

Sonja Čabrac, dipl. ing.
Dijana Puklek, dipl. ing.
Marija Poljak, kem. tehn.
KONČAR – Institut za elektrotehniku, Zagreb

D1 – 02

KOMPATIBILNOST MATERIJALA U TRANSFORMATORIMA PUNJENIM MINERALNIM ULJEM

SAŽETAK

Svojstva materijala koji se koriste u uljnim transformatorima moraju zadovoljiti zahtjevima specifikacija normi, te dodatnim tehničkim zahtjevima kao što su otpornost materijala prema transformatorskom ulju i utjecaj na transformatorsko ulje.

Metode ispitivanja kompatibilnosti nisu normizirane međunarodnim normama. Postoje pojedine nacionalne norme odnosno lokalni tehnički zahtjevi i interne laboratorijske metode.

Prikazani su rezultati ispitivanja kompatibilnosti mineralnih ulja međusobno, zatim s drugim tekućim dielektricima i nekim materijalima iz proizvodnje transformatora.

Ključne riječi: transformatorsko ulje, materijali, kompatibilnost

MATERIAL COMPATIBILITY IN MINERAL-OIL-IMMersed TRANSFORMERS

SUMMARY

Properties of material intended for use in oil-immersed transformers near standard specification requirements must meet also additional technical requirements such as transformer oil resistivity and influence of the material to the transformer oil.

Compatibility test methods are not standardized by international standards. There are some national standards or local technical requirements and internal laboratory methods.

Compatibility test results for mineral insulating oils mutually, also with other liquid dielectrics and some solid materials from transformer manufacture are presented.

Key words: transformer oil, material, compatibility

1. UVOD

Transformatori punjeni mineralnim uljem klasičan su i standardiziran proizvod i za sada još nema znakova da bi se izolacijski sustav sastavljen od mineralnog izolacijskog ulja i celuloznog papira mogao zamijeniti drugim materijalima. Tijekom godina provedena su opsežna istraživanja kako pojedinačnih materijala ulja i papira, tako i u različitim međusobnim kombinacijama, tako da su dobro definirani utjecajni parametri, razine kvalitete i tijek degradacije. Činjenica je da se predmetni materijali vrlo dobro podnose i da su tehnologije proizvodnje transformatora kojima se postiže kvaliteta izolacijskog sustava dobro poznate.

Konstrukcijski i pomoćni materijali u transformatoru su metali (željezo, bakar, cink, aluminij), drvo, ljepila, lak žica, impregnacijski lakovi, premazi, brtve i različiti plastični dijelovi, a njihova količina u odnosu na ulje može biti u širokom rasponu.

Za punjenje specijalnih transformatora i drugih električnih uređaja koriste se sintetske tekućine posebnih svojstava, koje mogu različito utjecati na krute materijale.

Kompatibilnost materijala s uljem može se definirati kao maksimalno dozvoljena interakcija između materijala i ulja u uvjetima pažljivo odabralih testova. [L.1] Pri odabiru uvjeta izlaganja materijala ulju mora se polaziti od realnih uvjeta pogona, pooštrenih toliko da se dugogodišnji pogon svede na razumno vrijeme laboratorijskog ispitivanja, a da se ne prekorače kritične vrijednosti najutjecajnijih parametara. Reakcije između materijala moraju se potaknuti tako da ne nastanu neke druge nepoželjne pojave koje bi ih mogle ubrzati, skrenuti ili blokirati.

Razne vrste onečišćenja, koja trenutačno i dugoročno slabe svojstva ulja i cjelokupnog izolacijskog sustava, neizbjegno su prisutna u pogonu i mogu dospjeti u ulje u pojedinim fazama proizvodnje, transporta i skladištenja materijala i transformatora. Ispitivanje njihovog utjecaja na kompatibilnost uključeno je jedino ako su integralni dio materijala. Ako se radi o onečišćenjima koja se uklanjuju tehnološkim procesom, kao što su vлага, zrak, pojedine nečistoće, poželjno ih je prethodnom pripremom uzoraka isključiti iz reakcije.

