređaj koji prema principima elektromagnetske indukcije, prenosi električnu energiju iz jednog električnog kruga u drugi, bez promjene frekvencije, povećavajući ili smanjujući napon. Prema primjeni razlikuju se: energetske transformatori koji su namijenjeni prijenosu i pretvorbi električne energije, mjerni transformatori koji su namijenjeni električnim mjerenjima i transformatori impedancije koji se u visokofrekvencijskoj tehnici prilagođavaju impedanciji dvaju strujnih krugova. Izolacijski sustav transformatora sastoji se od kombinacije tekućeg izolacijskog medija i krute izolacije. Kruta izolacija može biti celulozni materijal (papir) ili necelulozni materijal.

Uljni transformatori kao tekući medij koriste transformatorsko ulje koje služi za prijenos topline, impregnaciju izolacije, izoliranje dijelova pod naponom, tj. prigušivanje iskri. Transformatorsko ulje mora imati specifična svojstva bitna za primjenu, na temelju kojih se osigurava optimalan vijek transformatora i pravilno funkcioniranje. Ulje mora imati visoku dielektričnu čvrstoću, visok električni otpor, niske dielektrične gubitke, otpornost prema oksidaciji i degradaciji pod utjecajem električnog i toplinskog naprežanja, visok toplinski kapacitet, dobru toplinsku vodljivost, dobru apsorpciju plinova i tešku zapaljivost. Potrebno je prije svake upotrebe ispitati kvalitetu transformatora. Najčešći pristup ispitivanju je da obučeni električar ili kemičar izvuče uzorak ulja iz transformatora i pošalje ga u ispitni laboratorij specijaliziran za ispitivanje transformatorskog ulja. Ako ulje nije dobro ispitano može doći do kvara transformatora.

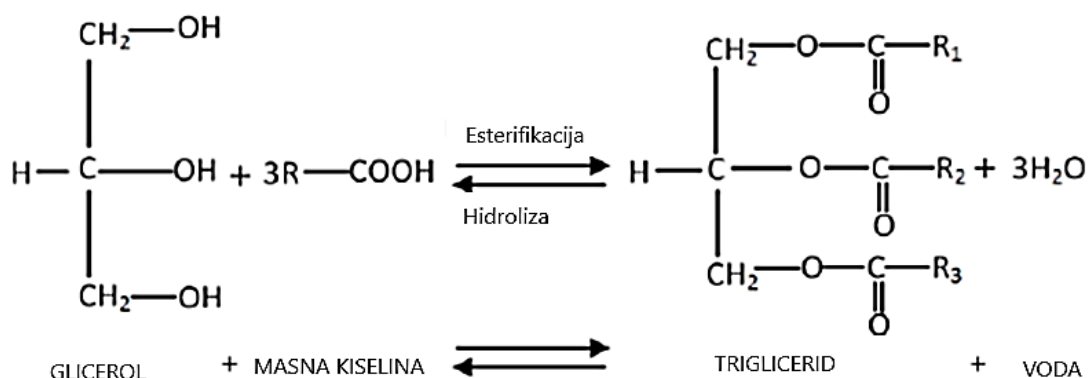
## 2. Literaturni pregled

### 2.1. Ulja

Ulje je nepolarna kemijska tvar koja je viskozna tekućina na sobnoj temperaturi. Istovremeno je hidrofobna, što znači da se ne miješa se s vodom i lipofilna, što znači da se miješa s drugim uljima. Ulja sadržavaju visok udio ugljika i vodika, te su obično zapaljiva i površinski aktivna. Većina su nezasićeni lipidi koji su tekući na sobnoj temperaturi.

Ulja mogu biti životinjskog, biljnog ili petrokemijskog podrijetla, a mogu biti hlapljiva ili nehlapljiva. Koriste se za hranu, gorivo, u medicinske svrhe, za podmazivanje, te proizvodnju mnogih vrsta boja, plastike i drugih materijala.

Ulja i masti nazivaju se trigliceridi (ili triacilcilgeroli), jer su esteri sastavljeni od tri jedinice masnih kiselina spojenih u glicerol, trihidroksi alkohol. Reakcija nastanka triglicerida prikazana je na slici 1. Triglicerid se naziva masnoćom ako je krutina pri 25 ° C; a uljem ako je tekućina pri toj temperaturi. Te razlike u talištima odražavaju razlike u stupnju nezasićenosti i broju atoma ugljika u sastavnim masnim kiselinama. Trigliceridi dobiveni iz životinjskih izvora obično su krute tvari, dok su biljnog podrijetla uglavnom ulja. Stoga su često poznati nazivi životinjske masti i biljna ulja [1].



Slika 1. Nastanak triglicerida [2].

Čista ulja i masti su bez boje, mirisa i okusa. Karakteristične boje, mirise i okuse koje povezujemo s nekima od njih daju strane tvari koje su topive u lipidima i koje su apsorbirali ti lipidi. Lakši su od vode, gustoće oko  $0,8 \text{ g / cm}^3$ . Loši su vodiči topline i električne energije i stoga služe kao izvrsni izolatori za tijelo, usporavajući gubitak topline kroz kožu.

Masti su izvor nekih masnih kiselina koje su potrebne organizmu, a organizam ih ne može sam proizvesti, pa ih zovemo esencijalne masne kiseline. U modernoj prehrani prednost imaju biljna ulja, na primjer maslinovo ulje jer sadrži nezasićene masne kiseline, dok su neke vrste ulja dobar izvor omega-3 masnih kiselina.

Biljke, životinje i drugi organizmi proizvode organska ulja u izvanrednoj raznolikosti prirodnim metaboličkim procesima. Lipid je znanstveni izraz za masne kiseline, steroide i slične kemikalije koje se nalaze u uljima koja proizvode živa bića, dok se ulje odnosi na ukupnu smjesu kemikalija. Organska ulja mogu sadržavati i kemikalije kao što su proteini, voskovi i alkaloidi.

Mineralna ulja mogu se opisati kao bilo koji proizvod rafinerije nafte koji je tekuć na sobnoj temperaturi, poput benzina, kerozina, dizela, mazuta ili ulja za podmazivanje. Sastoje se od mješavine viših alkana - smjese ravnolančanih, razgranatih i cikličkih alkana. Kemijski su prilično neaktivni. Sirova nafta karakterizirana je vrstom ugljikovodičnog spoja u kojem su najzastupljeniji: parafini, nafteni i aromati. Parafini su najčešći ugljikovodici u sirovoj nafti. Glavni su sastojci benzina i stoga su vrlo cijenjeni. Nafteni su važan dio svih tekućih rafinerijskih proizvoda, te tvore i neke od teških asfaltnih ostataka rafinerijskih procesa, dok aromati uglavnom čine samo mali postotak većine sirovih proizvoda [3].

Također, razlikujemo i eterična ili esencijalna ulja. To su smjese hlapljivih, biološki aktivnih spojeva koji se dobivaju iz biljnog materijala najčešće destilacijom vodenom parom, tiještenjem ili ekstrakcijom. Premda se nazivaju uljima, ona dakle nisu masna ulja, već nemasne, hlapljive tekućine. Koriste se u proizvodnji kozmetike i dezinfekcijskih sredstava, u farmaceutskoj industriji za proizvodnju pojedinih preparata, te u fitoterapiji i aromaterapiji u liječenju, prevenciji bolesti i očuvanju zdravlja [4].



