

**UNIVERZITET U BEOGRADU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKI FAKULTET**

Valentina Z. Vasović

**RASPODELA VLAGE I DEGRADACIJA IZOLACIONOG
SISTEMA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA SA
MINERALNIM I BILJNIM ULJEM**

Doktorska Disertacija

Beograd, 2021

**University of Belgrade
Faculty of Technology and Metallurgy**

Valentina Z. Vasović

**DISTRIBUTION OF WATER AND DEGRADATION OF
INSULATION SYSTEM OF POWER TRANSFORMERS
FILLED WITH MINERAL AND NATURAL ESTER OIL**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

MENTOR:

Dr Aleksandar Orlović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

KOMISIJA:

Dr Sandra Glišić, docent
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Ivana Lukić, naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

Dr Zoran Radaković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Dr Jelena Lukić, naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla

Dr Nenad Kartalović, naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla

Datum odbrane:

Zahvalnica

Ovom prilikom zahvaljujem se dr. Draganu Kovačeviću, direktoru elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“ i Mr. Srđanu Milosavljeviću, direktoru centra „Elektromerenja“ na pruženoj mogućnosti da se bavim naučnom-istraživačkim radom.

Dr Jeleni Lukić, rukovodiocu specijalizovane laboratorije za ispitivanje izolacionih ulja i papira elektrotehničkog instituta „Nikola Tesla“, zahvaljujem se na pruženoj podršci i prilici da učestvujem u naučno istraživačkim projektima kao i na nesebičnom prenošenju stručnog znanja.

Mentoru dr Aleksandru Orloviću, redovnom profesoru Tehnološko-metalurškog fakulteta, zahvaljujem se na pomoći i sugestijama tokom izrade doktorske disertacije.

Dr Zoranu Radakoviću, redovnom profesoru Elektrotehničkog fakulteta, zahvaljujem se na saradnji tokom istraživanja i pomoći prilikom oblikovanja naučno istraživačkih rezultata.

Zahvaljujem se svim saradnicima iz laboratorije za ispitivanje izolacionih ulja i papira na pruženoj pomoći, i svim kolegama koji su na bilo koji način pomogli u sprovođenju istraživanja.

Naposletku, zahvaljujem se svojoj porodici, na neizmernom razumevanju i podršci tokom bavljenja naučno istraživačkim radom i pripreme doktorske disertacije, a posebnu zahvalnost upućujem suprugu Milovanu i našoj dečici Sonji i Ognjenu za snagu i nadahnuće koje mi neprestano pružaju.

Raspodela vlage i degradacija izolacionog sistema energetskih transformatora sa mineralnim i biljnim uljem

Rezime: Predmet istraživanja ove doktorske disertacije je raspodela vlage i degradacija izolacionog sistema energetskih transformatora čiji su bakarni provodnici izolovani Kraft papirom i izolacionim uljem mineralnog, odnosno biljnog porekla. Izolacioni sistem uljem punjenih energetskih transformatora sačinjen je od izolacionih ulja i čvrste izolacije na bazi celuloze. Najvažniji deo izolacije predstavlja izolacioni papir oko bakarnih provodnika i smatra se da je transformator dostigao kraj svoj životnog veka onda kada je papir degradirao u tolikoj meri da je izgubio mehaničku čvrstinu i sposobnost da podnese dalja električna, a posebno mehanička naprezanja. Kao jedna od mera degradacije papira, odnosno mera mehaničke čvrstoće, uzima se vrednost stepena polimerizacije papira (DP). Ovaj parametar se može odrediti tek nakon što transformator završi svoj radni vek, tako da je tokom pogona transformatora moguće vršiti samo indirektno procene stepena degradacije papirne izolacije. Jedan od načina za procenu stanja papirne izolacije jeste određivanjem sadržaja derivata furana u ulju koji nastaju prilikom degradacije papirne izolacije uz korišćenje odgovarajućih korelacionih jednačina. Korelacione jednačine koje su trenutno dostupne u literaturi ne uvažavaju parametre koji utiču na rastvorljivost derivata furana iz papira u ulje kao što je prisustvo vlage i kiselina u izolacionom sistemu.

Istraživački rad bio je organizovan u dva dela. Prvi deo istraživanja obuhvatao je proučavanje fenomena raspodele vlage između papirne izolacije i izolacionog ulja mineralnog i biljnog porekla. Formirani su ravnotežni dijagrami raspodele vlage između izolacionog Kraft papira, presborda i mineralnog, odnosno biljnog izolacionog ulja, za opseg temperatura 40 °C - 120 °C i sadržaja vlage u izolaciji 0,5% – 5%. Potvrda mogućnosti primene formiranih dijagrama u održavanju realnih energetskih transformatora ostvarena je poređenjem rezultata procene sadržaja vlage u celuloznoj izolaciji kod 23 realna energetska transformatora dobijenih na dva načina: primenom električne metode FDS i primenom predmetnih dijagrama uz korišćenje izmerenih sadržaja vode u ulju i radne temperature ulja. U okviru istraživanja fenomena raspodele vlage utvrđeno je da u slučaju biljnih izolacionih ulja postoji nejednaka raspodela vlage između papira i presborda, naročito na umerenim temperaturama i za niže

sadržaje vlage, što može biti veoma korisno prilikom procene ovlaženosti izolacionog sistema realnih energetskih transformatora punjenih uljem biljnog porekla.

Drugi deo istraživanja obuhvatao je detaljnije ispitivanje uticaja ovlaženosti izolacionog sistema i temperature na degradaciju papirne izolacije kroz testove ubrzanog starenja. Poređenje performansi biljnog izolacionog ulja sa performansama mineralnih izolacionih ulja, kao i brzine starenja izolacionog Kraft papira u predmetnim uljima, izvršeno je na osnovu rezultata testa ubrzanog starenja izolacionog sistema u laboratorijskim uslovima. Test ubrzanog starenja sproveden je na temperaturi od 140 °C u uslovima ograničene koncentracije kiseonika u ulju (< 4000 mg/kg) uz prisustvo bakra. Rezultati ovih istraživanja su pokazali da su performanse biljnog ulja zadovoljavajuće za primenu u energetskim transformatorima odgovarajuće konstrukcije kod kojih je prisustvo kiseonika dovoljno nisko da se oksidacija biljnih ulja ne odvija u značajnoj meri. Ustanovljeno je da se degradacija papirne izolacije tokom eksperimenta odvijala nešto sporijom brzinom u sistemu sa biljnim uljem u odnosu sisteme sa mineralnim uljima. Sadržaj derivata furana rastvorenih u biljnom ulju je tokom i na kraju testa starenja bio prilično nizak, te korelacije između koncentracije derivata furana u ulju i ostarelosti papirne izolacije nije bilo moguće uspostaviti. Ova činjenica otvara pitanje da li u održavanju energetskih transformatora punjenih biljnim uljem analiza ovih jedinjenja ima praktičnog smisla. Preporuka je da se na bazi skupa rezultata kod realnih transformatora izvrši analiza i doneti konačni zaključak po tom pitanju. U okviru ovog dela istraživanja potvrđeni su navodi u literaturi da prilikom termičke degradacije određenih tipova biljnih ulja nastaje etan kao vodeći gas i to u značajno višim koncentracijama u odnosu na ostale gasove, o čemu je potrebno voditi računa prilikom tumačenja rezultata analize sadržaja gasova u ulju i dijagnostike pogonskog stanja realnih energetskih transformatora punjenih ovim uljima.