Ispitivanja kompatibilnosti mogu se provoditi na više načina. Pod pojmom uljostalnosti podrazumijevaju se najčešće normizirana fizikalno-kemijska i mehanička ispitivanja propisanih uzoraka materijala (ispitne epruvete), prije i nakon izlaganja definiranoj vrsti tekućine pri povišenoj temperaturi. Kod ispitivanja uljostalnosti tekućina se ocjenjuje samo vizualno. Tipska i kontrolna ispitivanja razlikuju se po vremenu i temperaturi izlaganja i opsegu ispitivanja.

Postupak ispitivanja utjecaja na transformatorsko ulje nije propisan međunarodnom normom. Američka metoda ASTM 3455 [L.2] koja se odnosi na ispitivanje kompatibilnosti konstrukcijskih materijala s izolacijskim mineralnim uljem, vrlo je dobra podloga za provođenje preliminarnih ispitivanja, jer se za relativno kratko vrijeme može provesti kontrolirana selekcija materijala. Kao što i sama norma navodi, zadovoljavanje preporučenim kriterijima ne znači da se materijal može primijeniti, što potvrđuje složenost problema. U preporuci IEC 60422 [L.3] za nadgledavanje i održavanje izolacijskih transformatorskih ulja u pogonu naglašava se kompatibilnost izolacijskih ulja, navodi osnovni princip miješanja ulja i važnost ispitivanja.

Tijekom vremena pooštravaju se zahtjevi kupaca na kvalitetu i pogonsku pouzdanost opreme, dolazi do promjena u izvedbama objekata, pa se i na materijale postavljaju sve oštiri zahtjevi. Prilikom izrade projekta potrebno je najprije definirati vrstu ulja (izolacijske tekućine) zatim odabrati materijale koji su s njim kompatibilni. Ako postoji bilo kakva sumnja, mora se provjeriti kompatibilnost materijala s dotičnim uljem. Općenito, pri odabiru materijala za specifičnu primjenu, važni su slijedeći koraci [L.4]:

1. Odrediti sve moguće uvjete kojima će materijali biti izloženi, uključujući (ali nije uvijek ograničavajuće) temperaturu, vlagu, kemijske utjecaje i zračenje.
2. Pregledati listu potencijalno prihvatljivih materijala, te odmah izuzeti sve one za koje se zna da nisu otporni na navedene uvjete. Npr. ako primjena zahtjeva stalni rad na 155°C , sve materijale niže termičke klase treba isključiti.
3. Izabrati samo one materijale koji imaju potrebna dielektrična i mehanička svojstva.
4. Kompatibilnost s drugim komponentama izolacijskog sustava je kritični faktor za izbor materijala. Tako izolacijska tekućina ne smije utjecati na brtve, premaze, laminate, ali niti njena svojstva ne smiju slabiti pod utjecajem tih materijala.
5. Izbor materijala i njihovi međusobni odnosi moraju biti provedeni i postavljeni tako da se planski osigura vijek trajanja transformatora od 30 godina.

U radu su prikazana ispitivanja, koja mogu biti korisna za praksu, a odnose se na kompatibilnost mineralnih ulja, zatim mineralnog ulja s drugim tekućinama i nekim materijalima. Prikazani su rezultati ispitivanja, koja su imala za cilj otkrivanje reakcija s uljem u kojima dolazi do razvijanja plinova, za materijale koji nominalno zadovoljavaju prema testovima kompatibilnosti s mineralnim uljem.

2. SVOJSTVA ULJA ZNAČAJNA ZA KOMPATIBILNOST

Izolacijsko mineralno ulje klasičan je primjer izolacijske tekućine koja je smjesa različitih tekućih ugljikovodika, sastavljenih od dva kemijska elementa, ugljika i vodika, spojena u veliki broj različitih molekula, koje spadaju u tri grupe strukturalnih oblika: parafinske, naftenske i aromatske. Osnovni sastav je naftensko-parafinski, dok su aromatske molekule prisutne u znatno manjoj količini, ali vrlo značajne za

termičku otpornost ulja i reaktivnost prema drugim materijalima. Materijali koji se djelomično ili potpuno otapaju u izolacijskoj tekućini utječu na njena električna svojstva, a često i na brzinu degradacije.