## 2.2. Transformatori

Transformator je statički uređaj koji se sastoji od dva ili više spojenih namota, s ili bez magnetske jezgre, za induciranje međusobnog spajanja između krugova. Transformatori se koriste isključivo u elektroenergetskim sustavima za prijenos snage elektromagnetskom indukcijom između krugova na istoj frekvenciji, obično s promijenjenim vrijednostima napona i struje. Jedan namot napaja se izmjeničnim električnim izvorom. Izmjenična struja kroz namot stvara kontinuirano promjenjivi i izmjenični tok koji okružuje taj namot. Ako se drugi namot približi ovom namotu, neki dio ovog izmjeničnog toka spojit će se s drugim namotom. Kako se ovaj tok neprestano mijenja u svojoj amplitudi i smjeru, mora postojati promjenjiva veza fluksa u drugom namotu ili zavojnici. Prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije, u drugom namotu bit će inducirana elektromotorna sila. Ako je krug ovog sekundarnog namota zatvoren, tada će kroz njega teći struja. Ovo je osnovno načelo rada transformatora [5].

Transformator koji povećava napon između primarnog i sekundarnog namota definiran je kao uzlazni transformator. Suprotno tome, transformator koji smanjuje napon između primarnog i sekundarnog namota definiran je kao silazni transformator. Postoje još neke vrste transformatora, poput elektroenergetskog transformatora, distribucijskog transformatora, mjernog, strujnog, potencijalnog, jednofaznog i trofaznog transformatora. Energetski transformator koristi se u prijenosu, razdiobi i potrošnji električne energije. Djeluje kao most između generatora električne energije i primarne distribucijske mreže. Najčešći energetski transformatori pune se uljima. Ovi transformatori transformiraju napon, te su ovisni o principu Faradayeve indukcije. Distribucijski transformator koristi se u distribucijskoj mreži za pružanje transformacije napona u elektroenergetskom sustavu, spuštanjem naponske razine gdje se električna energija distribuira i koristi na kraju potrošača. Mjerni transformator je električni uređaj koji se koristi za transformiranje struje kao i naponske razine. Najčešća upotreba je sigurna izolacija sekundarnog namota kada primarni ima visoki napon i veliku struju, tako da ga mjerni instrument koji je spojen na sekundarnu stranu transformatora neće oštetiti. Mjerni transformator dijeli se na: strujni i potencijalni transformator. Strujni transformator služi za mjerenje i zaštitu. Kada je struja u krugu velika da bi se izravno primijenila na mjerni instrument, strujni transformator koristi se za pretvaranje velike struje u željenu vrijednost struje potrebne u krugu. Potencijalni transformator naziva se još i naponski transformator. Glavna funkcija potencijalnog transformatora je spuštanje naponske razine na sigurnu granicu ili vrijednost. Razlikujemo elektromagnetski, naponski i optički. Jednofazni transformator je

statički uređaj, koji radi na principu Faradayevog zakona međusobne indukcije. Pri konstantnoj frekvenciji i promjeni razine napona, transformator prenosi izmjeničnu snagu iz jednog u drugi krug. Ako se uzmu tri jednofazna transformatora i spoje zajedno sa tri primarna namota međusobno povezana kao jedan i sva tri sekundarna namota jedan na drugi, tvoreći jedan sekundarni namot, transformator će se ponašati kao trofazni transformator. On služi za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije u industrijske svrhe [6].

Prema izvedbi transformatore dijelimo na uljne i suhe. Kod uljnih transformatora (Slika 2), cijeli je namotaj smješten u kotlu s uljem radi izolacije i hlađenja, dok se suhi transformatori hlade zrakom.



Slika 2. Prikaz uljnog transformatora [7].

Prvi transformator sa zatvorenim magnetskom jezgrom prikazan je na izložbi inovacija u Budimpešti 1885, dok je prvi trofazni transformator razvijen 1889. godine. Nikola Tesla izumio je 1891. Teslin transformator, koji se primjenjuje pri stvaranju vrlo visokih napona uz visoku frekvenciju izmjenične električne struje [8].

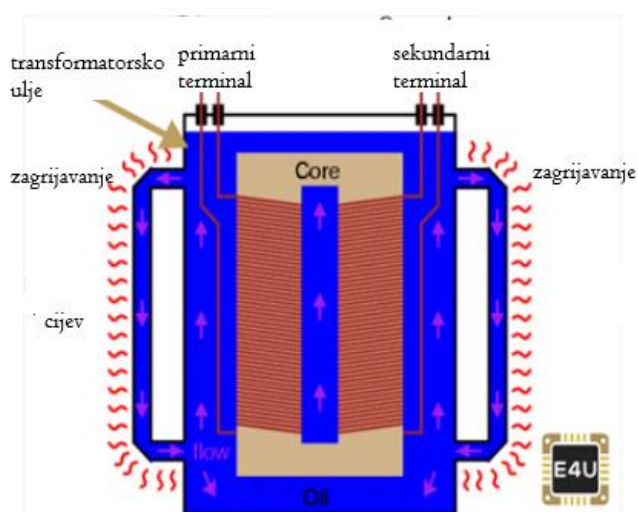
Proizvodnja transformatora u Hrvatskoj započela je 1946. u tvornici Rade Končar. Danas se u tvornici Končar–Energetski transformatori proizvode generatorski transformatori električne snage do 800 MW i električnoga napona do 420 kV, transformatori za povezivanje

mreža električne snage do 600 MW i napona do 420 kV, te strujno-naponski mjerni transformatori električnoga napona do 420 kV.

### 2.3. Uloga ulja u transformatoru

Transformatorsko ulje, koje se još naziva i izolacijsko ulje, posebna je vrsta ulja, koje ima izvrsna električna izolacijska svojstva i stabilno je na visokim temperaturama. Upotrebljava se u uljnim elektroenergetskim transformatorima za izolaciju, zaustavljanje luka i električnog izboja, te za odvođenje topline transformatora. Također se koristi za očuvanje jezgre i namota transformatora jer su oni potpuno uronjeni u ulje. Sljedeće važno svojstvo je sposobnost sprječavanja oksidacije celulozne izolacije od papira. Transformatorsko ulje djeluje kao barijera između atmosferskog kisika i celuloze, tako da izbjegava izravan kontakt i time minimalizira oksidaciju [9].

Primarne funkcije transformatorskog ulja su izolacija i hlađenje transformatora, pa ulje mora imati visoku dielektričnu čvrstoću, toplinsku vodljivost i kemijsku stabilnost i mora zadržati ta svojstva kada se dugo drži na visokim temperaturama. Točka paljenja ulja treba biti 140 °C ili veća, temperatura tališta -40 °C ili niža, napon dielektričnog proboja 28 kV ili veći. Da bi se poboljšalo hlađenje velikih energetskih transformatora, spremnik napunjen uljem može imati vanjske radijatore kroz koje ulje cirkulira prirodnom konvekcijom. Energetski transformatori kapaciteta od tisuću kW mogu također imati ventilatore za hlađenje, pumpe za ulje, pa čak i izmjenjivače topline ulje-voda [10].