Ispitivanje uticaja vlage na brzinu starenja izolacionog Kraft papira u izolacionom ulju mineralnog porekla izvršeno je kroz ubrzani test starenja na temperaturi od 105 °C u eksperimentalnim transformatorima specifične konstrukcije. Dva eksperimentalna transformatora različitog početnog sadržaja vlage u izolaciji, kod kojih je bilo moguće periodično uzorkovanje ulja i papirne izolacije bili su podvrgnuti ubrzanom starenju i dostigli su kraj svog životnog veka odnosno vrednost stepena polimerizacije papira od oko 200 – 250. Na istoj temperaturi stareni su i odgovarajući laboratorijski modeli koji su u sebi

sadržali najvažnije izolacione materijale (papir, presbord, barijera, prešpan i ulje), ali i najvažnije katalizatore reakcija degradacije izolacionog sistema (gvožđe i bakar) u istim masenim odnosima kao kod eksperimentalnih transformatora. Na osnovu dobijenih rezultata izrađene su krive zavisnosti stepena polimerizacije Kraft papira od sadržaja derivata furana u ulju za temperaturu od 105 °C, nizak sadržaj kiseonika u ulju (< 4000 mg/kg) i umeren sadržaj kiselina u ulju. Izučavanjem brzine starenja papirne izolacije eksperimentalnih transformatora i odgovarajućih laboratorijskih modela za dva različita početna sadržaja vlage u izolaciji (oko 1% i oko 4%) formirana je jednačina koja uvažava uticaj sadržaja vlage na brzinu starenja Kraft papira, čime je unapređen Arrhenius-ov termokinetički model starenja papirne izolacije. Rezultati ostvareni u okviru ovog dela istraživanja mogu poslužiti za unapređenje procene trenutnog stanja papirne izolacije realnih energetskih transformatora punjenih mineralnim uljem, baziranog na merenju sadržaja derivata furana u ulju, kao i procene preostalog životnog veka energetskih transformatora.

Ključne reči: energetski transformator, brzina degradacije papirne izolacije, biljna izolaciona ulja, derivati furana, raspodela vlage

Naučna oblast: Tehnološko inženjerstvo

Uža naučna oblast: Hemijsko inženjerstvo

UDK broj:

Distribution of water and degradation processes of insulation system of power transformers filled with mineral oil and natural ester oil

Abstract: Scope of this phd research was investigation of moisture distribution and ageing phenomena of the insulation system of power transformers with kraft paper insulated copper conductors and filled with mineral or natural ester oil. The insulation system of oil-filled power transformers is composed of insulating oils and cellulose-based solid insulation. The most important part of the insulation is the insulating paper wrapped around copper conductors. Transformer is considered to have reached the end of its life when the paper have lost it's mechanical strength and ability to withstand further electrical and mechanical stresses due to degradation. A common way to express the condition of paper insulation in transformers, ie mechanical strength of paper, is the degree of polymerization (DP). This parameter can be determined only after the transformer has completed its service life. During the operation of the transformer it is only possible to make estimation of DP based on furan derivatives content in the oil, compounds produced during paper ageing, using appropriate correlation equations. The correlation equations currently available in the literature do not take into account parameters that affect the solubility of furan derivatives in oil, such as the presence of moisture and acids.

Research was oriented in two areas. First area had covered investigation of moisture distribution phenomena between paper and oil, mineral and natural ester. Based on experimentally data moisture equilibrium charts for kraft paper and pressboard insulation and mineral and natural ester oil were developed, for temperature range 40 ° C – 120 ° C and moisture content in insulation 0.5% - 5%. A comparative analysis of estimated moisture contents in the cellulose insulation using measurements of water content in the oil and equilibrium curves, and moisture contents obtained by applying electrical frequency dependent spectroscopic method (FDS) are provided for 23 transformers in service. A good agreement of these results confirmed applicability of these charts for assesing the water content in solid insulation of power transformers in service.

Due to the higher solubility of moisture in natural ester compared to in mineral oil, water equilibrium in a system of natural ester oil, paper and pressboard was moved to the oil. In the system of natural ester oil uneven distribution of water between paper and pressboard was also observed, especially for moderate initial water contents and moderate temperatures. This fact could be very useful in assessing the moisture content in paper in power transformers filled with natural ester oil.

Second research area included a more detailed investigation of the influence of water and temperature on ageing of paper insulation by performing accelerated aging tests. The performances of natural ester oil and mineral insulation oils, as well as the aging rate of kraft paper in the subject oils, were compared in accelerated aging test in laboratory conditions. The accelerated aging test was performed at 140 ° C under conditions of limited oxygen concentration in oil (<4000 mg / kg) in the presence of copper. The obtained results shown that the performance of vegetable oil is satisfactory for application in power transformers of appropriate construction in which the presence of oxygen is low, so that oxidation of natural ester oils does not occur significant extent. The ageing rate of paper in natural ester oil was somewhat slower comparing to system with mineral oil. The furan derivatives content in natural ester oil was quite low during ageing, and correlations between the furan derivatives and DP of paper could not be established. This observation raises the question of whether the analysis of furan compounds makes practical sense in the maintenance of power transformers filled with natural ester oil. It is recommended that on the basis of a set of results for real transformers, an analysis be performed and a final conclusion be made on that issue. Results from these experiments also confirm that certain types of natural ester oils produce ethane in significantly higher amount compared to other gases, even at low temperatures. This is very important to be taken into account when interpreting the results of gas content analysis of oil and performing diagnostics of power transformers filled with these oils.

