

Ispitivanje smjese mineralnog i esterskog ulja električnim i toplinskim metodama

Vilić, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:540285>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ivana Vilić

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ivana Vilić

**Ispitivanje smjese mineralnog i esterskog ulja električnim i
toplinskim metodama**

DIPLOMSKI RAD

Voditeljica rada: izv. prof. dr. sc. Elvira Vidović

Članovi ispitnog povjerenstva:

izv. prof. dr. sc. Elvira Vidović

prof. dr. sc. Zlata Hrnjak – Murgić

doc. dr. sc. Fabio Faraguna

Zagreb, rujan, 2018.

Dio diplomskog rada izrađen je na Zavodu za tehnologiju nafte i petrokemiju Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, kao i u laboratoriju Ulazne kontrole tvornice Končar - Distributivni i specijalni transformatori.

Zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Elviri Vidović na stručnoj pomoći, savjetima i razumijevanju pri izradi diplomskog rada.

Asistentu mag. ing. cheming. Roku Blažicu i docentu doc. dr. sc. Fabiu Faraguni zahvaljujem na danim smjernicama pri izvođenju eksperimentalnog dijela rada, uloženom trudu i strpljenju.

Veliko hvala svim djelatnicima Končara, posebno Ivanki i Ivanu, na susretljivosti i mogućnosti realizacije ideje ovog rada.

Hvala svim kolegama i prijateljima koji su ovo vrijeme provedeno na fakultetu učinili ljepšim, sretnijim i zabavnijim.

Najveće hvala mojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci, ohrabrenju i vjeri u mene tijekom studija.

Veliko hvala svima!

SAŽETAK

Izolacijska ulja koja se koriste u transformatorima često se nazivaju transformatorska ulja ili trafo ulja, a proizvedena su s ciljem osiguranja sigurnog rada tijekom radnog vijeka transformatora. Primjenjuju se u dvije osnovne svrhe, kao izolacijski materijal i medij za hlađenje. Danas se za izoliranje dijelova pod naponom najčešće koristi mineralno ulje kojem se već dugi niz godina, zbog dobrih toplinskih i električnih svojstava, daje prednost u primjeni. Međutim, kako ono ima i svoje nedostatke kao što su zapaljivost i korozivno djelovanje, transformatorsko izolacijsko ulje na osnovi estera se sve više koristi kao zamjena za mineralno ulje zbog visoke otpornosti na temperaturu, povećane sigurnosti od požara i visokog stupnja biorazgradivosti.

U ovom radu korištene su dvije vrste transformatorskog ulja, i to mineralno transformatorsko ulje HyVolt III (Ergon), HIII i sintetsko estersko ulje Midel[®] 7131 (M&I Materials), M7131, ustupljeno od Končar - Distributivnih i specijalnih transformatora. u različitim volumnim omjerima. Pripremljenim smjesama različitih volumnih omjera u rasponu od 1 do 50 vol.% HIII mjerena je viskoznost nakon 30 dana te se pokazalo kako se radi o homogenim mješavinama. Ostale metode kojima su karakterizirane pripravljene smjese i čisti uzorci transformatorskog ulja su toplinska vodljivost, infracrvena spektroskopija, termogravimetrijska analiza, probojni napon, ispitivanje sadržaja vode, faktor dielektričnog gubitka i specifični električni otpor.

Termogravimetrijskom analizom utvrđena je bolja toplinska stabilnost sintetskog estera u odnosu na mineralno ulje. Kod svih smjesa dobiven je stabilan probojni napon unatoč porastu sadržaja vode. Također, sve pripravljene mješavine različitih volumnih udjela mineralnog i esterskog ulja pokazuju viši probojni napon u odnosu na probojni napon čistog mineralnog transformatorskog ulja. Zaključno, prema svim praćenim svojstvima, dobiveni rezultati ispitivanih smjesa mineralnog i esterskog ulja pokazuju zadovoljavajuću međusobnu kompatibilnost dielektrika.

Ključne riječi: izolacijska ulja, transformator, mineralno ulje, sintetsko estersko ulje

ABSTRACT

Insulating oils used in transformers, often referred to as transformer oils, are designed to ensure safe operation during the transformer's working life. They are used for two basic purposes: as an insulating material and a cooling media. Today, mineral insulating oil, which has been used over past year due to its good thermal and electrical properties, is most preferred for isolating. However, as mineral oil it has its shortcomings such as flammability and corrosivity, ester-based transformer oil is increasingly used as a substitute for mineral oil due to high temperature resistance, increased fire safety and high biodegradability.

Two types of transformer oils were used in this work: Mineral Transformer Oil HyVolt III (Ergon), HIII and Synthetic Ester Oil Midel[®] 7131 (M & I Materials), M7131, provided by Končar - Distributive and Special Transformers in different volumetric ratios. Prepared mixtures of different volume ratios ranging from 1 to 50 vol% of HIII were characterized by viscosity measurement after 30 days and it was found that mixtures are homogeneous. In addition prepared mixtures and pure transformer oil sample were characterized by thermal conductivity measurement, infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, breakdown voltage, water content test, dielectric dissipation factor and specific electrical resistivity.

Thermal stability of synthetic ester is higher than thermal stability of mineral oil which was shown by thermogravimetric analysis. A stable breakdown voltage was obtained in all mixtures despite increasing water content. Also, all prepared mixtures of transformer oil exhibits higher breakdown voltage versus the breakdown voltage of pure mineral transformer oil.

In conclusion, according to all observed properties, the obtained results for the tested mixtures of mineral and ester oil show satisfactory mutual compatibility of dielectrics.

Keywords: insulating oils, transformer, mineral oil, synthetic ester oil

SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	TEORIJSKI DIO	3
2.1.	Ulja	3
2.2.	Transformatori	4
2.3.	Vrste transformatorskih izolacijskih tekućina	6
2.3.1.	Mineralno izolacijsko ulje	7
2.3.2.	Silikonsko ulje	10
2.3.3.	Esterske izolacijske tekućine	10
2.4.	Proces obrade ulja	12
2.5.	Probojni napon	15
2.6.	Faktor dielektričnog gubitka i specifični električni otpor	16
3.	EKSPERIMENTALNI DIO	18
3.1.	Materijali	18
3.2.	Priprema mješavina	20
3.3.	Metode karakterizacije	22
3.3.1.	Kinematička viskoznost	22
3.3.2.	Infracrvena spektroskopija (FTIR)	24
3.3.3.	Termogravimetrijska analiza	25
3.3.4.	Toplinska vodljivost	26
3.3.5.	Ispitivanje sadržaja vode Karl Fischer titracijom	27
3.3.6.	Probojni napon	28
3.3.7.	Faktor dielektričnog gubitka i specifični električni otpor	29
4.	REZULTATI I RASPRAVA	30
4.1.	Viskoznost	30
4.2.	Infracrvena spektroskopija	33
4.3.	Toplinska vodljivost	39
4.4.	Termogravimetrijska analiza	43
4.5.	Probojni napon	51
4.6.	Ispitivanje sadržaja vode	52
4.7.	Mjerenje faktora dielektričnog gubitka i specifičnog električnog otpora	55
5.	ZAKLJUČAK	58
6.	LITERATURA	60
7.	ŽIVOTOPIS	64

1. UVOD

Transformator je statički elektromagnetski uređaj u kojem se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova, koji napajaju primarne namote transformatora, prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora, s izmijenjenim iznosima struja i napona i nepromijenjenom frekvencijom. Prema namjeni i izvedbi razlikuje se više vrsta transformatora: energetske transformator namijenjen je prijenosu i pretvorbi električne energije, mjerni transformator primjenjuje se za električna mjerenja a transformatorom impedancije u visokofrekvencijskoj se tehnici prilagođavaju impedancije dvaju strujnih krugova.^[1]

Uljni transformatori koriste se već više od 100 godina, a njihov princip rada nije se mijenjao desetljećima. Izolacijski sustav transformatora najčešće čine kombinacija tekućeg izolacijskog medija i krute izolacije. Kruta izolacija može biti celuloza (prešpan, kraft papir, drvo itd.) ili necelulozni materijali (različiti sintetski polimeri – aramidni papir, stakleno tvrdo tkivo, poliesteri, poliamidi...). Takvi transformatori kao tekući medij koriste transformatorsko ulje koje služi za prijenos topline, impregnaciju izolacije, izoliranje dijelova pod naponom (prigušivanje iskri), a ujedno i prenosi informacije o stanju izolacijskog sustava ulje-papir. Transformatorsko ulje mora imati specifična svojstva bitna za primjenu, na temelju kojih se osigurava pouzdano funkcioniranje i optimalan vijek transformatora. Bitna primjenska svojstva transformatorskih ulja su visoka dielektrična čvrstoća, visok električni otpor, niski dielektrični gubici, otpornost prema oksidaciji i degradaciji pod utjecajem električnog i toplinskog naprezanja, visok toplinski kapacitet, dobra toplinska vodljivost, odgovarajuća viskoznost u području radnih temperatura, dobra apsorpcija plinova i teška zapaljivost.^[2]

Transformatorska ulja dobivaju se iz prirodnih izvora ili su sintetski proizvodi. Najčešće korišteni izolacijski medij su mineralna ulja dobivena postupkom rafinacije iz sirove nafte, a po sastavu su smjese parafinskih, naftenskih i aromatskih ugljikovodika. Mineralna ulja su najbolje rješenje uzimajući u obzir omjer kvalitete i cijene. Međutim, kad je radna temperatura transformatora viša ($> 100^{\circ}\text{C}$), te kada postoje naglašeni zahtjevi za sigurnost, nezapaljivost i zaštitu okoliša, moraju se razmotriti druge vrste izolacijskih tekućina. Sintetski esteri nastaju transesterifikacijom masnih kiselina s alkoholima, dok se s druge strane prirodni esteri dobivaju iz poljoprivrednih kultura. Silikonske izolacijske tekućine imaju visoku stabilnost te visoko plamište i gorište, ali nisu ekološki prihvatljive. Osim toga nisu

kompatibilne s ostalim vrstama izolacijskih medija i imaju visoku cijenu te je njihova primjena danas manja u odnosu na esterska ulja čija primjena raste. Unatrag nekoliko godina na tržištu se pojavilo i sintetsko trafo ulje proizvedeno Fischer Tropschovom sintezom. Odlikuje se velikom čistoćom, nižom gustoćom i višim plamištem od mineralnih ulja dobivenih rafinacijom sirove nafte. Dakle, odabir optimalne izolacijske tekućine ovisi o nizu faktora koje treba uzeti u obzir – tehničkoj specifikaciji, specifičnim zahtjevima kupca, a naravno i cijeni. Osnovni razlozi primjene biorazgradivih izolacijskih tekućina su sve veći zahtjevi vezani uz očuvanje čovjekove okoline, nezapaljivost i sigurnost pogona. Stupanj primjene alternativnih tekućina u transformatorima ovisi o raspolaganju prirodnih resursa za njihovu proizvodnju, potrebama i razvijenosti industrije. Danas se u SAD-u pretežno koriste prirodni esteri, u Japanu i okolnim zemljama silikonsko ulje, dok se u Europi koriste sintetski i prirodni esteri.^[3]

Tijekom rada transformatora dolazi do degradacije ulja te izolacijskog papira. Prilikom degradacije najvažniji faktori koji utječu na vrstu i brzinu degradacije su temperatura, kisik te vlaga. Produkti degradacije su plinovita, tekuća i kruta onečišćenja koja mogu ukazati na predstojeći kvar, odnosno skratiti životni vijek transformatora ako se na vrijeme ne otkriju i ne poduzmu odgovarajuće mjere. Predviđeni životni vijek ulja ovisi o puno uvjeta: vrsti ulja, tipu transformatora, nazivnom naponu i snazi te uvjetima koji vladaju u pogonu.^[4]

Zahvaljujući spoznajama o djelovanju štetnih tvari na čovjeka i okoliš, sve više pažnje posvećuje se onim svojstvima preko kojih materijali posredno ili neposredno utječu na okoliš tijekom proizvodnje, korištenja i zbrinjavanja (eko-toksikološka svojstva materijala). Biološka degradacija, odnosno biorazgradivost, jedno je od najvažnijih svojstava tvari na temelju kojeg se ocjenjuje njegov utjecaj prema okolini, a odnosi se na razgradivost tvari pomoću mikroorganizama.^[5]

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Ulja

Ulja su skupina neutralnih, nepolarnih i lipofilnih tekućina koje se ne miješaju s vodom. Dijele se na masna ulja, mineralna ulja i eterična ulja.

Masti i masna ulja su organski spojevi životinjskog ili biljnog podrijetla (laneno, sojino ili ulje sardina), široko rasprostranjene u prirodi. Prema kemijskom sastavu su esteri glicerola i viših masnih kiselina pa se svrstavaju u trigliceride, a također i u širu skupinu spojeva koji se zovu lipidi. Ne otapaju se u vodi, ali se otapaju u organskim otapalima.^[6]

Masti su spojevi sa zasićenim masnim kiselinama (palmitinska, stearinska), te su zato pri sobnoj temperaturi u krutom agregatnom stanju, a ulja spojevi sa nezasićenim masnim kiselinama (oleinska, linolna, linolenska) pa su zato pri sobnoj temperaturi u tekućem agregatnom stanju. Živim bićima masti služe kao gradivna tvar i za prehranu. Iz njih se dobiva dvostruko više energije po jedinici mase nego iz bjelančevina i ugljikohidrata. Također su važne kao otapalo za vitamine A, D, E i K koji se bez masti ne bi mogli iskoristiti.

Masti su nužne u čovjekovoj prehrani i kao izvor nekih masnih kiselina koje se potrebne organizmu, a ne može ih sam proizvesti, pa ih zovemo esencijalne masne kiseline (kao što je arahidonska kiselina). U modernoj prehrani prednost imaju biljna ulja (kao što je maslinovo ulje) jer sadrže nezasićene masne kiseline, dok su neke vrste ulja dobar izvor omega-3 masnih kiselina.^[7]

Mineralna ulja potječu iz sirove nafte, a prema sastavu su ugljikovodici. Najširu upotrebu imaju kao sredstva za podmazivanje i izmjenu topline.

Eterična ulja su hlapljive tvari koje se dobivaju iz sjemenki, cvjetova ili plodova različitih biljki, destilacijom vodenom parom i ekstrakcijom, a sastoje se najviše od terpena. Najčešće su žućkasta i bezbojna, premda znaju imati i izraženu boju ovisno o procesu dobivanja i biljnom materijalu iz kojeg su dobivena. Koriste se u proizvodnji kozmetike i dezinfekcijskih sredstava. Točnije esencijalna ulja ili neke njihove kemijske sastavnice koriste se u farmaceutskoj industriji za proizvodnju pojedinih preparata. Koriste se također u fitoterapiji i aromaterapiji u liječenju, prevenciji bolesti i sačuvanju zdravlja.

Postoji popriličan broj vrsta eteričnih ulja i njihov broj je u porastu pošto se od različitih biljaka mogu dobiti i različite vrste eteričnih ulja s različitom primjenom i efektima koja daju.

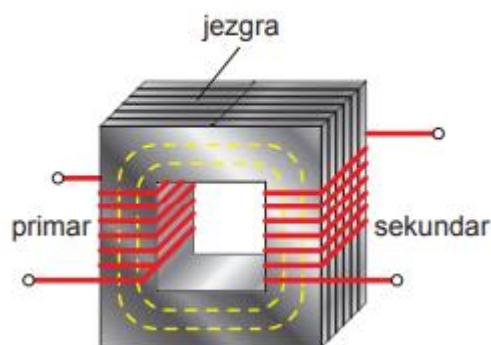
Neke od vrsta eteričnih ulja su čempresovo ulje, komoračevo ulje, lavandino, ružmarinovo, lovorovo itd. ^[8]

2.2. Transformatori

Transformator je statički elektromagnetski uređaj u kojem se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova, koji napajaju primarne namote transformatora, prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora, s izmijenjenim iznosima struja i napona i nepromijenjenom frekvencijom.

Prema namjeni i izvedbi razlikuje se više vrsta transformatora: energetske transformator namijenjen je prijenosu i pretvorbi električne energije, mjerni transformator primjenjuje se za električna mjerenja a transformatorom impedancije u visokofrekvencijskoj se tehnici prilagođavaju impedancije dvaju strujnih krugova. Mnoge su podvrste energetskih transformatora: generatorski, mrežni, distribucijski, ispravljački, pečni i dr. U elektroničkoj se industriji uz energetske primjenjuje niz specijalnih malih transformatora kao što su niskofrekvencijski ili tonski transformator, međufrekvencijski, visokofrekvencijski, antenski i sl. Poseban visokofrekvencijski transformator velikoga prijenosnog omjera naziva se Teslinim transformatorom. ^[1]

Tipični transformator ima 2 ili više stacionarna električna kruga međusobno povezana pomoću zajedničkog magnetskog polja. Princip rada transformatora zasniva se na Faradayevu zakonu elektromagnetske indukcije.

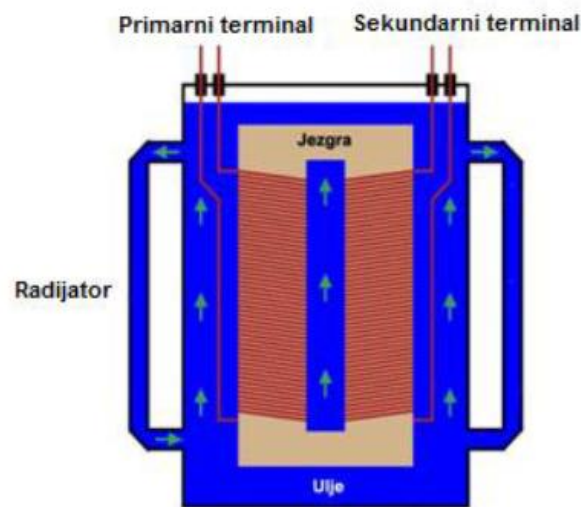


Slika 2.2.1. Pojednostavljeni prikaz transformatora ^[9]

Na Slici 2.2.1. prikazan je pojednostavljeni prikaz transformatora. Transformacija se zbiva u tzv. aktivnom dijelu transformatora koji se sastoji od jezgre i namota. Energija ulazi u transformator kroz primarni namot (primar), te se posredstvom magnetskog toka u jezgri seli

u sekundarni namot (sekundar) s iznosima struje i napona različitim od primarnih, a iz njega nastavlja put ka potrošaču.^[10] Smjer je energije dakle od primara prema sekundaru, pa isti namot, već prema smjeru energije na mjestu ugradnje, može biti primarnim ili sekundarnim namotom. Zato je namote bolje prepoznavati po relativnoj razini napona. Razlikuju se obično namoti višeg, VN, srednjeg, SN, i nižeg napona, NN. Omjer napona u transformatoru naziva se omjerom transformacije.^[11]

Uljni transformatori koriste se već više od 100 godina, a njihov princip rada nije se mijenjao desetljećima. Takvi transformatori koriste transformatorsko ulje kao tekuću električnu izolaciju, rashladni medij te za prigušivanje iskri.^[2]



Slika 2.2.2. Prikaz strujanja trafo ulja u uljnom transformatoru^[12]

Aktivni dio uljem hlađenog transformatora, jezgra s namotima, nalazi se u metalnom kućištu, kotlu transformatora. Prolaskom struje kroz namote i magnetiziranjem jezgre razvija se toplina, pa transformatore treba hladiti. Slika 2.2.2. prikazuje smjer strujanja ulja u uljnom transformatoru. U uljnim transformatorima toplinu iz namota i jezgre preuzima transformatorsko ulje i prenosi je do hladila iz kojih se toplina odvodi najčešće zrakom, a katkad i vodom. Transformatorsko je ulje u kombinaciji s papirom i osnovni izolacijski medij uljnih transformatora. Zbog zagrijavanja transformatora povećava se obujam ulja u transformatoru. Taj višak ulja preuzima konzervator, spremnik koji se obično nalazi na poklopcu transformatora. Konzervator sadrži uljokaz i sušionik zraka koji oduzima vlagu iz zraka što kroz njega struji kad se razina ulja u konzervatoru spušta zbog hlađenja. Manji se uljni transformatori izrađuju i bez konzervatora, u tzv. hermetički zatvorenoj izvedbi. Njihov je kotao od valovitog lima, pa se prilikom širenja ulja može elastično deformirati i privremeno povećati svoj obujam.

Proizvodnja transformatora u Hrvatskoj započela je 1946. u tvornici "Rade Končar" u Zagrebu. Danas su to tri tvornice: "Končar" - Energetski transformatori d.d., koja proizvodi generatorske i mrežne transformatore snaga 20 do 1000 MVA za napone do 500 kV, s najvećom isporučenom trofaznom jedinicom snage 725 MVA; "Končar" - Distributivni i specijalni transformatori d.d., koja proizvodi uljne energetske transformatore od 30 kVA do 63 MVA za napone do 145 kV, suhe transformatore do 5 MVA te razne specijalne transformatore kao što su pećni, ispravljački, lokomotivski i sl., te "Končar" - Mjerni transformatori d.d., koja u svojem proizvodnom programu ima naponske i strujne transformatore za mjerenje i zaštitu, izolirane uljnopapirnom izolacijom ili plinom sumpornim heksafluoridom, za napone do 700 kV, te epoksidnom ili sličnim smolama izolirane mjerne transformatore nazivnih napona do 50 kV. Izvoz, već prema proizvođaču i potrebama domaćeg tržišta, iznosi 50 do 95 % godišnje proizvodnje.^[1]

2.3. Vrste transformatorskih izolacijskih tekućina

Izolacijsko ulje spada u grupu elektroizolacijskih materijala koji se koristi u transformatorima za proizvodnju, prijenos, distribuciju i industrijsku primjenu električne energije. Izolacijska ulja koja se koriste u transformatorima često se nazivaju transformatorska ulja ili trafo ulja i proizvedena su s ciljem osiguranja sigurnog rada tijekom radnog vijeka transformatora. Primjenjuju se u dvije osnovne svrhe, kao izolacijski materijal i medij za hlađenje.

