

Ivanka Radić
Končar Distributivni i specijalni transformatori
ivanka.radic@koncar-dst.hr

Dominik Trstoglavac
Končar Distributivni i specijalni transformatori
dominik.trstoglavac@koncar-dst.hr

Vlatka Matun
Končar Distributivni i specijalni transformatori
vlatka.matun@koncar-dst.hr

Martina Mikulić
Končar Distributivni i specijalni transformatori
martina.mikulic@koncar-dst.hr

PREGLED IZOLACIJSKIH TEKUĆINA PRIMJENJIVIH KAO TEKUĆI DIELEKTRIK I SREDSTVO ZA ODVOĐENJE TOPLINE U DISTRIBUTIVNIM TRANSFORMATORIMA

SAŽETAK

U referatu je dan pregled izolacijskih tekućina koja se koriste u transformatorima kao sredstva za hlađenje i kao tekući dielektrici. Danas su u upotrebi različite vrste izolacijskih tekućina: mineralna ulja, esteri (prirodni i sintetski), silikonska ulja te izoparafinska ulja dobivena GTL tehnologijom (gas to liquid). Odabir optimalne izolacijske tekućine ovisi o nizu faktora koje treba uzeti u obzir – tehničkoj specifikaciji, specifičnim zahtjevima kupca, a naravno i cijeni.

U referatu je prikazana usporedba svojstava izolacijskih tekućina te njihove prednosti i nedostaci kao i zahtjevi odgovarajućih normi, a u svrhu odabira optimalnog rješenja pri odabiru vrste izolacijskog medija.

Ključne riječi: mineralna ulja, prirodni i sintetski esteri, silikonska ulja i izoparafinska ulja (GTL)

OVERVIEW OF INSULATING LIQUIDS APPLICABLE AS LIQUID DIELECTRIC AND MEDIUM FOR HEAT DISSIPATION IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS

SUMMARY

This paper gives an overview of insulating liquids used in transformers as a coolant medium and as liquid dielectrics. Today, various types of insulating liquids are in use: mineral oils, esters (natural and synthetic), silicone oils and oils obtained by isoparaffinic GTL technology (gas to liquid). The choice of the optimal insulating liquid depends on number factors that should be taken into account - technical specification, specific customer needs and costs.

This paper is a comparison of the properties of insulating liquids and their advantages and disadvantages as well as the requirements of appropriate standards for the purpose of selecting the optimal solution when choosing type of insulating medium.

Key words: mineral oil, natural and synthetic esters, silicone oil and isoparaffinic oil (GTL)

1. UVOD

Izolacijsko ulje se koristi u uljnim transformatorima kao sredstvo za prijenos topline, impregnaciju izolacije, izoliranje dijelova pod naponom, a ujedno je to i tekući medij koji 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 [1].

Najčešće korišteni izolacijski medij je mineralno naftensko ulje dobiveno postupkom rafinacije iz sirove nafte. Mineralna ulja mogu biti naftenska, parafinska, inhibirana i neinhirirana. Dugogodišnjim korištenjem ovog dielektrika stečeno je veliko iskustvo i znanje o ponašanju navedenog izolacijskog medija i najčešće je baš mineralno ulje najbolje rješenje uzimajući u obzir omjer kvalitete i cijene. Međutim kad je radna temperatura transformatora viša ($>100^{\circ}$), te kada imamo naglašene zahtjeve za sigurnost, nezapaljivost i zaštitu okoliša, moramo razmotriti druge vrste izolacijskih tekućina (npr. prirodni i sintetski esteri). Sintetski esteri nastaju kemijskom sintezom alkohola i masnih kiselina, dok se s druge strane prirodni esteri (vegetabilna ulja) dobivaju iz poljoprivrednih kultura (soja, suncokret i uljana repica).

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 par godina na tržištu se pojavilo i ulje proizvedeno ukapljivanjem prirodnog plina metana (GTL ulje) koje je izoparafinske strukture. GTL ulje se već primijenjuje u transformatorima prvenstveno u energetskim. Odlikuje prije svega velikom čistoćom (bez prisustva sumpora ili drugih primjesa), nižom gustoćom i višom točkom plamišta od mineralnih ulja dobivenih iz nafte.