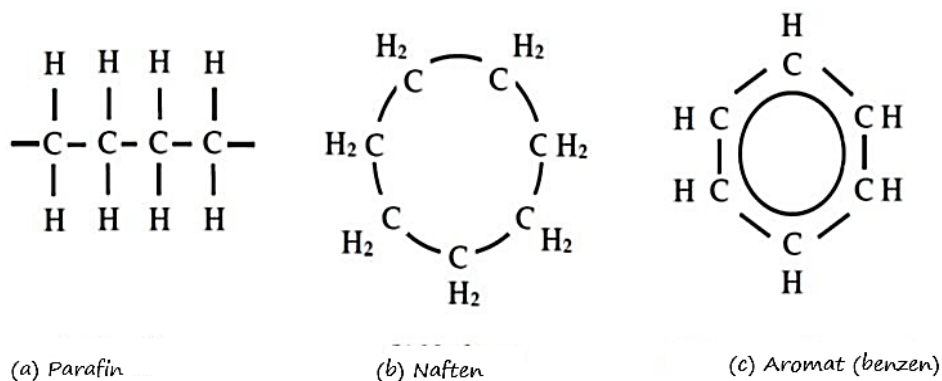
Slika 3. strujanje ulja u transformatoru [11].

Na slici 3. prikazano je strujanje ulja u transformatoru. Kada temperatura okoline raste, volumen ulja u transformatoru se povećava. Konzervatorski spremnik transformatora pruža odgovarajući prostor transformatorskom ulju. Također djeluje kao spremnik za izolacijsko ulje transformatora. Ovo je cilindrična posuda za ulje koja je zatvorena s oba kraja. Na obje strane spremnika nalazi se jedan veliki inspekcijski poklopac kako bi se olakšalo održavanje i čišćenje konzervatora. Konzervator sadrži uljokaz i sušionik zraka koji oduzima vlagu iz zraka što kroz njega struji kad se razina ulja u konzervatoru spušta zbog hlađenja [12].

## 2.4. Vrste izolacijskih ulja

Izolacijska ulja dijele se na mineralna, koja mogu biti inhibirana i neinhibirana, te sintetske izolacijske tekućine nazvane askareli.

Mineralno izolacijsko ulje dobiva se rafinacijom, modifikacijom ili miješanjem naftnih produkata ili drugih ugljikovodika. Ono predstavlja smjesu ugljikovodika različitih struktura, koje su prikazane na slici 4.: parafinske (mogu biti lančane ili razgranate strukture), naftenske (sadrže zasićene prstene) i aromatske (sadrže benzol i njihove derivate) [13].



Slika 4. Smjese ugljikovodika [14].

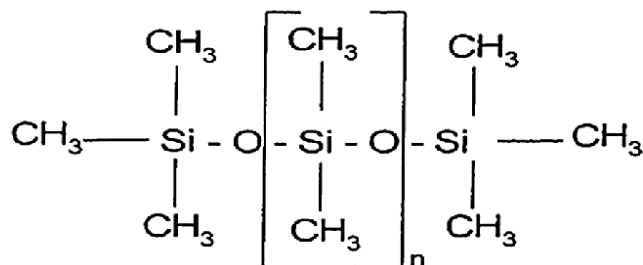
Neinhibirana izolacijska ulja dobivaju se preradbom nafte. Tim uljima nisu naknadno dodani inhibitori ili usporivači procesa starenja, već po svojoj prirodi sadrže inhibitore u obliku fenolnih ili aminskih derivata aromatskih ugljikovodika. Za razliku od neinhibiranih izolacijskih ulja, inhibiranim uljima se dodaju supstance koje utječu na smanjenje oksidacije

ulja. Neinhibirana ulja sadrže prirodne inhibitore ili sintetske inhibitore do maksimalne koncentracije od 0,08 mas.%, dok inhibirana ulja sadrže prirodne inhibitore ili sintetske inhibitore do maksimalne koncentracije od 0,4 mas.%. Inhibirano ulje kao mineralno izolacijsko ulje sadrži najmanje 0,08% i najviše 0,40% antioksidacijskog aditiva zajedno s ostalim aditivima. Najčešće korišteni sintetski inhibitori su DBPC (2,6-ditercijar-butil para-krezol) i DBP (2,6-ditercijar-butil-fenol), dok su prirodni inhibitori najčešće različiti sumporni spojevi [15].

Transformatorsko ulje na bazi parafina i transformatorsko ulje na bazi nafte pripadaju skupini mineralnih ulja. Ulje nafte lakše se oksidira od parafinskog ulja. Međutim, proizvod oksidacije je mulj, koji je u nafti topljiviji od mulja iz parafinskog ulja. Tako se mulj ulja na bazi nafte ne taloži na dnu transformatora, te tako ne ometa konvekcijsku cirkulaciju ulja, što znači da ne remeti sustav hlađenja transformatora. Parafinsko ulje ima nižu brzinu oksidacije od nafte, mulj je netopiv i taloži se na dnu spremnika, te djeluje kao prepreka sustavu hlađenja transformatora. Unatoč nedostacima, ulje na bazi parafina još uvijek se često koristi u mnogim zemljama, poput Indije zbog velike dostupnosti [16].

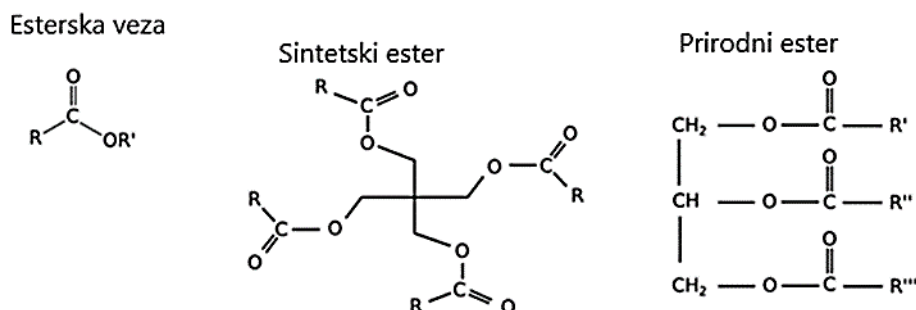
Askareli su sintetski proizvedene izolacijske tekućine. Po kemijskom sastavu su poliklorirani bifenili (PCB). Askareli su vrlo stabilni, korozivni, niske zapaljivosti i izvrsna su sredstva za toplinsku izolaciju. Postoji mogućnost raspadanja pri izloženosti električnim lukovima ili požarima, kako bi nastala klorovodična kiselina i toksični furani i dioksini. Spojevi su nepoželjni zbog svoje postojanosti u okolišu i njihove sposobnosti akumuliranja u višim životinjama, uključujući ljude. Testiranje od strane Američke agencije za zaštitu okoliša pokazalo je da poliklorirani bifenili mogu izazvati rak kod životinja i uzrokovati druge neželjene učinke na zdravlje. Zabranjeno je korištenje askarela u novim transformatorima 1977. godine [17].