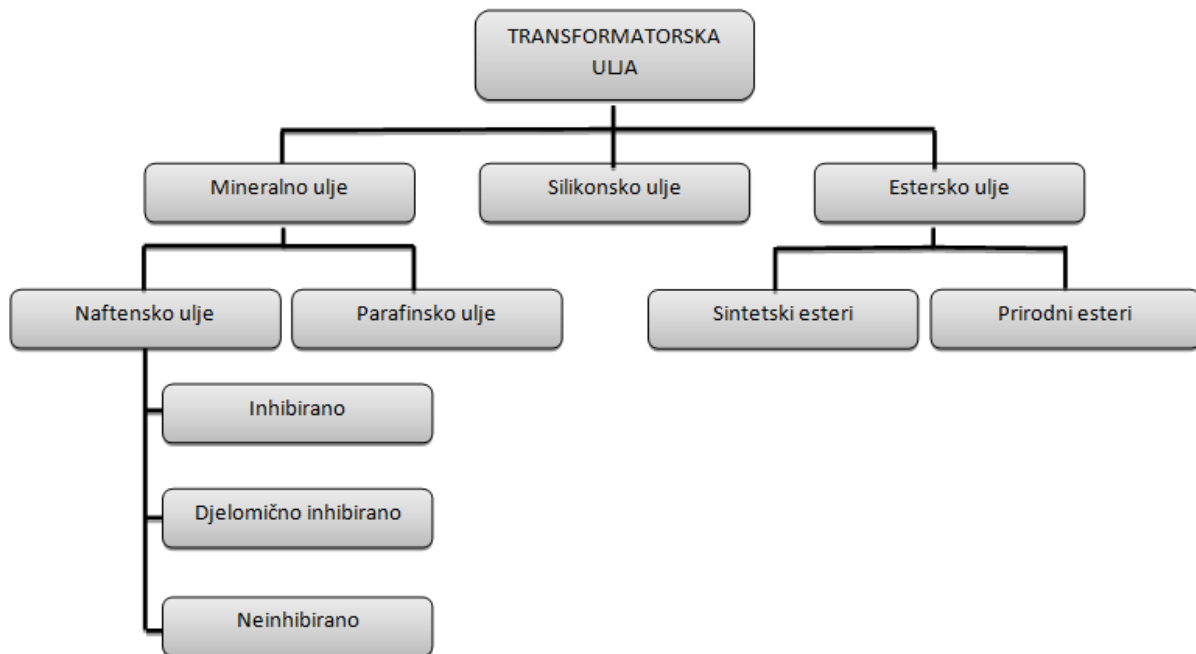
Prema tome, osnovni zahtjevi izolacijskog ulja su:

- da djeluje kao rashladno sredstvo, odvaja toplinu iz jezgre i namota i odvodi na površinu transformatora (na višim temperaturama viskoznost ulja se smanjuje čime se olakšava protok ulja)
- izoliranje dijelova transformatora pod naponom
- gašenje električnog luka koji se javlja na krajevima regulatora napona i sprječavanje iskrenja^[13]

Da bi se zadovoljili ovi zahtjevi izolacijsko ulje mora imati dobra izolacijska svojstva, dobru oksidacijsku stabilnost, toplinsku vodljivost, viskoznost koja osigurava dobru cirkulaciju oko komponenata, visoko plamište, nisko stinište i mnoge druge karakteristike. Pored svojih glavnih funkcija kao što je električna izolacija i hlađenje, izolacijsko ulje omogućava prikladan način redovitih analiza stanja transformatora, što je od izuzetne važnosti za procjenu

njegovog preostalog životnog vijeka. Danas se za izoliranje dijelova pod naponom u energetske transformatorima najčešće koristi mineralno ulje kojem se već dugi niz godina, zbog dobrih toplinskih i električnih svojstava, daje prednost u primjeni. Međutim, ono ima i svoje nedostatke kao što su zapaljivost i korozivno djelovanje. Jedna od boljih i sigurnijih alternativa je izolacijsko ulje na osnovi sintetskog estera, koje uz visoku otpornost na temperaturu, povećanu sigurnost od požara i bolju otpornost na vlagu, ima i visok stupanj biorazgradivosti.^[14]

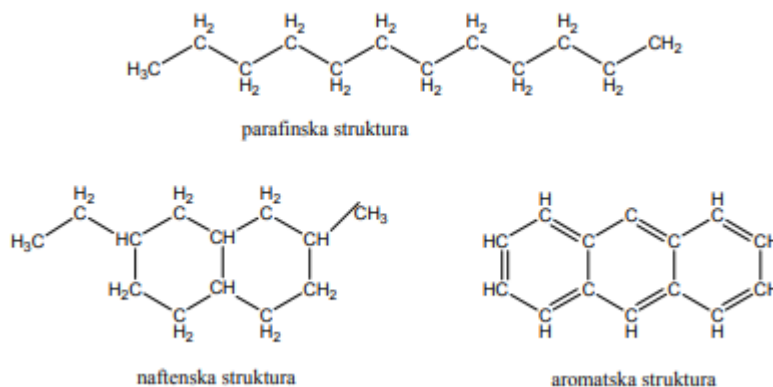
Na Slici 2.3.1. su prikazane različite vrste izolacijskih transformatorskih ulja, a to su mineralna, esterska i silikonska ulja.



Slika 2.3.1. Vrste transformatorskih izolacijskih ulja^[3]

2.3.1. Mineralno izolacijsko ulje

Mineralno izolacijsko ulje je ulje dobiveno rafinacijom, modifikacijom i/ili mješanjem naftnih produkata ili drugih ugljikovodika. Mineralno ulje dobiveno postupkom rafinacije iz sirove nafte je smjesa ugljikovodika različitih struktura: parafinske, naftenske i aromatske. Na Slici 2.3.1.1. prikazane su različite strukture mineralnog ulja.^[3]



Slika 2.3.1.1. Struktura mineralnog izolacijskog ulja

Parafinsko ulje je derivat nafte, koji sadrži znatnu količinu prirodnih *n*-parafina. U prošlosti su parafinska ulja imala relativno visoku točku staništa te su zahtijevala upotrebu dodatnih aditiva za sniženje točke staništa. Današnja iskustva širom svijeta pokazuju da se uz određene aditive ovaj nedostatak može riješiti.

Naftensko ulje je derivat nafte koji sadrži malo prirodnih *n*-parafina. Naftenska ulja imaju nisku točku staništa bez dodatnih aditiva, bolju viskoznost i bolju oksidacijsku stabilnost. Iz tog razloga su danas u transformatorima korištena uglavnom naftenska mineralna ulja.

Mineralna ulja sadrže antioksidanse, tj. inhibitore. Inhibitori su kemijske supstance koje se dodaju u svrhu produljenja „životnog vijeka“ ulja, odnosno oni usporavaju proces oksidacije ulja te stvaranja taloga i kiselina. Mogu biti prirodni i sintetski. Najčešći antioksidansi su fenoli ili amini, a najrašireniji tip inhibitora je 2,6-di-tert-butil-para-krezol, DBPC i 2,6-di-tert-butil-fenol, DBP. Neinhibirana ulja smiju sadržavati samo prirodne inhibitore. Postotak antioksidansa prema IEC 60666 za neinhibirano ulje treba biti < 0,01 mas.%. Inhibirano ulje je ulje u kojem je postotak dodanog inhibitora 0,08 mas.% - 0,4 mas.%. Djelomično inhibirano ulje je ulje u kojem je postotak inhibitora < 0,08 mas.%. Na Slici 2.3.1.2. je prikazano inhibirano i neinhibirano ulje. ^[15] ^[16]



Slika 2.3.1.2. Neinhibirano (lijevo) i inhibirano (desno) ulje

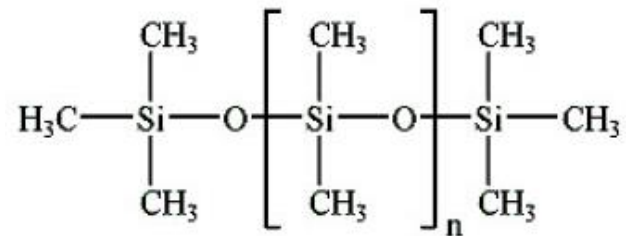
Na ovaj način se kvantitativno određuje sadržaj inhibitora. Ispitivanje se provodi tako što se u epruvetu ulije mala količina ulja i doda otprilike ista količina etanola. Zatim se dodaje mala količina dodekamolibdato-fosfatne kiseline-hidrata. Sadržaj epruvete se protrese te se dodaje par kapi amonijaka. Ukoliko je u ulju prisutan inhibitor, smjesa u epruveti će poplaviti, a ako nije, ostat će nebojena.

Osim navedene metode, prisutnost inhibitora u ulju moguće je odrediti infracrvenom spektroskopijom prema normi IEC 60666.^[17]

Parafinsko ulje dobiva se Fischer Tropschovom sintezom iz sinteznog plina. To je postupak dobivanja smjese alifatskih ugljikovodika katalitičkom reakcijom ugljikova monoksida i vodika.^[18] Parafinsko ulje je visoke čistoće bez korozivnog sumpora i visoke oksidacijske stabilnosti. Prednosti parafinskog ulja nad ostalim mineralnim uljima su nešto više plamište i niža gustoća ulja, a nedostaci su viša cijena i manjak iskustva iz prakse jer najstariji transformatori koji rade s parafinskim uljem su otprilike oko 5 godina u pogonu.

2.3.2. Silikonsko ulje

Silikonsko ulje (polisiloksani) je smjesa anorganskih i organskih polimera kemijske formule $[R_2SiO]_n$. Strukturna formula silikonskog ulja prikazana je na Slici 2.3.2.1. ^[19]



Slika2.3.2.1. Strukturna formula silikonskog ulja

Silikonsko ulje se koristi u transformatorima od kraja 1970-tih, kao alternativa PCB (poliklorirani bifenili) izolacijskim tekućinama korištenim prvenstveno radi zaštite od požara. Silikonske izolacijske tekućine odlikuju se visokom oksidacijskom stabilnošću, te su otporne na biorazgradivost. Iz tog razloga njihova upotreba je ograničena u ekološki osjetljivijim područjima. Nedostatak silikonskih izolacijskih tekućina je i nekompatibilnost s ostalim izolacijskim tekućinama kao i obavezno korištenje posebne opreme pri rukovanju. ^[3]

2.3.3. Esterske izolacijske tekućine

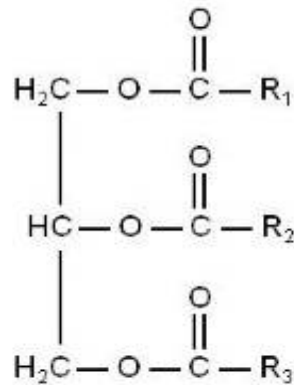
Prednost esterskih izolacijskih tekućina, u odnosu na mineralna ili silikonska ulja, su visoko gorište i plamište te biorazgradivost. ^[20] Iako su prirodni i sintetski esteri slični po kemijskoj strukturi, razlikuju se u nekim karakteristikama (prije svega po oksidacijskoj stabilnosti).

Prirodni esteri (vegetabilna ulja)

Dobivaju se iz sjemenki različitih kultura (uljane repice, suncokreta, soje, ricinusa). Po kemijskom sastavu su smjese triglicerida, tj. triestera s dugim lancima masnih kiselina (lanac sadrži od 8-22 atoma ugljika). Relativno su polarni i zbog svoje strukture skloni stvaranju vodikovih veza. Za transformatorska ulja koriste se vegetabilna ulja s dugim lancima masnih kiselina (14-22 ugljikova atoma s jednom do tri dvostruke veze). U malom postotku (do 1,5 mas.%) dodaju im se aditivi i to antioksidansi i boja.

Vegetabilna ulja su izolacijske tekućine gušće i viskoznije od mineralnih ulja, karakterističnog mirisa, imaju visoko plamište i gorište, teško su zapaljiva, imaju nizak tlak para, dobra maziva svojstva, visok indeks viskoznosti i dobra dielektrična svojstva. Mogu

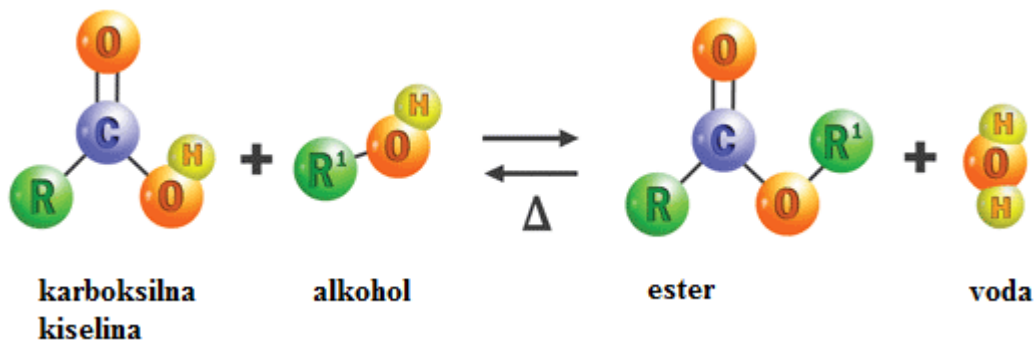
otopiti 40 puta veću količinu vode od mineralnih ulja što znači da su izrazito su higroskopna. Strukturna formula prirodnih estera je prikazana na Slici 2.3.3.1. Nedostatak ovih izolacijskih tekućina je loša oksidacijska stabilnost, tj. mogu se koristiti samo u hermetički zatvorenim transformatorima (bez kontakta ulja i zraka). Nedostatak je i visoka točka stišta, što može biti problem pri pokretanju rada transformatora u hladnim područjima.^[21]



Slika 2.3.3.1. Strukturna formula prirodnog estera

Sintetski esteri

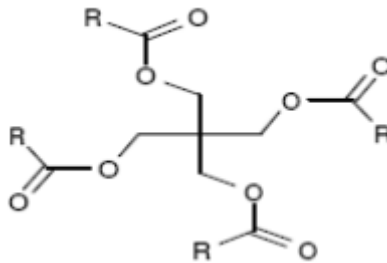
Sintetski organski esteri su izolacijske tekućine koji nastaju kao produkt reakcije esterifikacije između polivalentnih alkohola i viših masnih kiselina. Reakcija esterifikacije prikazana je na Slici 2.3.3.2.^[22]



Slika 2.3.3.2. Prikaz reakcije esterifikacije karboksilnih kiselina i alkohola

Osnovni elementi od kojih se sastoje su ugljik, vodik i kisik. strukturna formula sintetskog estera prikazana je na Slici 2.3.3.2. To je uljasta tekućina, bez mirisa, nešto gušća i viskozija od mineralnog ulja. Sintetski organski esteri se koriste kao rashladni mediji u transformatorima čije su radne temperature puno više od transformatora čiji su rashladni

mediji mineralna ili silikonska ulja. Iznimna svojstva kojima se izdvajaju od ostalih izolacijskih tekućina su visoka točka zapaljenja ($>300^{\circ}\text{C}$), čime su klasificirane kao tekućine K-klase prema IEC 61100, visok stupanj biorazgradivosti (99% nakon 28 dana – što ih svrstava u „environmental friendly“ tekućine i „tekućine neopasne za vodu“ prema Umwelt Bundes Amt (UBA) u Njemačkoj), niska akutna i kronična toksičnost, dobra električna i termička svojstva, nizak tlak para u radnim uvjetima, dobro svojstvo podmazivanja, otpornost na električna izbijanja odnosno električni luk i kompatibilnost s ugradbenim materijalima u transformatoru. Sintetski esteri su u primjeni već dugi niz godina i danas se široko primjenju u distributivnim, specijalnim i energetskim transformatorima. Nedostatak je još uvijek visoka cijena u odnosu na mineralna ulja.^[23]



Slika 2.3.3.2. Strukturna formula sintetskog estera

2.4. Proces obrade ulja

Za obradu ulja koristi se uređaj za obradu ulja, koji odvlažuje i otplinjava ulje na principu povišene temperature i vakuuma. Nominalni kapacitet za kvalitetnu obradu optokom u transformatoru je minimalno 3000 l/h. Uređaj mora imati automatsku regulaciju temperature, tlaka i protoka. Uz uređaj je potrebno imati priključna crijeva s odgovarajućim prirubnicima za sve potrebne spojeve i prespoje (kotao, separator, sklopka, ulazi/izlaz ulja). Uređaj manjeg kapaciteta dozvoljeno je koristiti uz povećanu pažnju po pitanju tlaka i temperature, odnosno treba prilagoditi protok kroz uređaj tako da temperatura ostane u granicama 55°C do 60°C uz tlak manji od 1 mbar. Korištenjem manjeg kapaciteta produljiti će se vrijeme obrade, što također treba uzeti u obzir kod odabira uređaja.^[24]

Tijekom rada transformatora postepeno slabe fizikalna i dielektrična svojstva glavnih komponenata izolacijskog sustava. Dolazi do oksidacije ulja kao i celulozne izolacije. Degradacija izolacije je kemijski proces u kojem se oslobađa određena količina vode/vlage koja dodatno narušava izolacijska svojstva celuloze i ulja. Osim toga povećani udio vlage u

ulju dodatno ubrzava degradaciju i ulja i celuloze. Stoga je potrebno izdvojiti nastale produkte iz ulja (vlaga, plinovi, čestice).^[25]

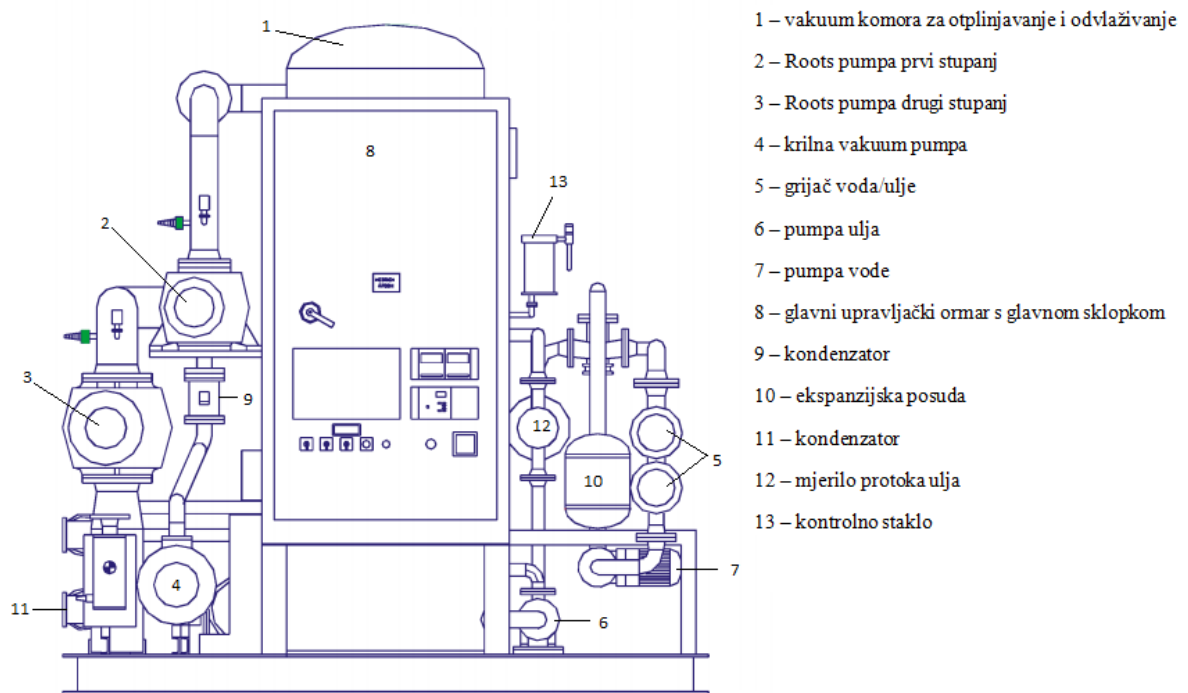
U *Končar D&ST*-u koristi se dvostupanjski uređaj AP50H namijenjen za obradu transformatorskog ulja, čija je shema prikazana na Slici 2.4.1. Osnovni elementi uređaja su: dobavna pumpa, grijač ulja, filter ulja, kolona za otplinjavanje, tlačna pumpa, volumetrijsko brojilo, kondenzator, roots pumpa, stupica za ulje, vakuum pumpa i izlazni kondenzator. Dobavna pumpa postavljena je na ulazni dio cijevovoda uređaja. Funkcionalno je povezana sa razvodom ulja u uljnom cijevovodu povlači ulje iz odabranog spremnika i transportira ulje preko grijača i filtera u kolonu za otplinjavanje. Pumpa je pogonjena pomoću elektromotora upravljanog frekventnim pretvaračem što omogućuje fino reguliranje protoka kroz uređaj. Zagrijavanje ulja je indirektno pomoću tople vode. Preko izmjenjivača topline zagrijava se ulje na zadanu temperaturu obrade. Električni protočni grijač vode grije vodu u zatvorenom sustavu na maksimalno 90° C. Voda pomoću cirkulacijske pumpe cirkulira kroz grijač i kroz izmjenjivač te zagrijava transformatorsko ulje.

Filter za ulje je ugrađen na cijevovodu između grijača i kolone za otplinjavanje s osnovnim zadatkom da odstrani fine čestice iz ulja prije faze otplinjavanja i sušenja ulja u koloni za otplinjavanje. Dvostupanjska kolona za otplinjavanje i sušenje ulja svojom konstrukcijom omogućava raspršivanje ulja preko rashigovih prstena. Kolona je podjeljena u dva dijela pomoću metalnog sita. Zajedno sa uljnim filmom koji se stvara prolaskom kroz pregradu osigurava različite podtlake (vakuum) u komorama. Relativno dugo zadržavanje ulja u koloni omogućava ekstrakciju vlage i zraka apsorbiranog u transformatorskom ulju. Tlačna pumpa, kapaciteta 5000 l/h je višestupanjska centrifugalna pumpa koja izbacuje ulje iz 2. stupnja kolone za otplinjavanje.

Volumetrijsko brojilo za registriranje količine obrađenog ulja ugrađeno je na izlaznom cijevovodu uređaja. Ono omogućava praćenje trenutnog protoka i ukupne količine obrađenog ulja. Na uređaj su ugrađena dva instrumenta kojim se kontrolira kvaliteta ulja tijekom obrade, a to su instrument za mjerenje sadržaja vlage u ulju i instrument za mjerenje ostatne količine zraka.