Investigation of moisture impact on the ageing rate of kraft paper in mineral oil was performed through an accelerated ageing test of experimental power transformers of special construction at temperature of 105 ° C. Two identical experimental transformers with different initial moisture content in the insulation, were subjected to accelerated ageing and reached the end of their lifespan, i.e. DP values of the paper were 200-250 at the end. Along with ageing of experimental transformers, corresponding laboratory experiments were carried

out, at the same temperature, with the same proportion of materials and initial water contents. Based on experimental results correlation curves of DP of kraft paper and furan derivative content in the oil were developed for temperature of 105 °C, low oxygen content in oil (< 4000 mg/kg) and moderate acid content in oil. By studying the aging rate of paper insulation of experimental transformers and corresponding laboratory models for two different initial moisture contents in insulation (about 1% and about 4%) thus improving Arrhenius thermodynamic model of aging of kraft paper insulation by taking into account the influence of moisture content. The results achieved in this research could be used to improve the assessment of the consumed and remaining life of power transformers in service.

Key words: power transformers, paper insulation degradation, natural ester insulation oil, furan derivatives, moisture distribution.

Scientific Area: Technological engineering

Specific Scientific Area: Chemical engineering

UDK number:

SADRŽAJ

UVOD.....	1
1. IZOLACIONI SISTEM ENERGETSKIH TRANSFORMATORA	3
1.1. Izolaciona ulja.....	5
1.1.1. Hemijski sastav izolacionih ulja mineralnog i biljnog porekla	6
1.1.2. Oksidaciona stabilnost izolacionih ulja i njen uticaj na performanse izolacionog sistema transformatora.....	9
1.2. Degradacija celulozne izolacije energetskih transformatora	11
1.3. Degradacija celulozne izolacije i životni vek energetskih transformatora	14
1.3.1. Procena potrošenog životnog veka prema standardu IEC 60076-7.....	15
1.3.2. Kinetika degradacije celulozne izolacije prema Arrheniuss-ovom modelu	16
1.4. Procena preostalog životnog veka ET.....	20
1.4.1. Procena preostalog životnog veka prema M. Pradhan-u	21
1.4.2. Procena trenutne vrednosti DP papira na osnovu sadržaja derivata furana u ulju.....	22
2. METODE ZA ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA I STEPENA DEGRADACIJE PAPIRNO/ULJNE IZOLACIJE U POGONSKIM USLOVIMA TRANSFORMATORA.....	27
2.1. Određivanje sadržaja gasova rastvorenih u ulju	27
2.2. Fizičke, hemijske i električne karakteristike izolacionih ulja.....	32
2.2.1. Kratak uporedni pregled karakteristika mineralnih i biljnih ulja	33
2.3. Određivanje sadržaja vode rastvorene u ulju	35
2.3.1. Apsolutni sadržaj vode u ulju	36
2.3.2. Procena ovlaženosti izolacionog sistema energetskih transformatora na osnovu analize ulja	37
2.4. Određivanje sadržaja derivata furana u ulju	41
3. EKSPERIMENTALNI DEO	43
3.1. Materijali i reagensi	43
3.2. Analitičke Metode.....	44

3.2.1.	Ispitivanje sadržaja vode u izolacionom ulju i papiru prema standardu IEC 60814	44
3.2.2.	Određivanje koncentracije gasova rastvorenih u ulju prema IEC 60567	48
3.2.3.	Određivanje koncentracije derivata furana u ulju metodom tečne hromatografije prema IEC 61198.....	49
3.2.4.	Određivanje srednjeg viskozimetrijskog stepena polimerizacije papira prema IEC 60450.....	52
3.2.5.	Određivanje kinematičke viskoznosti i izračunavanje dinamičke viskoznosti ulja prema metodi SRPS ISO 3104:2003	56
3.2.6.	Određivanje neutralizacionog broja kolorimetrijskom titracijom prema SRPS EN 62021-2:2010 (IEC 62021-2:2007-05)	59
3.2.7.	Određivanje sadržaja inhibitora oksidacije u izolacionom ulju	61
3.2.8.	Određivanje relativnog sadržaja vode u ulju kapacitivnim senzorom	65
3.2.9.	Metoda dielektrične spektroskopije u frekventnom domenu - FDS.....	66
3.3.	Eksperimentalni postupak.....	68
3.3.1.	EKSPERIMENT I – Istraživanje fenomena ravnotežne raspodele vode u izolacionom sistemu energetskih transformatora	68
3.3.2.	EKSPERIMENT II – Simulacija ubrzanog starenja izolacionog sistema energetskih transformatora u laboratorijskim uslovima sa mineralnim odnosno biljnim uljem.....	78
3.3.3.	EKSPERIMENT III – Simulacija ubrzane degradacije izolacionog sistema dva eksperimentalna energetska transformatora punjena mineralnim uljem i odgovarajućih laboratorijskih modela	80
4.	REZULTATI I DISKUSIJA	91
4.1.	Rezultati eksperimenta I - istraživanje fenomena ravnotežne raspodele vode u izolacionom sistemu energetskih transformatora	91
4.1.1.	Ravnotežna raspodela vode između papira i presborda u mineralnom i biljnom ulju	97
4.1.2.	Poređenje eksperimentalno dobijenih dijagrama sa ravnotežnim dijagramima iz literature.....	100

4.1.3. Upotreba ravnotežnih dijagrama za procenu sadržaja vode u papiru ET u pogonu - poređenje sa rezultatima procene putem električnih merenja metodom FDS.....	102
4.2. Rezultati eksperimenta II - Simulacija ubranog starenja izolacionog sistema energetskih transformatora u laboratorijskim uslovima sa mineralnim odnosno biljnim uljem	104
4.2.1. Rezultati ispitivanja sadržaja vode u ulju i celuloznim materijalima.....	104
4.2.2. Rezultati fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja.....	106
4.2.3. Rezultati gasnohromatografske analize ulja.....	110
4.2.4. Kinetika starenja i markeri degradacije papirne izolacije	117
4.3. Rezultati Eksperiment III – Ubrzano starenje dva eksperimentalna energetska transformatora punjena mineralnim uljem i odgovarajućih laboratorijskih modela	123
4.3.1. Rezultati ispitivanja ulja transformatora i laboratorijskih modela	124
4.3.2. Kinetika starenja i markeri degradacije papirne izolacije eksperimentalnih transformatora i laboratorijskih modela.....	138
4.3.3. Poređenje brzine starenja različitih celuloznih materijala.....	146
4.3.4. Brzina starenja papirne izolacije - Arrhenius-ov termo-kinetički model	148
5. ZAKLJUČAK.....	156
6. LITERATURA	161