Kako su poliklorirani bifenili klasificirani kao kancerogeni organski zagađivači, silikonska ulja su postala sigurna zamjena. Silikonska ulja su smjese anorganskih i organskih polimera kemijske formule  $[R_2SiO]_n$ , strukturne formule prikazane na slici 5. To su tekućine K klase, što znači da imaju točku gorenja iznad  $300^\circ\text{C}$ . U slučaju kvara transformatora uslijed udara luka ili groma ne bi došlo do požara, kao što bi bio slučaj sa mineralnim uljem. Atomi Si zamjenjuju atome ugljikovodika i tako nastaje tvar silikonskog ulja [18].



Slika 5. struktura silikonskog ulja [19].

Međutim, silikon su zamijenile tehnički naprednije opcije kao što su esterske tekućinske transformatorske tekućine. Esteri i silikonske tekućine su klase K (nezapaljive), što ih čini idealnim za primjenu u kojima je požarna sigurnost presudna. Esterske izolacijske tekućine su bolje u odnosu na mineralna ili silikonska ulja, jer imaju visoko plamište, te biorazgradivost. Razlikujemo prirodne i sintetske estere. Prirodna ulja su izolacijske tekućine gušće i viskoznije od mineralnih ulja, karakterističnog mirisa, teško zapaljiva, imaju nizak tlak para, dobra maziva svojstva, visok indeks viskoznosti i dobra dielektrična svojstva, te su izrazito higroskopna. Njihov nedostatak je loša oksidacijska stabilnost, što znači da se mogu koristiti samo u hermetički zatvorenim transformatorima, tj. bez kontakta ulja i zraka. Imaju visoku točku stinista, što može biti problem pri pokretanju rada transformatora u hladnim područjima. Sintetski esteri se koriste kao rashladni mediji u transformatorima čije su radne temperature puno više od transformatora čiji su rashladni mediji mineralna ili silikonska ulja. Primjenjuju se već dugi niz godina u distributivnim, specijalnim i energetskim transformatorima. Strukture esterskih tekućina prikazane su na slici 6. Nažalost, imaju visoku cijenu u odnosu na mineralna ulja.[20]



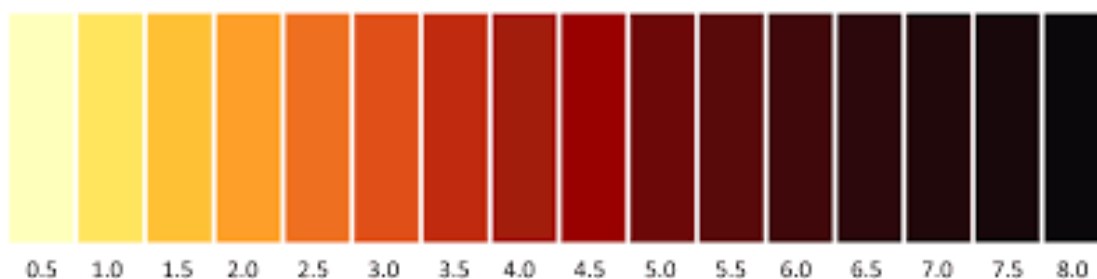
Slika 6. Strukture estera [21].

## 2.6. Fizička svojstva ulja u transformatoru

U fizička svojstva ulja ubrajaju se: čistoća i boja, viskoznost, gustoća, površinska napetost, te točka paljenja. Fizička svojstva ulja važan su kriterij za određivanje starosti ulja i neometane cirkulacija ulja kroz transformator.

### 2.6.1. Čistoća i boja

Ispitivanje boje ulja jedna je od najjednostavnijih metoda za točno utvrđivanje koliko je ulje staro i hoće li i dalje raditi učinkovito. Nova, rafinirana ulja moraju biti bistra, svijetla, te bez prisustva taloga. Tamnija boja ulja prvi je znak da transformatorsko ulje treba mijenjati ili filtrirati. Kako ulje stari, polako se mijenja iz blijedožute, prozirne boje u tamno smeđu boju. Većinu transformatorskih ulja treba filtrirati ili mijenjati najmanje svakih šest mjeseci kako bi se spriječilo oštećenje transformatora. Ulje je općenito žute, narančaste ili čak pomalo crvene boje. Kako ulje stari, ono prelazi u smeđu ili crnu boju, te se njegova učinkovitost smanjuje. Ako se ne otkriju na vrijeme ove važne promjene boje, transformator može biti skloniji problemima kao što su lučenje, pražnjenje korone, pregrijavanje ili smanjena izolacijska čvrstoća [22]. Ovo je razlog zbog čega je ispitivanje boje bitan korak za održavanje potpuno ispravnog električnog transformatora. Na slici 7. prikazana je skala prema kojoj se određuje kvaliteta boje ulja.



Slika 7. Skala boje ulja [23].

### **2.6.2. Viskoznost**

Viskoznost ulja definira se kao otpor protoka ulja, tj. ometanje konvekcijske cirkulacije ulja unutar transformatora. Određivanje viskoznosti ulja se određuje da bi se utvrdilo u kojoj mjeri je ulje sposobno za neometanu cirkulaciju kroz transformator. Dobro ulje mora imati malu viskoznost tako da pruža manje otpora uobičajenom protoku ulja, a time ne utječe na hlađenje transformatora. Niska viskoznost transformatorskog ulja je bitna, ali je važno da se viskoznost ulja povećava što je manje moguće s padom temperature. Ako ulje ima veću viskoznost od propisane vrijednosti, može doći do smanjene cirkulacije ulja, a time i do smanjenja odvođenja topline sa transformatora, što može dovesti do povećanja radne temperature i oštećenja transformatora. Smanjena cirkulacija ulja uzrokuje nagomilavanje zapaljivih para, što snižava točku zapaljivosti ulja i dovodi do požara. Viskoznost se mjeri instrumentom koji se naziva viskozimetar [24].

### **2.6.3. Gustoća**

Gustoća se definira kao omjer mase tvari i volumena tvari, odnosno omjer mase prema volumenu ulja. Gustoća ulja ima veliki utjecaj na rad elektroenergetskih transformatora, stoga je važno paziti na gustoću ulja prilikom punjenja električnih transformatora dielektričnim izolacijskim uljem. Gustoća ne smije prelaziti  $900 \text{ kg/m}^3$  pri unaprijed određenoj temperaturi od  $+ 20 \text{ }^\circ \text{C}$  /  $+ 68 \text{ }^\circ \text{F}$ . Gustoća se također mijenja promjenom temperature. Porastom temperature gustoća opada, a smanjenjem temperature raste. Na svjetskim tržištima rasponi standardne gustoće variraju s omjerom gustoće ulja koji se kreće između  $(0,84-0,89) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  [25].

