

Mjerenje površinske napetosti i gustoće elektroizolacijskih tekućina

Danković, Valentina

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:182:572398>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Odjel za kemiju
Preddiplomski studij kemije

Valentina Danković

Mjerenje površinske napetosti i gustoće
elektroizolacijskih tekućina

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

Neposredni voditelj: Dominik Goman

Osijek, 2021

Sažetak

Transformator je elektromagnetski uređaj koji radi na principu Faradeyevog zakona elektromagnetske indukcije. Transformatori služe za transformaciju razine napona kroz neku točku u elektroenergetskoj mreži. Transformatorsko ili elektroizolacijsko ulje je ulje posebnih karakteristika koje je stabilno na visokim temperaturama i ima dobra izolacijska svojstva. Uloga ulja u transformatorima je hlađenje, izolacija te zaustavljanje iskrenja i koronskog pražnjenja. Također transformatorsko ulje štiti celuloznu izolaciju tako što sprječava izravan kontakt između celuloze i atmosferskog kisika. Uz to štiti i namotaje koji su potpuno uronjeni u ulje. Dvije su glavne vrste transformatorskih ulja; mineralna ulja koja mogu biti inhibirana i neinhibirana te sintetička ulja. Kod elektroizolacijskih ulja promatramo električna, fizikalna i kemijska svojstva. U ovom će se radu posebno pratiti gustoća i granična površinska napetost ulja. Praćenje gustoće transformatorskih ulja je osobito važno jer ulje nikako ne smije biti teže od vode, jer bi pri jako niskim temperaturama led mogao isplivati na površinu ulja. Pomoću mjerenja površinske napetosti ulja možemo otkriti prisutnost polarnih zagađivača i produkata oksidacije ulja. U ovom završnom radu ispitivani su uzorci transformatorskih ulja iz transformatora u eksploataciji i jedno novo ulje. Mjerene su karakteristike osam različitih uzoraka ulja različitih proizvođača.

Ključne riječi: Transformator, transformatorsko ulje, gustoća, površinska napetost

Abstract

A transformer is an electromagnetic device which works on principle of Faraday's Law of induction. Transformers are used to transform the voltage level through a point in the power grid. Transformer or electrical insulating oil is an oil with special characteristics that is stable at high temperatures and has good insulating properties. The role of oil in transformers is cooling, insulation and stopping sparking and corona discharge. Also transformer oil protects cellulose insulation by preventing direct contact between cellulose and atmospheric oxygen. It also protects coils that are completely immersed in oil. There are two main types of transformer oils; mineral oils that can be inhibited and uninhibited, and synthetic oils. In electrical insulation oils, we observe electrical, physical and chemical properties. In this paper, the density and ultimate surface tension of the oil will be particularly monitored. It is important to measure the density of transformer oils especially because the oil should never be heavier than water, because at very low temperatures ice could float to the surface of the oil. By measuring the surface tension of the oil, we can detect the presence of polar pollutants and oil oxidation products. In this final work, samples of transformer oils from transformers in operation and one new oil were examined. The characteristics of eight different oil samples from different manufacturers were measured.

Keywords: Transformer, transformer oil, density, surface tension

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Literaturni pregled	2
2.1. Transformatori.....	2
2.1.1. Građa transformatora	2
2.1.2. Vrste transformatora	3
2.2. Ulja	3
2.2.1. Vrste ulja.....	4
2.2.2. Svojstva ulja	5
2.3. Gustoća.....	7
2.4. Površinska napetost	8
3. Materijali i metode.....	10
3.1. Materijali	10
3.2. Metode određivanja gustoće i površinske napetosti ulja.....	13
4. Rezultati i rasprava.....	15
5. Zaključak.....	21
6. Literatura.....	22

1.Uvod

Kako je kroz povijest rasla potreba za električnom energijom s njom se razvijala elektroenergetska mreža u cijelom svijetu. Za napajanje tih mreža ključni uređaji su transformatori. Transformator je pasivna komponenta, odnosno elektromagnetski uređaj koji radi na principu Faradeyevog zakona elektromagnetske indukcije. [1] Transformatori za rad trebaju dobru izolaciju i hlađenje. U tu svrhu koriste se transformatorska ili elektroizolacijska ulja. Transformatorsko ili elektroizolacijsko ulje je ulje posebnih karakteristika koje je stabilno na visokim temperaturama i ima dobra izolacijska svojstva. [2] Da bi transformator učinkovito radio i ulje mora biti kvalitetno. Zbog toga se analiziraju fizikalna, kemijska i električna svojstva ulja. Važno je ne samo ispitati svojstva ulja, nego i pratiti njihove promjene tijekom vremena. Kvalitetna ulja ključna su za rad transformatora, ali isto tako ulja loše kvalitete mogu biti pogubna za transformatore. U ovom radu posebna pažnja bit će usmjerena na gustoću i površinsku napetost ulja i pitanje mogu li ta dva parametra biti dovoljna da neko ulje bude ocijenjeno kao zadovoljavajuće ili nezadovoljavajuće.