Zahtjevi za fizikalnim i kemijskim svojstvima koje transformatorska izolacijska ulja moraju ispuniti su definirani u različitim međunarodnim normama (IEC, ASTM, IEEE).

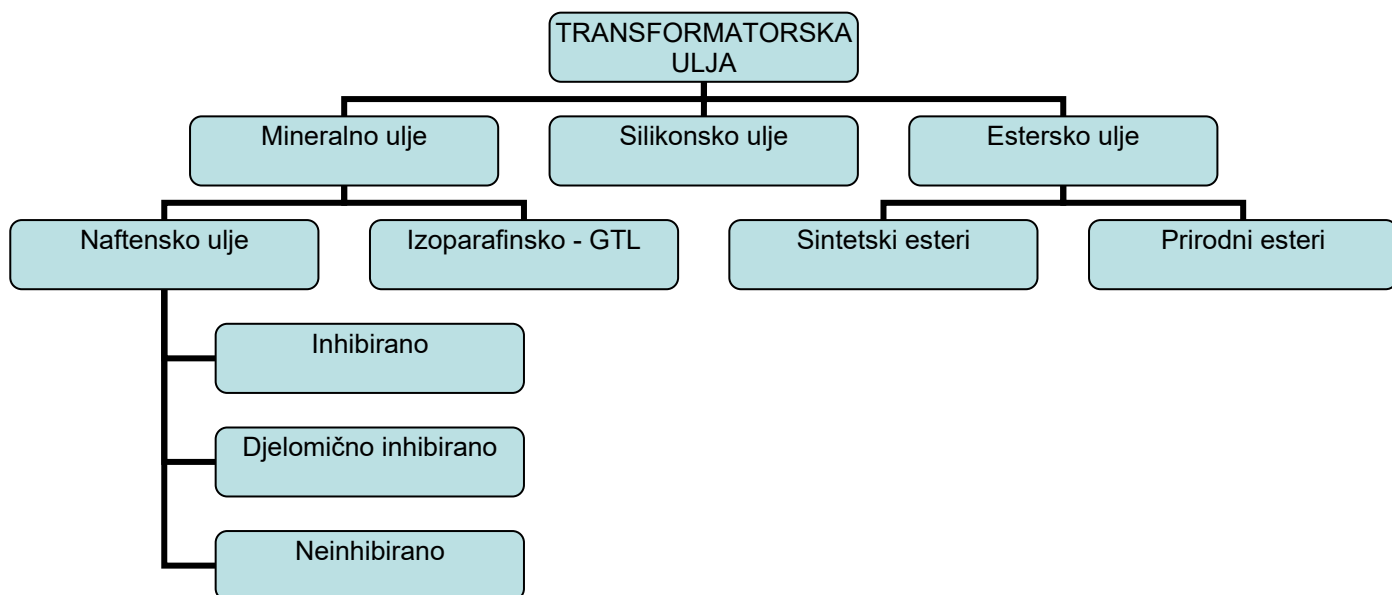
Fizikalno-kemijske karakteristike transformatorskih ulja se mogu podijeliti u šest grupa prema tablici I, ovisno o njihovoj ulozi u transformatoru (hlađenje, električna izolacija, životni vijek, kompatibilnost, zaštita okoliša i ostalo) [3].

Tablica I. Fizikalno – kemijske karakteristike transformatorskih ulja

Funkcija ulja	Svojstvo ulja			
Hlađenje	Viskoznost	Točka stiništa		
Električna izolacija	Probojni napon	Dielektrički disipacijski faktor DDF (tan delta)	Otpor	Sadržaj vode
Životni vijek	Oksidacijska stabilnost	Sadržaj inhibitora		
Kompatibilnost	Sadržaj sumpora/korozivnog sumpora	Sadržaj kiselina	Sadržaj aromata	
Zdravlje, sigurnost i okoliš	Točka plamišta /gorenja	DMSO, IP 346	PCB	
Ostalo	Gustoća	Površinska napetost	Sadržaj furana	

2. VRSTE TRANSFORMATORSKIH IZOLACIJSKIH TEKUĆINA

Danas su na tržištu dostupna i koristi se više vrsta izolacijskih transformatorskih ulja: mineralno ulje (inhirirano i neinhirirano), esterska, silikonska i izoparafinska ulja (slika 1.). Transformatorska ulja moraju zadovoljavati različite međunarodne norme ovisno o vrsti i statusu ulja (novo/nekorišteno ulje ili ulje u pogonu) prema tablici II.