Aromati sadrže najmanje jedan prsten od šest ugljikovih atoma (monoaromati), naizmjenično povezanih dvostrukom i jednostrukom vezom (C_6H_6). Imaju vrlo dobra električna svojstva, svojstvo otapanja plinova ("gassing"), relativno su oksidacijski stabilni, a neki od tih spojeva djeluju i kao prirodni inhibitori oksidacije ulja. Višak aromata može slabiti otpornost prema impulsnom naponu i termičkoj stabilnosti, potiče električno nabijanje kod bržeg strujanja ulja i djeluje agresivno prema drugim materijalima. Ulja prirodno sadrže i male količine aromata, koji u svojoj strukturi pored ugljika i vodika imaju elemente dušik, sumpor i kisik (heteroatomi). Njihova svojstva mogu biti različita, od povoljnog djelovanja kao inhibitora oksidacije ulja i pasivatora metala, do inicijatora oksidacije i nabijanja u električnom polju.

Kvalitetno ulje sve češće podrazumijeva stabilnost svojstava tijekom ukupnog planiranog vijeka trajanja transformatora, dakle cca. 30 god., što se može postići vrlo uravnoteženim odnosom tri glavne grupe ugljikovodika, uz što manji udio policikličkih aromata i heteroatomarnih molekula.

Rafinacijom se uklanjuju poliaromati i heteroatomi, a aromatske molekule mijenjaju u naftenske. Ako se pooštire uvjeti rafinacije, aromatske i naftenske molekule se mijenjaju u parafinske. Tako se naftenska ulja s visokim aromatima, mogu mijenjati u pretežno parafinska s niskim sadržajem aromata.

Ulje nakon rafinacije mora imati određenu prirodnu oksidacijsku stabilnost, kao i svojstvo dobre topivosti produkata degradacije, koji su znatno manje štetni dok su otopljeni u ulju. Početak njihovog izdvajanja iz ulja i stvaranje taloga usporavaju upravo aromati.

Sadržaj pojedinih grupa spojeva u ulju ovisno o porijeklu nafte i korištenom procesu rafinacije može se kretati u slijedećem području [L.1]:

N-alkani, % tež.	<0,05 – 15
C_{aromati} , % (IR)	5 - 25
C_{parafini} , % (IR)	40 - 70
C_{nafteni} , % (IR)	25 - 55
Sumpor, % tež.	0,05 - 1,0
Dušik, % tež.	0,0010 – 0,06
Kisik, kao org. kiselina	0,01 – 2,0 mg KOH/g

Za poboljšanje svojstava uljima se mogu dodati slijedeći sintetski spojevi:

2,6-ditercijski-butil-para-krezol ili 2,6-ditercijski-butil-fenol kao inhibitor oksidacije (cca. 0,3 % tež.);

Alkilirani polistiren ili polimetaakrilat kao depresant za sniženje stiništa (0,2 – 0,7 %);

Neki amini, antranilna kiselina kao pasivatori metalnih površina (cca. 0,2 %).

Prisutnost, sastav i djelovanje dodataka moraju biti poznati, jer im je utjecajnost na pojedina svojstva ulja u odnosu na naftensko-parafinske ugljikovodike 1:100.

Svojstva ulja koja proizlaze od kemijskog sastava, a značajna su za njegovo ponašanje prema materijalima su slijedeća:

- moć otapanja
- pritisak para
- zapaljivost
- međupovršinska napetost
- prisutnost krutih čestica

Moć otapanja ovisi o polaritetu molekula ulja, koji je posljedica privlačnih sila između molekula. Ugljikovodici, koji su na normalnim temperaturama tekući, miješaju se međusobno u svim omjerima, jer se privlačne sile između molekula različitih ugljikovodika malo razlikuju od sila između molekula istog tipa. Međutim, kod niskih temperatura na kojima su pojedini ugljikovodici kruti (voskovi), može prevladati privlačnost između sličnih molekula, pa dolazi do okrupnjavanja molekula i izdvajanja taloga. Privlačne sile između aromatskih ugljikovodika jače su nego kod naftenskih, a najslabije su između parafinskih ugljikovodika. Svojstvo otapanja koje imaju aromati koristi se i za uklanjanje aromata iz ulja pomoću polarnijih otapala.