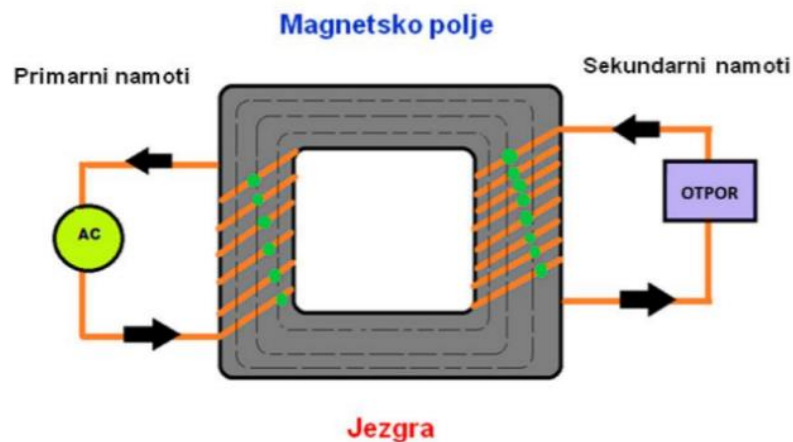
2. Literaturni pregled

2.1. Transformatori

Transformator je pasivna komponenta, odnosno elektromagnetski uređaj koji radi na principu Faradeyevog zakona elektromagnetske indukcije. On pretvara sustav izmjeničnog napona u drugi ili u više drugih sustava čiji su naponi iste frekvencije. [1] Transformatori služe za transformaciju razine napona kroz neku točku u elektroenergetskoj mreži. Važno je osigurati što manje gubitke tijekom prijenosa električne energije od elektrane do odredišta, a s druge strane prije ulaska u domove napon se mora smanjiti. Transformator može smanjiti ili povećati napon koji putuje kroz električne žice. Transformatori povećavaju napon s nekoliko tisuća na nekoliko stotina tisuća volti da bi se energija dobivena u elektrani mogla dalje prenositi. Kada električna energije dođe do trafostanica u kojima se nalaze transformatori srednje razine napon se mora smanjiti na ispod 10 000 V. Nakon toga električna energije putuje na krajnja odredišta kao što su domovi te se u malim transformatorima napon smanjuje na 240V. [3]

2.1.1. Grada transformatora

Svaki transformator sastoji se od jezgre, niskonaponskog i visokonaponskog namota, odnosno primarnog i sekundarnog namota. Uz navedene dijelove može sadržavati i tercijarni namot. Navedeni dijelovi čine aktivni dio transformatora. Transformatori sadrže još i konstruktivni i izolacijski dio koji ne sudjeluju u transformaciji energije. [4] Jezgra transformatora služi za osiguravanje magnetske putanje oko nje. Magnetska putanja je neophodna za rad transformatora. [5]



Slika 1. Shematski prikaz transformatora. [6]

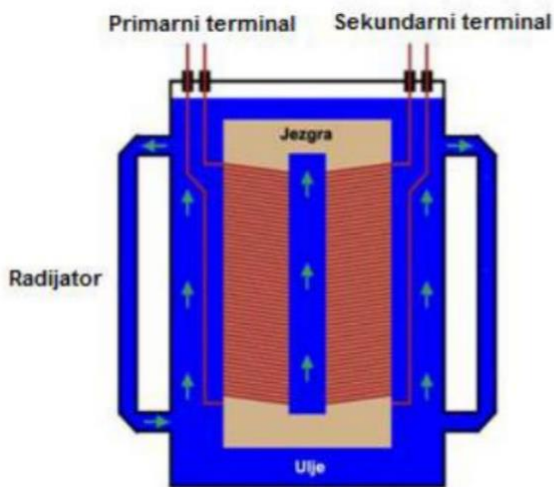
2.1.2. Vrste transformatora

Od vrsta transformatora razlikujemo energetske transformator koji služi za prijenos i pretvorbu električne energije, mjerni transformator koji se koristi za električna mjerenja te transformator impedancije kojim se u visokofrekvencijskoj tehnici prilagođavaju impedancije dvaju strujnih krugova. Zatim postoje mnoge podvrste energetskih transformatora kao što su generatorski, mrežni, distribucijski, ispravljački, pećni i ostali. 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 Teslin transformator. [7]

2.2. Ulja

Transformatorsko ili elektroizolacijsko ulje je ulje posebnih karakteristika koje je stabilno na visokim temperaturama i ima dobra izolacijska svojstva. Uloga ulja u transformatorima je hlađenje, izolacija te zaustavljanje iskrenja i koronskog pražnjenja. Također transformatorsko ulje

štiti celuloznu izolaciju tako što sprječava izravan kontakt između celuloze i atmosferskog kisika. Uz to štiti i namotaje koji su potpuno uronjeni u ulje. [2]



Slika 2. Prikaz strujanja ulja u transformatoru. [6]

2.2.1. Vrste ulja

Dvije su glavne vrste transformatorskih ulja; mineralna ulja koja mogu biti inhibirana i neinhibirana te sintetička ulja. Neinhibirana mineralna ulja su ulja dobivena iz nafte kojima nisu dodani inhibitori već su prirodno inhibirani fenolnim ili aminskim derivatima aromatskih ugljikovodika. Inhibirana mineralna ulja su ulja koja su također dobivena iz nafte, ali njima su na kraju tog procesa dodani inhibitori oksidacije ulja. Sintetička ulja ili askareli (poliklorirani bifenili (PCB)) po sastavu su poliklorirani aromatski ugljikovodici. Za razliku od mineralnih ulja, raspadom sintetičkih ulja oslobađaju se samo nezapaljivi plinovi. Zbog toga su praktični za upotrebu u zatvorenim prostorima kao što su rudnici. Njihova mana je velika reaktivnost te se stoga mogu koristati samo uz posebne čvrste izolatore. Nadalje mineralna ulja možemo podijeliti na ona na bazi nafte i ulja na bazi parafina. Naime nafta je uljasta tekućina sastavljena od ugljikovodika koji čine od 95% do 98% njezina sastava. Prema tome nafta može biti parafinska ili naftenska nafta, ovisno o tome koji ugljikovodici dominiraju. Prerada nafte vrši se postupkom frakcijske vakuumske destilacije.