UVOD

Energetski transformatori su električni uređaji koji transformišu napon sa nižeg na viši ili obrnuto i imaju važnu ulogu u snabdevanju potrošača električnom energijom. Kontinualno snabdevanje potrošača električnom energijom u velikoj meri zavisi od ispravnosti ovih uređaja. Početkom 90tih godina XIX veka počinje proizvodnja transformatora ispunjenih izolacionim uljima umesto vazduhom, radi bolje i kvalitetnije izolacije i hlađenja namotaja. U početku su se u tu svrhu koristila izolaciona ulja na bazi biljnog i mineralnog porekla. Biljna ulja su se ubrzo pokazala kao neodgovarajuća za transformatore koji nisu zaptiveni, pa su povučena iz upotrebe. Nasuprot biljnim, mineralna ulja su se pokazala kao veoma pogodne izolacione tečnosti u električnoj opremi zahvaljujući odličnim svojstvima, kao što su: dobre dielektrične karakteristike, odličan prenos toplote, odlična stabilnost prema oksidaciji, dobra kompatibilnost sa izolacijom na bazi celuloze i mala cena, te su u upotrebi ostala do danas. Poslednjih godina XX i početkom XXI veka ponovo raste zainteresovanost za primenu biljnih ulja u električnoj opremi, a razlozi za to su: osiromašenost resursa mineralnih ulja koji se smatraju praktično neobnovljivim, noviji i sve rigorozniji ekološki zahtevi koje izolacione tečnosti moraju da ispune da bi se primenile u transformatorima, a vezani su pre svega za biorazgradivost i obnovljivost resursa, kao i za problem svođenja opasnosti od požara usled havarija transformatora na minimum, a koje biljna ulja u potpunosti ispunjavaju.

Ispravnost rada uljem punjenih energetskih transformatora (ET) u velikoj meri zavisi od stanja izolacionog sistema (IS) koji čine izolaciono ulje i papirna izolacija. Metode koje se koriste za ispitivanje izolacionih ulja imaju veliki značaj u dijagnostici pogonskog stanja, kao i u proceni preostalog životnog veka transformatora. Upotreba mineralnih ulja kao izolacionih tečnosti je već dugi niz godina veoma rasprostranjena, te postoji veliko iskustvo i poznavanje toka promena do kojih dolazi tokom eksploatacije i/ili pojave kvara u transformatoru. Istraživanja vezana za biljna ulja i mogućnost njihove primene u transformatorima, usmerena su ka tome da se izvrši poređenje njihovih karakteristika i karakteristika mineralnih biljnih ulja, kao i da se ispita mogućnost primene ispitnih i dijagnostičkih metoda razvijenih za mineralna ulja i na biljna ulja. Sa druge strane, u

stručnim krugovima su i dalje aktuelna nastojanja da se unapredi postojeći dijagnostički alat za ocenu pogonskog stanja energetskih transformatora, kao i za procenu potrošenog i preostalog životnog veka energetskih transformatora punjenih mineralnim uljima.

Prvo poglavlje disertacije opisuje osnovne mehanizme i stanje tehnike u vezi sa raspodelom vlage u IS i procene sadržaja vlage u celuloznoj izolaciji ET u pogonu. Takođe, razmatraju se i najbitnije praktično pitanje o zakonitostima brzine degradacije izolacionog sistema ET, kao i za problematiku procene potrošenog i preostalog životnog veka ET u upotrebi.

Eksperimentalni deo ove disertacije podeljen je u tri celine pri čemu je u svakoj celini dat opis postupka eksperimenta, opis analitičkih metoda i opis eksperimentalnih tehnika koje su primenjene. Prikaz rezultata i diskusija takođe je organizovan u tri celine u skladu sa eksperimentalnim delom. Disertacija se završava zaključkom u kome je dat zbirni prikaz i tumačenja svih rezultata ostvarenih tokom eksperimentalnih.

Naučni doprinos ove doktorske disertacije u odnosu na postojeće stanje tehnike ogleda se u sledećim rezultatima izvršenih istraživanja.

U okviru prvog dela istraživanja izučavani su fenomeni raspodele vlage u izolacionom sistemu transformatora, pre svega između izolacionog ulja i čvrste izolacije, ali i između celuloznih materijala različite debljine i to za dva izolaciona ulja različitog porekla – mineralno ulje i biljno ulje. Na osnovu eksperimentalnih rezultata formirani su ravnotežni dijagrami raspodele vode u izolacionom ulju, papiru i presbordu u temperaturnom opsegu od 40 °C - 120 °C za sadržaj vlage u čvrstoj izolaciji od 0,5% - 5%. Na ovaj način omogućena je tačnija procena sadržaja vlage u izolacionom papiru realnih ET u pogonu na osnovu izmernog sadržaja vode u ulju. Rezultati procene sadržaja vode dobijenih korišćenjem formiranih ravnotežnih dijagrama upoređeni su sa rezultatima procene pomoću postojećih ravnotežnih dijagrama koji su duži niz godina u upotrebi za mineralna ulja *Ommen* i *Cargill* dijagramima za biljno ulje, ali i sa rezultatima procene sadržaja vlage u realnim transformatorima u upotrebi na osnovu ispitivanja ET električnom metodom frekventno zavisne spektroskopije (*Frequency Domain Spectroscopy* – FDS). U većini slučajeva dobijena su zadovoljavajuća slaganja.

U okviru drugog dela istraživanja izučavani su mehanizmi degradacije izolacionog

sistema ET pod uticajem vlage i/ili temperature u prisustvu mineralnih ili biljnih ulja. Ubrzanim starenjem izolacionih ulja i papira u prisustvu bakra u laboratorijskim uslovima na temperaturi od 140 °C, uz ispitivanje primenskih osobina ulja tokom starenja i stepena polimerizacije papira, došlo se do zaključaka da bi biljno ulje moglo da se koristi kao izolaciono ulje u energetskim transformatorima sa zaptivenom konstrukcijom. Ubrzanim starenjem eksperimentalnih transformatora, i odgovarajućih laboratorijskih modela (osnovni izolacioni i konstrukcioni elementi ET u masenim odnosima bliskim realnim transformatorima), na temperaturi od 105 °C sa različitim početnim sadržajima vode u izolaciji, oko 1% i oko 4%, kvantifikovan je uticaj vlage na brzinu starenja izolacionog Kraft papira u mineralnim uljima. Takođe, formirane su korelacione krive za procenu ostarelosti Kraft papirne izolacije ET u pogonu na osnovu sadržaja derivata furana rastvorenih u mineralnom izolacionom ulju. Korelacione krive u okviru ove disertacije formirane su na osnovu eksperimentalnih rezultata dobijenih ubrzanim starenjem dva realna transformatora uz mogućnost periodičnog uzorkovanja i ispitivanja papirne izolacije, pri različitim početnim sadržajima vode u izolaciji, oko 1% i oko 4%. Korelacije prisutne u literaturi u glavnom su nastale na osnovu rezultata dobijenih u okviru laboratorijskih eksperimenata, pri čemu ne uvažavaju različit sadržaj vlage u izolaciji [1], ove korelacije u značajnoj meri unapređuju procenu ostarelosti papirne izolacije energetskih transformatora u pogonu. Osim toga, dobijenim korelacijama je jasno prikazano u kojoj meri ovlaženost IS utiče na rastvorljivost derivata furana u ulju, a samim tim i na procenu ostarelosti papirne izolacije na osnovu izmerene koncentracije derivata furana u ulju. Rezultati ovih istraživanja, doprineli su i boljem razumevanju sličnosti i razlika u mehanizmima degradacije izolacionog sistema realnog transformatora i laboratorijskih modela pod uticajem vlage i temperature.