U praksi se moć otapanja ulja najčešće definira preko dvije ispitne karakteristike: anilinska točka i konstanta viskoznost-gustoća (VGC).

Kod normalnih temperatura anilin i ulje se ne miješaju. Anilinska točka je temperatura kod koje se ulje potpuno otapa u anilinu. Određuje se tako da se jednake količine anilina i ulja griju uz jednolично miješanje do temperature otapanja. Što je veći sadržaj aromata, niža je temperatura otapanja. Pojedine specifikacije ulja propisuju granične vrijednosti anilinske točke, što je vezano uz zahtjev da ulje treba imati dobru moć otapanja produkata degradacije i ograničen sadržaj parafina.

Niža viskoznost povezana je s većim sadržajem lakših i hlapivijih ugljikovodika, koji imaju veći pritisak para i niže plamište. Gustoća je, međutim, kod parafina niža nego kod aromata.

Granična površinska napetost nije direktna mjera za topivost, ali je njena vrijednost povezana uz prisutnost polarnih spojeva bliskih vodi, što ujedno ukazuje na veću topivost.

Krute čestice u ulju mogu potjecati iz različitih izvora, a njihova prisutnost u ulju ima za posljedicu stvaranje električnog naboja i vodljivih mostova, polarizaciju pojedinih molekula ulja i stvaranje taloga.

Materijali koji se nalaze u ulju također imaju određena kemijska svojstva i strukturu, različita od ulja, na temelju kojih mogu biti ili ne kompatibilni s uljem. Najčešće se reakcije odvijaju na graničnim odnosno dodirnim površinama, na kojima je narušena homogenost materijala, a molekule izložene dodatnom djelovanju primjesa koje potiču reakcije (kisik, voda, kiseline, lužine).

Produkti kemijskih reakcija između molekula mogu biti tekući, kruti i plinoviti. Ako su tekući i topivi u ulju, najčešće se otkrivaju fizikalno-kemijskim metodama. Kruti se mogu lakše odrediti količinski nego kvalitativno, a plinovite je moguće odrediti kromatografskom analizom plinova iz ulja. Međutim, prema testovima kojima se ispituju uljostalnost i kompatibilnost nije predviđeno određivanje plinova. Plinovi nastali reakcijama između ulja i površine materijala mogu se otkriti kromatografskom analizom u uzorcima ulja iz transformatora u pogonu, ali njihovo porijeklo često ostaje nejasno i otežava interpretaciju analize plinova.

3. KOMPATIBILNOST MINERALNIH ULJA – MIJEŠANJE ULJA

U praksi je često pitanje kompatibilnosti mineralnih ulja i to, mogućnost miješanja novih ulja različite kvalitete i proizvođača, zatim starih ulja nepoznatog porijekla s novim uljima, bilo da se radi o nadolijevanju, ili zamjeni starih ulja novima i miješanju novog ulja s ostacima starog ulja.

Prema uputi iz IEC 60422/89 [L.3] ulja koja zadovoljavaju specifikaciji IEC norme 60296 [L.5], a iste su klase i ne sadrže aditive, mogu se bez posljedica dolicavati starom ulju, ako se dodaju u manjim iznosima (npr. do 5 %). Ako se radi o novim uljima različitog tipa i porijekla, treba ispitati kompatibilnost. Poznate su, naime, pojave izdvajanja taloga, ako se jako degradiranom ulju doda veća količina novog.

Dobra praksa je, prije primjene svake nove vrste ulja, pored obaveznih kvalifikacijskih ispitivanja, provesti dodatna ispitivanja, tj. proširena ispitivanja oksidacijske stabilnosti i kompatibilnosti s uljima iz pogona. Posebno je važno ispitati kompatibilnost uljima koja sadrže različite aditive.