Posebno je važan sastav ulja i udio aromatskih ugljikovodika u ulju. Njihov udio se kontrolira postupkom rafinacije. Tijekom tog postupka uklanjaju se štetni i jako reaktivni ugljikovodici dok se oni dobri zadržavaju i imaju ulogu u povećanju otpornosti ulja na oksidaciju te apsorbiraju plinove koji nastaju u ulju tijekom rada transformatora. Na primjer fenoli su odlični inhibitori ulja koji usporavaju proces oksidacije, odnosno starenja ulja. Nafta se, za razliku od parafinskog ulja, lakše oksidira. Prednost nafte je što se mulj koji nastaje oksidacijom nafte lakše otapa, dok se mulj koji nastaje oksidacijom parafina taloži i ometa rad transformatora. [8]

2.2.2. Svojstva ulja

Kod elektroizolacijskih ulja promatramo električna, fizikalna i kemijska svojstva. Prva fizikalna svojstva koja se mogu zapaziti kod ulja su svakako njegova boja i čistoća. Nova rafinirana ulja su bistra i prozirna. Sama boja ne može biti pokazatelj kvalitete ulja već se prati promjena boje tijekom vremena da bi se utvrdila brzina promjene boje. Iduće fizikalno svojstvo koje se promatra je viskoznost. Viskoznost se može definirati kao otpor protjecanju, odnosno gibanju jednog sloja fluida u odnosu na drugi. Viskoznost se kod transformatorskih ulja određuje da bi se utvrdilo koliko se ulje može kretati oko namotaja transformatora. Ako ulje ima veću viskoznost od dopuštene, teže će se kretati oko namotaja a samim time teže će i odvoditi toplinu i stvarat će se više plinova. Koeficijent viskoznosti ili dinamička viskoznost izražava se u *Pas*. Postoji još i kinematička viskoznost koja opisuje odnos dinamičke viskoznosti i gustoće fluida, a izražava se u m^2/s . Uz ostala fizikalna svojstva važna je još i točka stiništa. To je najniža temperatura pri kojoj tekućina još teče. Određuje se tako da se vrijednosti temperature pri kojoj tekućina prestaje teći doda 3 °C a točka stiništa se izražava u °C. Kod hlađenja mineralnih ulja dolazi do odvajanja voskova i ugljikovodika te može doći do prijelaza u plastično stanje. Kod parafinskog ulja pri niskim temperaturama dolazi do izdvajanja čvrstog parafina što kvari njegova izolacijska svojstva. Još jedno zanimljivo fizikalno svojstvo je gustoća koja je posebno istraživana u ovom radu. Gustoća se izražava u g/cm^3 i važno ju je pratiti jer ulje ne smije biti teže od vode da pri niskim temperaturama led ne bi mogao isplivati na površinu ulja. Zapaljivost ulja je još jedno fizikalno svojstvo koje može poslužiti kao izvor informacija o tome kako se ulje ponaša pri visokoj temperaturi i niskom tlaku. Mjeri se temperatura zapaljivosti ulja kako ne bi došlo do njegovog zapaljenja odnosno eksplozije dok je ulje u pogonu. Površinska napetost je drugo svojstvo ulja

koje će detaljnije biti analizirano u ovom radu. Površinsku napetost se mjeri u odnosu na vodu i izražava se u N/m. Kemijska stabilnost ulja ovisi o njegovom sastavu i kemijskim utjecajima kojima je ulje izloženo tijekom korištenja. Ugljikovodici koji čine većinu sastava izolacijskih ulja su jako slabo reaktivni. Najmanje reaktivni su parafini, zatim nafteni (cikloalkani) i na kraju aromati. Svako izolacijsko ulje sadrži primjese organskih kiselina. Važno je mjeriti kiselost ulja koja su neko vrijeme bila u pogonu jer se njihovom kondenzacijom stvara organski mulj. Dobro rafinirano ulje ne smije sadržavati anorganske kiseline ili baze jer bi mogle lako reagirati sa čvrstom izolacijom ili metalnim dijelovima transformatora. Od kemijskih svojstava određuju se još sadržaji primjesa odnosno vode, sumpora, sapuna i taloga. Voda u izolacijskom ulju može biti kemijski vezana, u obliku otopine, emulzije ili izdvojena na dnu spremnika. Sumpor je izuzetno štetan za transformator jer napada metalne, posebno bakrene dijelove. Starenjem izolacijskog ulja nastaju soli metala i viših organskih kiselina, odnosno sapuni. Sapuni su štetni jer su za razliku od ulja polarni i izazivaju dielektrični gubitak. Talog je također nepoželjan jer utječe na smanjenje dielektričnog gubitka. [8]

Tablica 1. Prikaz fizikalnih svojstava važnih za praćenje kvalitete ulja.

KARAKTERISTIKE	MJERNE JEDINICE	TEST METODA	UVJET
IZGLED		HRN EN 60296	BISTRO
BOJA		ASTM D1500	
TALOG S N-HEPTANOM			NE SADRŽI
SADRŽAJ VODE, mg/kg	mg/kg	HRN EN 60814	≤ 25
GUSTOĆA(pri 20°C)	kg/dm ³	HRN EN 60296	≤ 0,8950
REFRAKCIJSKI INDEKS	nD	ASTM D 1807	1,46-1,48
TOČKA PALJENJA	°C	HRN EN ISO 2719	≥ 130
POVRŠINSKA NAPETOST	mN/m	HRN EN 14210	≥ 22
NEUTRALIZACIJSKI BROJ	mgKOH/g	HRN EN 62021	≤ 0,30