Za održavanje radnog vakuuma u koloni za otplinjavanje koristi se vakuumski sustav sastavljen iz nekoliko osnovnih vakuumskih elemenata i instrumenata : jednostupanjska krilna vakuum pumpa, roots pumpa, stupica za ulje, uljni kondenzator, ventil za priključivanje

mjerne sonde, kompenzator vibracija, sigurnosni vakuumski ventil, zaklopke, ventili za upuštanje zraka u uređaj i izlazni kondenzator. [26]



Slika 2.4.1. Shema uređaja za obradu ulja

Izolacijsko ulje pomoću dobavne pumpe prolazi kroz grijač i zagrijava na temperaturu obrade (40° C) potrebne za otplinjavanje, preko grijača i filtera za ulje i dobavne pumpe. Potom zagrijano ulje prolazi kroz filter tako da se odstrane mehaničke nečistoće. Za vrijeme prolaza ulja kroz kolonu za otplinjavanje ulje se raspršuje preko raspršivača na vrlo sitne kapljice sa kontinuiranim produženjem uljne površine. Obradeno ulje se ispumpava izvan kolone za otplinjavanje sa centrifugalnom pumpom. Ovim postupkom nije moguće popraviti kemijsku degradaciju ulja ($\tan \delta$). Isključivo se uklanjaju vlaga, otopljeni plinovi i čestice.

Poslove pripreme, vakuumiranja i punjenja uljem obavlja operater koji je osposobljen za rad na poslovima s uljem. Dobro poznavanje tehničkih sredstava, ispravnog procesa rada i detaljno pridržavanje istog, osiguravaju izvršenje zadataka na siguran način. Budući da postoji mogućnost prolijevanja ulja, potrebno je voditi povećanu brigu o zaštiti okoline. Ukoliko dođe do prolijevanja poduzimaju se odmah propisane mjere predviđene za takav slučaj (koriste se absorbent za ulje, upijači i krpe). Za čišćenje je najbolje upotrijebiti inertni apsorpcijski materijal (pijesak, zemlju), odložiti ih u adekvatne kontejnere te zbrinuti na ekološki propisan način. U slučaju požara izbjegavati udisanje produkata izgaranja te koristiti

zaštitnu masku. Prikladna sredstva za gašenje su ugljikov dioksid, pjena za gašenje, suhi prah, vodena magla.^[25]

2.5. Probojni napon

Električni strojevi i transformatori tijekom rada su podložni mehaničkom, toplinskom i naponskom naprezanju. Njihovo dimenzioniranje stoga ovisi o dozvoljenim granicama naprezanja, iznad kojih dolazi do pojave kvara, odnosno kratkotrajnog ili dugotrajnog prestanka njihovog rada.

Prevelika naponska naprezanja popraćena su pojavom parcijalnih izbijanja, koja ovisno o naponu i jakosti električnog polja mogu, a i ne moraju prethoditi proboju dielektrika. Pojam dielektrik prvi je upotrijebio Faraday kako bi razlikovao materijale prema njihovim električnim svojstvima. Općenito govoreći, dielektrici su materijali koji pokazuju svojstvo električne polarizacije, koja kod svih dielektrika ovisi o temperaturi, a kod plinova i o tlaku. Dielektrici vode struju u puno manjoj mjeri od vodiča te se još nazivaju izolatori. Razlog male vodljivosti leži u njihovoj strukturi aniona, tj. u energiji ionizacije, koja je puno viša od ostalih materijala.

Općenita istraživanja mehanizama proboja izolacijskih tekućina započela su početkom XX. stoljeća, zajedno s istraživanjima krutih i plinovitih dielektrika.^[27]

U dielektricima postoje tri vrste polarizacije: elektronska, ionska i dipolna. Kod elektronske polarizacije se pozitivna jezgra i negativni elektroni uslijed djelovanja električnog polja pomiču u suprotnim smjerovima i obrazuju orijentirani dipol. Ionska polarizacija nastaje kada pozitivni i negativni ioni pod djelovanjem električnog polja budu pomaknuti jedan od drugog, te obrazuju dipol sa nešto većom međusobnom udaljenošću. Ako se polarne molekule koje se nalaze u kaotičnom kretanju orijentiraju pod djelovanjem električnog polja, nastaje dipolna polarizacija. Elektronska i ionska polarizacija prolaze kao elastični procesi koji ne sadrže gubitke, dok su dielektrični gubici uglavnom vezani za dipolnu polarizaciju.

Kod tekućih dielektrika, a tako i kod transformatorskog ulja, mehanizam proboja sastoji se od tri veličine. Prva veličina je udarna ionizacija elektronima koji posljedično dovode do pojave prostornih naboja u samom ulju. Zatim dolazi do emisije elektrona, te stvaranje mjehurića koji pod utjecajem električnog polja mijenjaju fizički oblik i olakšavaju proboj.

Kod viših napona, mehanizam proboja započinje i autoemisijom elektrona, a pojava plinskih mjehura kao rezultat disocijacije samog dielektrika ili rezultat isparavanja radi dovedene topline.

Kod većih razmaka između elektroda, mehanizam proboja počinje autoelektronskom emisijom, koja dovodi do udarne ionizacije te stvaranje kanala parcijalnih pražnjenja. Svako parcijalno pražnjenje je zapravo kanal ispunjen plinom. Stvaranje kanala, njihov rast u jednom trenutku dodiruju drugu elektrodu i tu pojavu nazivamo proboj. Napon pri kojem dolaze do ove pojave nazivamo probojni napon.

Probojna čvrstoća mineralnog ulja ispituju se normiranom metodom, uz definirane vrijednosti razmaka i oblika električnog polja. Uz razmak elektroda i oblik polja definiran ispitnim elektrodama na vrijednost napona utječu i nečistoće, vlaga, temperatura te mjehurići zraka koji nisu rezultat naponske degradacije ulja.^[11]

2.6. Faktor dielektričnog gubitka i specifični električni otpor

U dielektriku u kojem je narinuto električno polje dolazi do polarizacije, tj. električni dipoli se usmjeravaju prema smjeru električnog polja. Polarizacija u dielektriku može se računski uzeti u obzir uz pomoć dielektrične konstante ϵ_r .

U slučaju idealnog dielektrika, struja kroz dielektrik će imati samo jednu komponentu, kapacitivnu (I_c), koja će prethoditi narinutom naponu za 90° . Kod realnih dielektrika, zbog nesavršenosti, struja se sastoji od dvije komponente, radne (I_r) i kapacitivne (I_c).

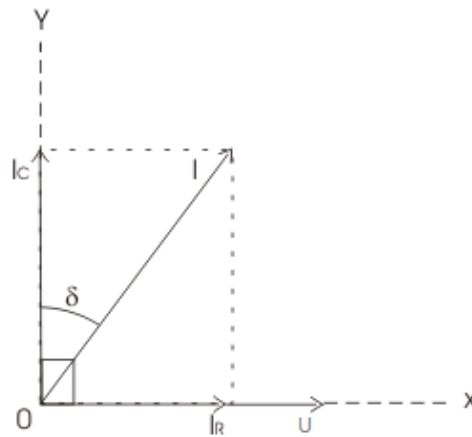
Radna komponenta struje definirana je malom električnom vodljivošću svakog dielektrika (reda veličine 10^{-16} do 10^{-10} S /cm) te energijom koja je potrebna za polarizaciju električnih dipola.

Mjera kvalitete dielektrika, dakle može biti i što manja komponenta radne komponente struje ili, ako se promatra iz druge perspektive, što veća reaktivna komponenta koja se definira i kutom gubitaka.

Kut gubitaka (grč. slovo δ) je kut između ukupne struje koja protječe kroz dielektrik i njene kapacitivne komponente. Zbog praktičnosti, najčešće se računa s tangensom tog kuta.^[11]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C} = \frac{1}{R\omega C}$$

Iz izraza je vidljiva povezanost radnog otpora dielektrika, njegovog kapaciteta te frekvencije izražene preko kružne frekvencije.



Slika 3.3.7.1. Ovisnost kapacitivne o radnoj komponenti struje

Električna otpornost ili specifični električni otpor (grč. slovo ρ) je intrinzično svojstvo koje opisuje svojstvo tvari da se opire protjecanju električne struje. Električna otpornost je recipročna električnoj provodnosti. Nisku otpornost imaju dobri vodiči, a visoka otpornost karakterizira dobre izolatore.

Faktor dielektričnog gubitka i specifični otpor glavni su pokazatelji kvalitete ulja, osobito ako se radi o korištenom ulju. Ova dva parametra svojim porastom ukazuju na prisustvo vlage, čestica ili topljivih polarnih onečišćenja. Dobro rafinirana ulja uvijek daju male vrijednosti za faktor dielektričnog gubitka i specifični otpor.^[2]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Materijali

Sintetsko transformatorsko ulje esterske osnove (Midel[®] 7131)

Sintetsko estersko ulje Midel[®] 7131, M7131 (M&I Materials, Ujedinjeno Kraljestvo; ustupljeno od KONČAR - Distributivni i specijalni transformatori d.d.) je transformatorsko ulje dobiveno kemijskom sintezom. Karakteriziraju ga dobra biološka razgradnja, izvanredna stabilnost kod visokih temperatura, dugotrajna mogućnost zadržavanja svojstava efikasnog rashladnog medija, pa se zbog toga koristi tamo gdje su naglašeni zahtjevi za povećanom sigurnosti od zapaljivosti kao i u područjima gdje je visoko prioritarna briga za očuvanjem okoliša. Midel[®] 7131 je sintetska tekućina niske akutne i kronične toksičnosti, niskog tlaka para u radnim uvjetima, te dobrih termičkih i izvrsnih dielektričnih svojstava, što ju čine otpornom na električna izbijanja. Također, odlikuje ga velika mogućnost apsorpcije vlage bez narušavanja dielektričnih i ostalih svojstava i kvalitete. Ta odlika daje veliku prednost sintetskim uljima u odnosu na mineralna ulja.^[28] Ostala važna svojstva navedena su u Tablici 3.1.1., Tablici 3.1.2. i Tablici 3.1.3.

Mineralno transformatorsko ulje (HyVolt III)

HyVolt III, HIII (Ergon Europe MEA, Belgija; ustupljeno od KONČAR - Distributivni i specijalni transformatori d.d.) je mineralno transformatorsko ulje. Mineralno transformatorsko ulje se dobiva se iz produkata prerade nafte, a prema sastavu se dijeli na dva tipa: parafinska i naftenska mineralna transformatorska ulja. Mineralna ulja su slabo biorazgradiva što ih svrstava u grupu ekološki nepovoljnih materijala. Imaju dobro svojstvo hlađenja zbog niske viskoznosti te dugi životni vijek zbog dobre oksidacijske stabilnosti. Najbolji su izbor kod standardne radne temperature transformatora (do 100 °C) te su i najjeftinije. Transformatorsko ulje mora zadovoljavati određene standarde za električna, fizikalna, kemijska i toplinska svojstva kako bi se moglo koristiti u predviđene svrhe.^[29] U Tablici 3.1.1., Tablici 3.1.2. i Tablici 3.1.3. dane su osnovne karakteristike mineralnog transformatorskog ulja HyVolt III upotrebljenog u ovom radu.

Tablica 3.1.1. Prikaz fizikalno-kemijskih svojstava mineralnog ulja i sintetskog estera

Svojstva	Mjerna jedinica	Ispitna metoda	Mineralno ulje	Sintetski ester
FIZIKALNO-KEMIJSKA				
Izgled	-	vizualno	bistro	bistro
Gustoća, 20 °C	g cm ⁻³	ISO 3675 / ISO 12185	max. 0,895	max. 1,000 ^[30]
Kinematička viskoznost, 20 °C	mm ² s ⁻¹	ISO 3104	22	60 - 70 ^[31]
Kinematička viskoznost, 40 °C	mm ² s ⁻¹	ISO 3104	max. 12	max. 35
Kinematička viskoznost, 100 °C	mm ² s ⁻¹	ISO 3104	2,6	6
Kinematička viskoznost, -30 °C, -20 °C	mm ² s ⁻¹	ISO 3104	(-30 °C) max. 1800	(-20 °C) max. 3000
Kinematička viskoznost, 0 °C	mm ² s ⁻¹	ISO 3104	37,5	240
Sadržaj vlage (za korištena ulja)	mg kg ⁻¹	IEC 60814	max. 30	max. 400 ^[32]
Sadržaj vlage (za nekorisštena ulja)	mg kg ⁻¹	IEC 60814	max. 30	max. 200
Tolerancija vlage, 20 °C	mg kg ⁻¹	IEC 60296 / IEC 61099	55	2600 ^[33]
Sadržaj inhibitora	%	IEC 60666	neinhibirana: <0,01 ^[17]	-

Tablica 3.1.2. Prikaz dielektričnih svojstava mineralnog ulja i sintetskog estera

Svojstva	Mjerna jedinica	Ispitna metoda	Mineralno ulje	Sintetski ester
DIELEKTRIČNA				
Probojni napon (prije obrade)	kV	IEC 60156	min. 30	min. 45 ^[34]
Probojni napon (nakon obrade)	kV	IEC 60156	min.70	min. 75
Faktor diel. gubitaka, tgδ (90 °C)	-	IEC 60247 / IEC 61620	max. 0,005	max. 0,030 ^[35]
Spec. el. otpor	GΩm	IEC 60247	-	min. 2

Tablica 3.1.3. Prikaz toplinskih svojstava mineralnog ulja i sintetskog estera

Svojstva	Mjerna jedinica	Ispitna metoda	Mineralno ulje	Sintetski ester
TOPLINSKA				
Točka paljenja	°C	ISO 2719	min. 135	min. 250 ^[36]
Točka tečenja	°C	ISO 3016	max. - 40	max. - 45 ^[37]
Gorište	°C	ISO 2592	min. 150	min. 300 ^[38]
Vrelište	°C	ASTM D 2887 / ISO 3294	min. 280	min. 400 ^[39]
Temp. samozapaljenja	°C	ASTM E 659	250	min. 400
Toplinska vodljivost, 20 °C	W m ⁻¹ K ⁻¹	ASTM D7896	0,130	0,160



Slika 3.1.1. Prikaz transformatorskog ulja: nekorišteno inhibirano ulje, nekorišteno neinhibirano ulje, korišteno inhibirano ulje i sintetski ester Midel[®] 7131

3.2. Priprema mješavina

U radu su korištene dvije vrste transformatorskog ulja: mineralno transformatorsko ulje HyVolt III (Ergon), HIII i sintetsko estersko ulje Midel[®] 7131 (M&I Materials), M7131, ustupljeno od Končar - Distributivnih i specijalnih transformatora (Končar – D&ST).

Karakteristike koje izdvajaju Midel[®] 7131 su visoka točka zapaljenja (> 300 °C) čime je klasificiran kao tekućina K – klase (prema IEC 61100), te visok stupanj biorazgradivosti (99% nakon 28 dana) . Prema dosadašnjoj praksi, ukoliko je postotak mineralnog ulja u esterskom ulju veći od 8 vol.% ta izolacijska tekućina onda više ne spada u K - klasu

nezapaljivosti. No, za izradu ovog rada korišteni su veći volumni udjeli mineralnog ulja u esterskom ulju.

Eksperimentalni dio sastoji se od pripreve mješavina navedenih vrsta transformatorskog ulja, u različitim volumnim omjerima koji su prikazani u Tablici 3.2.1. Pripravljene mješavine miješane su 3 sata na magnetskoj miješalici. U svim slučajevima smjesa je vizualno bila bistra, bez vidljivih nehomogenosti prije i nakon miješanja.

Tablica 3.2.1. Prikaz pripremljenih volumnih udjela za nekorišteno mineralno ulje HIII

Mješavina	φ (HIII), vol. %
1.	1
2.	3
3.	5
4.	7
5.	10
6.	20
7.	30
8.	40
9.	50

Primjer računa dobivanja masa za različite volumne udjele transformatorskog ulja:

$$\varphi(\text{HIII}) = 0,876 \text{ g/ml}$$

$$\varphi(\text{M7131}) = 0,970 \text{ g/ml}$$

$$V(\text{mješavine}) = 100,00 \text{ ml}$$

$$\varphi(\text{HIII}) = 1\% = 0,01$$

$$\varphi(\text{HIII}) = \frac{V(\text{HIII})}{V(\text{mješavine})}$$

$$V(\text{HIII}) = \varphi(\text{HIII}) \times V(\text{mješavine}) = 0,01 \times 100,00 \text{ ml} = 1,00 \text{ ml}$$

$$\rho(\text{HIII}) = \frac{m(\text{HIII})}{V(\text{HIII})}$$

$$m(\text{HIII}) = \rho(\text{HIII}) \times V(\text{HIII}) = 0,876 \text{ g/ml} \times 1,00 \text{ ml} = 0,8760 \text{ g}$$

Tablica 3.2.2. Prikaz eksperimentalno dobivenih masa transformatorskog ulja

φ (HIII), vol. %	m (HIII) _{eksp.} , g	φ (M7131), vol. %	m (M7131) _{eksp.} , g
1	0,8780	99	96,0342
3	2,6296	97	94,0890
5	4,3847	95	92,1487
7	6,1342	93	90,2835
10	8,7563	90	87,3218
20	17,5219	80	77,5934
30	26,2793	70	67,8911
40	35,0378	60	58,2229
50	43,8085	50	48,5035

3.3. Metode karakterizacije

3.3.1. Kinematička viskoznost

Viskoznost je trenje nastalo pri strujanju fluida zbog različite brzine gibanja njegovih slojeva. Važna je fizikalna značajka svih naftnih produkata, posebice kada su u pitanju transformatorska ulja, čija svojstva tečenja ovise u velikoj mjeri o viskoznosti. Slaba svojstva tečenja trafo ulja mogu izazvati ozbiljna oštećenja i kvar transformatora zbog slabog prijenosa topline. Kinematička viskoznost (ν) je mjera za otpor tečenju pod utjecajem gravitacije. Predstavlja omjer dinamičke viskoznosti i gustoće (η/ρ), a određuje se mjerenjem vremena protoka tekućine kroz kapilaru poznatih dimenzija. ^[40]



Slika 3.3.1.1. Aparatura za mjerenje viskoznosti

Kako bi se utvrdilo je li mineralno ulje mješljivo s sintetskim esterskim uljem upotrijebljena je viskozimetrija. Pripremljene mješavine mineralnog i esterskog ulja, nakon miješanja od 3 dana, stavljene su u graduirane lijevke za odjeljivanje. Uočeno je kako nije došlo do odjeljivanja između ove dvije vrste transformatorskog ulja. Zatim se uzorkovalo s vrha i dna lijevka nakon 4, 10 i 30 dana, od dana stavljanja mješavina u graduirane lijevke, te je mjerena kinematička viskoznost. Aparatura za mjerenje viskoznosti prikazana je na Slici 3.3.1.1. Ispitivanje je provedeno tako što se u odgovarajući viskozimetar ulilo 10 ml ispitivane mješavine ulja, termostatirano je 10 minuta u vodenoj kupelji pri 40° C, a zatim je mjereno vrijeme prolaska kapljevine kroz kapilaru. Svako mjerenje ponovljeno je najmanje 3 puta.

Za čisto mineralno ulje HIII korišten je viskozimetar Cannon-Fenske (Slika 3.3.1.2.) oznake 150 čija konstanta iznosi 0,037857 mm² s⁻². Viskozimetar oznake 300 čija konstanta iznosi 0,1598 mm² s⁻² korišten je za čisti sintetski ester M7131 i smjese u rasponu od 1 do 10 vol. % HIII, dok je za smjese od 20 do 50 vol. % HIII korišten viskozimetar koji ima oznaku 200, čija konstanta za prve dvije smjese (20 i 30 vol. % HIII) iznosi 0,1030 mm² s⁻², a za druge dvije (40 i 50 vol. % HIII) 0,07526 mm² s⁻². Kinematička viskoznost (ν , mm² s⁻¹) se zatim računa kao umnožak baždarne konstante viskozimetra (C , mm² s⁻²) i vremena protoka kapljevine (t , s) prema jednadžbi:

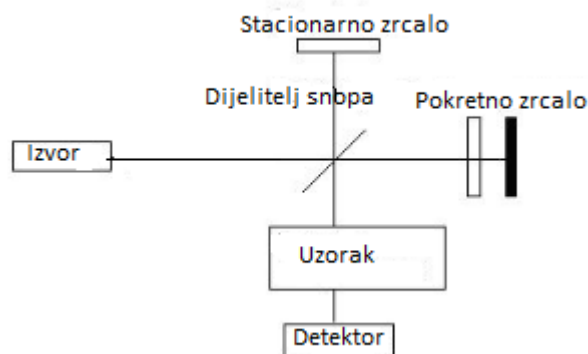
$$\nu = C \times t$$



Slika 3.3.1.2. Viskozimetar^[12]

3.3.2. Infracrvena spektroskopija (FTIR)

Infracrvena spektroskopija jedna je od najvažnijih metoda u identifikaciji uzoraka, a jedno od najvažnijih značenja ove metode je visoka informacijska vrijednost spektra, te mogućnost proučavanja najraznovrsnijih uzoraka. Identifikacija strukturnih skupina određenog uzorka provodi se na temelju položaja i intenziteta apsorpcijskih vrpca. Na taj način se može izravno dokazati postojanje određene strukturne skupine. Infracrvena spektroskopija se naširoko koristi u organskoj sintezi, petrokemijskom inženjerstvu, farmaceutskoj industriji, analizi hrane i radu s polimerima. FTIR spektrometar sastoji se od izvora zračenja, interferometra, detektora, pojačala, analogno-digitalnog pretvornika i računala.^[41]



Slika 3.3.2.1. Blok dijagram FTIR spektrometra

Izvor generira zračenje koje prolazi kroz interferometar i dopire do detektora. Interferometar dijeli upadno infracrveno zračenje u dva snopa koji se nakon prijeđenog optičkog puta sastaju

i prolaze kroz uzorak. Zračenje dopire do detektora gdje se optički signal pretvara u električni pomoću pojačala i analogno-digitalnog pretvornika. Sve frekvencije infracrvenog izvora na detektor padaju istovremeno. To je velika prednost u odnosu na konvencionalne spektrometre gdje frekvencije infracrvenog izvora padaju jedna po jedna, a vrijeme dobivanja spektra se produljuje. Na detektoru se registrira signal koji se prenosi na računalo.^[42]

Karakterizacija ispitivanih mješavina provedena je na FTIR spektrometru s ATR modulom u području valnih duljina od 4000 cm^{-1} do 650 cm^{-1} . Uređaj je prikazan na Slici 3.3.2.2. Za karakterizaciju nije bila potrebna prethodna priprema uzorka, već je uzorak špatulom nanesen na ATR kristal. Da bi se povećao odnos signala prema šumu svaki uzorak snimljen je 4 puta, uz rezoluciju 4 cm^{-1} .