Naveden je primjer ispitivanja kompatibilnosti novih mineralnih ulja različite kvalitete. Prikazani su rezultati ispitivanja dobiveni na uzorcima novih ulja: parafinskog (A) i naftensko-parafinskog (B), s različitim sadržajem aromata, s dodatkom antioksidansa istog tipa, bez drugih dodataka.

Tablica I. Rezultati ispitivanja ulja (A) i (B) i njihovih mješavina

Starenje, sati IEC 61125/A	KARAKTERISTIKA	A 100	B 100	A:B 25:75	A:B 50:50	A:B 75:25
164	Neutralizacijski broj, mg KOH/g	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Sadržaj taloga, %	0	0	0	0	0
2 x 164	Neutralizacijski broj, mg KOH/g	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04
	Sadržaj taloga, %	0	0	0	0	0
3 x 164	Neutralizacijski broj, mg KOH/g	0,06	0,04	-	0,04	-
	Sadržaj taloga, %	0	0	-	0	-
4 x 164	Neutralizacijski broj, mg KOH/g	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04
	Sadržaj taloga, %	0	0	0	0	0
IEC 61125/C	Indukcijska perioda, sati	122	168	134	144	158
Dostavno stanje	Anilinska točka, °C	99	86	-	92	-
	IR-spektar, % C _{aromata} C _{parafina}	15,4	10	-	12,5	-
		70,3	56	-	63	-

Fizikalno-kemijske karakteristike mješavina ulja u dostavnom stanju mijenjaju se linearno prema udjelu pojedinog ulja. Za ocjenu mogućih dugoročnih posljedica, podvrgnuta su laboratorijskom starenju čista ulja i njihove mješavine u omjerima (A) : (B) = 25:75 ; 50:50 i 75:25.

Korištena je metoda određivanja oksidacijske stabilnosti prema IEC 61125/A i C. [L.5.]

Rezultati ispitivanja prikazani u tablici I. pokazuju vrlo dobro miješanje ulja različite klase i sastava, što potvrđuje naprijed navedeno o potpunoj međusobnoj topivosti tekućih ugljikovodika.

S obzirom na razlike u sastavu, proizlazi da ulje (A) slab moć topivosti ulja (B) kao i njegovu oksidacijsku stabilnost kod viših temperatura.

Predmetna ispitivanja pokazala su da nije preporučljivo nekontrolirano miješati ovako različita ulja, iako se za praksu može izvući zaključak da se dolijevanje može dozvoliti.

4. KOMPATIBILNOST MINERALNIH ULJA S DRUGIM TEKUĆINAMA

4.1. Ispitivanja kompatibilnosti mineralnih ulja i sintetskog alkil-benzena

Provedena su u okviru opsežnih istraživanja mogućnosti zamjene mineralnih ulja sa sintetskim materijalima, koji bi bili ekološki prihvatljiviji s boljim svojstvima za specifičnu primjenu, npr. provodne izolatore i kabele. U jednom razdoblju očekivalo se da će alkil-benzen zamijeniti mineralno ulje.

U praksi je moguće da tekući dielektrik iz provodnog izolatora dospije u transformatorsko ulje, pa je i radi toga važna kompatibilnost mineralnog ulja s alkil-benzenom.

Ispitani su usporedno čisti alkil-benzen (AB) i naftensko-parafinsko mineralno ulje (M), te njihove smjese u omjerima 25:75, 50:50 i 75:25.

Oba dielektrika su inhibirana s 0,3 % 2,6-ditercijarnog-butil-para-krezola, pa je za ispitivanje oksidacijske stabilnosti korištena metoda IEC 61125/B i C.

Dio rezultata ispitivanja prikazan je u tablici II. Ispitivanja su pokazala izvanrednu kompatibilnost alkil-benzena s mineralnim uljem u svim omjerima, kako u dostavnom stanju tako i u dugotrajnim testovima oksidacijske stabilnosti.