Slika 1. Vrste transformatorskih izolacijskih ulja

Tablica II. Pregled normi transformatorskih ulja

	Mineralno ulje	Silikonsko ulje	Sintetski esteri	Prirodni esteri
Nova/nekorištena ulja	IEC 60296 ASTM D3487 IEEE PC57.106 IEEE C57.121	IEC 60836 ASTM D4652 IEEE C57.111	IEC 61099	ASTM D6871 IEEE PC57.147 IEC 62770
Ulja u pogonu	IEC 60422 IEEE PC57.106	IEC 60944 IEEE C57.111	IEC 61203	

Mineralna naftenska ulja su najčešće korištena u transformatorima, iako su zadnjih godina sve više u primjeni i druge alternativne vrste izolacijskih tekućina i to za distributivne, energetske i transformatore za vlakove. Kako raste primjena ovih izolacijskih tekućina tako raste i znanje oko ponašanja ovih dielektrika u praksi. U tablici III je dan sažetak primjene izolacijskih tekućina u današnje vrijeme iz čega je vidljivo da se na distributivnom programu koriste sve danas dostupne izolacijske tekućine [4].

Tablica III. Primjena izolacijskih ulja u transformatorima [4]

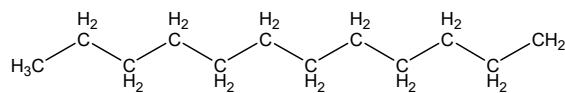
	Mineralna ulja	Silikonska ulja	Sintetski esteri	Prirodni esteri
Energetski transformatori	A	X	B	B
Transformatori za vuču	A	A	A	X
Distributivni transformatori	A	A*	A	A
Mjerni transformatori	A	X	X	X

A – u široj primjeni; B – rjeđe u primjeni; X – trenutno se ne koristi;

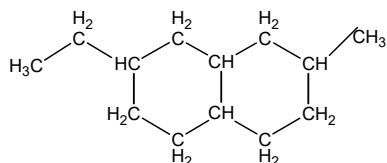
*primjena silikonskog ulja u DT transformatorima zadnjih godina je u opadanju

2.1. Mineralno izolacijsko ulje

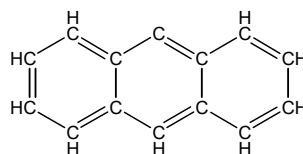
Mineralno izolacijsko ulje je ulje dobiveno rafinacijom, modifikacijom i/ili mješanjem naftnih produkata ili drugih ugljikovodika. Mineralno ulje dobiveno postupkom rafinacije iz sirove nafte je smjesa ugljikovodika različitih struktura: parafinske, naftenske i aromatske (slika 2.)



parafinska struktura



naftenska struktura



aromska struktura

Slika 2. Mineralno izolacijsko ulje - struktura

Parafinsko ulje je derivat iz 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 ili nimalo prirodnih n-parafina. Naftenska ulja imaju nisku točku staništa bez dodatnih aditiva. Naftenska ulja imaju bolju viskoznost i bolju oksidacijsku stabilnost. Iz tog razloga su danas u transformatorima korištena uglavnom naftenska mineralna ulja. [4].