KOEF.DIELEKTRIČNIH GUBITAKA	%	HRN EN 60247	< 0,1
SPECIFIČNI OTPOR(pri 20°C)	GΩm	HRN EN 60247	> 60

2.3. Gustoća

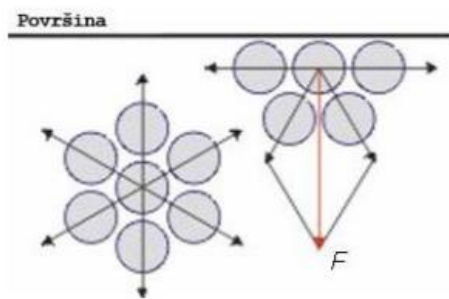
Gustoća neke tekućine (ρ) definira se kao omjer mase (m) i volumena (V), odnosno masa volumena koja zauzima neki prostor, a računa se prema relaciji:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

te se izražava u kg/m^3 u SI sustavu. Budući da gustoća ima istu vrijednost pri jednakom tlaku i temperature, može se koristiti za identifikaciju tvari. Jedna od preciznih metoda određivanja gustoće je pomoću piknometra. Mjerenje započinje mjerenjem mase praznog i suhog piknometra na analitičkoj vagi. Zatim se piknometar napuni tekućim uzorkom, začepi se ubrušenim čepom kroz koji je provučena kapilara kroz koju izlazi višak tekućine. Tako napunjeni piknometar se izvaže te se mase piknomatra s uzorkom tekućine i praznog piknometra oduzmu. Dobivana masa je masa uzorka, a volumen uzorka je volumen piknometra. Druga metoda za mjerenje gustoće je metoda s areometrom. Izvodi se tako da se areometar uroni u posudu sa tekućinom. Kada se uspostavi ravnoteža očita se gustoća uzorka. Treća metoda je metoda s hidrostatskom vagom. Izvodi se tako da se uzorak čvrste tvari izvaže na zrak i uronjen u tekućinu čija nam je gustoća poznata. Izračuna se volumen uzorka uz pomoć razlike u masama i gustoće tekućine. Također se može računati i volumen tekućine ukoliko su nam poznati gustoća, masa i volumen čvrste tvari. [9] Gustoća elektroizolacijskih ulja se mjeri na temperature od 20°C. To je važno jer s porastom temperature opada gustoća tekućine. Važno je mjeriti gustoću transformatorskih ulja posebno jer ulje nikako ne smije biti teže od vode, jer bi u izvanrednim situacijama pri jako niskim temperaturama led mogao isplivati na površinu ulja. [8]

2.4. Površinska napetost

Površinska napetost (σ) je posljedica djelovanja molekula tekućina na molekulu koja se nalazi na površini odnosno granici faza. Rezultantna sila na tu molekulu je usmjerena prema dnu posude u kojoj se tekućina nalazi.



Slika 3. Sila (F) koja uzrokuje površinsku napetost. [10]

Površinska napetost (σ) može se definirati kao mjera za silu kojom bi se trebalo djelovati na molekule na površini tekućine da bi one pokazale jednaku silu međudjelovanja kao i molekule u unutrašnjosti tekućine. Ova fizikalna veličina izražava koliko je rada odnosno energije potrebno uložiti da bi se nadvladale kohezivne sile na površini tekućine kako bi se površina povećala za određeni iznos što je prikazano relacijom:

$$dw = \sigma dA \quad (2)$$

gdje je w rad, a A površina tekućine. [10]

U ovom radu se površinska napetost mjerila u odnosu na vodu i predstavlja silu između dodirnih površina vode i ulja odnosno predstavlja mjeru molekulskih privlačnih sila između različitih molekula na njihovoj dodirnoj površini. Dobivena površinska napetost izražava se u N/m u SI sustavu. Pomoću mjerenja površinske napetosti ulja može se detektirati prisutnost polarnih zagađivača i produkata oksidacije ulja. Tijekom dužeg korištenja ulja dolazi do njegovog starenja,

odnosno oksidacije i vrijednost površinske napetosti se smanjuje zbog nastanka organskih peroksida i taloga. [8]

3. Materijali i metode

3.1. Materijali

U ovom završnom radu ispitivani su uzorci transformatorskih ulja iz transformatora u eksploataciji i jedno novo ulje. Mjerene su karakteristike osam različitih uzoraka ulja različitih proizvođača. Eksperimentalni dio ovog završnog rada odrađen je u Fizikalno-kemijskom laboratoriju referentnog centra za transformatore, HEP, Osijek. U tablici 2 navedeni su tehnički podaci ispitivanih ulja.

Tablica 2. Pregled ispitivanih uzoraka ulja.

Redni broj uzorka	Naziv proizvođača transformatora	Snaga	Napon	Godina proizvodnje transformatora
1. *				
2.	Elektrosrbija	8000kVA	35000/10500V	1964.
3.	Končar	400kVA	20000/10000/400V	1991.
4.	Končar	8000kVA	35000/20000V	2012.
5.	Končar	8000kVA	35000/10500V	1973.
6.	Končar	400kVA	10000/400V	1982.
7.	Minel	160kVA	10000/400V	1983.
8.	Minel	8000kVA	35000/10500V	1981.

*Novo ulje

Uzorci ulja ispitivani u ovom radu prikazani su na slici 4 prema rastućem intenzitetu boje. Iz slike je vidljivo da je boja ispitivanih uzoraka varirala od bezbojne do crne boje.



Slika 4. Ispitivana ulja složena po boji koja je određena ASTM metodom.

Tablica 3. Primjer tablice s dobivenim rezultatima ispitivanja ulja s ispitnog lista.