Sam alkil-benzen, je kemijski definiran spoj, koji s obzirom na benzensku jezgru ima znatno nižu anilinsku točku od mineralnog ulja, pa mu je zato i moć otapanja znatno veća. Polarnost spoja neutralizirana je parafinskim lancima koji se nalaze na benzenu.

Tablica II. Rezultati ispitivanja kompatibilnosti alkil-benzena (AB) i mineralnog ulja (M)

Vrsta uzorka	Gustoća na 20°C, g/cm³	Anilinska točka, °C	Oksidacijska stabilnost IEC 61125/C -nakon 240 h		Oksidacijska stabilnost IEC 61125/C Ind. perioda, h
			Faktor diel. gubitaka, na 90°C	Neutralizacijski broj, mg KOH/g	
AB	0,872	33	0,078	0,02	>240
M	0,878	82	0,167	> 1,0	170
AB:M (50:50)	0,875	58	0,056	0,02	>240
AB:M (25:75)	0,876	69	0,027	0,02	>240
AB:M (75:25)	0,874	46	0,085	0,02	>240

4.2. Ispitivanja kompatibilnosti mineralnih ulja i različitih izolacijskih tekućina

Ispitane su i mješavine mineralnog ulja s različitim izolacijskim tekućinama, koje se nalaze u praksi za punjenje specijalnih transformatora i druge električne opreme, pa realno postoji opasnost njihovog nehotičnog, slučajnog miješanja.

Kompatibilnost novog mineralnog ulja s različitim izolacijskim tekućinama provedena je u volumskom omjeru 90 :10, sa slijedećim tekućinama:

- sintetski ester,
- silikonsko ulje,
- kerozin,
- staro mineralno ulje i
- trikloretilen

Tablica III. Rezultati ispitivanja kompatibilnosti tipičnog mineralnog ulja i tekućih dielektrika

OZNAKA UZORKA	Gran. površ. napetost, mN/m	Faktor dielektričkih gubitaka, tanδ, na 90 ⁰ C	Specifični el. otpor, GΩm, na 90 ⁰ C	IR – spektar Ca/Cp Usporedba s početnim
Vrijeme na t = 115 ⁰ C	0 96h 240h	0 96h 240h	0 96h 240h	
Mineralno ulje - čisto C _{aromata} /C _{parafina} (12 / 48)	42 40 35	0,001 - 0,001	469 - 180	Ca/Cp 12/48 Na kraju testa utrošen inhibitor
Mineralno ulje + 10% sintetskog estera	30 30 26	0,002 - 0,002	97 - 90	Jaka promjena strukture – na kraju utrošen inh.
Mineralno ulje + 10% silikonskog ulja	39 38 35	0,001 - 0,002	324 - 169	Ca/Cp 12/48- Na kraju testa utrošen inhibitor
Mineralno ulje + 10% kerozina	41 40 36	0,001 - 0,001	407 - 207	Ca/Cp 12/48- Na kraju testa utrošen inhibitor
Mineralno ulje + 10% starog ulja	30 24 23	0,005 - 0,006	76 - 29	Ca/Cp 12/48- Na kraju testa utrošen inhibitor
Mineralno ulje + 10% trikloretilena	42 40 33	0,002 - 0,002	138 - 103	Jaka promjena strukture – utrošen inhibitor

Pripremljeni su uzorci mineralnog ulja tipičnog za primjenu u energetskim i mjernim transformatorima naftensko-parafinske baze, te smjese istog ulja s 10 % strane tekućine. Uzorci su izloženi temperaturi od 115⁰C do 240 h. Mjerena su provedena u početnom stanju, nakon 96 h i 240 h. Rezultati su prikazani u tablici III. Opseg ispitivanja obuhvatio je karakteristike ulja koje su najosjetljivije na prisutnost spojeva polarnog karaktera i strukture različite od mineralnog ulja: granična površinska napetost, faktor dielektričnih gubitaka, specifični električni otpor i IR-spektar. U svim slučajevima smjesa je vizualno bila čista i bistra, bez vidljivih nehomogenosti prije i nakon termičkog izlaganja.