Mineralna ulja sadrže antioksidanse tj. inhibitore. Antioksidansi usporavaju oksidaciju ulja te stvaranje taloga i kiselina. Ovi inhibitori mogu biti prirodni (neinhibirana ulja) i sintetski (inhibirana ulja). Najčešći antioksidansi su fenoli ili amini, a najrašireniji tip inhibitora je DBPC (2,6-di-tert-butil-para-krezol) i DBP (2,6-di-tert-butil-fenol). Vrstu dodanih aditiva proizvođači ulja moraju deklarirati prema IEC 60296. [5]

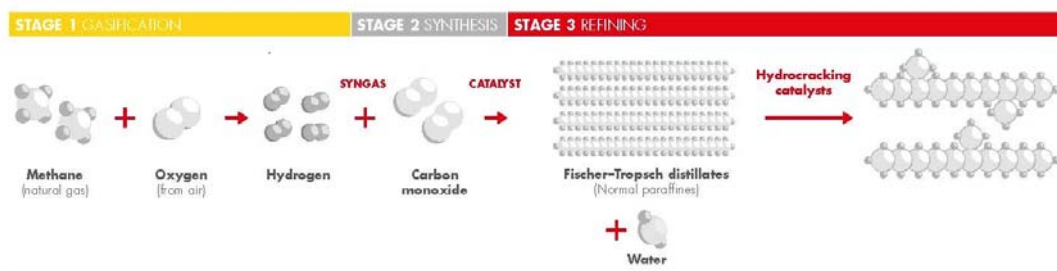
Neinhibirana ulja ne smiju sadržavati dodane sintetske inhibitore. Postotak antioksidansa (inhibitora) prema IEC 60296 za neinhibirano ulje treba biti <0,01%.

Inhibirano ulje je ulje u kojem je postotak dodanog inhibitora 0,08%-0,4%

Djelomično inhibirano ulje je ulje u kojem je postotak inhibitora <0,08%.

2.1.1. Izoparafinsko ulje dobiveno postupkom ukapljivanja prirodnog plina metana – GTL

Izoparafinsko ulje dobiveno postupkom ukapljivanja prirodnog plina metana (GTL- gas to liquid) je inhibirano transformatorsko ulje koje se dobiva Fischer-Tropsch postupkom (Slika 3.). [6]

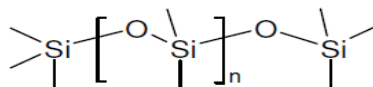


Slika 3. Postupak dobivanja izoparafinskog ulja

Dobiveno ulje je ulje visoke čistoće, izoparafinske strukture bez korozivnog sumpora, visoke oksidacijske stabilnosti i u potpunosti zadovoljava zahtjeve IEC 60296 za mineralna transformatorska ulja. Osim toga, prednosti nad ostalim mineralnim uljima su i nešto viša točka plamivosti i niža gustoća ulja, a nedostaci su i dalje nešto viša cijena i nedostatak iskustva iz prakse jer najstariji transformatori koji rade s ovom vrstom ulja su otprilike 5 godina u pogonu.

2.1.2. Silikonsko ulje

Silikonsko ulje (polisiloksani) su smjesa anorganskih i organskih polimera kemijske formule $[R_2SiO]_n$ (Slika 4).



Slika 4. Strukturna formula silikonskog ulja

Koristi se u transformatorima od kraja 1970-tih, kao alternativa PCB izolacijskim tekućinama korištenim prvenstveno radi zaštite od požara. Kao izolacijske tekućine s visokom stabilnošću i otpornošću na gorenje bile su široko primjenjivane u transformatorima za vlakove i distributivnim transformatorima više toplinske klase. Nema podataka o korištenju silikonskog ulja u energetske transformatorima.

Silikonske izolacijske tekućine su poznate po visokoj oksidacijskoj stabilnosti, ali su i otporne na biorazgradivost. Iz tog razloga imaju negativan utjecaj na okoliš, te je njihova upotreba ograničena u ekološki osjetljivijim područjima. Nedostatak ovih izolacijskih tekućina je i nekompatibilnost s ostalim izolacijskim tekućinama kao i obavezno korištenje posebne opreme pri manipulaciji.

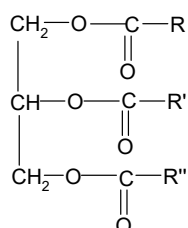
2.1.3. Esterske izolacijske tekućine

Esterske izolacijske tekućine imaju visoku točku gorišta i plamišta te su biorazgradive što im je prednost u odnosu na mineralna ili silikonska ulja. Iako su po kemijskoj strukturi slični, prirodni i sintetski esteri se ipak razlikuju u nekim karakteristikama, a prije svega po oksidacijskoj stabilnosti.