Slika 3.3.2.2. FTIR spektrometar

3.3.3. Termogravimetrijska analiza

Termogravimetrijska analiza je tehnika kojom se određuje toplinska stabilnost materijala, a mjeri promjenu mase uzorka u ovisnosti o temperaturi. Može mjeriti i promjenu mase u ovisnosti o vremenu pri određenoj temperaturi ili u ovisnosti o temperaturi uz određenu brzinu zagrijavanja. Kao rezultat mjerenja se dobiva krivulja gubitka mase u ovisnosti o temperaturi koju je potrebno derivirati, jer se iz derivirane krivulje lakše uočava promjena mase u ovisnosti o temperaturi. Metoda termogravimetrijske analize osim za proučavanje toplinske stabilnosti polimera koristi se i za studije mehanizama degradacije te za predviđanje vremena upotrebe materijala.^[43]

Termogravimetrijska analiza provedena je na instrumentu TA Instruments Q500 koji je prikazan na Slici 3.3.3.1. Pripremljeni uzorci mase $\sim 10\text{ mg}$ grijani su u otvorenoj platinskoj

posudici u struji zraka uz protok $60 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$. Mjerenja su provedena pri brzini zagrijavanja od $10^\circ \text{C min}^{-1}$ u temperaturnom području od 30°C do 500°C .



Slika 3.3.3.1. TGA uređaj TA Instruments Q500

3.3.4. Toplinska vodljivost

Za određivanje koeficijenta toplinske vodljivosti korišten je model *Transient hot bridge* (THB) tvrtke *Linseis Thermal Analysis*. Uređaj za mjerenje toplinske vodljivosti prikazan je na Slici 3.3.4.1. Mjerenje se izvodi pomoću termoelektričnog senzora koji se nalazi u sondi. Senzor mora biti postavljena tako da ostvaruje što je moguće bolji kontakt s uzorkom. Korišten je senzor THB6K99 s vremenom mjerenja od 30 do 55 s i strujom jakosti 0,048 A. Nakon podešavanja parametara senzor je uronjen u 50 mL uzorka. Na uređaju se prate porast temperature uzorkovan otporom unutar sklopa, provođenje topline u uzorku i vrijeme. Posebnim algoritmima se izračunava vrijednost toplinske vodljivosti.



Slika 3.3.4.1. Uređaj za mjerenje toplinske vodljivosti^[12]

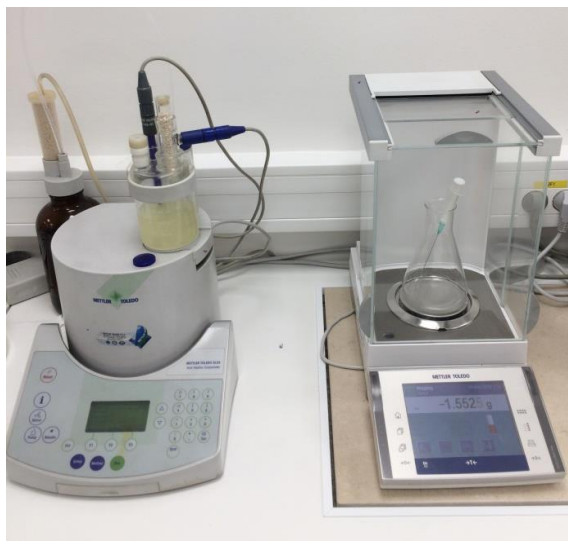
3.3.5. Ispitivanje sadržaja vode Karl Fischer titracijom

Kulometrijskom Karl Fischer titracijom određuje se voda u izolacijskim uljima koja imaju viskoznost manju od $100 \text{ mm}^2/\text{s}$ kod 40°C i koja sadrže vodu u koncentraciji iznad 2 mg/kg i to novim uljima, uljima iz transformatora prije puštanja u pogon i rabljenim uljima iz transformatora u pogonu.

Određena masa uzorka ulja špricom se ubacuje u reakcijsku ćeliju s Karl Fischer reagensom. Kemijske reakcije koje se odvijaju su reakcije vode s jodom, sumporovim dioksidom, organskom bazom i alkoholom u organskom otapalu.^[44]

Kulometar je opremljen mikroprocesorom, titracijskom ćelijom s elektromagnetskim mješačem kapaciteta 250 cm^3 , otvorima za elektrode i septumom za ubrizgavanje uzorka, generatorskom elektrodom bez dijafragme i dvostrukom platinskom pin elektrodom. Uzorak ulja uzima se špricom volumena 5 cm^3 i važe na analitičkoj vagi. Zatim se ulje injektira u reakcijsku ćeliju u kojoj je Karl Fischer reagens. Jod koji se generira iz Karl Fischerovog reagensa reagira s vodom iz uzorka ulja do utroška vode kada dolazi do pojave suviška joda te se reakcija zaustavlja. Sadržaj vode izračunava se kao srednja vrijednost tri mjerenja i izražava kao cijeli broj u mg/kg .^[45]

Ispitivanje sadržaja vode u trafo ulju određuje se prema normi IEC 60814 na uređaju prikazanom na Slici 3.3.5.1. (titrator – Mettler Toledo DL 32 i analitička vaga – Mettler Toledo XP) metodom Karl Fischerove titracije. Mjerenje se ponavlja još 2 puta, te se kao konačni rezultat uzima srednja vrijednost.



Slika 3.3.5.1. Uređaj za mjerenje sadržaja vode

Kako bi se provjerila ukupna zasićenost vodom na sobnoj temperaturi, odnosno ukupna količina vode koju izolacijska tekućina može apsorbirati provedeno je sljedeće ispitivanje. U dvije tamne staklene boce stavljeno je mineralno ulje HIII. Jedna boca je izolirana čepom, dok je druga ostavljena otvorena na zraku. Za oba uzorka određivan je sadržaj vode Karl Fischer titracijom nakon 2, 8, 10, 20, 30, 40, 50 i 60 dana. Na isti način provedeno je određivanje sadržaja vode i za sintetski ester M7131.

3.3.6. Probojni napon

Kao što je već opisano u teorijskom dijelu, probojni napon izolacijskog ulja bitno je svojstvo ulja koje ukazuje na njegovu otpornost prema električnom naprezanju i koristi se prvenstveno za utvrđivanje prisutnosti fizikalnih onečišćenja ulja vodom ili vodljivim česticama.

U ovom radu probojni napon transformatorskog ulja odredio se prema normi IEC 60156 na uređaju prikazanom na Slici 3.3.6.1. (Megger OTS100). Mjerenja su provedena u laboratoriju Ulazne kontrole Končar – Distributivnih i specijalnih transformatora (Končar D&ST). Razmak između elektroda je 2,5 mm i brzina promjene napona $2,0 \text{ kV s}^{-1}$. Konačni rezultat probojnog napona je srednja vrijednost 6 dobivenih proboja.



Slika 3.3.6.1. Uređaj za mjerenje probojnog napona

3.3.7. Faktor dielektričnog gubitka i specifični električni otpor

U ovom radu, faktor dielektričnog gubitka ($\tan \delta$) i specifični otpor određeni su pomoću uređaja Baur DTL prikazanog na Slici 3.3.7.2. Mjerenje je provedeno prema IEC 60247 normi. Propuštanjem ulja, staklena ćelija se tri puta ispiru s uzorkom koji se želi ispitati. Ćelija se napuni sa oko 40 ml uzorka, pričekava se da se nivo ulja u obje staklene posude izjednače te se pokreće mjerenje.



Slika 3.3.7.2. Uređaj za mjerenje faktora dielektričnog gubitka i specifičnog otpora

4. REZULTATI I RASPRAVA

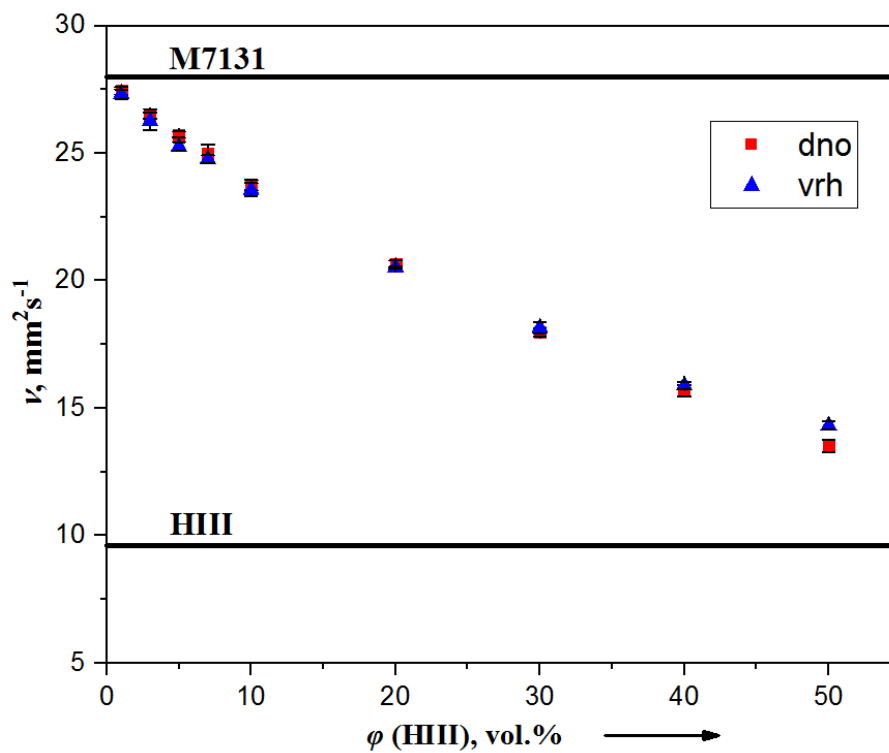
4.1. Viskoznost

Pripremljene mješavine mineralnog i esterskog ulja, nakon miješanja od 3 dana, stavljene su u graduirane lijevke za odjeljivanje. Uočeno je kako nije došlo do odjeljivanja između ove dvije vrste transformatorskog ulja. Zatim se uzorkovalo s vrha i dna lijevka nakon 4, 10 i 30 dana, od dana stavljanja mješavina u graduirane lijevke, te je mjerena kinematička viskoznost na način opisan u eksperimentalnom dijelu rada. Rezultati kinematičke viskoznosti dani su u Tablici 4.1.1.

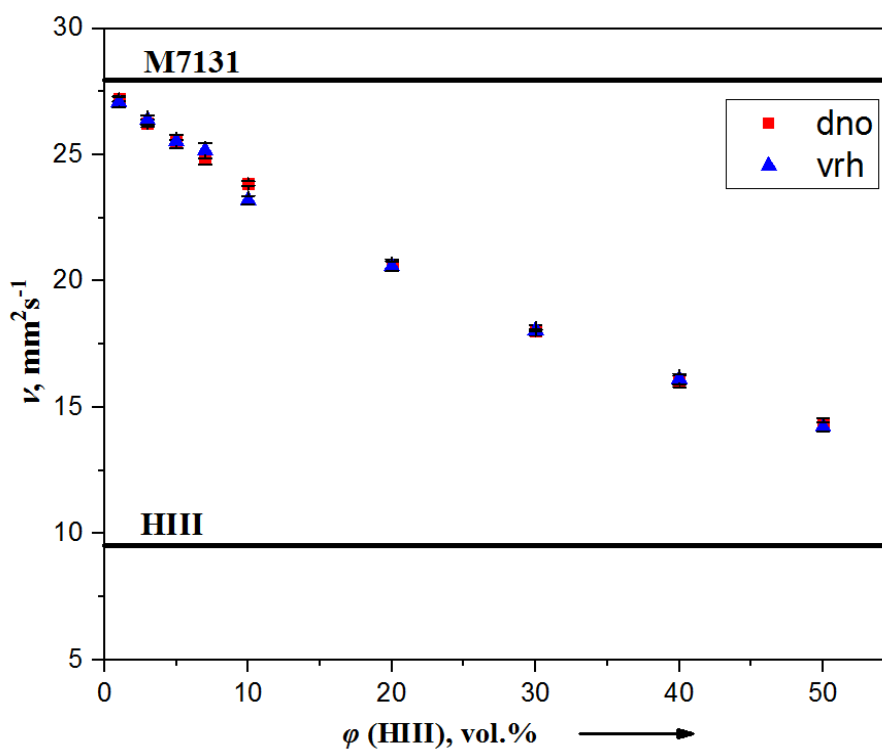
Tablica 4.1.1. Rezultati kinematičke viskoznosti za navedene mješavine nakon 4, 10 i 30 dana

MJESAVINE ULJA	NAKON 4 DANA		NAKON 10 DANA		NAKON 30 DANA	
	ν , mm ² s ⁻¹ (dno)	ν , mm ² s ⁻¹ (vrh)	ν , mm ² s ⁻¹ (dno)	ν , mm ² s ⁻¹ (vrh)	ν , mm ² s ⁻¹ (dno)	ν , mm ² s ⁻¹ (vrh)
φ (HIII)=1vol.%	27,45 ± 0,15	27,32 ± 0,19	27,22 ± 0,10	27,08 ± 0,21	27,03 ± 0,19	26,55 ± 0,18
φ (HIII)=3vol.%	26,55 ± 0,19	26,26 ± 0,34	26,25 ± 0,15	26,38 ± 0,18	26,37 ± 0,21	26,22 ± 0,13
φ (HIII)=5vol.%	25,73 ± 0,12	25,26 ± 0,18	25,51 ± 0,07	25,53 ± 0,27	25,56 ± 0,13	25,49 ± 0,17
φ (HIII)=7vol.%	25,01 ± 0,33	24,77 ± 0,15	24,83 ± 0,20	25,17 ± 0,30	24,84 ± 0,15	24,74 ± 0,20
φ (HIII)=10vol.%	23,75 ± 0,20	23,57 ± 0,26	23,86 ± 0,09	23,20 ± 0,17	23,89 ± 0,15	23,80 ± 0,21
φ (HIII)=20vol.%	20,65 ± 0,14	20,52 ± 0,04	20,62 ± 0,23	20,58 ± 0,20	20,65 ± 0,22	20,70 ± 0,13
φ (HIII)=30vol.%	17,98 ± 0,16	18,15 ± 0,22	18,05 ± 0,21	18,05 ± 0,03	18,33 ± 0,11	18,30 ± 0,07
φ (HIII)=40vol.%	15,86 ± 0,22	15,89 ± 0,15	16,03 ± 0,23	16,12 ± 0,21	16,18 ± 0,20	16,01 ± 0,19
φ (HIII)=50vol.%	13,51 ± 0,25	14,32 ± 0,15	14,36 ± 0,19	14,22 ± 0,17	14,47 ± 0,17	14,24 ± 0,16

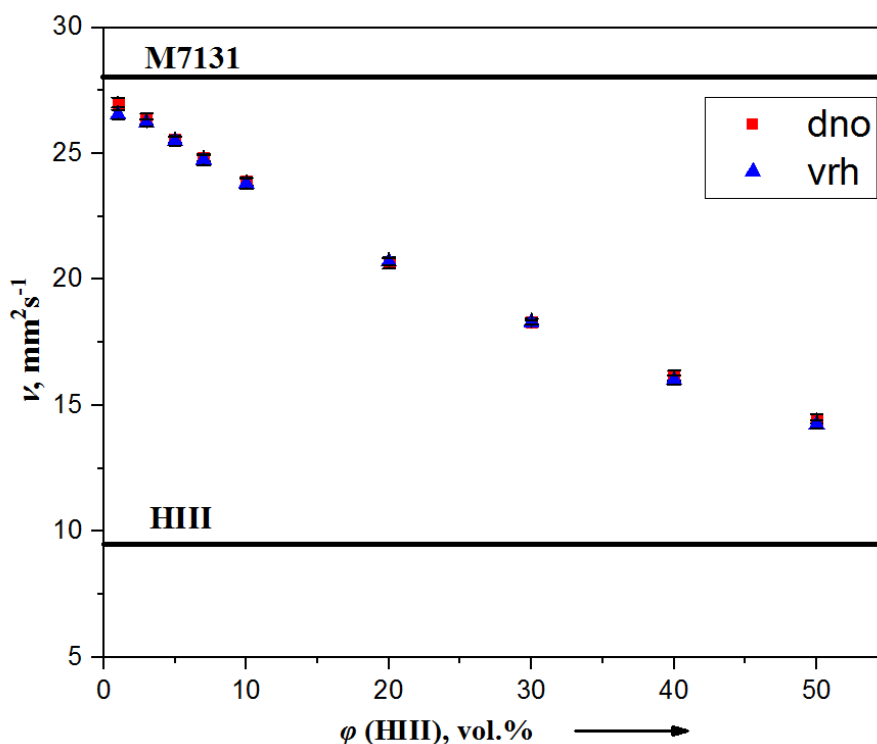
Viskoznost je jedan od ključnih parametara kod određivanja svojstava hlađenja izolacijskih ulja. Viskoznost je otpor prema tečenju. Što je niža viskoznost ulja, ulje lakše cirkulira i bolje prenosi toplinu, tj. dolazi do poboljšanja hidrodinamičkih uvjeta. Za transformatorska ulja je važno da zadržavaju dobra svojstva tečenja i kod niskih temperatura. Na Slici 4.1.1., Slici 4.1.2. i Slici 4.1.3. prikazane su vrijednosti kinematičke viskoznosti pripremljenih mješavina s vrha i dna lijevka nakon 4, 10 i 30 dana.



Slika 4.1.1. Ovisnost kinematičke vrijednosti pripremljenih mješavina s vrha i dna lijevka nakon 4 dana



Slika 4.1.2. Ovisnost kinematičke vrijednosti pripremljenih mješavina s vrha i dna lijevka nakon 10 dana



Slika 4.1.3. Ovisnost kinematičke vrijednosti pripremljenih mješavina s vrha i dna lijevka nakon 30 dana

Poznato je da mineralno ulje ima najnižu viskoznost u odnosu na ostale alternativne izolacijske tekućine. Prema ISO 3140, maksimalna dopuštena vrijednost za viskoznost mineralnog ulja pri 40 °C je 12 mm² s⁻¹, dok se za sintetsko estersko ulje ona se može kretati do 35 mm² s⁻¹. U ovom radu, izmjerena viskoznost pri 40 °C čistog HIII trafo ulja iznosi 9,23 mm² s⁻¹, a čistog M7131 27,84 mm² s⁻¹. Kod pripremljenih mješavina, povećanjem volumnog udjela mineralnog ulja u mješavini, vidljiv je pad viskoznosti sa oko 27 mm² s⁻¹ na oko 14 mm² s⁻¹ što znači da je došlo do poboljšanja svojstva tečenja što doprinosi hidrodinamičkih uvjetima u transformatoru.

U realnom pogonu kod izraženih termičkih i električkih naprezanja izolacije, slaba svojstva tečenja ulja mogu izazvati ozbiljna oštećenja i kvar transformatora zbog slabog prijenosa topline. Transformatorsko ulje mora imati nisku viskoznost koja mu omogućuje dobru cirkulaciju i prijenos topline. Kinematička viskoznost sintetskog estera je oko 3 puta viša od mineralnih ulja što je nepovoljno, i treba uzeti u obzir kod izvedbe sustava hlađenja transformatora. Visoka viskoznost može uzrokovati povećanje radne temperature u transformatoru i veće gubitke što rezultira bržim starenjem ulja. Izvedbom sustava hlađenja

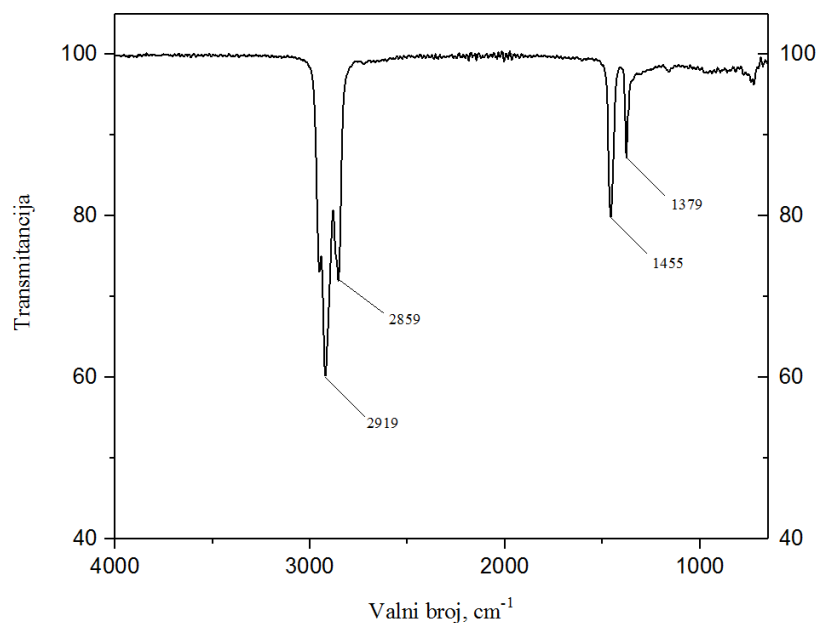
transformatora, određenim preinakama u transformatoru, može se poboljšati svojstvo hlađenja izolacijskih tekućina s visokom viskoznošću.

Praksa je pokazala da su mineralna ulja najbolji izbor kod standardne radne temperature transformatora (do 100 °C) jer imaju dobro svojstvo hlađenja zbog niske viskoznosti te dugi životni vijek zbog dobre oksidacijske stabilnosti. Esterske izolacijske tekućine se primjenjuju kod transformatora s višom radnom temperaturom, gdje su povećani zahtjevi za višom točkom zapaljenja. Sintetski organski esteri zbog svojih iznimnih svojstava koriste se kao rashladni mediji u transformatorima čije su radne temperature puno više od transformatora čiji su rashladni mediji mineralna ulja.^[46]

Iz svega navedenog, može se zaključiti kako se sve pripravljene mješavine mineralnog i esterskog ulja mogu koristiti u transformatorima, ali pri tome treba voditi računa kod izvedbe sustava zagrijavanja, odnosno hlađenja. Neznatne razlike u izmjerenim viskoznostima s vrha i dna graduiranog lijevka, odnosno manja odstupanja, upućuju na to da se radi o homogenim mješavinama.