Rezultati ispitivanja potvrđuju dobrutopljivost i miješanje različitih vrsta ugljikovodika. Izražen je utjecaj sintetskog estera, trikloretilena i starog mineralnog ulja. Kerozin se vrlo dobro podnosi s mineralnim uljem, dok utjecaj silikonskog ulja nije izražen ovim testom. Naime, mineralno ulje pomiješano sa silikonskim jako pjeni. Proizlazi da je štetno nekontrolirano onečišćavanje mineralnog, izolacijskog ulja, te da udio od 10% značajan za kontaminaciju.

4.3. Ispitivanje kompatibilnosti mineralnog ulja i sredstva za privremenu zaštitu metala

U praksi se za privremenu zaštitu metala od korozije koristi selektivno rafinirano mineralno ulje s dodacima, kao što su inhibitori korozije, oksidacije i dodaci za istiskivanje vode. Postavljeno je pitanje da li je potrebno nauljene dijelove odmastiti prije ugradnje, tj. da li je zaštitno ulje kompatibilno s transformatorskim uljem.

Provedeno je ispitivanje smjese zaštitnog ulja i standardnog transformatorskog, u pretpostavljenom omjeru 1 : 100. Uz to su nauljeni metalni dijelovi ostavljeni na zraku (7 dana), a zatim stavljeni u ulje i izloženi 24 sata temperaturi 100⁰ C. Nakon hlađenja, ispitana je granična površinska napetost i IR spektar.

Rezultati ispitivanja (tablica IV) su pokazali da ulje za zaštitu metala već u vrlo maloj količini utječe na transformatorsko ulje, iako mu je osnova mineralno ulje. To je posljedica prisutnosti dodataka za poboljšanje svojstava i postizanje antikoroziskog efekta, koji su jako hidrofilni spojevi, polarnog karaktera, što pokazuje drastično smanjenje granične površinske napetosti.

Proizlazi da se kod primjene ulja za zaštitu metala mora strogo voditi briga o zaostaloj količini, odmašćivati predmete neposredno prije punjenja izolacijskog ulja ili odustati od primjene.

Tablica IV. Ispitivanja kompatibilnosti mineralnog ulja i sredstva za privremenu zaštitu od korozije

VRSTA UZORKA	Granična površinska napetost, mN/m	IR spektar
Transformatorsko mineralno ulje	40	% Ca / Cp = 10 / 47 tipičan za dotično trafo ulje
Ulje za privremenu zaštitu metala	3	Mineralno inhibirano ulje s dodacima
Zaštitno ulje : trafo ulje (omjer = 1 : 100)	26	Tipičan za trafo ulje - bez promjene
Zaštitno ulje : trafo ulje (omjer = 1 : 100000)	40	Tipičan za trafo ulje - bez promjene
Metalne pločice premazane zaštitnim uljem i stavljeni u trafo ulje	20	Tipičan za trafo ulje - bez promjene

5. PLINOVU ULJU KAO POSLJEDICA NEKOMPATIBILNOSTI MATERIJALA

Kromatografska analiza plinova iz ulja važna je dijagnostička metoda za detekciju stanja izolacijskog sustava transformatora u pogonu. Interpretacija rezultata analize plinova razrađena je i normizirana metodologija, međutim, u praksi su česte poteškoće i to kad rezultati ispitivanja odstupaju od predviđenih tipskih grešaka. Takvi primjeri su npr. odstupanja pojedinačnih plinova, koji spadaju u proekte degradacije izolacije, a nalaze se kod transformatora koji nisu bili pod naponom. Izražen problem javlja se kod nekih mjernih transformatora, kod kojih je udio materijala prema ulju znatno veći nego u energetskim transformatorima.

Proveden je niz ispitivanja u laboratorijskim uvjetima, kojima se pokušao kvantificirati utjecaj pojedinih uljostalnih materijala na razvijanje plinova. Od ispitanih prikazani su karakteristični primjeri, koji ilustriraju navedeno, to su uljostalne gumene brtve, elektroizolacijska navlaka i pocinčani lim.