2.1.3.1. Prirodni esteri (vegetabilna ulja)

Vegetabilna ulja se dobivaju iz sjemenki različitih kultura (uljane repice, suncokreta, soje). Po kemijskom sastavu su smjese triglicerida. Relativno su polarni i zbog svoje strukture skloni stvaranju vodikovih veza. Vegetabilna ulja su izolacijske tekućine nešto 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. Izrazito su higroskopna i mogu otopiti 40 puta veću količinu vode od mineralnih ulja. [8]. Strukturna formula prirodnih estera je prikazana na slici 5.

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 staništa, što može biti problem pri pokretanju rada transformatora u hladnim područjima (ispod -30°C).

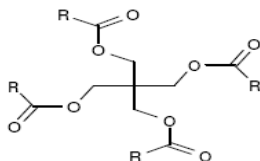


Slika 5. Strukturna formula prirodnog estera

2.1.3.2. Sintetski esteri

Sintetski esteri se dobivaju reakcijom esterifikacije između polivalentnih alkohola i viših masnih kiselina. Karakteristike, na temelju kojih su postali značajni za primjenu su sljedeće: visoko plamište i gorište – zbog čega su teško zapaljivi, dobra biološka razgradnja, 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 [1].

Sintetski esteri su u primjeni već dugi niz godina i danas se široko primjenjuju u distributivnim, specijalnim (npr. transformatorima za vlakove) i energetske transformatorima. Na slici 6. je prikazana strukturna formula sintetskih estera. Nedostatak je još uvijek viša cijena u odnosu na mineralna ulja.



Slika 6. Strukturna formula sintetskih estera

3. USPOREDBA SVOJSTAVA RAZLIČITIH IZOLACIJSKIH TEKUĆINA

Usporedba fizikalno-kemijskih svojstava različitih izolacijskih tekućina za transformatore dana je u tablicama IV i V. U tablici V su izdvojena neka svojstva uz naglašene prednosti pojedinih izolacijskih tekućina. [4]

Tablica IV: Usporedna svojstva novih izolacijskih tekućina primjenjivih u transformatorima

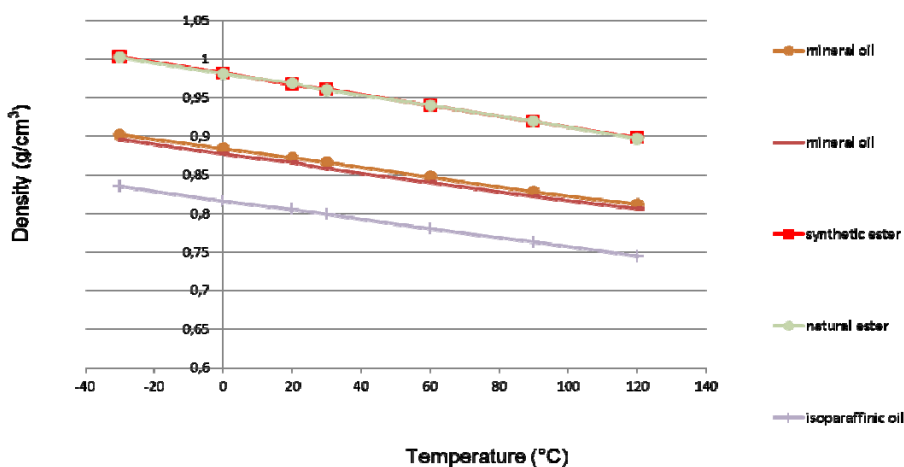
	Jedinica	Mineralno ulje ¹	GTL ²	Sintetski ester ³	Prirodni ester ⁴	Silikonsko ulje ⁵
Gustoća na 20°C	kg/dm ³	0.875	0,805	0.97	0.92	0.96
Toplinski kapacitet na 20°C	J/kgK	1860	2178	1880	1883	1510
Termička vodljivost na 20°C	W/mK	0.126	0,147	0.144	0.167	0.151 (50°)
Kinematička viskoznost na 20°C	mm ² /s	22	19	70	78	54
Kinematička viskoznost na 100°C	mm ² /s	2.6	2,6	5.25	8	15
Točka staništa	°C	-50	-42	-60	-21	<-50
Točka plamništa	°C	148	191	275	330	>300
Točka gorenja	°C	170	-	322	360	>350
Kvalifikacija zapaljivosti, IEC 61100		0	0	K3	K2	K3
Neutralizacijski broj	mgKOH/g	<0.01	<0.01	<0.03	0.022	<0.01
Zasićenje vodom pri 23°C	ppm	55	-	2600	1100	220
Probojni napon (2.5 mm)	kV	>70	>70	>75	75	50
DDF faktor na 90°C		<0.002	<0.001	<0.006	0.005	<0.001
Dielektrična konstanta na 20°C		2.2	2,2	3.2	3.1	2.7