### **2.6.4. Površinska napetost**

Površinska napetost je mjera molekulskih privlačnih sila između različitih molekula na graničnoj površini. Obično se mjeri u odnosu na vodu i predstavlja napetost između dodirnih površina ulja i vode. Mjeri se u  $\text{mN/m}$  ili  $\text{Dyne/cm}$ . Dobro, novo ulje općenito pokazuje visoku površinsku napetost. Tijekom dužeg korištenja izolacijskog ulja, dolazi do njegovog prirodnog starenja, oksidacije pri čemu se stvaraju organski peroksidi i kiseline koji smanjuju vrijednost površinske napetosti ulja. Kako se transformatorsko ulje s vremenom razgrađuje ili se unose zagađivači, površinska napetost između njega i čiste vode će padati, što ukazuje na pogoršanje





Slika 8. Uređaj za određivanje površinske napetosti

kvalitete transformatora [26]. Pri određivanju površinske napetosti treba promatrati temperaturu ulja. Određuje se pri temperaturi od 25 °C, na uređaju prikazanom na slici 8.

### 2.6.5. Točka paljenja

Točka paljenja prikazuje vrijednost pri kojoj na minimalnoj temperaturi transformatorsko ulje daje paru da bi se zapalilo u zraku. Plamište je važno jer određuje vjerojatnost opasnosti od požara u transformatoru. Poželjna je visoka vrijednost točke paljenja transformatorskog ulja, više od 140°C. Ispitivanje tačke paljenja transformatorskog ulja jeftin je test i popularan test izolacijskog ulja. Ulje zablista nakon miješanja pare s kisikom u zraku. Uređaj za određivanje točke paljenja prikazan je na slici 9.



Slika 9. Uređaj za određivanje točke paljenja

Kada se na ulje nanese mala količina plamena, mješavina pare privremeno će sagorjeti, a zatim će se automatski riješiti kad se postigne određena temperatura. Ako se nastavi postupak zagrijavanja dulje vrijeme ili više od plamišta (50-70 °C), ulje će postići točku plamišta [27].

### 2.6.6. Refrakcijski indeks

Refrakcijski indeks ili indeks loma( $n$ ) je bezdimenzionalni broj koji opisuje koliko brzo svjetlost putuje kroz materijal. Određivanje refrakcijskog indeksa izolacijskih ulja primjenjuje se zbog određivanja sastava i tipa ulja. Indeks loma u uljima mjeri se refraktometrom prikazanim na slici 10. On ovisi o temperaturi i valnoj duljini svjetlosti. Za svjetlosno zračenje manje valne duljine, indeks loma je veći, pa je za određivanje indeksa loma pomoću refraktometra utvrđena svjetlost određene valne duljine, i to žuta svjetlost natrijevog plamena-linija D valne duljine 5893 Å, pri temperaturi 20 °C, te se zbog toga indeks loma obično označava sa  $n_{D20}$  [28].



Slika 10. Refraktometar [29].

### 2.7. Kemijska svojstva ulja

U kemijska svojstva ulja spadaju: kemijska stabilnost, sadržaj vode i kiselost. Bitno je ispitivati kemijska svojstva kako bi se kontrolirala oksidacija ulja, sadržaj mulja, te ugrožavanje izolacije transformatora.

### 2.7.1. Kemijska stabilnost

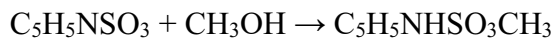
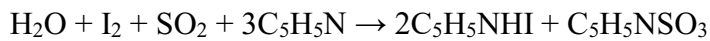
Kemijska ili oksidacijska stabilnost ulja je otpornost ulja prema starenju kada je ulje izloženo normalnoj eksploataciji. Ovo svojstvo zavisi od kemijskog sastava ulja i od utjecaja kojima je ulje izloženo tijekom dugogodišnjeg korištenja. Oksidacija neće proizvesti samo mulj koja smanjuje učinkovitost hlađenja transformatora, već može dovesti do korozije spremnika hlapivim kiselinama. Proces oksidacije uključuje kemijske reakcije između ulja, kisika i metalnih spojeva, a rezultat ovih reakcija je nastajanje nusproizvoda razgradnje ulja koji utječu na dielektrična svojstva transformatorskog ulja. Novo izolacijsko ulje sadrže male količine određenih kemijskih spojeva koji djeluju kao inhibitori oksidacije. Njihova uloga je usporavanje oksidacije ulja. Brzina kojom se troše inhibitori u ulju ovisi o količini kisika, onečišćenjima u ulju, katalitičkim sredstvima i temperaturi ulja. Kako se smanjuje aktivnost inhibitora, tako se povećava brzina oksidacije, te dolazi do pogoršanja ulja. Oksidacija transformatorskog ulja je neizbježna i ne može se učiniti ništa da bi se taj proces zaustavio. Ipak, postoji nekoliko koraka za usporavanje ovog procesa. Prvo, inhibitor treba biti prisutan u ulju cijelo vrijeme dok ga proces oksidacije kontinuirano troši. Drugo, provjerava se koncentracija inhibitora, zatim uzima reprezentativni uzorak ulja iz transformatora i šalje u laboratorij. Koriste se tri analitičke metode za određivanje količine preostalog inhibitora u uzorku: infracrvena spektrofotometrija (IR), plinska kromatografija (GC) ili tekućinska kromatografija visoke djelotvornosti (HPLC) [30].

### 2.7.2. Kiselost

Kiselost ulja je štetno svojstvo jer pogoršava izolacijsko svojstvo papirne izolacije namota u transformatoru. Kiselost ubrzava proces oksidacije ulja, te stvaranja hrđe i nakupine mulja. Ako ulje postane kiselo, voda u ulju postaje topljivije u njoj. Kiselost ulja izražava se u mg KOH potrebnog za neutralizaciju kiseline prisutne u gramu ulja, koje je također poznato kao neutralizacijski broj. Kalijev hidroksid se dodaje u određenoj količini u uzorak transformatorskog ulja kako bi se neutralizirao učinak kiselosti, Kiselost zdravog transformatorskog ulja iznosi 0,3 mg KOH / gram. To znači da je za neutraliziranje 1 grama izolacijskog ulja potrebno 0,3 miligrama KOH. Povećana kiselost ulja uzrokuje smanjenje otpornosti ulja i povećava faktor dielektričnih gubitaka [31].

### 2.7.3. Sadržaj vode

Prisustvo vode ili vlage u transformatorskom ulju vrlo je nepoželjan jer nepovoljno utječe na dielektrična svojstva ulja. Također utječe na izolaciju jezgre i namota transformatora. Većina vode u transformatorskom sustavu nalazi se u čvrstoj izolaciji (papiru), a ne u ulju. Kako temperatura raste, voda silom izlazi iz papira u ulje. Voda u izolacijskom ulju može biti prisutna: kao kemijski vezana voda u kojoj je vodik vezan za molekule ugljikovodika od kojih se sastoji ulje, kao emulgirana voda i kao slobodna voda. Slobodna i emulgirana voda mjere se Karl-Fischerovom titracijom i mogu se ukloniti konvencionalnim metodama sušenja. Karl-Fischer titracija je potenciometrijska titracija sa Karl-Fischerovim reagensom, koji predstavlja mješavinu joda, sumpor-dioksida, piridina i metil-alkohola. Tijekom titracije odvija se reakcija:



Kemijski vezana voda se ispušta pri višim temperaturama i potencijalna je opasnost za dielektričnu čvrstoću. Ova voda ne može se ukloniti konvencionalnim metodama. Većinom se nalazi u ostarjelim uljima. Vlaga može stvoriti oštećenja kako za izolacijsko ulje tako i za izolaciju papira u transformatoru. Ako papirna izolacija izgubi mehaničku čvrstoću zbog vlage, papirna izolacija se ne može vratiti u prvobitno stanje. Udio vode u ulju izražava se u ppm ili mg/kg [32].