4.2. Infracrvena spektroskopija

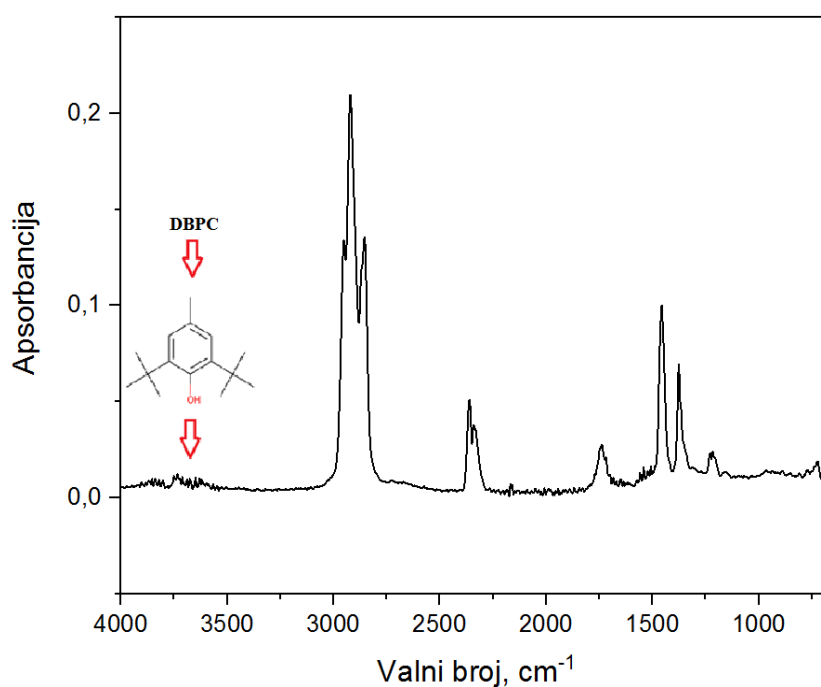
Infracrvena spektroskopija je vrlo učinkovita metoda kojom se identificiraju sastavnice uzorka analizom apsorpcijskih ili emisijskih spektara infracrvenoga zračenja. S namjerom da se utvrde razlike u strukturi izolacijskog ulja, snimljeni su FTIR spektrogrami.



Slika 4.2.1. Prikaz infracrvenih spektara za HIII

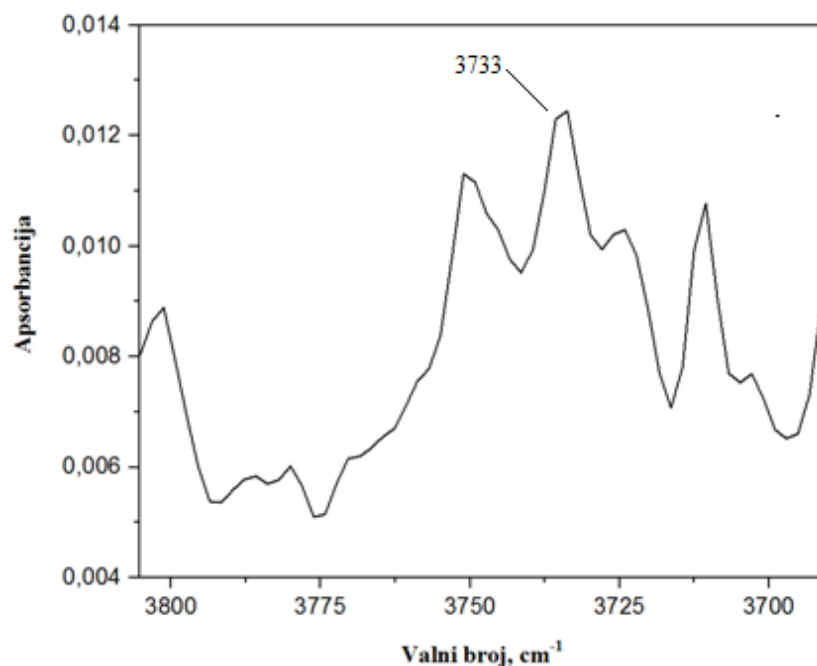
Iz FTIR spektra za čisti uzorak HIII koji je prikazan na Slici 4.2.1. vidljive su dvije intenzivne vrpce u području $2859 - 2919 \text{ cm}^{-1}$ koje su karakteristične za vibracije CH_2 i CH_3 grupe. Također, vidljive su i na 1455 cm^{-1} i 1379 cm^{-1} za CH_3 , te na oko 720 cm^{-1} za CH_2 .

Budući da je HIII inhibirano mineralno ulje, na oko 3700 cm^{-1} očekivan je signal koji odgovara inhibitoru 2,6-ditercijarbutil-para-krezol, DBPC ili butiliranihidroksitoluen, BHT.^[47] Kako navedeni signal nije uočen na infracrvenom spektru za HIII (Slika 4.2.1), mjerjenje je ponovljeno na drugom spektrometru s ATR modulom u području valnih duljina od 4000 cm^{-1} do 650 cm^{-1} . Uzorak je špatulom nanesen na dijamantni kristal, snimljen je 4 puta, uz rezoluciju 4 cm^{-1} . Ponovljeni FTIR spektar HIII uzorka prikazan je na Slici 4.2.2.



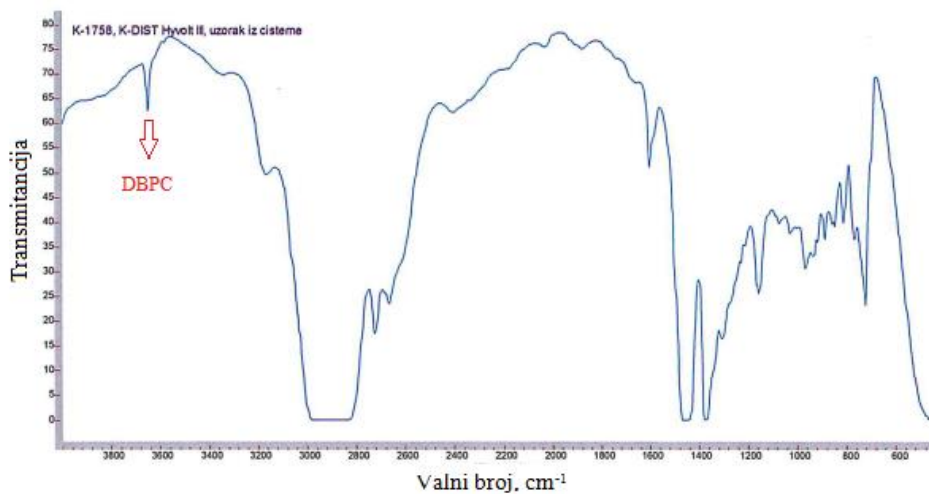
Slika 4.2.2. Prikaz infracrvenih spektara za HIII

Na Slici 4.2.3. prikazan je uvećani pik za kojeg se pretpostavlja da se odnosi na inhibitor DBPC, a nalazi se na 3733 cm^{-1} .



Slika 4.2.3. Prikaz uvećanog pika inhibitora DBPC

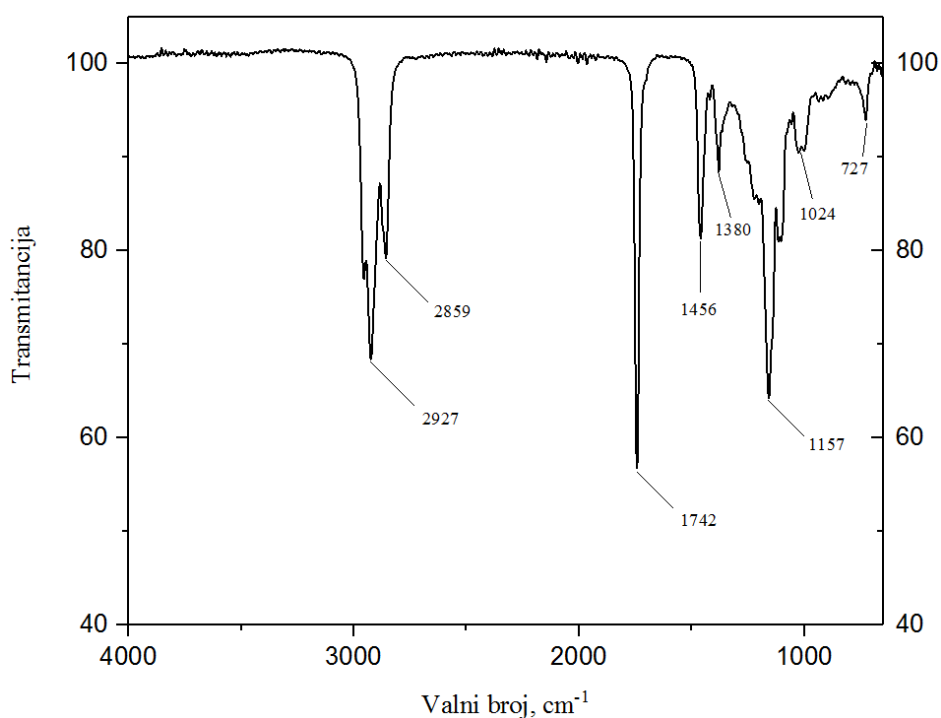
Na Slici 4.2.4. prikazani su infracrveni spektri za jedan uzorak HIII iz cisterne. Ispitivanje je provedeno u Končar – Institutu za elektrotehniku d.d. 2016. godine, prema IEC 60666 normi, na FTIR spektrometru Varian 640-IR. Rezultati su pokazali kako je uzorak sadržavao 0,38 mas. % inhibitora DBPC, a njegova vrpca detektirana je na oko 3680 cm⁻¹. [48]



Slika 4.2.4. Prikaz infracrvenih spektara za HIII uzorak iz cisterne

Iz FTIR spektra za čisti uzorak sintetskog esterskog ulja M7131 koji je prikazan na Slici 4.2.5. vidljive su vrpce karakteristične za estere.

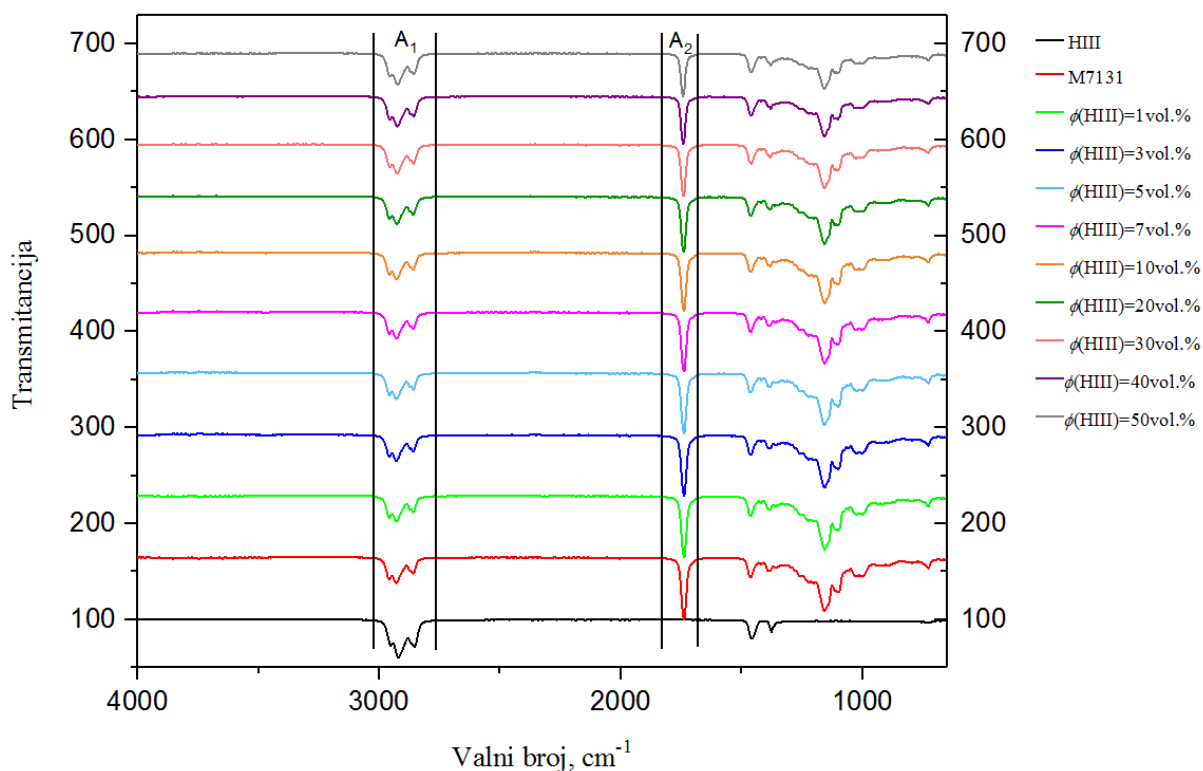
Najintenzivnija vrpca u spektru potječe od C=O skupine (karbonilna skupina), a nalazi se na 1742 cm^{-1} . Druga vrpca, na 1157 cm^{-1} potječe od asimetričnog istežanja C-C i C-O veze uz karbonilni C atom. Vrpca na 1024 cm^{-1} posljedica je vibracija esterskog kisika. Vibracijske vrpce koje se javljaju u području između 3000 cm^{-1} i 2800 cm^{-1} tipične su za CH_2 i CH_3 grupe. Također, vidljive su na 1456 cm^{-1} i 1380 cm^{-1} za CH_3 , te na 727 cm^{-1} za CH_2 .



Slika 4.2.5. Prikaz infracrvenih spektara za M7131

Na Slici 4.2.6. nalaze se FTIR spektri svih ispitivanih uzoraka prikazani na istom grafu. Kako bi se kvantitativno odredio udio HIII određene su površine najintenzivnijih vrpce koje se odnose na esterska ulja i vrpce koje se odnose na ugljikovodike od kojih se sastoji i mineralno i estersko ulje. Integracija površine A_1 obuhvaćala je područje od $2775 - 3070\text{ cm}^{-1}$, a površina A_2 od $1619 - 1861\text{ cm}^{-1}$. Integrirana površina A_1 odnosi se na vibracije CH_2 i CH_3 grupe prisutnih u ugljikovodicima i sintetskim esterima, dok se površina A_2 odnosi na

karbonilnu skupinu prisutnu u esterima. Rezultati integriranih površina dani su u Tablici 4.2.1.



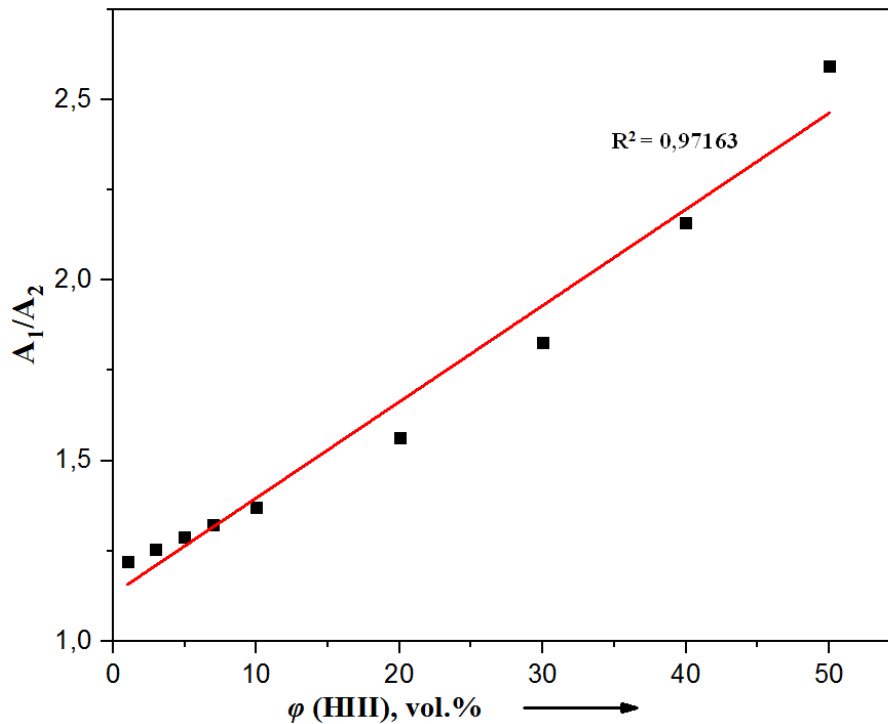
Slika 4.2.6. Prikaz infracrvenih spektara za čiste uzorke HIII i M7131 te za smjese različitih udjela HIII i M7131

Najveća vrijednost za integriranu površinu A₁ dobivena je za čisti uzorak HIII, a najmanja za čisti uzorak M7131. Obratno tome, za površinu A₂ najveća vrijednost integrirane površine dobivena je kod čistog uzorka M7131, a najmanja za uzorak HIII. Dobiveni rezultati su očekivani, budući da je, kako je već spomenuto, površina A₁ vezana uz vibracije CH₂ i CH₃ grupa prisutnih u ugljikovodicima i sintetskim esterima, a površina A₂ isključivo za estere. Također, vezano uz navedeno, vidljivo je kako povećanjem udjela mineralnog ulja HIII u smjesi dolazi do povećanja površine A₁, a smanjenja vrijednosti integrirane površine A₂. Odnos površina A₁/A₂ se povećava s povišenjem udjela mineralnog ulja u smjesama.

Tablica 4.2.1. Prikaz integriranih površina karakterističnih za mineralno i estersko ulje

Uzorak	A ₁	A ₂	A ₁ /A ₂
HIII	3711,4905	-	-
M7131	2369,2248	1949,4707	1,215
φ (HIII) = 1 vol. %	2383,4044	1954,8129	1,219
φ (HIII) = 3 vol. %	2403,5969	1916,5194	1,254
φ (HIII) = 5 vol. %	2432,6452	1887,7437	1,289
φ (HIII) = 7 vol. %	2452,6157	1854,8396	1,322
φ (HIII) = 10 vol. %	2492,7908	1821,4287	1,369
φ (HIII) = 20 vol. %	2634,9270	1684,7226	1,564
φ (HIII) = 30 vol. %	2774,7496	1518,2717	1,828
φ (HIII) = 40 vol. %	2918,3066	1352,0403	2,158
φ (HIII) = 50 vol. %	3053,5421	1178,2567	2,592

Na temelju FTIR metode moguće je iz omjera površina signala A₁ i A₂ kvantitativno odrediti pojedine volumne udjele mineralnog ulja u smjesi. Kako bi se to utvrdilo, prikazana je ovisnost omjera površina A₁/A₂ o volumnom udjelu mineralnog ulja u smjesi, pri čemu je dobiven kvadrat odstupanja $R^2 = 0,97163$ i jednadžba pravca $y = 0,02665x + 1,13015$. Dobiveni baždarni pravac prikazan je na Slici 4.2.7. Za što točnije određivanje volumnog udjela mineralnog ulja u esterskom poželjno je da R^2 bude što bliže vrijednosti 1.



Slika 4.2.7. Ovisnost omjera površina A_1/A_2 o volumnom udjelu HIII u smjesi

4.3. Toplinska vodljivost

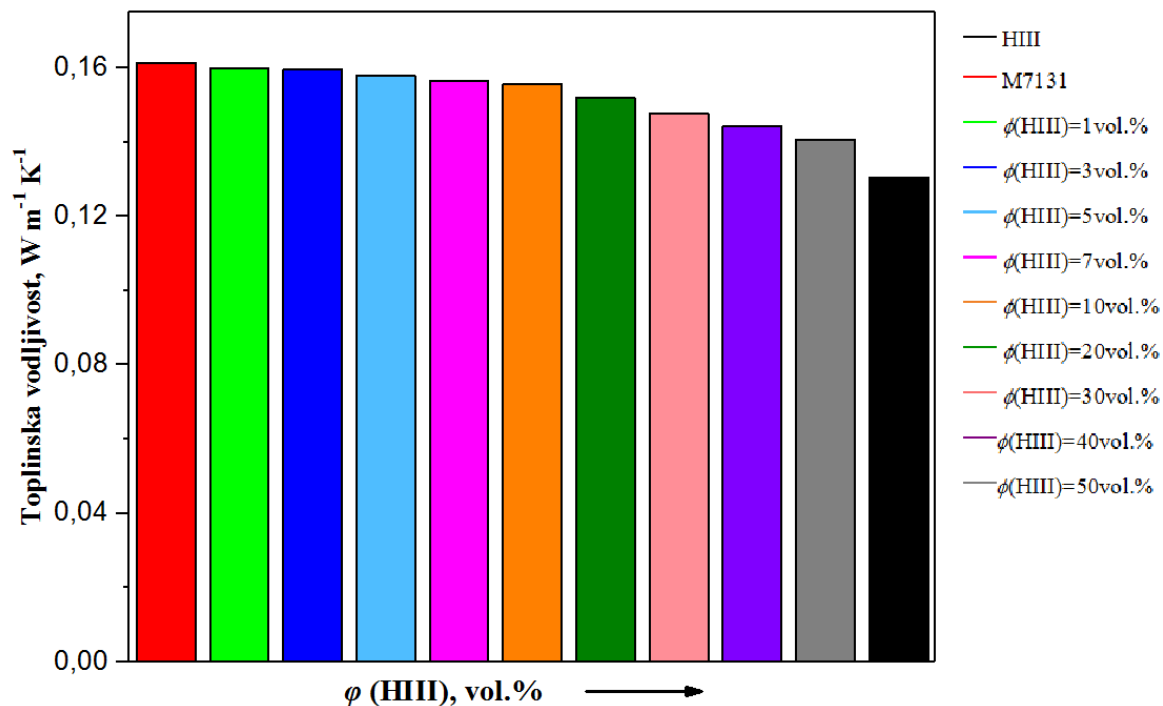
Toplinska vodljivost je fizikalna veličina koja opisuje kako toplina prolazi kroz tvari. Mijenja se u širokom rasponu ovisno od materijala koji dobro vode toplinu (metali od 8 do preko 400 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) do onih koji je vode veoma loše (nemetali od 0,004 do 3 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$). Općenito, vrijedi pravilo da su dobri vodiči električne struje ujedno i dobri vodiči topline. Toplinska vodljivost je funkcija temperature, pa je uz svaku njenu vrijednost potrebno navesti i temperaturu na koju se ta vrijednost odnosi.^[12]

Poznato je da je životni vijek transformatora ovisan o životnom vijeku njegove izolacije. Transformator prilikom rada, zbog gubitaka, proizvodi i toplinu koju je potrebno odvesti. Dijelovi transformatora uronjeni su u transformatorsko ulje koje služi i kao izolator i kao medij koji na sebe preuzima proizvedenu tolinu, odnosno rashladno sredstvo. Iz tog razloga vrijednost toplinske vodljivosti transformatorskog treba biti što viša. Kruta i tekuća izolacija su podložne fizikalno-kemijskim procesima koji uzrokuju gubljenje početnih svojstva, pa se može reći da izolacija „stari“. Zbog toga se vodi računa o tome da transformatorska ulja ne sadrže nikakve čvrste materijale, kiseline i sumpor jer mu oni smanjuju izolacijska svojstva, tj. nagrizaju i razaraju izolaciju (npr. talog povećava viskoznost ulja pa samim time smanjuje njegovu sposobnost odvođenja topline).^[49]

Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti dani su u Tablici 4.3.1., a ovisnost toplinske vodljivosti o čistim uzorcima transformatorskog ulja i volumnom udjelu HIII u smjesi prikazana je na Slici 4.3.1.