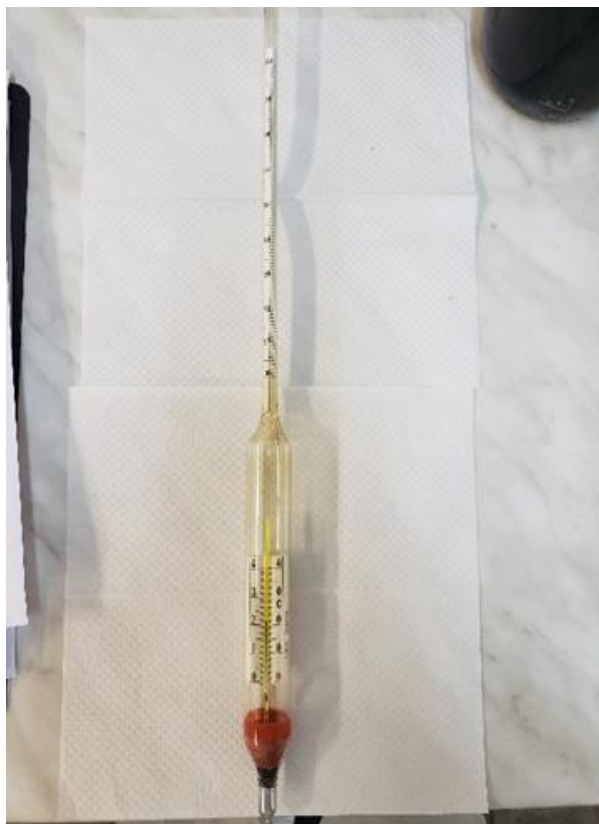
KARAKTERISTIKE	JED.MJERE	TEST METODA	UVJET	REZULTATI ISPITIVANJA
IZGLED		HRN EN 60296	BISTRO	BISTRO
BOJA		ASTM D1500		0,5
TALOG S N-HEPTANOM			NE SADRŽI	NE SADRŽI
SADRŽAJ VODE, mg/kg	mg/kg	HRN EN 60814	≤ 25	8,0
GUSTOĆA(pri 20°C)	kg/dm ³	HRN EN 60296	≤ 0,8950	0,8604
REFRAKCIJSKI INDEKS	nD	ASTM 1807	1.46-1.48	1,4714
TOČKA PALJENJA	°C	HRN EN ISO 2719	≥ 130	150
POVRŠINSKA NAPETOST	mN/m	HRN EN 14210	≥ 22	41
NEUTRALIZACIJSKI BROJ	mgKOH/g	HRN EN 62021	≤ 0,30	0,011
Koef. Dielektričkih gubitaka	%	HRN EN 60247	<0,1	0.001
Specifični otpor (pri 20°C)	GΩm	HRN EN 60247	>60	999,90
PRIMJEDBA: Novo ulje Nytro 4000x				

3.2. Metode određivanja gustoće i površinske napetosti ulja

U ovom radu, prilikom ispitivanja gustoće ulja korištene su metode opisane u normi HRN EN 60422. Norma propisuje postupak uzorkovanja, analize uzorka te ocjenjivanja stanja ulja prema dobivenim rezultatima mjerenja. Prilikom ispitivanja površinske napetosti ulja korištene su metode opisane u normi HRN EN 60296. U ovom radu, prilikom određivanja gustoće transformatorskih ulja (Slika 5) korišten je areometar (Slika 6). Areometar je naprava za mjerenje gustoće tekućina. Sastoji se od zatvorene staklene cjevčice s malom olovnom sačmom koja se nalazi u širem donjem dijelu. Mjerenje se izvodi tako da se u staklenu posudu napunjenu uljem lagano uroni areometar i pričekava nekoliko trenutaka dok se uređaj ne umiri te se zatim sa skale areometra očita gustoća ulja.



Slika 5. Mjerenje gustoće ulja.



Slika 6. Areometar.

Pri određivanju površinske napetosti mineralnih transformatorskih ulja u odnosu na vodu korištena je de Nouyeva metoda. Metoda se bazira na principu mjerenja sile koja je potrebna za otkidanje prstena od površine tekućine više površinske napetosti. Uređaj za mjerenje površinske napetosti naziva se tenziometar (Slika 7). Najvažniji dio tenziometra je torzijska vaga koja s jedna strane ima metalni prsten, najčešće od platine. [9] Prije svakog mjerenja posudica u kojoj se izvodi mjerenje mora se dobro oprati detergentom za čišćenje kemijskog pribora te zatim destiliranom vodom i osušiti u sušioniku. Prije početka mjerenja mora se žariti oksidirajućim plamenom pazeći da ne dođe do nastanka čađi. Prije svake upotrebe prsten se mora isprati otopinom toluena te zatim, nakon što višak toluena ispari također žariti do tamnocrvene boje, pazeći da ne prijeđe u bijelu boju jer bi moglo doći do deformacije prstena. Prije početka mjerenja radi se kalibracija. Postupak kalibracije se radi na destiliranoj vodi. Ukoliko je rezultat mjerenja destilirane vode manji od 71,0 mN/m, računa se korekcijski faktor (k_{atc}) te korigirana površinska napetost ($\sigma_{korigirano}$) prema relacijama [11]:

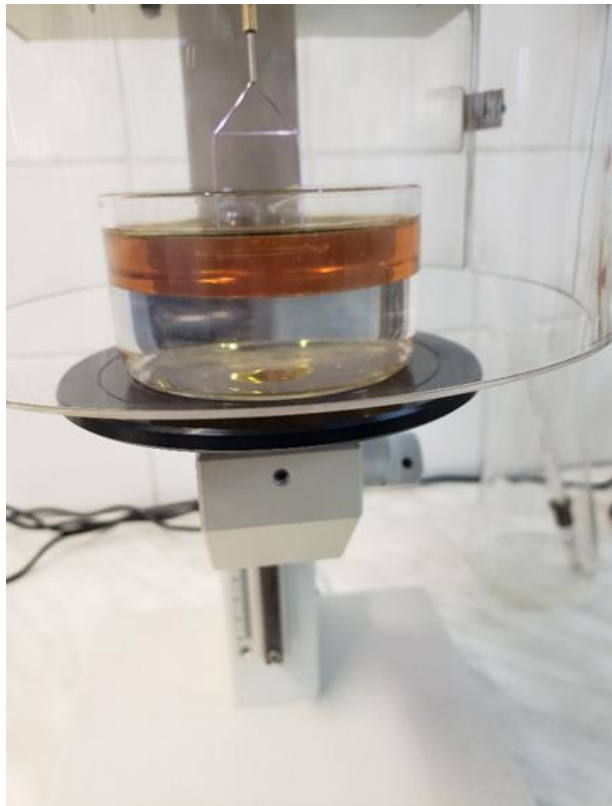
$$k_{atc} = \sigma (\text{H}_2\text{O ref.}) / \sigma (\text{H}_2\text{O izmj.}) \quad (3)$$

$$\sigma_{korigirano} = k_{atc} \cdot \sigma (\text{ulje izmj.}) \quad (4)$$

gdje je: k_{atc} - korekcijski faktor

σ – površinska napetost (granična H₂O referentno, granična H₂O izmjereno, međupovršinska ulje izmjereno i međupovršinska ulje korigirano)

Mjerenje se izvodi tako da se prsten uroni u uzorak i polako se izvlači prema površini. Kako se prsten podiže tako se povećava površina tekućine i sila potrebna za daljnje podizanje prstena. [12] Za mjerenja u ovom završnom radu korišten je tenziometar Krüss K9 (Slika 8). Mjerenje se provodi pri standardiziranim uvjetima koji nisu ravnotežni te se završava u roku od jedne minute od stvaranja granične površine. Kod uređaja Krüss K9 nije potrebna korekcija sile pod uvjetom da su vrijednosti površinske napetosti redestiliane vode u intervalu od 71 – 73 mN/m pri sobnoj temperaturi.



Slika 7. Mjerenje površinske napetosti.



Slika 8. Mjerenje površinske napetosti uređajem Krüss K9.

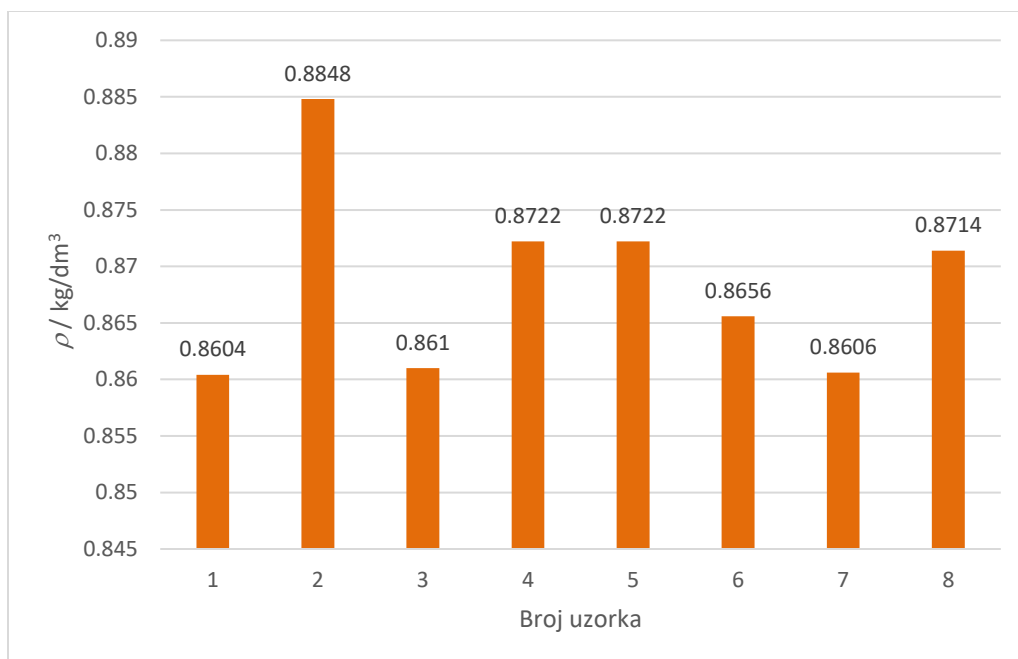
4. Rezultati i rasprava

U ovom završnom radu ispitivano je osam uzoraka ulja dobivenih iz različitih transformatora. U prvom eksperimentu je određivana gustoća ispitivanih uzoraka ulja. Dobiveni podaci su prikazani u tablici 4 i na slici 9. Iz podataka u tablici 4 vidljivo je da vrijednosti gustoće ispitivanih uzoraka variraju od $0,8604 \text{ kg/dm}^3$ (uzorak 1) do $0,8848 \text{ kg/dm}^3$ (uzorak 2). Prema normi HRN EN 60422 i testnoj metodi HRN EN 60296 prihvatljive vrijednosti gustoće za dobra ulja su $\leq 0,8950 \text{ kg dm}^{-3}$ [13].

Tablica 4. Prikaz vrijednosti gustoće ispitivanih uzoraka ulja određenih pri 20 °C.