## 2.8. Električna svojstva ulja

U električna svojstva ulja spadaju: Dielektrična snaga, specifični otpor i koeficijent dielektričnih gubitaka. Bitno je kontrolirati električna svojstva ulja kako bi se spriječilo stvaranje nečistoća u ulju, te kako ne bi došlo do kvara i loše izolacije transformatora.

### 2.8.1. Dielektrična snaga

Dielektrična snaga naziva se još i probojni napon (BDV). Ovo je važno svojstvo jer je neophodno za održavanje pouzdanog rada energetskih transformatora. Probajni napon transformatorskog ulja uglavnom se određuje prisutnošću kiselina, vode i drugih onečišćenja,

pa je važno zaštititi transformatorsko ulje od takvih nečistoća. Probojni napon mjeri se u uređaju koji je prikazan na slici 11., na način da se promatra napon potreban za preskakanje iskre između dvije elektrode uronjene u ulje odvojene određenim razmakom. Alternativni naziv za probojni napon je jakost iskrenja. Dakle, što je veći napon potreban za skok iskre, to će probojni napon biti veći u ulju, a što je niži napon potreban za skok iskre, probojni napon će biti niži, što ukazuje na prisutnost vlage i drugih provodnih tvari u ulju. Također, prisutnost raznih nečistoća poput kiselina smanjuju probojni napon. Vrijednost od 30 kV je najmanji probojni napon pri kojem se transformatorsko ulje može sigurno koristiti u transformatoru [33].



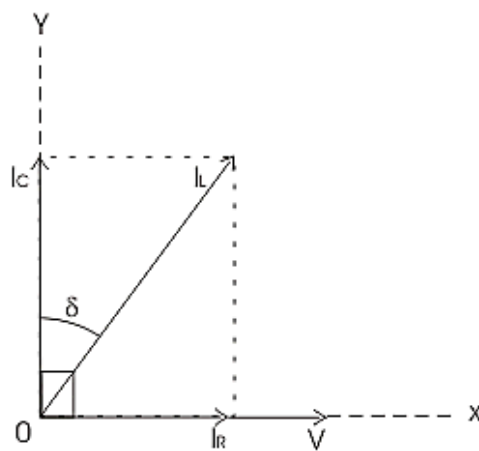
Slika 11. uređaj za određivanje probojnog napona [34].

### 2.8.2. Specifični otpor

Električna otpornost ili specifični električni otpor (grč. slovo  $\rho$ ) je svojstvo tvari da se opire protjecanju električne struje. Proporcionalan je njegovom otporu, duljini, a obrnuto proporcionalan površini presjeka. Također, ovisi i o temperaturi ulja. Otpor izolacijskog ulja mora biti visok na sobnoj temperaturi, a također bi trebao imati dobru vrijednost i na visokoj temperaturi. Zbog toga bi se specifični otpor trebao mjeriti pri 27 °C i 90 °C. Istosmjerni otpor se mjeri između dvije suprotne strane na bloku ulja od  $\text{cm}^3$ . Mjerna jedinica specifičnog otpora je  $\Omega\text{m}$  [35].

### 2.8.3. Koeficijent dielektričnih gubitaka ( $\tan \delta$ )

Koeficijent dielektričnih gubitaka definira se kao omjer aktivne i reaktivne struje koja teče u mjernom krugu. Kada se izolacijski materijali postave između dijela pod naponom i uzemljenog dijela električne opreme, teče tzv. električna struja curenja. Izolatorski materijal je dielektrične prirode, pa struja kroz izolaciju idealno dovodi napon za  $90^\circ$ . Struja propuštanja kroz izolaciju ima dvije komponente: kapacitivnu i otpornu. Na dijagramu prikazanom na slici 12., x-os predstavlja razinu napona u sustavu koji je otporni element struje curenja  $I_R$ . Kako ovaj kapacitivni element struje istjecanja  $I_C$  prethodi  $90^\circ$ , on se vodi preko osi y. struja curenja dana je pomoću  $I_L(I_C + I_R)$ . Dakle,  $\tan \delta$  je omjer  $I_R / I_C$ .



Slika 12. Dijagram  $\tan \delta$  [36].

Ako je kut gubitka mali, tada je otporna komponenta struje  $I_R$  mala, što ukazuje na visoko otporno svojstvo izolacijskog materijala. Visoka otporna izolacija opisuje dobar izolator, stoga je poželjno imati što manji  $\tan \delta$ . Visoka vrijednost  $\tan \delta$  pokazatelj je prisutnosti onečišćenja u transformatorskom ulju. Postoji veza između  $\tan \delta$  i otpornosti. Ako se otpor izolacijskog ulja smanji, vrijednost  $\tan \delta$  raste i obrnuto. Kako ulje stari, javljaju se polarne komponente, što dovodi do faznog pomicanja i zauzvrat do dielektričnih gubitaka. Nečistoće poput vode, otopljene izolacijske smole i papira također mogu imati polarne učinke i time utjecati na  $\tan \delta$  [37].

### 3. Eksperimentalni dio

#### 3.1. Materijali

Prilikom izvođenja eksperimenta koristila sam osam različitih ulja iz različitih transformatora. Eksperimentalni dio ovog završnog rada, odrađen je u Fizikalno-kemijskom laboratoriju referentnog centra za transformatore, HEP, Osijek.

#### 3.2. Koeficijent dielektričnih gubitaka

Za određivanje koeficijenta dielektričnih gubitaka koristila sam uređaj Megger TRAX280, prikazan na slici 13. Mjerenje je provedeno prema IEC 60247 normi. Mjerenje sam provela tako da sam u izoliranu metalnu posudu (prikazanoj na slici 15.) dodala uzorak ulja te spojila krokodil štipaljka za uređaj i očitala vrijednosti pri temperaturi 90 °C i frekvenciji između 40 Hz i 60 Hz.



Slika 13. Uređaj za određivanje  $\tan \delta$ .

### 3.3. Specifični otpor

Za određivanje specifičnog otpora korišten je uređaj Megger mit1025 prikazan na slici 14. Mjerenje je provedeno pri 20 °C, na jednak način kao i određivanje koeficijenta dielektričnog gubitka, prema IEC 60247 normi.



Slika 14. Uređaj za određivanje specifičnog otpora [38].



Slika 15. Izolirana metalna posuda.