Tablica 4.3.1. Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti za nekorišteno čisto mineralno trafo ulje (HIII), sintetsko estersko ulje (M7131) te njihove mješavine u različitim volumnim udjelima

NEKORIŠTENO TRANSFORMATORSKO ULJE		
Uzorak	Temperatura, °C	Toplinska vodljivost, W m⁻¹K⁻¹
HIII	26,27 ± 0,19	0,1305 ± 0,000
M7131	26,25 ± 0,21	0,1613 ± 0,000
φ (HIII) = 1 vol. %	26,19 ± 0,28	0,1598 ± 0,000
φ (HIII) = 3 vol. %	25,78 ± 0,09	0,1596 ± 0,000
φ (HIII) = 5 vol. %	25,73 ± 0,15	0,1578 ± 0,000
φ (HIII) = 7 vol. %	25,62 ± 0,23	0,1564 ± 0,000
φ (HIII) = 10 vol. %	25,90 ± 0,12	0,1555 ± 0,000
φ (HIII) = 20 vol. %	25,88 ± 0,20	0,1519 ± 0,000
φ (HIII) = 30 vol. %	26,20 ± 0,06	0,1476 ± 0,000
φ (HIII) = 40 vol. %	25,73 ± 0,09	0,1442 ± 0,000
φ (HIII) = 50 vol. %	26,19 ± 0,21	0,1406 ± 0,001



Slika 4.3.1. Prikaz ovisnosti toplinske vodljivosti o volumnim udjelima HIII u smjesi

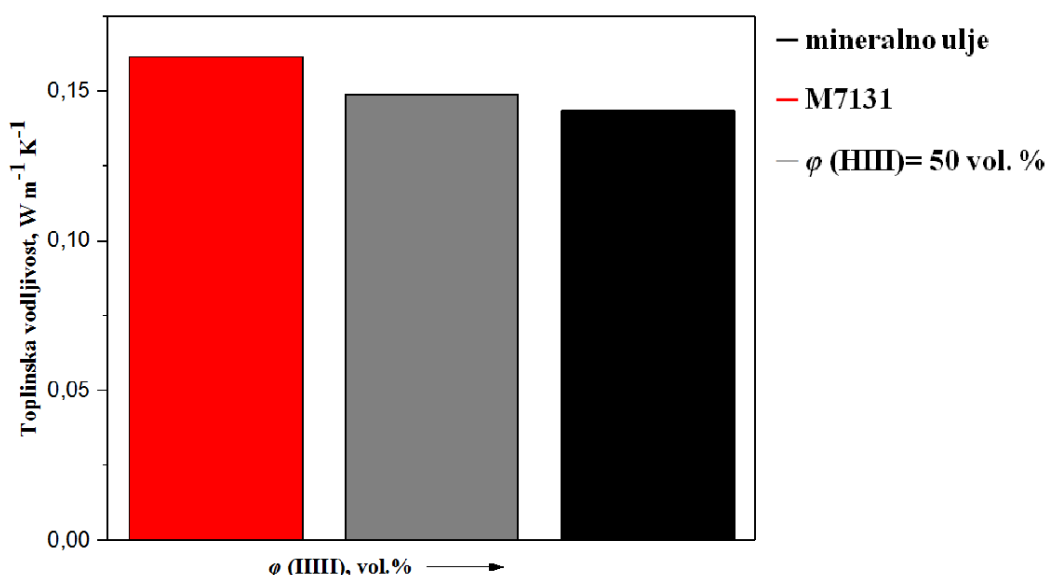
Izmjerena toplinska vodljivost za čisti uzorak trafo ulja HIII iznosi $0,1305 W m^{-1} K^{-1}$, a za čisti uzorak sintetskog esterskog ulja M7131 $0,1613 W m^{-1} K^{-1}$. Budući da je izmjerena toplinska vodljivost manja od $3 W m^{-1} K^{-1}$, obje vrste transformatorskog ulja svrstavaju se u tvari koje loše prenose toplinu. Iz dobivenih mjerenja može se zaključiti da se povećanjem volumnog udjela mineralnog ulja u smjesi smanjuje toplinska vodljivost pripremljenih mješavina. Da bi transformatorsko ulje što brže odvodilo toplinu koja se generira na vodiču, vrijednost njegove toplinske vodljivosti mora biti što viša. Dakle, u ovom slučaju, čisto estersko ulje M7131 pokazalo se kao najbolji izbor izolacijske tekućine.

Kako bi se usporedila toplinska svojstva nekorištenog i korištenog transformatorskog ulja, dodatno su ispitivani i uzorci korištenog transformatorskog ulja. Korišteni uzorci sintetskog estera M7131 uzeti su iz vlaka HŽ, a staro je 2 godine. Budući da se tad nije moglo doći do korištenog mineralnog ulja HIII jer su njime uglavnom punjeni transformatori izvan granica Republike Hrvatske, nabavljeno je mineralno ulje nepoznatog proizvođača staro 35 godina, uzeto iz transformatora koji se nalazi u Karlovcu. Mjerena je toplinska vodljivost za čisti M7131, čisto mineralno ulje i smjesu ϕ (HIII)= 50 vol %, na isti način i pri istim uvjetima kao i za nekorišteno transformatorsko ulje. Rezultati su dani u Tablici 4.3.2. i Slici 4.3.2.

Tablica 4.3.2. Rezultati mjerenja toplinske vodljivosti za korišteno mineralno i sintetsko estersko trafo ulje (M7131) te za mješavinu navedenih ulja

KORIŠTENO TRANSFORMATORSKO ULJE		
Uzorak	Temperatura, °C	Toplinska vodljivost, $W m^{-1}K^{-1}$
Mineralno ulje	$23,24 \pm 0,16$	$0,1435 \pm 0,000$
M7131	$24,61 \pm 0,17$	$0,1616 \pm 0,000$
φ (HIII) = 50 vol. %	$23,88 \pm 0,19$	$0,1487 \pm 0,000$

Vrijednosti dobivene za toplinsku vodljivost korištenog mineralnog transformatorskog ulja više su u odnosu na nekorišteno mineralno ulje HIII. Razlog tome može biti taj da su uzorci korištenog transformatorskog ulja sadržavali veći udio vode ili nekih metala u sebi, pa je samim time došlo i do povećanja njihove toplinske vodljivosti. Također, jedan od razloga može biti da su polazne vrijednosti toplinske vodljivosti za navedene uzorke bile više u odnosu na početne vrijednosti toplinske vodljivosti izmjerene u sklopu ovog rada. Vrijednost toplinske vodljivosti za sintetsko estersko ulje M7131, koje je korišteno 2 godine, ostala je nepromijenjena.



Slika 4.3.2. Prikaz ovisnosti toplinske vodljivosti za mineralno ulje, M7131 i smjesu

φ (mineralno ulje)= 50 vol. %

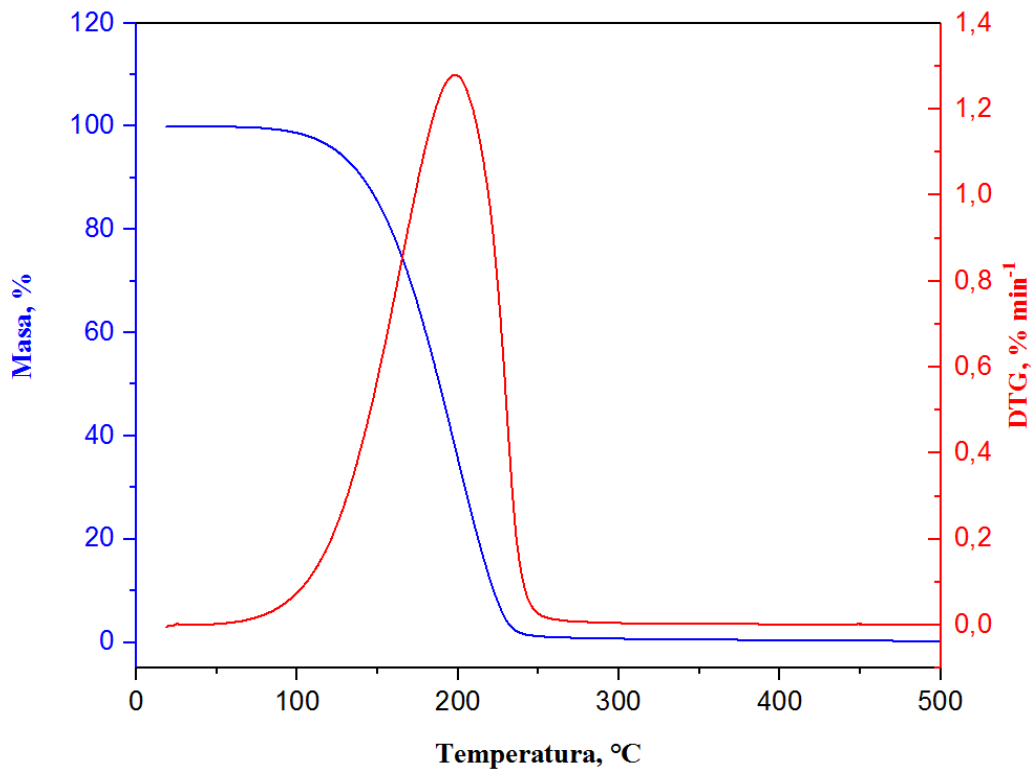
4.4. Termogravimetrijska analiza

Rezultati neizotermne termogravimetrijske analize su termogravimetrijska (TG) krivulja i derivirana termogravimetrijska (DTG) krivulja. TG krivulja predstavlja promjenu mase uzorka u ovisnosti o temperaturi, a DTG krivulja predstavlja brzinu promjene mase uzorka s temperaturom. Toplinska razgradnja može se odvijati u jednom ili više razgradnih stupnjeva što se na TG krivulji uočava kao promjena mase, a na DTG krivulji u obliku jednog ili više pikova. Ako je uzorak u određenom temperaturnom području toplinski stabilan neće pokazivati promjenu mase na TGA krivulji. Također daje informaciju koja je gornja temperaturna granica za primjenu ispitivanog materijala. Uz pomoć TGA mogu se vidjeti i različiti fizikalni i kemijski procesi koji se događaju unutar materijala tijekom zagrijavanja/hlađenja (npr. kao što su adsorpcija, apsorpcija, sušenje, raspadanje, oksidacija itd.).

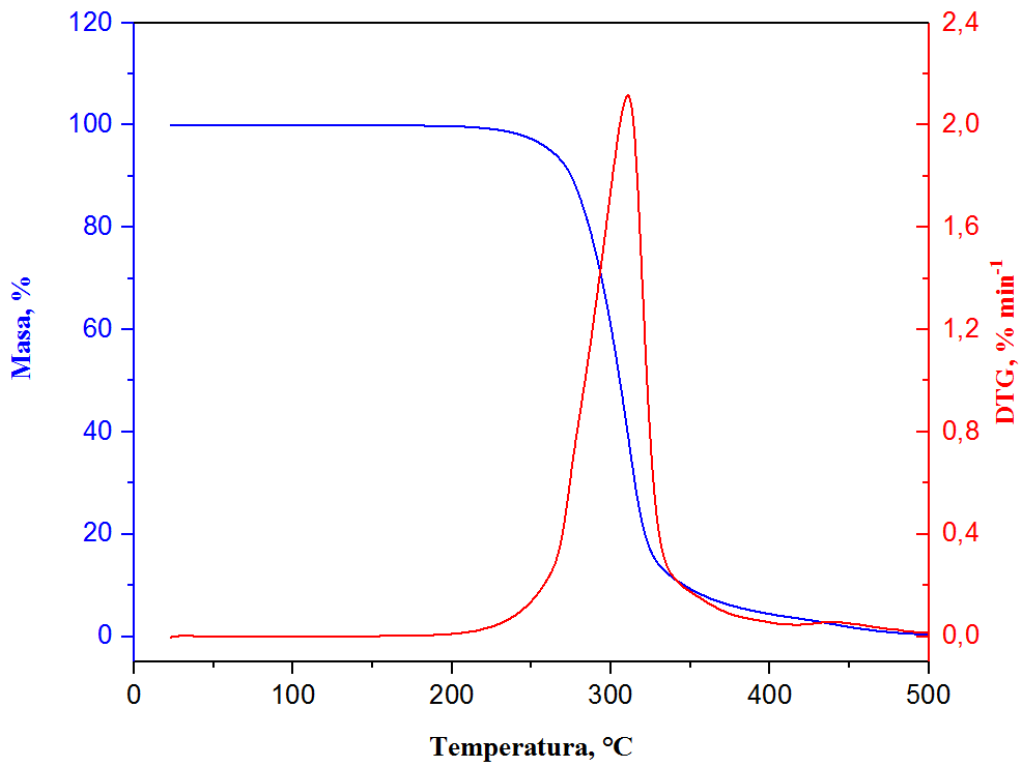
Termogravimetrijskom analizom ispitivala se toplinska stabilnost čistog HIII i M7131 te pripremljenih mješavina prateći promjenu mase uzorka s temperaturom. U Tablici 4.4.1. prikazani su eksperimentalni podaci dobiveni iz termograma.

Na Slici 4.4.1. prikazana je dobivena termogravimetrijska krivulja koja se odnosi na mineralno ulje HIII, a na Slici 4.4.2 za sintetski ester M7131. Iz provedene termogravimetrijske analize vidljivo je da je početak razgradnje čistog HIII na 125,7 °C, a M7131 na 262,6 °C, što ukazuje na bolju toplinsku stabilnost M7131. Početak razgradnje kod ostalih mješavina kreće se od 255,5 °C do 137,1 °C, što znači da one imaju bolju toplinsku postojanost u odnosu na čisti HIII, a lošiju od čistog M7131. Iz tog razloga se HIII upotrebljava u transformatorima gdje su radne temperature do 100 °C, a M7131 tamo gdje su potrebne više radne temperature.

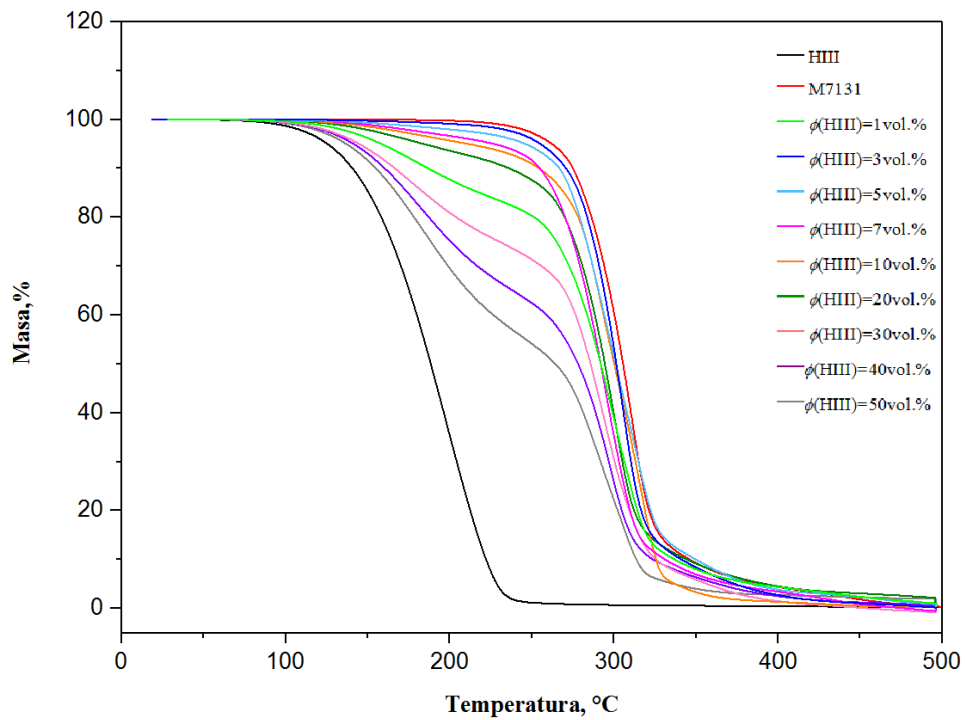
Termogravimetrijske i derivirane termogravimetrijske krivulje, čistog HIII i M7131 uzorka, pokazuju po jedan temperaturni interval gubitka mase, dok ostale mješavine pokazuju dva ili više stupnjeva gubitka mase, pri čemu se prvi stupanj odnosi na HIII, a ostali na M7131 (Slika 4.4.3. i Slika 4.4.4.).



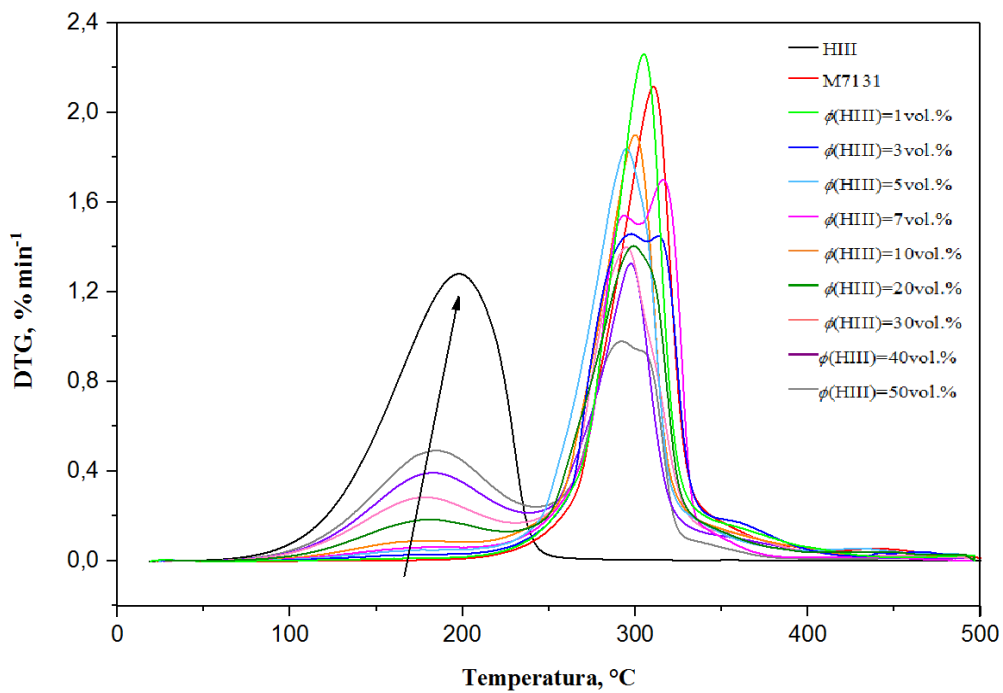
Slika 4.4.1. Termogravimetrijska krivulja za HIII



Slika 4.4.2. Termogravimetrijska krivulja za M7131



Slika 4.4.3. Termogravimetrijske krivulje za čiste uzorke HIII i M7131, te za smjese različitih udjela HIII i M7131



Slika 4.4.4. DTG krivulje čiste uzorke HIII i M7131, te za smjese različitih udjela HIII i M7131

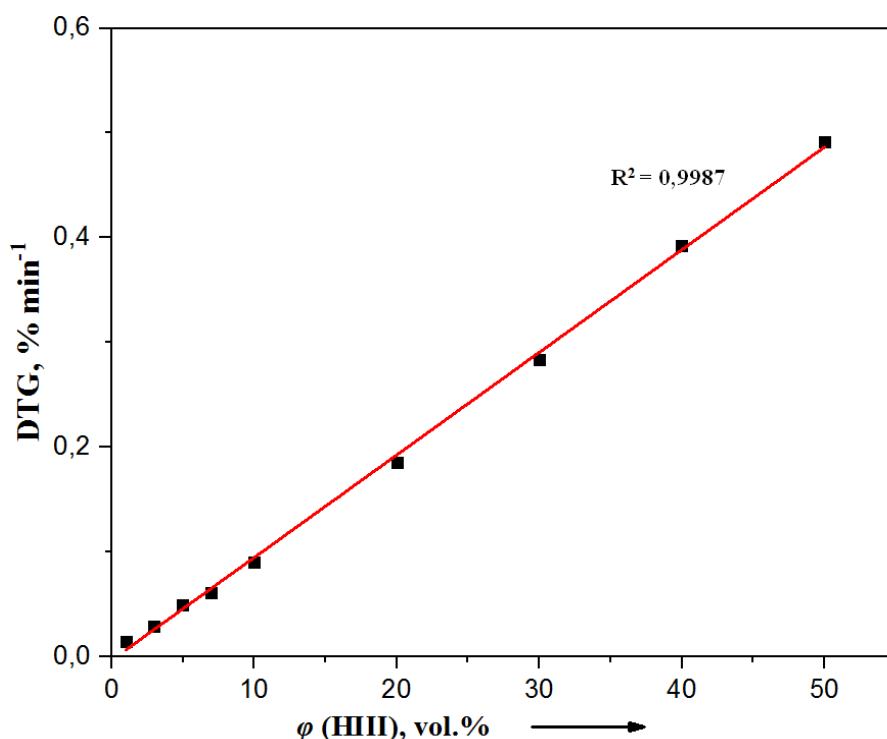
Tablica 4.4.1. Eksperimentalni podaci dobiveni preko termograma

NEKORIŠTENO TRANSFORMATORSKO ULJE					
Uzorak	$T_{95\%}, ^\circ\text{C}$	$T_{50\%}, ^\circ\text{C}$	$T^1_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$T^2_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	% _R
HIII	125,7	188,4	198,2	-	0,22
M7131	262,6	305,6	311,1	-	0,05
φ (HIII)=1 vol.%,	255,5	301,5	304,9	-	0,15
φ (HIII)=3 vol.%,	246,1	301,0	298,0	-	0,85
φ (HIII)=5 vol.%,	227,3	292,0	294,7	-	-0,54
φ (HIII)=7 vol.%,	211,4	300,2	293,2	316,2	0,22
φ (HIII)=10 vol.%,	184,1	294,5	177,3	299,7	2,14
φ (HIII)=20 vol.%,	158,5	292,0	179,2	299,0	1,01
φ (HIII)=30 vol.%,	145,0	285,8	177,7	295,5	-0,75
φ (HIII)=40 vol.%,	141,5	278,2	182,7	297,4	0,66
φ (HIII)=50 vol.%,	137,1	264,3	185,6	291,2	1,99

Pod utjecajem termičkih, električnih i mehaničkih naprezanja u izolaciji nastaju plinovi kao produkt degradacije izolacije. Povećana količina plinova u ulju često je prva indikacija greške koja bi s vremenom mogla dovesti do kvara. Mineralno izolacijsko ulje sastoji se od smjese ugljikovodika različite strukture uz minimalne količine drugih organskih spojeva. Do cijepanja veza C-H i C-C može doći uslijed električnih ili termičkih naprezanja. Stvaraju se male nestabilne molekule u obliku radikala ili iona (H° , CH_3° , CH_2° , CH° , C°) koji se brzo rekombiniraju u molekule plina, kao što su vodik (H-H), metan (CH_4), etan (C_2H_6), etilen (C_2H_4), ili acetilen (C_2H_2). Vodik i metan se stvaraju pri nižim temperaturama (na oko 200°C), etan i etilen nastaju pri 350°C , a acetilen tek iznad 750°C . Nastali plinovi se otapaju u ulju ili se izdvajaju kao slobodni plinovi i mogu se analizirati s metodom plinske kromatografije. ^{[2] [50] [51]}

Termogravimetrijskom analizom omogućeno je kvantitativno određivanje udjela mineralnog ulja u sintetskom esteru na sljedeći način. Iz deriviranih termogravimetrijskih krivulja, za svaku smjesu je očitana vrijednost prvog maksimuma na krivulji koji se odnosi na raspad mineralnog ulja, te prikazana u ovisnosti o pojedinom volumnom udjelu mineralnog ulja.