Uzorak	$\rho / \text{kg dm}^{-3}$
Ulje 1	0,8604
Ulje 2	0,8848
Ulje 3	0,861
Ulje 4	0,8722
Ulje 5	0,8722
Ulje 6	0,8656
Ulje 7	0,8606
Ulje 8	0,8714

Na slici 9 grafički su prikazane gustoće ispitivanih uzoraka ulja. Iz slike je vidljivo da je najveća gustoća određena za uzorak ulja 2 ($\rho = 0,8848 \text{ kg/dm}^3$) dok je najniža gustoća određena za uzorke ulja 1, 3 i 7 ($\rho \sim 0,861 \text{ kg/dm}^3$). Srednje vrijednosti gustoće u rasponu od 0,8656 - 0,8772 kg/dm^3 određene su za uzorke ulja 4, 5, 6 i 8.



Slika 9. Grafički prikaz gustoće ispitivanih uzoraka ulja određenih pri 20 °C.

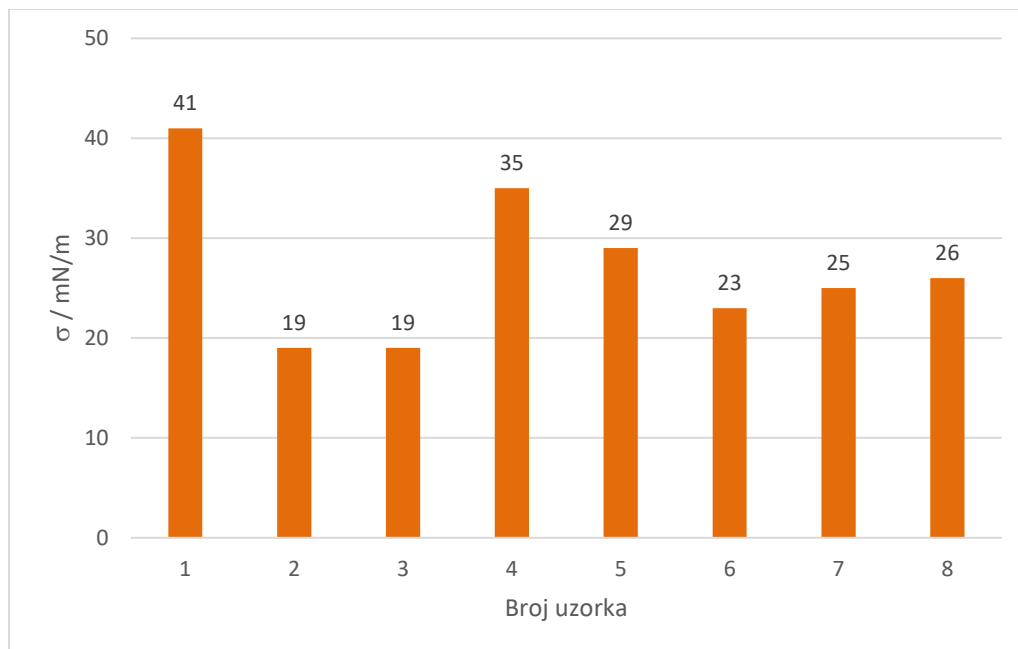
Iz eksperimentalno dobivenih rezultata za gustoću ulja može se zaključiti da je gustoća svih uzoraka zadovoljavajuća prema HRN EN 60296 normi. Najveća određena gustoća je za uzorak broj 2 ($\rho = 0,8848 \text{ kg/dm}^3$) i ona zadovoljava uvjet za dobra ulja.

U drugom eksperimentu je određivana površinska napetost ispitivanih uzoraka ulja. Dobiveni podaci su prikazani u tablici 5 i na slici 10. Iz podataka u tablici 5 vidljivo je da vrijednosti površinske napetosti ispitivanih uzoraka variraju od 19 mN/m (uzorak 2 i 3) do 41 mN/m (uzorak 1). Mjerenja su izvedena prema pravilima iz Hrvatske norme HRN EN 14210 te su rezultati ocijenjeni prema uvjetima iz iste. Uvjet za dobra ulja je $\sigma \geq 22 \text{ mN m}^{-1}$, a za izvrsna ulja $\sigma \geq 28 \text{ mN m}^{-1}$ [14].

Tablica 5. Prikaz vrijednosti površinske napetosti ispitivanih uzoraka ulja određenih pri 20 °C.

Uzorak	$\sigma / \text{mN m}^{-1}$
Ulje 1	41
Ulje 2	19
Ulje 3	19
Ulje 4	35
Ulje 5	29
Ulje 6	23
Ulje 7	25
Ulje 8	26

Na slici 10 grafički su prikazane napetosti površine ispitivanih uzoraka ulja. Iz slike je vidljivo da je najveća napetost površine određena za uzorke ulja 1 ($\sigma = 41 \text{ mN m}^{-1}$) i ulje 4 ($\sigma = 35 \text{ mN m}^{-1}$) dok je najniža gustoća određena za uzorke ulja 2 i 3 ($\sigma = 19 \text{ mN m}^{-1}$). Srednje vrijednosti napetosti površine u rasponu od 23 - 29 mN m^{-1} određene su za uzorke ulja 5, 6, 7 i 8.



Slika 10. Grafički prikaz površinske napetosti ispitivanih uzoraka ulja.

S obzirom na dobivene vrijednosti, površinske napetosti ulja pod brojevima 2 i 3 nisu zadovoljila uvjete iz norme HRN EN 60422 i testne metode HRN EN 14210. Ostali uzorci zadovoljavaju uvjet jer je njihova izmjerena površinska napetost $\sigma \geq 22 \text{ mN m}^{-1}$. Prema istoj normi uzorci 1,4 i 5 imaju izvrsnu površinsku napetost jer je njihova izmjerena vrijednost $\sigma \geq 28 \text{ mN m}^{-1}$.