#### 4. Rezultati i rasprava

Za eksperimentalno određivanje kvalitete ulja, korišteno je osam uzoraka ulja iz transformatora. U prvom eksperimentu je određivan koeficijent dielektričnih gubitaka ili  $\tan \delta$ . Iz podataka prikazanih u tablici 1. vidljivo je da su vrijednosti  $\tan \delta$  ispitivanih uzoraka varirale od 2,800 % (ulje 8) do 0,001% (ulje 4). Prema normi IEC 60247 [38], vrijednost  $\tan \delta$  treba biti manja od 0,1%, da bi kvaliteta ulja bila zadovoljavajuća. Iz tablice 1. vidljivo je da ulje 8 ima najveću vrijednost  $\tan \delta$ , što znači da ulje nije kvalitetno zbog velikog udjela nečistoća (grafita) u ulju. Ulje 4 ima najmanju vrijednost  $\tan \delta$ , ispod 0,1%, te se može reći da je ulje kvalitetno. Također, uzorci ulja 2,3,5 i 7 imaju vrijednost  $\tan \delta$  ispod 0,1 % te se smatraju kvalitetnim uljima, dok uzorci ulja 1 i 6 pokazuju vrijednost  $\tan \delta$  iznad 0,1 % i prema tom kriteriju ne spadaju u kvalitetna ulja.

**Tablica 1.** Prikaz vrijednosti koeficijenta dielektričnih gubitaka ( $\tan \delta$ ) u ispitivanim uzorima ulja.

Uzorak	$\tan \delta$ / %
Ulje 1	0,237
Ulje 2	0,026
Ulje 3	0,003
Ulje 4	0,001
Ulje 5	0,076
Ulje 6	0,235
Ulje 7	0,033
Ulje 8	2,800

Na slici 16 grafički su prikazane vrijednosti  $\tan \delta$  svih ispitivanih uzoraka ulja. Iz slike je vidljivo da najvišu vrijednost  $\tan \delta$  pokazuje uzorak ulje 8 (2,80 %) dok jako niske vrijednosti

$\tan \delta$  (između 0,001 % i 0,08 %) pokazuju uzorci ulje 2, ulje 3, ulje 4, ulje 5 i ulje 7. Uzorci ulje 1 i ulje 6 imaju nešto više vrijednosti  $\tan \delta$ , 0,237 % (ulje 1) i 0,235 % (ulje 6).



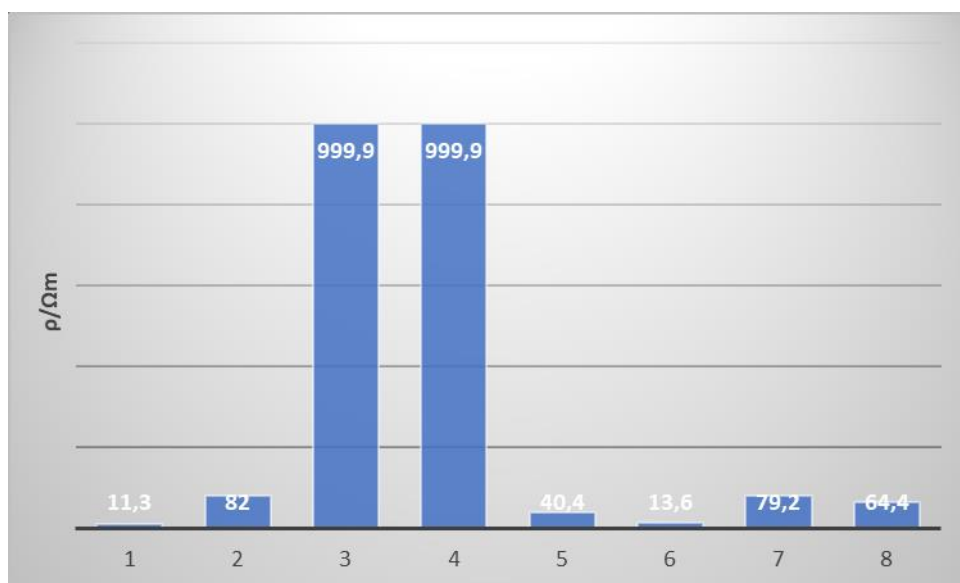
Slika 16. Grafički prikaz ispitivanja koeficijenta dielektričnih gubitaka.

U drugom eksperimentu je određivan specifični otpor ulja ( $\rho$ ). Rezultati su prikazani u tablici 2., te na slici 17. Iz podataka prikazanih u tablici 2. vidljivo je da su vrijednosti specifičnog otpora ulja varirale od 999,99 G $\Omega$ m (ulje 3 i ulje 4) do 11,30 G $\Omega$  m (ulje 1). Prema normi IEC 60247, vrijednost specifičnog otpora ulja ( $\rho$ ) treba biti veća od 60 G $\Omega$ m, da bi kvaliteta ulja bila zadovoljavajuća. Iz tablice 2. vidljivo je da uzorci ulja 3 i 4 imaju najveće vrijednosti specifičnog otpora, iznad 60 G $\Omega$ m, te se smatraju kvalitetnim uljima. Ulje 1 ima najmanju vrijednost specifičnog otpora, ispod 60 G $\Omega$ m, te se može zaključiti da je ulje oksidirano i ostarjelo. Također uzorci ulja 2, 7 i 8 imaju vrijednosti specifičnog otpora iznad 60 G $\Omega$ m, te se smatraju kvalitetnim uljima, dok uzorci ulja 5 i 6 pokazuju vrijednosti specifičnog otpora ispod 60 G $\Omega$ m i prema tom kriteriju ne spadaju u kvalitetna ulja.

**Tablica 2.** Prikaz vrijednosti specifičnog otpora ulja ( $\rho$ ) u ispitivanim uzorcima ulja.

Uzorak	$\rho / \text{G}\Omega\text{m}$
Ulje 1	11,30
Ulje 2	82,00
Ulje 3	999,90
Ulje 4	999,90
Ulje 5	40,40
Ulje 6	13,60
Ulje 7	79,20
Ulje 8	64,40

Na slici 17. grafički su prikazane vrijednosti specifičnog otpora ispitivanih uzoraka ulja. Iz slike je vidljivo da najveću vrijednost specifičnog otpora imaju uzorci ulja 3 i 4 ( $\rho = 999,99 \text{ G}\Omega\text{m}$ ). Uzorci ulja 2, 5, 7 i 8 imaju vrijednosti specifičnog otpora između 40,40 – 82,00  $\text{G}\Omega\text{m}$ , dok najnižu vrijednost specifičnog otpora pokazuju uzorci ulje 1 ( $\rho = 11,30 \text{ G}\Omega\text{m}$ ) i ulje 6 ( $\rho = 13,60 \text{ G}\Omega\text{m}$ )



Slika 17. Grafički prikaz ispitivanja specifičnog otpora ulja.

Međutim, kvaliteta ulja ne može se odrediti samo pomoću ove dvije metode, već se moraju uzeti u obzir i ostala svojstva koja utječu na kvalitetu ulja (boja ulja, gustoća, površinska napetost, refrakcijski indeks, sadržaj vode, točka paljenja, neutralizacijski broj). Kada bi određivala kvalitetu ulja samo prema  $\tan \delta$  i specifičnom otporu, onda bi samo ulje 2,3 4, i 7 bila kvalitetna. Ako se uzmu u obzir ostali parametri, ulje 3,4,5 i 7 su kvalitetna i ispravna za korištenje. Primjerice, vrijednosti  $\tan \delta$  i specifičnog otpora su zadovoljavajuća kod ulja 2, međutim to ulje je neispravno zbog velikog sadržaja vode. Također vrijednost specifičnog otpora kod ulja 5 nije zadovoljavajuća, no zbog ostalih svojstava koja utječu na kvalitetu ulja može se reći da je ulje ispravno.