Unapređenjem postojećih alata za procenu ostarelosti realnih transformatora u pogonu, omogućava se bolja procena pouzdanosti i raspoloživosti predmetnih ET, a samim tim i bolje planiranje investicija.

1. IZOLACIONI SISTEM ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Izolacioni sistem energetskih transformatora punjenih izolacionim uljem (IS) obuhvata izolaciono ulje i celuloznu odnosno čvrstu izolaciju. Celuloznu izolaciju čine svi materijali

izrađeni od celuloze, a to su pre svega papirna izolacija oko bakarnih provodnika, različite vrste presborda i prešpana, drvo, utifol, itd. Za pouzdan rad energetskih transformatora od velike je važnosti stanje izolacionog sistema, pri čemu je najvažnije stanje izolacionog papira koji izoluje bakarne provodnike. Izolacioni papir može biti običan Kraft papir ili razne vrste termički poboljšanog papira. U ovoj disertaciji biće razmatran samo normalan Kraft papir.

Tokom eksploatacije transformatora izolacioni materijali gube svoje izolacione karakteristike, što predstavlja starenje izolacionog sistema celuloza/ulje. Brzina starenja IS zavisi od raznih činilaca, poput stepena opterećenja transformatora, ovlaženosti izolacionog sistema, stanja i ostarelosti ulja, eventualno prisutnih termičkih i/ili električnih napreznja i drugih defekata u konstrukciji i izradi transformatora.

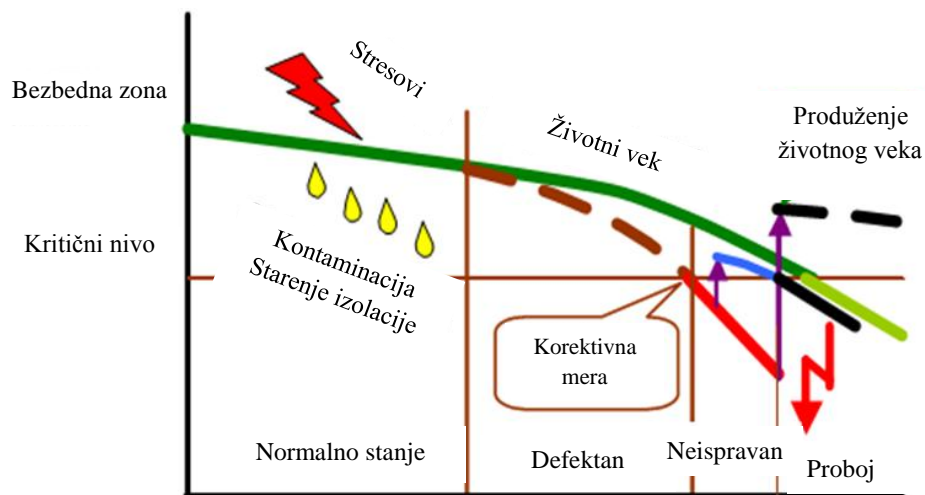
Najvažniji faktori koji pospešuju starenje izolacionih materijala i negativno utiču na izolacione karakteristike IS su: temperatura, voda i kiseonik. Prisustvo vode pre svega utiče na brzinu degradacije celuloznih materijala, dok kiseonik ima veliki uticaj na brzinu degradacije izolacionih ulja, a tek posredno na starenje celuloznih materijala [2]. Povišena temperatura ubrzava starenje celokupnog IS, pri čemu je celulozna izolacija nešto osetljivija na porast temperature u odnosu na izolaciono ulje [2]. Intenzivna degradacija normalnog Kraft papira počinje već na temperaturi od 105 °C a termički poboljšanog papira na 110 °C. Sa druge strane, prisustvo vode ugrožava dielektričnu čvrstoću celokupnog izolacionog sistema, pa tako i sigurnost pogona ET, dok degradacijom izolacionog ulja pod uticajem kiseonika nastaju kiseline, koje dalje pospešuju degradaciju papira i nagrizaaju metalne delove transformatora. Degradacijom IS raste koncentracija polarnih jedinjenja u izolacionom sistemu ET što uzrokuje povećanje faktora dielektričnih gubitaka IS. Kao krajnji proizvod starenja može nastati mulj koji se dalje može istaložiti na namotaje i smanjiti prenos toplote blokiranjem kanala za hlađenje.

Nakon dostizanja nezadovoljavajućih izolacionih karakteristika usled starenja, izolaciono ulje se može se postupcima obrade ponovo dovesti u stanje sa zadovoljavajućim karakteristikama ili se može zameniti novim uljem. Međutim, kada papir koji izoluje provodnike ostari u tolikoj meri da se mehanička čvrstoća papira spusti ispod određene vrednosti, transformator ulazi u zonu povećanog rizika od otkaza, te se smatra da je to trenutak kada je transformator dostigao kraj svog životnog veka (*Slika 1.1.1*) [3]. Izolacioni

papir impregniran uljem, koji je u velikoj meri degradirao i izgubio svoja mehanička svojstva, može dugo trpeti električna naprezanja. Međutim, ukoliko bi došlo do bliskog kratkog spoja u sistemu koga prate jake elektrodinamičke sile, one mogu izazvati mehaničke deformacije koje ostareli papir ne bi mogao da izdrži. U tom slučaju došlo bi do oštećenja izolacije i među zavojnog kratkog spoja, a zatim i do električnog proboja izolacije, odnosno do kraja životnog veka ET.

Ispravnost rada transformatora i pogonsko stanje izolacionog sistema, utvrđuje se nizom hemijskih i električnih metoda ispitivanja koje se razvijaju i standardizuju u okviru CIGRE, IEC, IEEE, ASTM radnih organizacija koje okupljaju stručnjake iz celog sveta.

Na *Slici 1.1.1* prikazane su faze životnog veka ET od ulaska u pogon do kraja eksploatacije/proboja.