Uzorak gumene brtve (50 mm x Ø 10 mm) stavljen je u 100 ml ulja u staklenu špricu i bez pristupa vanjskog zraka izložen temperaturi 100°C, 164 sata. Nakon toga ispitano je: ukupni sadržaj plina, koncentracija plinova otopljenih u ulju, sadržaj vode i granična površinska napetost. Dobiveni rezultati su u tablici V:

Tablica V. Rezultati ispitivanja reakcije između uljostalne gumene brtve i ulja

Karakteristika	Rezultati mjerjenja
Ukupno plina, ml/l	50,7
Vodik, H ₂ , µl/l	1175
Metan, etan, etilen, acetilen, µl/l	< 0,1
CO, µl/l	96
CO ₂ , µl/l	2196
Sadržaj vode, mg/kg	87
Granična površinska napetost, mN/m	34

Izraženo su visoki rezultati vodika i sadržaja vode, koji pokazuju da u uvjetima testa dolazi do nepoželjne reakcije, iako materijal prolazi testove ispitivanja uljostalnosti. Sa stajališta praktične primjene potrebno je uzeti u obzir nađeni utjecaj, ali također provesti ispitivanja u uvjetima bližim realnijim (temperatura, omjer materijala i ulja).

Na sličan način provedena su ispitivanja uljostalnih elektroizolacijskih navlaka (bužir) kod viših temperatura (120°C i 150°C), kojima se pokušala istražiti temperatura promjene materijala, deklariranog za 155°C . Nađeno je da kod 150°C dolazi do izraženog izdvajanja CO_2 , a materijal potamni i postaje krt.

U trećoj grupi ispitivanja poinčani lim izložen je djelovanju ulja, bez prisutnosti vanjskog zraka, kod sobne temperature u razdoblju od 7 do 180 dana (tablica VI). Za usporedbu je korišten čisti cink.

Tablici VI. Rezultati analize plinova nastalih reakcijom na poinčanoj površini

VRSTA PLINA	Koncentracija plina, $\mu\text{l/l}$			
	nakon 7 dana	nakon 14 dana	nakon 28 dana	nakon 180 dana
Vodik, H_2	19	41	41	651
Ugljikovodici	<0,1	<0,1	<1	<1
CO	< 1	<1	3	7
CO_2	405	427	302	354

U usporednoj probi s čistim cinkom, koncentracija vodika bila je manja od $20 \mu\text{l/l}$.

Kao što je iz rezultata vidljivo, s vremenom se razvijaju značajne količine vodika, koje se mogu očekivati i u uljnim transformatorima u kojima su pojedine čelične površine poinčane. Važno je naglasiti da je ispitivanje kompatibilnosti cinčanih površina bilo ranije provedeno u skladu s metodom ASTM D 3455, kao i dugotrajnim testovima oksidacijske stabilnosti, te da su rezultati bili u potpunosti zadovoljavajući.

6. ZAKLJUČAK

Ispitivanja međusobnog utjecaja materijala i izolacijskog ulja neophodan su preduvjet za primjenu materijala u uljnim transformatorima. Uz kvalifikacijska ispitivanja za izbor materijala i definiranje opsega primjene, normizirana su samo ispitivanja uljostalnosti elastomera. Za selekciju materijala prema kompatibilnosti s mineralnim izolacijskim uljem može se koristiti metoda ASTM D3455. Međutim, procjena ponašanja ulja i materijala u pojedinim specifičnim uvjetima, mora se donijeti na temelju proširenih ispitivanja, koja treba prilagoditi realnim zahtjevima primjene.

- [1] Wilson, a.c.m.: insulating liquids: their uses, manufacture and properties, Peregrinus, London, 1980.
- [2] Standard Test Methods ASTM D 3455: Compatibility of Construction Material with electrical Insulating oil of Petroleum Origin
- [3] IEC 60422 (1989): Supervision and maintenance guide for insulating mineral insulating oils in electrical equipment
- [4] Tillar Shugg W.: Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials, IEEE Press, 1995.
- [5] IEC 61125 (1992): Unused hydrocarbon based insulating liquids-Test methods for evaluating the oxidation stability