## 5. Zaključak

Transformatorsko ulje koristi se za izolaciju, zaustavljanje lučenja i koronskog pražnjenja, te za odvođenje topline transformatora. Također, pomaže u očuvanju jezgre i namota transformatora, jer su u potpunosti uronjeni u ulje. Pomaže i u sprečavanju oksidacije izolacije celuloznog papira u namotima. Visok sadržaj kiselina u ulju i povećane temperature ubrzat će pogoršanje izolacijskih svojstava ulja i ako se ispituje redovito, transformator će propasti.

Ispitivanje izolacijskih transformatorskog ulja pokazalo se kao izvrstan alat za rano otkrivanje kvara u preventivnom održavanju transformatora napunjenih uljem. Produžuje se vijek trajanja transformatora identificiranjem prisutnosti toplinskih i dielektričnih kvarova. Rezultati takvih ispitivanja pomažu u održavanju transformatora i pomažu u određivanju kada je nužna zamjena transformatora.

U ovom završnom radu ispitivana je kvaliteta ulja prema vrijednosti specifičnog otpora i koeficijentu dielektričnog gubitka. Vrijednosti su se pratile prema normi IEC 60247. Rezultati eksperimenta su pokazali, da ako vrijednosti specifičnog otpora i  $\tan \delta$  odstupaju od očekivanih vrijednosti, ulje nije ispravno. Međutim, ne može se na temelju samo ove dvije metode odrediti kvaliteta ulja. Za kompletnu karakterizaciju ulja, potrebno je uzeti u obzir i ostala svojstva koja utječu na kvalitetu ulja, kao što su boja ulja, gustoća, površinska napetost, refrakcijski indeks, sadržaj vode, točka paljenja i neutralizacijski broj.

## 6. Literatura

1. [https://chem.libretexts.org/Courses/Eastern Mennonite University/EMU%3A Chemistry for the Life Sciences \(Cessna\)/17%3A Lipids/17.2%3A Fats and Oils](https://chem.libretexts.org/Courses/Eastern_Mennonite_University/EMU%3A_Chemistry_for_the_Life_Sciences_(Cessna)/17%3A_Lipids/17.2%3A_Fats_and_Oils) (1.7.2021)
2. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory Chemistry/Book%3A Introductory Chemistry \(CK-12\)/26%3A Biochemistry/26.08%3A Triglycerides](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Book%3A_Introductory_Chemistry_(CK-12)/26%3A_Biochemistry/26.08%3A_Triglycerides)(1.7.2021)
3. <https://www.chemicalsafetyfacts.org/mineral-oil/> (2.7.2021)
4. <https://portal.terra-organica.hr/aromaterapija/etericna-ulja-primjena-djelovanje-inhalacija/> (2.7.2021.)
5. <https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/> (2.7.2021)
6. <https://circuitglobe.com/types-of-transformer.html> (2.7.2021.)
7. <https://www.nilamfiltration.com/tag/transformer-oil-requirement/> (3.7.2021)
8. <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69710> (3.7.2021)
9. <https://globecore.com/transformer-insulating-oil/> (4.7.2021)
10. Proučavanje činilaca koji utječu na karakteristike izolacionih ulja za transformatore i prekidače
11. <https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/> (4.7.2021)
12. Vilić, Ivana, Ispitivanje smjese mineralnog i esterskog ulja električnim i toplinskim metodama, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2018
13. <https://www.elprocus.com/what-is-transformer-oil-types-its-testing/> (5.7.2021)
14. [https://www.researchgate.net/figure/Hydrocarbons-in-the-mineral-oil-11\\_fig6\\_313625334](https://www.researchgate.net/figure/Hydrocarbons-in-the-mineral-oil-11_fig6_313625334)(5.7.2021.) (6.7.2021)
15. <https://benzoi.com.au/inhibitors-and-oxidation-in-transformer-oil/> (6.7.2021)
16. <https://www.crownoil.co.uk/guides/paraffin-guide-uses-history-more/> (6.7.2021.)
17. <https://steemit.com/askarel/@majidvx/oil-information-askarel> (7.7.2021.)
18. <https://www.powermag.com/end-of-an-era-for-silicone-transformer-fluids/> (7.7.2021.)
19. [https://www.researchgate.net/figure/Molecular-structure-of-silicone-oil\\_fig3\\_320759807](https://www.researchgate.net/figure/Molecular-structure-of-silicone-oil_fig3_320759807) (7.7.2021.)
20. <https://powertechresearch.com/ester-oil-transformers-another-step-towards-greener-energy/> (8.7.2021.)
21. [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-ester-linkage-synthetic-and-natural-ester-source-15-Figures-32-33\\_fig4\\_330925194](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-ester-linkage-synthetic-and-natural-ester-source-15-Figures-32-33_fig4_330925194) (8.7.2021.)

22. <https://blog.hunterlab.com/blog/color-chemical-industry/analyzing-the-color-of-transformer-oil-using-spectrophotometric-instrumentation/> (8.7.2021.)
23. <https://www.kytola.com/de/nachrichten/1442-monitoring-oil-color-can-make-a-difference-in-preventive-maintenance> (9.7.2021.)
24. <https://oilregeneration.globecore.com/transformer-oil-density-and-viscosity> (9.7.2021.)
25. <https://oilregeneration.globecore.com/transformer-oil-density-and-viscosity> (9.7.2021.)
26. <https://www.nanoscience.com/applications/energy/transformer-oil-quality/> (10.7.2021.)
27. <https://www.powerlinkoil.com/flash-point-test-of-transformer-oil/> (10.7.2021.)
28. <https://www.laboratuvar.com/bs/gida-analizleri/fiziksel-analizler/kirilma-indisi-tayini> (10.7.2021.)
29. <https://www.carlroth.com/com/en/refractometer-digital/handheld-refractometer-digital-dr-series-dr-301-95/p/ep62.1> (11.7.2021.)
30. <https://www.machinerylubrication.com/Read/28966/oil-oxidation-stability> (12.7.2021)
31. <https://www.electricalvolt.com/2019/08/acidity-test-of-transformer-oil/> (12.7.2021.)
32. <https://www.powerlinkoil.com/water-content-in-transformer-oil/> (12.7.2021.)
33. <https://oilregeneration.globecore.com/dielectric-strength-of-transformer-oil-2> (13.7.2021.)
34. <https://www.techrentals.com.my/Megger-OTS80PB-Transformer-Oil-Tester> (13.7.2021.)
35. Jonathan Hägerbrand, Measurements of resistivity in transformer insulation liquids, Uppsala univeristet, 2020.
36. <https://www.electrical4u.com/tan-delta-test-loss-angle-test-dissipation-factor-test/> (13.7.2021)
37. <https://www.electrical4u.com/tan-delta-test-loss-angle-test-dissipation-factor-test/> (13.7.2021)
38. Hrvatska norma 60247