¹Nytró Gemini X; ²Shell S4 ZX I; ³Midel 7131; ⁴FR3; ⁵Dow Corning

Tablica V. Usporedna svojstva različitih izolacijskih tekućina [7]

Svojstva	Mineralna ulja (IEC 60296)	Silikonska ulja (IEC 60836)	Sintetski esteri (IEC 61099)	Prirodni esteri (IEC 62770)
Kinematička viskoznost 20°C (mm ² /s)	22	50	70	80
Kinematička viskoznost 100°C (mm ² /s)	2,6	15	5,25	8,3
Točka gorenja (°C)	170-180	>350	>300	>350
Točka plamništa (°C)	140-160	>300	>250	>300
Zasićenje vodom na 20°C (ppm)	55	220	2600	1100
Biorazgradivost	Ne	Ne	Da	Da
Oksidacijska stabilnost	+	++	+	-

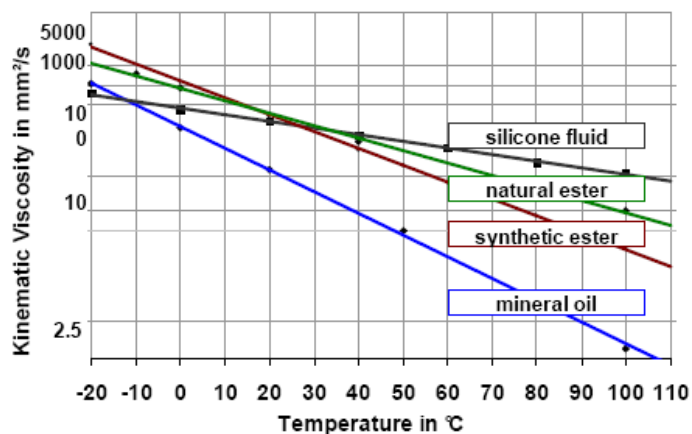
Gustoća ulja je neophodna karakteristika kod računanja ukupne mase transformatora. Gustoća ulja mora biti dovoljno niska u hladnim uvjetima kako bi se izbjeglo formiranje leda pri niskim temperaturama (u slučaju kad imamo prisutnu slobodnu vodu u ulju u transformatorima koji su izvan pogona), što može dovesti do iskrenja između vodiča. Gustoća ulja pada s rastom temperature (slika 7).



Slika 7. Usporedba gustoće različitih izolacijskih tekućina [6]

Gustoća GTL ulja je niža u odnosu na tradicionalna mineralna ulja ali i u odnosu na ostale izolacijske tekućine, što predstavlja njegovu prednost jer je za isti volumen potrebno manje ulja (cca 7% u odnosu na mineralna ulja), a i sama težina transformatora je time nešto manja.

Viskoznost je jedan od ključnih parametara kod određivanja svojstva hlađenja izolacijskih ulja. Viskoznost je otpor prema tečenju. Što je niža viskoznost ulja, ulje lakše cirkulira i bolje prenosi toplinu. Prema slici 8. vidljivo je da mineralno ulje ima najnižu viskoznost u odnosu na alternativne izolacijske tekućine. Visoka viskoznost može uzrokovati povećanje radne temperature transformatora. Izvedbom sustava hlađenja transformatora, određenim preinakama u transformatoru, može se poboljšati svojstvo hlađenja izolacijskih tekućina s visokom viskoznošću.