Slika 1.1.1 Faze životnog veka transformatora od ulaska u pogon do kraja eksploatacije [3]

1.1. IZOLACIONA ULJA

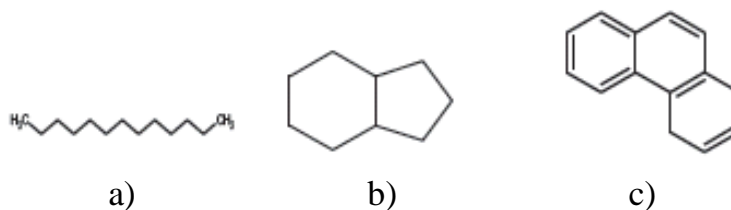
Izolaciona ulja imaju ulogu da hlade aktivni deo transformatora, izoluju delove pod naponom, podmazuju pokretne delove opreme (regulator napona) i štite celuloznu izolaciju od degradacije. Da bi izolaciona ulja uspešno obavljala pomenute funkcije, neophodno je da imaju sledeće karakteristike [4]:

- Visoku dielektričnu čvrstoću,

- Niske dielektrične gubitke,
- Adekvatnu permitivnost,
- Visoku sposobnost gašenja električnog luka,
- Visoku hemijsku i fizičku izdržljivost tokom dužeg perioda upotrebe,
- Visok toplotni kapacitet i provodljivost,
- Nisku viskoznost i zadovoljavajuće karakteristike na niskim temperaturama,
- Nizak napon pare,
- Da budu netoksična i ekološki pogodna,
- Nisku zapaljivost,
- Relativno lako rukovanje prilikom puštanja opreme u rad, kao i prilikom redovnog održavanja,
- Jednostavno odlaganje nakon korišćenja,
- Nisku cenu i laku dostupnost.

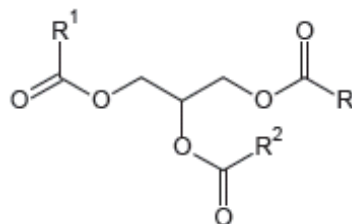
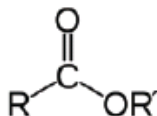
1.1.1. Hemijski sastav izolacionih ulja mineralnog i biljnog porekla

Mineralna ulja se proizvode vakuum destilacijom sirove nafte, kao laki destilat, tj. frakcija sa nižim tačkama ključanja od ostalih vakuum destilata, iz koje se dobijaju maziva i druga industrijska ulja. Predstavljaju smešu ugljovodonika, parafina, naftena i aromata. U zavisnosti od toga kojih ugljovodonika ima više, razlikujemo ulja parafinske i naftenske osnove. Često se u mineralna ulja dodaju aditivi koji sprečavaju oksidaciju i tako produžavaju eksploatacioni vek ulja. Ova ulja se nazivaju inhibiranim mineralnim uljima. Na *Slici 1.1.2* prikazane su strukturne formule različitih tipova ugljovodonika koje se susreću u mineralnim izolacionim uljima.



Sika 1.1.2 Strukturne formule: a) parafina, b) naftena, c) aromata [4]

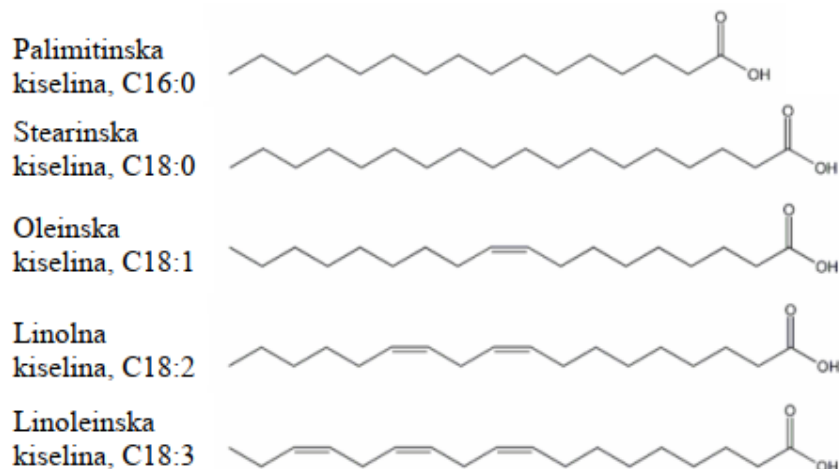
Ulja dobijena iz biljaka predstavljaju smešu estara (*Slika 1.1.3*) tj. jedinjenja viših masnih kiselina i alkohola glicerola. Za jedan molekul glicerola, vezane su do tri više masne kiseline, pri čemu ne moraju biti identične (*Slika 1.1.4*). Razlikujemo dve grupe viših masnih kiselina: zasićene i nezasićene. Nezasićene masne kiseline u svom sastavu imaju dvostruke veze koje lako stupaju u reakcije sa kiseonikom. Broj i položaj nezasićenih veza u višim masnim kiselinama imaju ključni uticaj na podložnost biljnih ulja procesu oksidacije. Biljna ulja koja sadrže isključivo zasićene masne kiseline su veoma otporna na proces oksidacije, ali zato imaju visoku viskoznost i tačku stinjavanja. Na *Slici 1.1.5* prikazane su strukturne formule najzastupljenijih viših masnih kiselina.



Slika 1.1.3 Strukturna formula estera[4]

Slika 1.1.4 Strukturna formula prirodnog estera[4]

Izolaciona ulja biljnog porekla koja se koriste u elektro opremi su najčešće triestri ili mešavine mono i triestara. Zavisno od vrste biljke iz koje se ulje pravi, udeo nezasićenih prema zasićenim masnim kiselinama se razlikuje. Udeo nezasićenih kiselina s jedne strane smanjuje viskoznost ulja, ali u isto vreme smanjuje i otpornost na oksidaciju, pa je neophodno vagati između dobrih parametara tečljivosti i dobre oksidacione stabilnosti. U tabeli 1.1 prikazan je sadržaj viših masnih kiselina u najčešće korišćenim biljnim uljima. Najpogodnije biljke za dobijanje izolacionih tečnosti na bazi prirodnih estara su: soja, suncokret, maslina i uljana repica.