Uzimajući u obzir parametre koji su ispitivani u ovom radu, ulja čiji su uzorci označeni brojevima 2 i 3 ne bi bila ocijenjena zadovoljavajućima jer je njihova površinska napetost manja od one određene normom za inhibirana ulja. Međutim ta dva parametra nisu dovoljna za potpunu procjenu kvalitete ulja. Uzorak ulja označen brojem 2 ne zadovoljava uvjet za dobru površinsku napetost, međutim svi ostali mjereni parametri su dobri te je ulje proglašeno dobrim za daljnje korištenje. Ulja označena brojevima 3 i 6 ocijenjena su kao nezadovoljavajuća. Iako su vrijednosti površinske napetosti i gustoće za ulje označeno brojem 6 zadovoljavajuće ono je nezadovoljavajuće zbog visokog udjela vode te je zaključeno da je ulje oksidirano i ostarjelo. Uzorak ulja označen brojem 8 je uzet iz transformatora u kojem je došlo do kvara, ulje je bilo mutno i sadržavalo je talog te mu je boja određena prema ASTM D1500 normi 7,5. Dakle ono je oksidirano, ali promatrajući samo

njegovu gustoću i površinsku napetost dalo bi se zaključiti da je ulje dobro. Ostali uzorci ulja (1,4, 5 i 7) zadovoljavajuće su kvalitete. Njihova eksperimentalno određena gustoća i površinska napetost su unutar granica za dobra ulja kao i ostali mjereni parametri.

5. Zaključak

U ovom završnom radu analizirani su rezultati dobiveni mjerenjem gustoće i površinske napetosti uzoraka elektroizolacijskih ulja. Transformatorska ili elektroizolacijska ulja koriste se za hlađenje i izolaciju metalnih dijelova transformatora. Ta ulja imaju posebno dobra izolacijska svojstva te sprječavaju iskrenje i koronsko pražnjenje te štite celuloznu izolaciju tako što sprječavaju njezin kontakt s atmosferskim kisikom. Zbog svega navedenog ulja su neophodna za dobar rad transformatora. Stoga je važno pratiti njihovu kvalitetu. Loša ili oksidirana ulja mogu uzrokovati velike kvarove na transformatorima koji zatim imaju velike financijske posljedice. Svi ispitivani uzorci ulja imali su zadovoljavajuću gustoću. Uzorci ulja označeni brojevima 1, 4, 5, 6, 7, i 8 imali su dobre vrijednost površinske napetosti. Uzorci označeni brojevima 2 i 3 nisu imali zadovoljavajuću vrijednost napetosti površine. Prema promatranim parametrima u ovom radu ta ulja bila bi nezadovoljavajuća. Međutim uzorak ulja pod rednim brojem 2 ocijenjen je kao zadovoljavajući unatoč tome što je vrijednost površinske napetosti niža od granice za dobra ulja. Razlog tome je što su svi ostali mjereni parametri ulja bili dobri. Uzorak pod rednim brojem 3 nije zadovoljavajuće kvalitete iako je njegova gustoća unutar granice određene za dobra ulja. Razlog tomu je što je ulje obojeno i stvara talog sa n-heptanom te je zaključeno da je ulje staro i oksidirano. Uzorak ulja pod rednim brojem 6 ocijenjen je kao nezadovoljavajući unatoč dobrim rezultatima dobivenim mjerenjem gustoće i površinske napetosti. To ulje je imalo visok udio vode te je zaključeno da je oksidirano i nije dobro za daljnje korištene. Uzorak ulja pod brojem 8 ima dobre rezultate mjerenja za gustoću i površinsku napetost, međutim to ulje je već na prvi pogled bilo loše. Boja mu je jako intenzivna i mutno je. Ulje je sadržavalo puno grafita, stvaralo je talog s n-heptanom i imalo je smanjen koeficijent dielektričnog gubitka. Iz svega navedenog može se zaključiti da se ulje ne može ocijeniti prema samo dva parametra već je potrebna cijela analiza. Kada bi se gledale samo vrijednosti gustoće i površinske napetosti ulje pod brojem 8 bi se ocijenilo kao zadovoljavajuće, a to ulje je uzeto iz transformatora u kvaru. Dakle za kvalitetnu procjenu stanja ulje potrebna je cjelokupna slika i detaljna analiza sastava.

6. Literatura

- [1] Morić M., Konstrukcija stroja za savijanje potpornih profila namota transformatora, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2017.
- [2] <https://riverglennapts.com/hr/transformer-oil/897-transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil.html>
- [3.] <https://sciencing.com/purpose-transformer-4620824.html>
- [4] Dolenc A., Transformatori, Elektrotehnički fakultet, Zagreb 1987.
- [5] <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/transformer-construction.html>
- [6] Lovreškov, L., Mršić, I., Optimiranje procesa pripreme nanofluida na osnovi transformatorskog ulja, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, (2015)
- [7] Vilić I., Ispitivanje smjese mineralnog i esterskog ulja električnim i toplinskim metodama, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb (2018.)
- [8] Proučavanje činilaca koji utječu na karakteristike izolacionih ulja za transformatore i prekidače, Institut Nikola Tesla, Beograd
- [9] M. Glumac, Volumetrijska svojstva vodenih otopina 1,2-dimetilimidazolijevog klorida pri različitim temperaturama, Kemijski-tehnološki fakultet, Split (2016.)
- [10] J. Radošević, Napetost površine vodenih otopina: utjecaj pH i suprotno nabijenih polielektrolita
- [11] Standardna operativna procedura: određivanje međupovršinske napetosti ulje/voda metodom prstena, HEP, Operativno-distribucijski centar, Fizikalno-kemijski laboratorij, Osijek
- [12] <https://www.enciklopedija.hr/>
- [13] Hrvatska norma HRN EN 60296
- [14] Hrvatska norma HRN EN 14210