Baždarni pravac prikazan je na Slici 4.4.5. Dobiven je kvadrat odstupanja $R^2 = 0,9987$ i jednačina pravca $y = 0,0098x - 0,00353$. Ovaj R^2 je nešto viši u odnosu na R^2 dobiven infracrvenom spektroskopijom što znači da se termogravimetrijska analiza pokazala kao točnija metoda za kvantitativno određivanje udjela mineralnog ulja u smjesi. Dakle, utvrđeno je da se TGA metodom može jednostavno odrediti sastav mješavine mineralnog transformatorskog ulja i sintetskog estera.



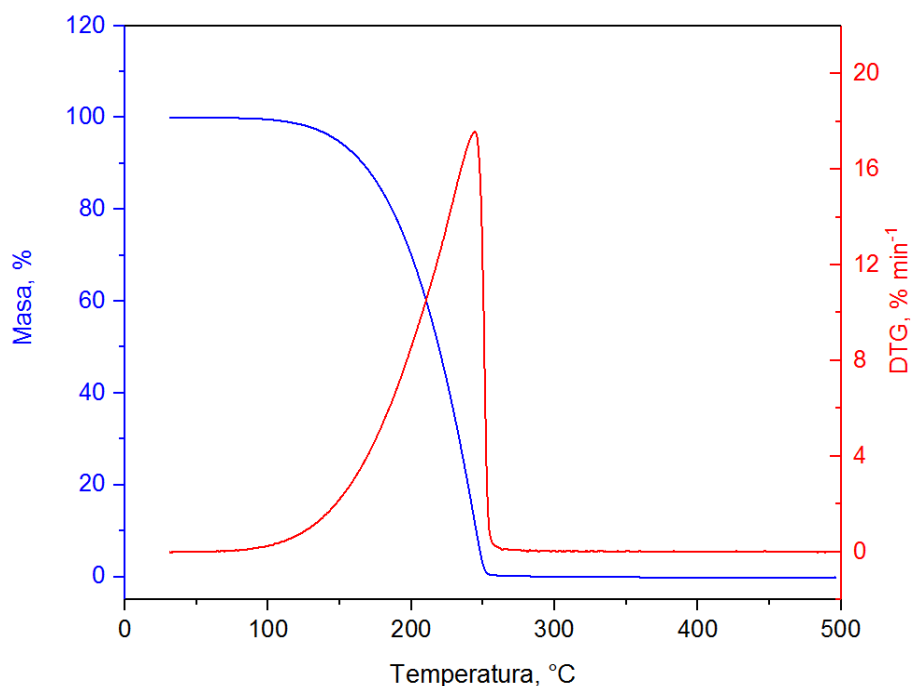
Slika 4.4.5. Ovisnost DTG o volumnom udjelu HIII u smjesi

Kako bi se usporedila toplinska stabilnost nekorištenog i korištenog transformatorskog ulja, dodatno su ispitivani i uzorci korištenog transformatorskog ulja. Ispitivani su isti uzorci opisani u radu kod toplinske vodljivoste. Eksperimentalni podaci dobiveni preko termograma za korišteno ulje dani su u Tablici 4.4.2.

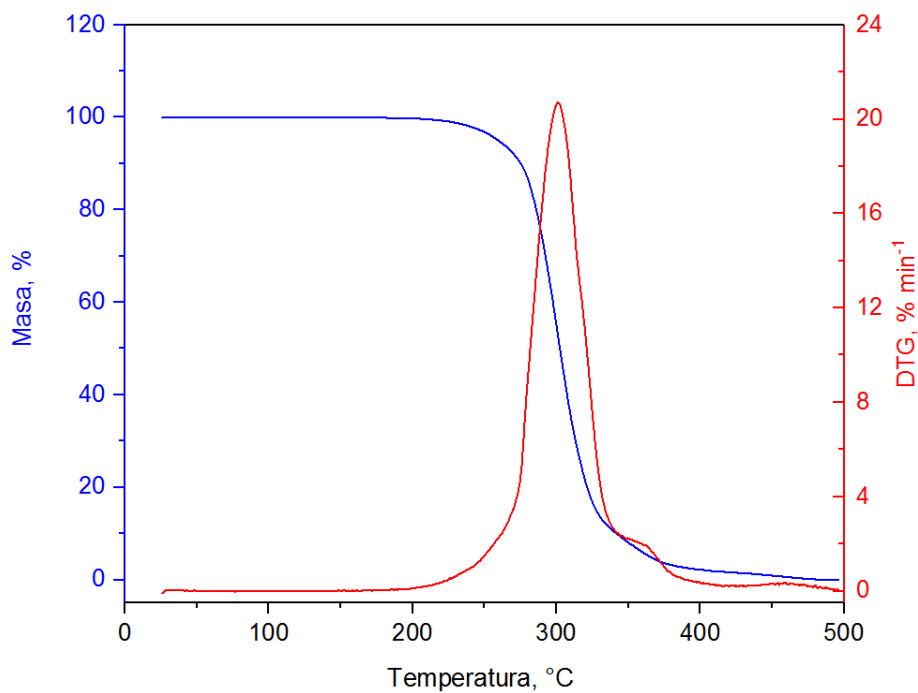
Tablica 4.4.2. Eksperimentalni podaci dobiveni preko termograma za korišteno ulje

KORIŠTENO TRANSFORMATORSKO ULJE					
Uzorak	$T_{95\%}, ^\circ\text{C}$	$T_{50\%}, ^\circ\text{C}$	$T_{\max}^1, ^\circ\text{C}$	$T_{\max}^2, ^\circ\text{C}$	$\%R$
Mineralno ulje	148,5	219,1	244,4	-	-0,2974
M7131	259,8	302,4	301,0	392,8	-0,1085

Na Slici 4.4.6. prikazana je dobivena termogravimetrijska krivulja koja se odnosi na korišteno mineralno ulje nepoznatog proizvođača, a na Slici 4.4.7. za korišteni sintetski ester M7131. Termogravimetrijske i derivirane termogravimetrijske krivulje, korištenog mineralnog ulja i M7131, pokazuju po jedan temperaturni interval gubitka mase. Iz provedene termogravimetrijske analize vidljiv je početak razgradnje mineralnog ulja na 148,5 °C, a M7131 na 259,8 °C, što ukazuje na bolju toplinsku stabilnost M7131. Uspoređujući dobivene rezultate za korišteno ulje (Tablica 4.4.2.) s rezultatima dobivenim za nekorišteno ulje (Tablica 4.4.1.) može se zaključiti kako je kod korištenog sintetskog estera došlo do slabljenja toplinskih svojstava u odnosu na nekorišteni sintetski ester. Naime, vidljiv je pomak početka razgradnje sa 262,5° C na 259,8 ° C. Suprotno tome, rezultati za korišteno mineralno ulje nepoznatog proizvođača pokazuju bolju toplinsku postojanost u odnosu na nekorišteno mineralno ulje HIII. Dobiveni rezultat je indikativan, budući da se radi o uzorku ulja nepoznatog porijekla i nepoznatih radnih uvjeta.



Slika 4.4.6. Termogravimetrijska krivulja za korišteno mineralno ulje



Slika 4.4.7. Termogravimetrijska krivulja za korišteni sintetski ester M7131

Pod utjecajem termičkih naprezanja, osim vodika, metana, etana, etilena i acetilena mogu nastati i drugi spojevi. Degradacija celuloze ubrzava se istovremenim djelovanjem temperature, kisika i vlage. Degradacijom nastaju ugljični monoksid, ugljični dioksid, voda i manja količina ugljikovodičnih plinova i furana . Količine CO i CO₂ rastu s temperaturom, ali i sa količinom kisika prisutnom u ulju i količinom vlage u papiru.^[50]

Mjerenja provedena u laboratoriju Ulazne kontrole tvornice Končar-Distributivnih i specijalnih transformatora

Bitna primjenska svojstva transformatorskih ulja su: visok probojni napon, visok električni otpor, niski dielektrični gubici, otpornost prema oksidaciji i degradaciji pod utjecajem električnog i toplinskog naprezanja, dobra toplinska vodljivost, odgovarajuća viskoznost u području radnih temperatura, dobra apsorpcija plinova i teška zapaljivost.

Praćenje i održavanje kvalitete ulja u transformatorima je veoma važno za pouzdan rad i životni vijek transformatora. Vijek korištenja dobrog transformatorskog ulja treba se poklapati s vijekom korištenja samog transformatora (30-40 godina). U toku rada transformatora događa se niz procesa koji mogu utjecati na pogoršanje kvalitete ulja i ukupnog izolacijskog sustava transformatora. Redovnim ispitivanjem fizikalno kemijskih i dielektričnih svojstava ulja može se preventivno intervenirati u slučaju promjene neke od karakteristika ulja.

Na fizikalne, kemijske i električne karakteristike ulja pored kvaliteta samog ulja utječe i niz drugih faktora koji mijenjaju stanje i kvalitetu ne samo ulja, već i ukupnog izolacijskog sustava transformatora. To su na prvom mjestu radni uvjeti transformatora (temperatura ulja i namota, nazivni napon i snaga transformatora, uvjeti pogona transformatora, električna polja i pojave u vezi sa njima (parcijalna pražnjenja, električni luk), ali i vanjski utjecaji (atmosferska vlaga i kisik iz zraka), nečistoće zaostale u transformatoru ili nastale uslijed prisutnog kvara (plinovi, čestice ugljika, metala, vlakana celuloze i dr.), te katalitičko djelovanje konstrukcijskih metala (bakra, željeza, aluminijska) i mnogi drugi.

Starenjem se ulje kemijski postepeno degradira pod utjecajem kisika, vlage te temperature stvarajući produkte oksidacije (kiselina, talog) i uz potrošnju inhibitora oksidacije. Za siguran rad transformatora neophodno je pratiti stanje izolacijskog sustava redovitim periodičkim ispitivanjima ulja, koja mogu biti rutinska (sadržaj vode, probojni napon, sadržaj kiselina, sadržaj inhibitora, tan delta, spec. otpor) te po potrebi i proširena u skladu s IEC 60422 normom, kao i kromatografska ispitivanja otopljenih plinova.

Dobro izolacijsko ulje mora imati između ostalog visok probojni napon. Probajni napon transformatorskog ulja je sposobnost odupiranja električnom stresu u transformatoru. Vrijednost probajnog napona ovisi o vrsti tvari, prisutnim česticama, vodi te otopljenom zraku u ulju. Prije punjenja transformatora uljem, ulje se obrađuje (filtrira, vakuumira i suši).

Obradom ulja smanjuje se količina prisutnih čestica, sadržaj vode te otopljeni zrak i na taj način poveća se probojni napon ulja.

4.5. Probojni napon

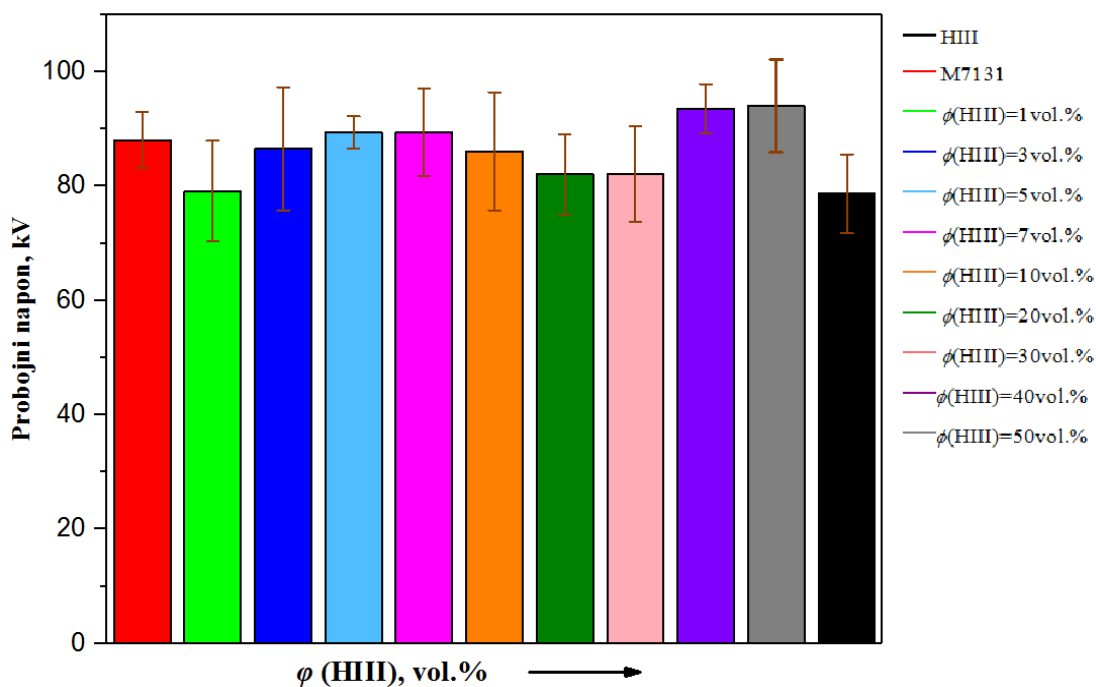
Ispitivani su čisti uzorci mineralnog ulja, HIII i sintetskog estera, M7131 te mješavine različitih volumnih omjera mineralnog i esterskog ulja. Mješavine ulja najprije su ispitivane odmah nakon njihove pripreme, a dobiveni rezultati probojnog napona nisu zadovoljavali normu IEC 60156 (vrijednosti probojnih napona pripremljenih mješavina bile su u rasponu od 40 do 60 kV). Iz tog razloga ponovljeno je ispitivanje s novim mješavinama gdje su prije ispitivanja uzorci miješani 3 sata na magnetskoj mješalici. Ispitivan je prvo uzorak koji sadrži 50 vol. % mineralnog i esterskog ulja, a zatim smjese sa sve manjim udjelima mineralnog ulja. Rezultati mjerenja dani su u Tablici 4.5.1.1 i na Slici 4.5.1.

Tablica 4.5.1. Rezultati mjerenja probojnog napona i sadržaja vode čistog mineralnog trafo ulja HIII, sintetskog trafo ulja M7131 te njihovih mješavina u različitim volumnim udjelima

Uzorak	Probojni napon, kV	Sadržaj vode, mg kg ⁻¹
HIII	78,6 ± 6,9	9
M7131	88,1 ± 4,8	62
φ (HIII) = 1 vol. %	79,2 ± 8,8	130
φ (HIII) = 3 vol. %	86,6 ± 10,8	123
φ (HIII) = 5 vol. %	89,4 ± 2,9	119
φ (HIII) = 7 vol. %	89,4 ± 7,6	117
φ (HIII) = 10 vol. %	86,1 ± 10,3	116
φ (HIII) = 20 vol. %	82,0 ± 7,1	112
φ (HIII) = 30 vol. %	82,2 ± 8,4	105
φ (HIII) = 40 vol. %	93,5 ± 4,3	97
φ (HIII) = 50 vol. %	94,0 ± 8,1	85

Prema IEC 60156 normi, najniža dopuštena vrijednost probojnog napona za obrađeno mineralno transformatorsko ulje iznosi 70 kV, dok za sintetski ester ta vrijednost nije definirana, ali iskustveno je na razini ovog za mineralno ulje.

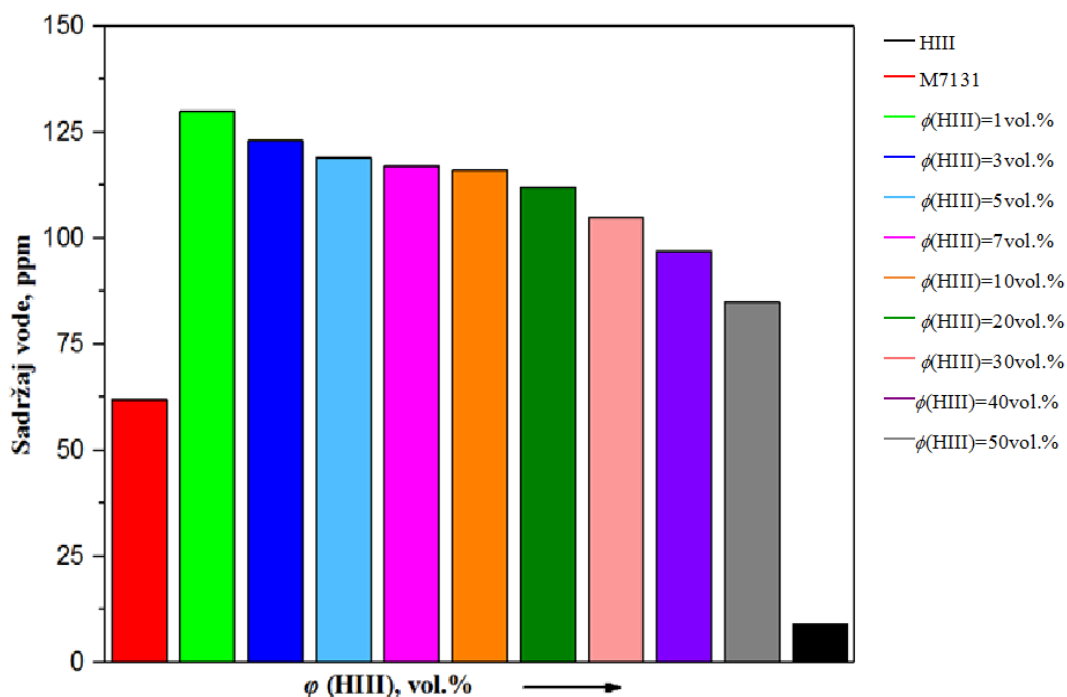
Iz Tablice 4.5.1. se može vidjeti da je iznos probojnog napona određen za čisti uzorak HIII 78,6 kV, a za M7131 88,1 kV što je vrlo dobra vrijednost za obje vrste ulja. Također, sve pripravljene mješavine različitih volumnih udjela mineralnog i esterskog ulja pokazuju viši probojni napon u odnosu na probojni napon čistog mineralnog transformatorskog ulja HIII. Kod svih smjesa probojni napon je stabilan unatoč porastu sadržaja vode (unutar cca 10 kV, što je i u granicama mjerne pogreške). Nešto viši probojni napon izmjereno je kod smjese koja sadrži po 50 vol. % mineralnog i esterskog ulja i iznosi 94,0 kV.



Slika 4.5.1. Grafički prikaz ovisnosti probojnog napona o volumnom udjelu HIII

4.6. Ispitivanje sadržaja vode

Ispitivanje sadržaja vode u trafo ulju određeno je prema normi IEC 60814 metodom Karl Fischerove titracije. U Tablici 4.5.1. su prikazane izmjerene vrijednosti sadržaja vode za čisto mineralno i estersko ulje, te za pripravljene mješavine različitih volumnih udjela pojedine vrste ulja. Na Slici 4.6.1. je prikazana ovisnost sadržaja vode o volumnim udjelima HIII u smjesi.



Slika 4.6.1. Grafički prikaz ovisnosti sadržaja vode o volumnom udjelu HIII

Dozvoljeni sadržaj vlage za sintetske estere u odnosu na mineralna ulja se značajno razlikuje. Prema IEC 60814 normi, za nekorisćena mineralna trafo ulja sadržaj vode smije iznositi do 30 ppm, a za sintetske estere do 200 ppm. Izmjerena vrijednost sadržaja vode za mineralno ulje HIII iznosi 9 ppm, dok je za sintetski ester M7131 ta vrijednost skoro 7 puta veća i iznosi 62 ppm. Kod pripremljenih mješavina različitih volumnih udjela sadržaj vode kreće se u rasponu od 130 – 85 ppm, što ne predstavlja prevelik problem budući da se transformatorska ulja prije punjenja u transformator obrađuju te na taj način uklanja neželjeni sadržaj vode. Esterska ulja su izrazito higroskopska i mogu otopiti puno veću količinu vode od mineralnih ulja. Poznato je da je sadržaj vlage usko povezan sa dielektričnim svojstvima. Dok kod mineralnog ulja čak i mali sadržaj vlage značajno narušava dielektrična i ostala svojstva, M7131 zadržava visoku dielektričnu čvrstoću (>75 kV) kod porasta vlage čak i do 550 ppm. Upravo ta odlika daje veliku prednost sintetskim esterskim uljima u odnosu na mineralna. Ukupna zasićenost vodom na 23 °C, odnosno ukupna količina vode koju izolacijska tekućina može apsorbirati, za mineralno ulje iznosi 55 ppm, a za sintetsko čak 2600 ppm. ^{[52][53]}

Dobiveni rezultati probnog napona i sadržaja vode su očekivani. Utvrđeno je kako esteri mogu apsorbirati puno veću količinu vode od mineralnog ulja. Što je veći volumni udio esterskog ulja u pripremljenim smjesama viši je i sadržaj vode, uz zadržavanje visokog probnog napona.

Također, iz dobivenih rezultata može se zaključiti da ispitivane smjese mineralnog i esterskog ulja pokazuju zadovoljavajuću međusobnu kompatibilnost dielektrika. Prednost ovih smjesa u zatvorenom sustavu (transformatoru) je ta što esteri mogu preuzeti vodu iz papirne izolacije uz zadržavanje visokog probojnog napona te na taj način osušiti papir te produžiti životni vijek papira, namota i samog transformatora.