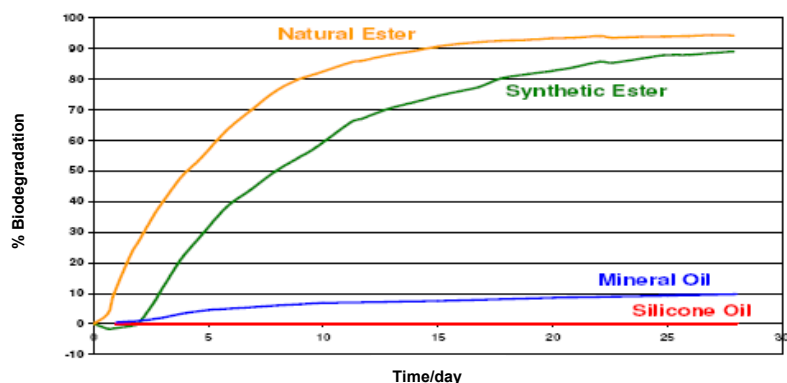


Slika 8. Usporedba viskoznosti različitih izolacijskih tekućina

Oksidacijska stabilnost izolacijskih tekućina je bitno svojstvo ulja za krajnje korisnike transformatora, jer što je viša oksidacijska stabilnost ulja to je dulji životni vijek izolacije pa i samog transformatora. Oksidacijom ulja nastaje talog i raste sadržaj kiselina u ulju. Silikonska ulja kao visoko stabilne molekule imaju najvišu oksidacijsku stabilnost dok prirodni esteri imaju najnižu oksidacijsku stabilnost. Prirodni esteri su zbog velike osjetljivosti na oksidaciju prihvatljivi isključivo u hermetički zatvorenim sustavima.

Biorazgradivost je svojstvo izolacijskih tekućina bitno za zaštitu okoliša. Biorazgradive tekućine se prirodno razgrađuju (uz pomoć mikroorganizama) u slučaju izlivanja u okoliš bez dodatnih akcija sanacije mjesta izlivanja. Da bi izolacijska tekućina bila klasificirana kao „biološki brzo razgradiva“ mora

između ostalog zadovoljiti i zahtjev da se minimalno 60% razgradnje mora odvit u roku od 28 dana. Prirodni i sintetski esteri su kvalificirani kao „biološki brzo razgradive“ tekućine dok mineralna i silikonska ulja nisu (Slika 9).

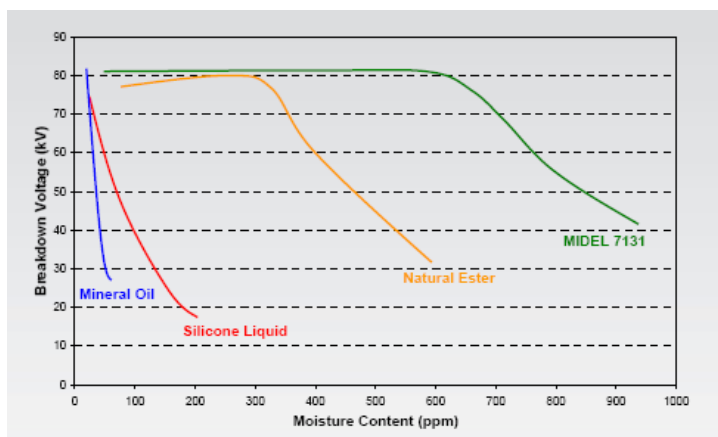


Slika 9. Biorazgradivost izolacijskih tekućina

Tolerancija vode izolacijskih ulja dana je u tablici VI, te pokazuje ukupnu količinu vode koju izolacijska tekućina može apsorbirati. Esterske izolacijske tekućine imaju visoku moć tolerancije vode, tj. mogu apsorbirati velike količine vode bez narušavanja dielektričnih svojstava (Slika 10). Esterske izolacijske tekućine (sintetski esteri) apsorpcijom vode iz krute izolacije na taj način produžuju životni vijek celulozne izolacije.