Slika 1.1.5 Strukturne formule najzastupljenijih viših masnih kiselina[4]

Tabela 1.1 Sadržaj viših masnih kiselina u biljnim uljima [4]

Ulje ili Mast	Udeo nezasićenih prema zasićenim kiselinama	Zasićene kiseline					Mono-nezasićene kiseline	Polinezasićene kiseline	
		Kaprinska	Laurinska	Miristinska	Palmitinska	Stearinska		Oleinska	Linolna kiselina
Kokosovo ulje	0.1	6	47	18	9	3	6	2	-
Palmino ulje	1.0	-	-	1	45	4	40	10	-
Ulje kikirikija	4.0	-	-	-	11	2	48	32	-
Maslinovo ulje	4.6	-	-	-	13	3	71	10	1
Sojino ulje	5.7	-	-	-	11	4	24	54	7
Susamovo ulju	6.6	-	-	-	9	4	41	45	-
Ulje suncokreta	7.3	-	-	-	7	5	19	68	4
Ulje uljane repice	14.6	-	-	-	4	2	56	22	10
Ulje kanole	15.7	-	-	-	4	2	62	22	10

Čvrsto \longrightarrow Tečnost
 Otporno na oksidaciju \longrightarrow Podložno oksidaciji

S obzirom da postoje značajne razlike u hemijskoj strukturi mineralnih i biljnih ulja, tako se i njihove fizičke, hemijske i električne karakteristike značajno razlikuju. U nastavku, biće prikazane karakteristike biljnih i mineralnih ulja kao izolacionih tečnosti, sa aspekta njihove primene u elektroopremi [4].

1.1.2. Oksidaciona stabilnost izolacionih ulja i njen uticaj na performanse izolacionog sistema transformatora

Dugoročna hemijska i fizička izdržljivost izolacionih ulja u najvećoj meri je određena njihovom oksidacionom stabilnošću. Degradacija, odnosno starenje izolacionih ulja, se odigrava putem reakcija oksidacije, koje pospešuje prisustvo kiseonika, povišena temperatura, svetlost, katalitičko dejstvo metala (u slučaju energetskih transformatora to su pre svega bakar, gvožđe, cink, srebro) [5].

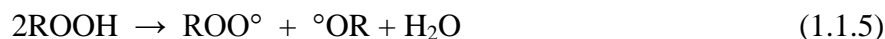
Mehanizam reakcija oksidacija kod oba tipa ulja (mineralnih i biljnih) odigrava se preko slobodnih radikala, s tim što je kod biljnih ulja oksidacija pospešena i prisustvom dvostrukih veza u molekulima [5]. Šema oksidacije može se prikazati sledećim koracima, pri čemu je sa RH označen svaki ugljovodonik ili nezasićena masna kiselina kod kojih je vodonik (H) labilno vezan:

Inicijacija – U ovoj fazi kiseonik reaguje sa RH, pri čemu dolazi do raskidanja ugljovodoničnih veza pri čemu nastaju slobodni radikali, R°:

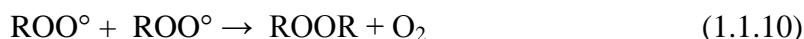


Propagacija – U ovoj fazi reakcije se praktično odigrava autooksidacija, slobodni radikali reaguju sa molekulima kiseonika pri čemu nastaju hidroperoksidni radikali, ROO°. Ovi radikali su veoma nestabilni i oni dalje reaguju sa ugljovodonicima (ili višim masnim kiselinama), pri čemu ponovo nastaju slobodni radikali i molekuli hidroperoksida, ROOH. Molekuli hidroperoksida se raspadaju na nove slobodne radikale i na taj način se ova faza reakcije nastavlja:





Terminacija – Faza propagacije može se završiti reakcijom slobodnih radikala sa molekulima inhibitoraaminskog ili fenolnog tipa ili reakcijom dva radikala pri čemu nastaju inertni molekuli, odnosno krajnji produkti oksidacije. Inhibitori reaguju sa slobodnim radikalima formirajući nestabilne hidroperoksidge koji se zatim razlažu na stabilne molekule manje molske mase i tom prilikom se obično izdvajaju i molekuli vodonika, vode, ugljen dioksida. Osim toga, inhibitori razlažu peroksidge na stabilne molekule i tako sprečavaju dalje reakcije propagacije. Reakcije terminacije mogu se prikazati sledećim reakcijama:



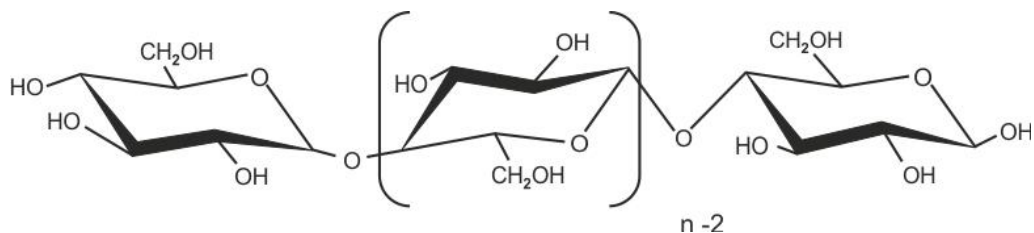
Tokom oksidacije mineralnih i biljnih ulja, nastaju rastvorni organski produkti poput organskih kiselina i polimernih jedinjenja koja utiču na zgušnjavanje ulja, kao i nerastvorni oksidacioni produkti koji mogu da se istalože na izolacionom papiru i ugroze njegova dielektrična svojstva ili da zapuše kanale za hlađenje i tako izmene termičke karakteristike transformatora. Intenzivna oksidacija biljnih izolacionih ulja dovodi do povećanja njihove viskoznosti, a pri ekstremnim uslovima može doći i do formiranja lepljivih, nerastvornih naslaga. Proces oksidacije ulja je usporen sve dok su u ulju prisutni molekuli aktivnog inhibitora, prirodnog ili dodatog. Nakon što se inhibitor utroši, dolazi do naglog porasta brzine oksidacije ulja. Takođe, oksidacijom ulja, pre svega mineralnih, nastaju niskomolekularne kiseline koje ubrzavaju degradaciju celulozne izolacije.

Produkti koji nastaju starenjem mineralnih ulja su: voda, kiseonik, alkoholi, aldehidi, ketoni, karboksilne kiseline, polikondenzovani aromati, ugljen monoksid i ugljen dioksid, dok starenjem biljnih ulja nastaju su: aldehidi, ketoni, niskomolekularne karboksilne kiseline, niži alkoholi, epoksidge, kao i razni drugi molekuli velike molske mase [5].