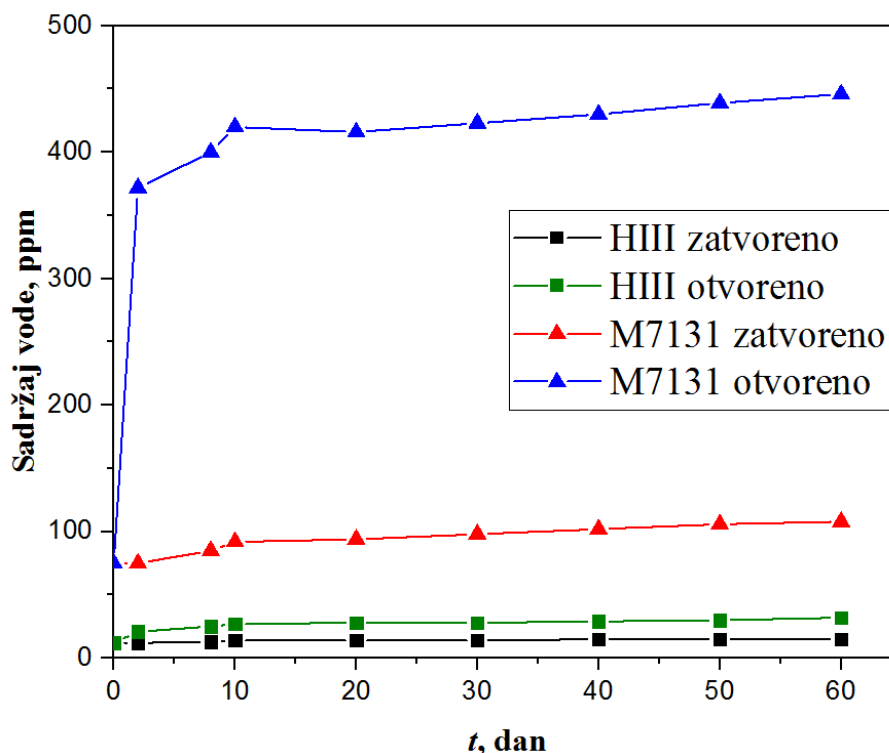
Rezultati zasićenja vodom pri sobnoj temperaturi za mineralno i sintetsko estersko ulje prikazani su u Tablici 4.6.1.

Tablica 4.6.1. Rezultati zasićenja vodom za HIII i M7131 pri sobnoj temperaturi

Period	HIII (zatvoreno)	HIII (otvoreno)	M7131 (zatvoreno)	M7131 (otvoreno)
početno	12 ppm	12 ppm	75 ppm	75 ppm
nakon 2 dana	12 ppm	21 ppm	75 ppm	372 ppm
nakon 8 dana	13 ppm	25 ppm	85 ppm	400 ppm
nakon 10 dana	14 ppm	27 ppm	92 ppm	420 ppm
nakon 20 dana	14 ppm	28 ppm	94 ppm	416 ppm
nakon 30 dana	14 ppm	28 ppm	98 ppm	423 ppm
nakon 40 dana	15 ppm	29 ppm	102 ppm	430 ppm
nakon 50 dana	15 ppm	30 ppm	106 ppm	439 ppm
nakon 60 dana	15 ppm	32 ppm	108 ppm	446 ppm

Izmjereni sadržaj vode za HIII u početnom stanju je 12 ppm, a za M7131 je 75 ppm. Nakon 2 dana sadržaj vlage u zatvorenim bocama je ostao isti, dok se u otvorenim bocama povećao, kod HIII na vrijednost 21 ppm, a kod M7131 na 372 ppm. Dobiveni rezultat jasno ukazuje na svojstvo afiniteta estera apsorpciji vlage iz zraka. Sljedećih 50-ak dana nije bilo značajnih promjena u izmjerenom sadržaju vlage. Konačni izmjereni sadržaj vlage nakon 60 dana za HIII u zatvorenoj boci iznosi 15 ppm, a za M7131 108 ppm; u otvorenoj boci za HIII sadržaj vlage povisio se na vrijednost 32 ppm, a za M7131 na 446 ppm. Grafički prikaz ovisnosti sadržaja vode o vremenu prikazan je na Slici 4.6.2.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je sadržaj vlage u otvorenim bocama veći nego u zatvorenim. Sintetski ester M7131 pokazuje sposobnog bržeg i većeg apsorpiranja vlage u odnosu na mineralno ulje HIII.



Slika 4.6.2. Ovisnost sadržaja vode o vremenu

4.7. Mjerenje faktora dielektričnog gubitka i specifičnog električnog otpora

Mjerenje faktora dielektričnog gubitka i specifičnog električnog otpora proveo se prema normi IEC 60247.

Dielektrični gubici predstavljaju gubitke energije koji se u materijalu pod utjecajem polja pretvaraju u toplinu, te povisuju temperaturu materijala. Kod istosmjernog polja gubici su zbog vodljivosti, a kod izmjeničnog polja gubicima pridonose i gubici zbog polarizacije. Gubici ovise o frekvenciji narinutog polja kod izmjenične struje.

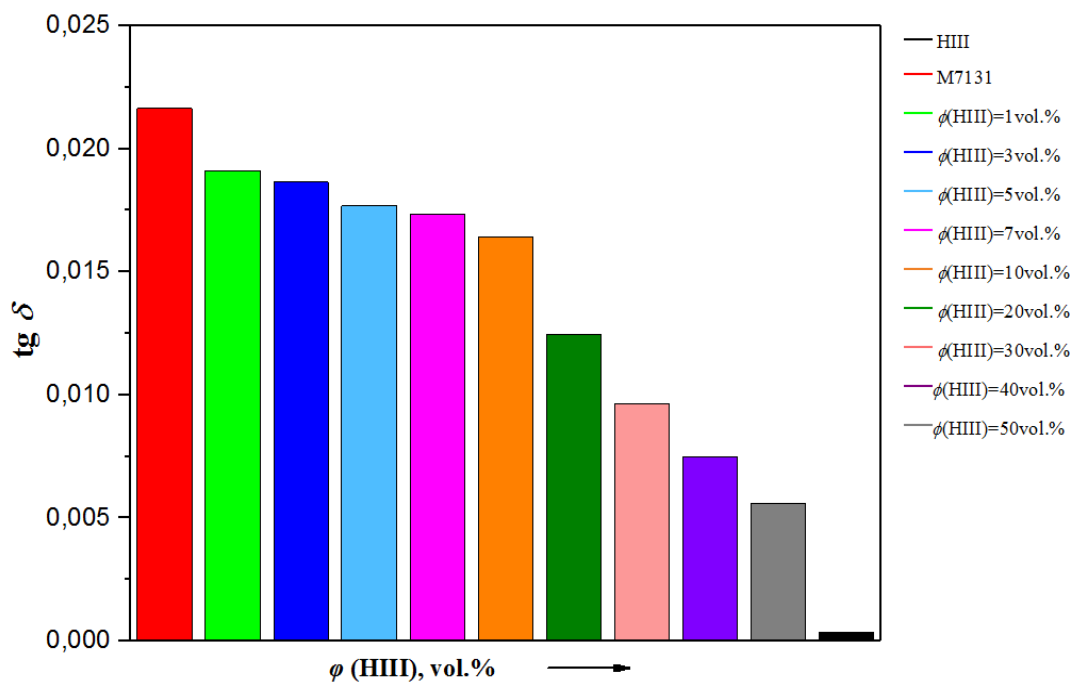
U Tablici 4.7.1. su prikazani rezultati mjerenja faktora dielektričnog gubitka i specifičnog otpora za čisto trafo ulje te ostale mješavine. Na Slici 4.7.1. se može vidjeti ovisnost faktora dielektričnog gubitka o volumnom udjelu HIII u smjesi.

Tablica 4.7.1. Rezultati mjerenja faktora dielektričnog gubitka i specifičnog električkog otpora čistog mineralnog trafo ulja HIII, sintetskog trafo ulja M7131 te njihovih mješavina u različitim volumnim udjelima

Uzorak	Faktor dielektričnih gubitaka, $\text{tg}\delta$ (90 °C)	Specifični električki otpor, $\text{G}\Omega\text{m}$
HIII	0,00033	2500
M7131	0,02164	8,5
φ (HIII) = 1 vol. %	0,01911	9,3
φ (HIII) = 3 vol. %	0,01864	9,9
φ (HIII) = 5 vol. %	0,01768	10,5
φ (HIII) = 7 vol. %	0,01736	10,6
φ (HIII) = 10 vol. %	0,01642	12
φ (HIII) = 20 vol. %	0,01245	15,7
φ (HIII) = 30 vol. %	0,00965	23,9
φ (HIII) = 40 vol. %	0,00748	33,7
φ (HIII) = 50 vol. %	0,00558	50,4

Prema navedenoj normi IEC 60247, maksimalna dopuštena vrijednost za faktor dielektričnog gubitka mineralnog ulja iznosi 0,005, a za sintetsko estersko ulje 0,03. Izmjereni faktor dielektričnog gubitka za HIII iznosi 0,00033, dok je za M7131 taj faktor jednak 0,02164.

Najniža dopuštena vrijednost specifičnog električnog otpora za sintetsko estersko ulje iznosi 2 $\text{G}\Omega\text{m}$, a u sklopu ovog rada izmjerena je vrijednost od 8,5 $\text{G}\Omega\text{m}$. Ograničenje vrijednosti specifičnog električnog otpora za novo i nekorišteno mineralno ulje, prema IEC 60247, nije definirano, a obično se kreće oko 1000 $\text{G}\Omega\text{m}$ (ovdje je izmjereno čak 2500 $\text{G}\Omega\text{m}$). No ova vrijednost naglo pada kad se mineralno ulje utoči u transformator te dođe u kontakt s ostalim materijalima. Granična vrijednost za novo ulje u novim transformatorima za specifični otpor je 60 $\text{G}\Omega\text{m}$.



Slika 4.7.1. Grafički prikaz ovisnostifaktora dielektričnog gubitka o volumnom udjelu HIII

Iz dobivenih rezultata ispitivanja, povećanjem volumnog udjela mineralnog ulja u sintetskom ulju, uočljiv je pad vrijednosti faktora dielektričnih gubitaka, što znači da se tim smjesama poboljšavaju izolacijska svojstva. Suprotno tome, povećanjem volumnog udjela mineralnog ulja dolazi do porasta izolacijskog otpora.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivana su svojstva mineralnog transformatorskog ulja HyVolt III, HIII i sintetskog esterskog ulja Midel[®] 7131, M7131, toplinskim i električnim metodama.

Pripravljene smjese, u rasponu od 1 do 50 vol.% HIII, bile su vizualno bistre, bez vidljivih nehomogenosti prije i nakon miješanja.

Dobiveni rezultati viskoznosti, mjereni u periodu od 30 dana, pokazali su kako se radi o homogenim mješavinama. Viskoznost mineralnog ulja je niža od viskoznosti sintetskog estera, a izmjerene viskoznosti za obje vrste transformatorskog ulja nalaze se u dopuštenim granicama. Kod pripremljenih mješavina, povećanjem volumnog udjela mineralnog u sintetskom ulju, dolazi do smanjenja viskoznosti, odnosno poboljšanja hidrodinamičkih svojstava. Budući da su za pripravljene mješavine vrijednosti kinematičkih viskoznosti između vrijednosti čistih komponenata transformatorskog ulja, može se zaključiti kako se sve pripravljene mješavine mineralnog i esterskog ulja mogu koristiti kao izolacijske tekućine u transformatorima, ali pri tome treba voditi računa kod izvedbe sustava zagrijavanja, odnosno hlađenja.

Za razliku od viskoznosti, rezultati toplinske vodljivosti pokazuju kako je transformatorsko ulje na osnovi sintetskog estera pogodnija izolacijska tekućina od mineralnog ulja jer ima višu vrijednost toplinske vodljivosti i samim time će brže odvoditi toplinu koja se generira na vodiču. Iz dobivenih mjerenja može se zaključiti da se povećanjem volumnog udjela mineralnog ulja smanjuje toplinska vodljivost pripremljenih mješavina.

Rezultati termogravimetrijske analize pokazuju bolju toplinsku stabilnost sintetskog estera u odnosu na mineralno ulje. Zbog toga se sintetski organski esteri koriste kao rashladni mediji u transformatorima čije su radne temperature puno više od transformatora čiji su rashladni mediji mineralna ulja, odnosno kada postoje naglašeni zahtjevi za sigurnost, nezapaljivost i zaštitu okoliša. Također, termogravimetrijska analiza se pokazala kao točnija metoda od infracrvene spektroskopije za kvantitativno određivanje udjela mineralnog ulja u mješavinama.

Dobiveni rezultati probojnog napona i sadržaja vode su očekivani. Što je veći volumni udio esterskog ulja u pripremljenim smjesama viši je i sadržaj vode, uz zadržavanje visokog probojnog napona. Utvrđeno je kako estersko ulje ima bržu i veću sposobnost apsorpiranja

vlage, tj. vode. Upravo ta odlika daje veliku prednost sintetskim esterskim uljima u odnosu na mineralna jer esteri mogu preuzeti vodu iz papirne izolacije, uz zadržavanje visokog probojnog napona, te na taj način “osušiti” papir i produžiti životni vijek papira, namota i samog transformatora.

U ovom radu za mineralno ulje izmjeren je niži faktor dielektričnog gubitka, a viši specifični električni otpor u odnosu na sintetski ester, što znači da je mineralno ulje bolji izolator. Iz dobivenih rezultata ispitivanja, povećanjem volumnog udjela mineralnog u sintetskom ulju, uočljiv je pad vrijednosti faktora dielektričnih gubitaka, odnosno porast izolacijskog otpora.

6. LITERATURA

1. Kelemen, T., Energetski transformator, Skripta, Končar D&ST
2. Transformer oil handbook – performing better by knowing more, Nynas, Sweden, (2010)
3. Radić, I., Trstoglavac, D., Matun, V., Mikulić, M., Pregled izolacijskih tekućina primjenjivih kao tekući dielektrik i sredstvo za odvođenje topline u distriputivnim transformatorima, HO Cired, (2016)
4. Radić, I., Haramija, V., Maljković, V., Krainz, M., Usporedba degradacijskih procesa u transformatorima u pogonu i mirovanju, HRO Cigre, (2017)
5. Hadži- Skerlev, A., Mareković, A., Musulin, B., Biorazgrađiva transformatorska ulja, HRO Cigre, (2007)
6. Obradović, M., Krsmanović, M., Đorđević, S., Todorović, P., Šepa, D., Bojović, P., Subotić, K., Radošević, N., Ćirić, J., Mladenović, S., Dražić, V., Tatić-Janjić, O., Valent, V., Đorđević, B., Šerbanović, S., Dizdar, Z., Hemijski i fizički podaci i veličine, Izdavačka radna organizacija „Rad“, Beograd, (1987), 830-841
7. Balentović, M., Utjecaj mikrovalnog zagrijavanja, antioksidanasa i skladištenja na oksidacijsku stabilnost hladno prešanog ulja podlanka, Diplomski rad, Prehrambeno-tehnološki fakultet , Osijek, (2014)
8. Dominković, I., Utjecaj mikrovalnog zagrijavanja i dodatka antioksidanasa na oksidacijsku stabilnost ulja pistacije, Diplomski rad, Prehrambeno-tehnološki fakultet, Osijek, (2015)
9. URL: <https://element.hr/artikli/file/2457> (pristup 21.8.2018.)
10. URL:https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abc6-6f535c3b5254/html/7590_Transformatori.html
(pristup 17.8.2018.)
11. Uglešić I., Tehnika visokog napona, FER, Zagreb, (2006), 14-72
12. Lovreškov, L., Mršić, I., Optimiranje procesa pripreve nanofluida na osnovi transformatorskog ulja, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, (2015)

13. Vrsaljko, D., Haramija, V., Lješćanin, A., Spektroskopsko istraživanje starenja izolacijskog ulja na osnovi sintetskog estera, HRO Cigre, (2017)
14. Karišik, A., Mašić, A., Analysis of results obtained by testing the physical and chemical characteristics from the transformer Elektroprijenos, BiH, Sarajevo, BH K Cigre, (2013)
15. Čabrac, S., Kompatibilnost materijala u transformatorima punjenim mineralnim uljem, HK Cigre, (2003)
16. Radić, I., Mareković, A., Jurišić, R., Sitar, I., Definiranje vrsta transformatorskog ulja, Radna uputa, Končar D&ST, (2012)
17. IEC 60666, Detection and determination of specified additives in mineral insulating oils, (2010)
18. Janović, Z., Naftni i petrokemijski procesi i proizvodi, Kerschoffset, Zagreb, (2011), 246-247
19. URL:https://www.google.hr/search?q=silicone+oil+structural+formula&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjy2JrHy53dAhUEsaQKHaUEDqgQ_AUICigB&biw=1366&bih=662#imgrc=xb3aExTFAfoLkM (pristup 20.6.2018.)
20. Radić, I., Sitar, I., Mareković, A., Domitrović, B., Izolacijski materijali više toplinske klase, HR Cigre, (2009)
21. Carević, S., Mikulić, M., Radić, I., Sitar, I., Distributivni transformator 400 KVA punjen vegetabilnim uljem, HR Cired
22. URL:<https://www.machinerylubrication.com/Read/29703/synthetic-esters-perform> (pristup 20.8.2018.)
23. Sitar, I., Biloš, M., Valešić, D., Energetski transformator 40 MVA punjen sintetičkim esterom, HRO Cigre, (2011)
24. Frangen, D., Česnik, T., Kopjar, Z., Ražnatović, N., Obrada ulja na terenu za srednje energetske transformatore do 100 MVA, Proizvodna procedura, Končar D&ST, (2017)
25. Frangen, D., Specijalni procesi, Obrada i punjenje ulja, Zagreb, Končar D&ST, (2017)
26. Kraić, Z., Kopjar, Z., Česnik, T., Opis i upute za rad i održavanje uređaja za obradu ulja AP 50 H-Hedrich, Proizvodna procedura, Končar D&ST, (2009)

27. Marković, M., Objedinjena metoda određivanja probojnih napona izolacijskih tekućina podvrgnutih izmjeničnom naponu, Doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, (2017)
28. URL: <https://www.midel.com/products/midel/midel-7131> (pristup 20.7.2018.)
29. URL: <http://ergonnsa.com/products/hyvolt> (pristup 04.5.2018.)
30. ISO 3675, Crude petroleum and liquid petroleum products – Laboratory determination of density – Hydrometer method, (1998)
31. ISO 3104, Petroleum products - Transparent and opaque liquids - Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity, (1994)
32. IEC 60814, Insulating liquids - Oil-impregnated paper and pressboard - Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration, (1997)
33. IEC 60296, Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear, (2012)
34. IEC 60156, Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method, (2018)
35. IEC60247, Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor (tan d) and d.c. resistivity, (2004)
36. ISO 2719, Determination of flash point - Pensky-Martens closed cup method, (2016)
37. ISO3016, Petroleum products -- Determination of pour point, (1994)
38. ISO 2592, Petroleum and related products - Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method, (2017)
39. ISO 3294, Parallel shank countersinks for angles 60, 90 and 120 degrees inclusive, (2016)
40. Cerić, E., Nafta procesi i proizvodi, Kigen, Zagreb, (2006), 55-338
41. Gunzler, H., Gremlich, H.U., Uvod u infracrvenu spektroskopiju, Školska knjiga, Zagreb (2006), 53-59
42. URL: [https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/](https://chem.libretexts.org/Textbook_Maps/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/)

Vibrational_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/How_an_FTIR_Spectrometer_Operates
(pristup 21.8.2018.)

43. Govorčin-Bajsić, E., Termogravimetrijska analiza - predavanja, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, (2016)
44. Mareković, A., Radić, I., Jurišić, R., Fizikalno-kemijsko ispitivanje izolacijskog ulja, Radna uputa, Končar D&ST, (2013)
45. Mareković, A., Jurišić R., Ispitivanje izolacijskih materijala, Radna uputa, Končar D&ST, (2013)
46. Dombek, G., Goscinski, P., Nadolny, Z., Comparison of mineral oil and esters as cooling liquids in high voltage transformer in aspect of environment protection, Poznan University of Technology, 60965 Poznan, Poland, **14** (2017),
47. URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C128370&Type=IR-SPEC&Index=1>
(pristup 26.6.2018.)
48. Provjera inhibitora, Ispitni izvještaj, Končar D&ST, (2016)
49. Gazivoda, S., Mikulecky., A., Dijagnostika distribucijskih transformatora, HO Cired, (2008)
50. Radić, I., Matun, V., Maljković, V., Plinska kromatografija, analiza i dijagnostika stanja transformatora, Zagreb, (2015), Končar D&ST
51. Lingvay, I., Radu, E., Udrea, O., Thermochemical stability of insulating oils, Journal of sustainable energy, No. 2, June, **6** (2015)
52. Fofana, I., Wasserberg, V., Borsi, H., Gockenbach, E., Challenge of Mixed Insulating Liquids for Use in High-Voltage Transformers, Part 1: Investigation of Mixed Liquids, IEEE Electrical Insulation Magazine, **18** (2002), 18-31
53. Zimmerman, N., Bass, R., Consideration of Ester-Based Oils as Replacements for Transformer Mineral Oil, Portland State University Maseeh College of Engineering & Computer Science Department of Electrical & Computer Engineering, (2014)

7. ŽIVOTOPIS

Ivana Vilić [REDACTED] Odrasla je u Posavskoj Mahali gdje je pohađala Osnovnu školu Vladimira Nazora. Opću gimnaziju u Srednjoj školi Pere Zečevića u Odžaku završila je 2010. godine, a 2013. godine upisuje studij Kemije i inženjerstva materijala na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu. Stručnu praksu odradila je u tvornici *Končar – Distributivni i specijalni transformatori*. Preddiplomski studij Kemije i inženjerstva materijala završila je 2016. godine obranom završnog rada pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Hrvoja Ivankovića s temom *Primjena hidroksiapatitne keramike u katalizi* i tako stekla pohvalu *magna cum laude*. Iste godine upisuje diplomski studij Kemije i inženjerstva materijala te je trenutno studentica druge godine. Tijekom diplomskog studija odrađivala je studentski posao u laboratoriju Ulazne kontrole *Končar D&STA-a* koji je obuhvatio ispitivanje brtvenih materijala, krutih izolacijskih materijala i tekućih izolacijskih materijala.