Tablica VI. Tolerancija vode

	Norma / sadržaj vode za nekoristene tekućine (ppm)	Ukupna zasićenost vodom na 23°C (ppm)
Mineralna ulja	IEC 60296 / max.30	55
Silikonska ulja	IEC 60836 / max. 50	220
Prirodni esteri	IEC 62770 / max. 200	1100
Sintetski esteri	IEC 61099 / max. 200	2600



Slika 10. Utjecaj sadržaja vode na dielektrična svojstva izolacijskih tekućina

4. ZAKLJUČAK

Izolacijske transformatorske tekućine danas moraju zadovoljiti stroge zahtjeve normi, zahtjeve krajnjih korisnika i zakonske kao i ostale zahtjeve po pitanju zaštite okoliša da bi njihova primjena osigurala pouzdan pogon transformatora te sigurnost po pitanju zdravlja ljudi i okoliša. Ovisno o tehničkoj specifikaciji te primjeni i radnim uvjetima transformatora potrebno je odabrati odgovarajuću vrstu ulja.

Mineralna ulja (naftenska i GTL) su najbolji izbor kod standardne radne temperature transformatora (do 100°C), imaju dobro svojstvo hlađenja zbog niske viskoznosti te dugi životni vijek zbog dobre oksidacijske stabilnosti. Mineralna izolacijska ulja su u upotrebi od samog početka proizvodnje transformatora, a zbog dostupnosti, cijene i performansi u cjelini i danas je njihova primjena najzastupljenija u transformatorima. Zahtjevi današnjih normi su puno stroži nego ranije, ulje ne smije sadržavati PCB, korozivni sumpor i pasivatore, a svi ostali aditivi moraju biti deklarirani. Izoparafinska ulja dobivena iz plina (GTL) su se pojavila unatrag par godina, međutim na razvoju istih se radi 30-tak godina. Zbog svojih prednosti nad mineralnim uljima iz nafte, a i velikim svjetskim rezervama plina (u odnosu na rezerve nafte) ovo ulje ima svoju budućnost u transformatorima. Cijena mu je usporediva s cijenom naftenskih ulja iste kvalitete.

Silikonske i esterske izolacijske tekućine se primjenjuju kod transformatora s višom radnom temperaturom, gdje su povećani zahtjevi za višom točkom zapaljenja. Primjena silikonskih izolacijskih tekućina zbog zaštite okoliša, loše biorazgradivosti i visoke cijene je danas sve rjeđa, dok primjena esterskih izolacijskih tekućina raste. Kad je naglasak na zaštiti okoliša, esterske izolacijske tekućine su obavezan izbor jer se u slučaju proljevanja u okoliš samorazgrađuju. Sve alternativne izolacijske tekućine su trenutno na tržištu i dalje puno skuplje od mineralnih izolacijskih ulja (oko 3-4 puta), što donekle sprječava njihovu širu primjenu.

Sve opisane vrste izolacijskih ulja zadovoljavaju međunarodne standarde i njihova se kvaliteta strogo provjerava.

5. LITERATURA

- [1] A. Hadži-Skerlev, B. Musulin, A. Mareković "Biorazgradiva transformatorska ulja", HRO CIGRE, Cavtat, 2007
- [2] A. Hadži-Skerlev, B. Musulin, D. Vrsaljko "Izbor opsega ispitivanja ulja u pojedinim fazama proizvodnje i rada transformatora" HRO CIGRE, Cavtat, 2009
- [3] Nynas transformer oil handbook, Nynas 2010.
- [4] CIGRE Working Group A2.35; 436 „Experiences in Service with New Insulating Liquids“, October 2010
- [5] IEC 60296 Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear; Edition 4.0; 2012
- [6] Dr. Jorg Friedel „Shell S4 ZX I -Inhibited transformer oil based on GTL fluids“; Zagreb, 17.09.2013.
- [7] Ivanka Atanasova-Hohlein „Transformer insulating liquid as diagnostic carrier“, 3rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management, 2012.