1.2. DEGRADACIJA CELULOZNE IZOLACIJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

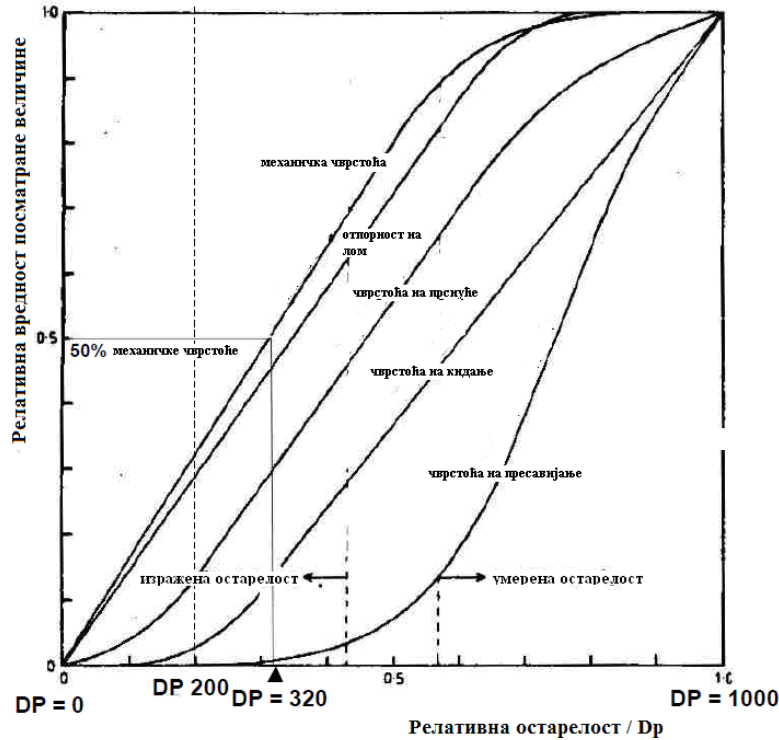
Čvrsti deo izolacionog sistema transformatora čine različiti celulozni materijali: izolacioni papir, prespord, prešpan, barijera, drvo, od kojih najvažniju ulogu ima papir koji izoluje bakarne namotaje. Celulozni izolacioni materijal u najvećem procentu čini tzv. alfa celuloza, koja je kristalne strukture, dok određeni manji procenat čine amorfne strukture i to: lignin, hemiceluloza i polisaharid [2]. Alfa celuloza daje mehaničku čvrstoću i elastičnost čvrstoj izolaciji, a čine je polimerni lanci sastavljeni od monomera glukoze (*Slika 1.2.1*).

Prosečni broj monomera koji čine polimerne lance izolacionog papira naziva se srednji viskozimetrijski stepen polimerizacije papira (DP) i predstavlja opšte prihvaćen parametar degradacije papirne izolacije ET. Pored DP vrednosti, kao mera degradacije papira, koristi se i mehanička čvrstoća, pre svega čvrstoća na istezanje, engl. *tensile strength*.



Slika 1.2.1. Makromolekul alfa celuloze: molekuli glukoze su povezani 1,4- β -glikozidnim vezama [2]

Izolacioni Kraft papir novog ET na početku eksploatacije obično ima vrednost DP iznad 1000, a tokom eksploatacije ova vrednost opada. Na *Slici 1.2.2*, prikazano je kako se tokom degradacije normalnog Kraft papira smanjuje mehanička čvrstoća u zavisnosti od smanjenja DP vrednosti.

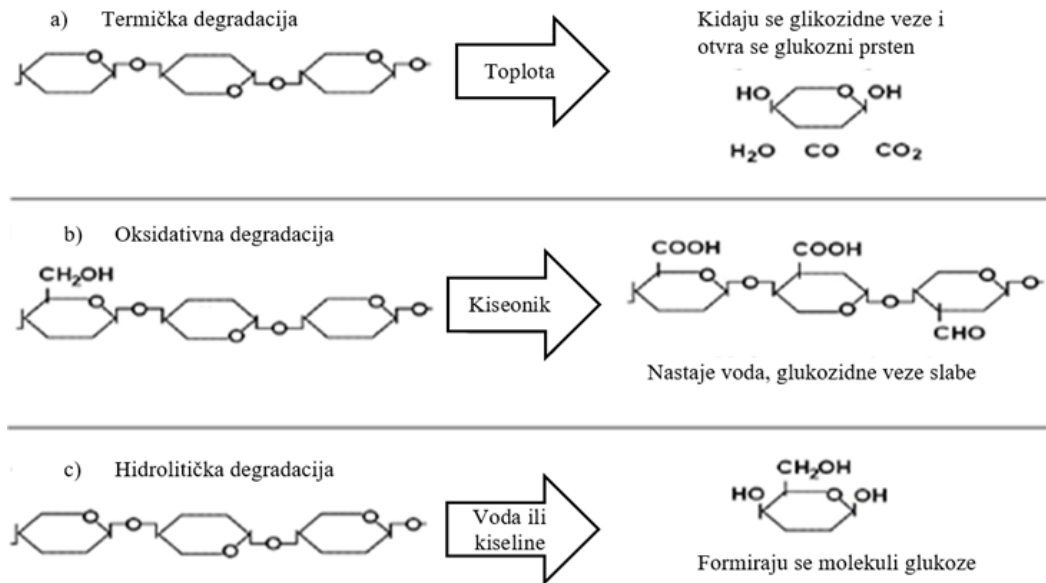


Slika 1.2.2 Smanjenje vrednosti stepena polimerizacije (DP) i mehaničkih karakteristika normalnog Kraft papira tokom starenja [6]

Prema dijagramu prikazanom na *Slici 1.2.2*, može se zaključiti da je papir izgubio oko 50% mehaničke čvrstoće kada DP vrednost padne ispod 400 (tačnije na 320). Pri DP vrednostima od 200, mehanička čvrstoća je na oko 30% od početne vrednosti, a pri vrednostima od 150, mehanička čvrstoća papira iznosi svega 20% od početne vrednosti [2][6].

Najčešće se za kraj životnog veka ET, odnosno za trenutak kada dalja eksploatacija transformatora postaje nepouzdana, uzima DP vrednost papira od 200 [7], mada neki autori smatraju da treba uzeti vrednost od 150 [8].

Proces degradacije celulozne izolacije u najvećoj meri ubrzavaju: prisustvo vode, povišena temperatura, prisustvo kiselina i prisustvo kiseonika. Na *Slici 1.2.3*, prikazani su mehanizmi razgradnje polimernih lanaca celuloze pod uticajem toplote, u prisustvu kiseonika i u prisustvu vode i kiselina.



Slika 1.2.3 Mehanizmi razgradnje celuloznih lanaca [9]

Uticaj temperature na degradaciju celuloznih materijala

Termička klasa normalnog Kraft papira iznosi 105°C [2] što znači da na temperaturama višim od naznačene intenzitet i brzina degradacije značajno rastu. Pri termičkoj razgradnji papira raskidaju se prvo veze između molekula glukoze, a zatim i veze u samom molekulu glukoze. Prvo nastaju molekuli manje molske mase: voda, ugljen monoksid, ugljen dioksid, metan, metanol, etanol, a zatim i derivati furana, aceton, acetaldehid, formaldehid [2].

Uticaj prisustva vode na degradaciju celuloznih materijala

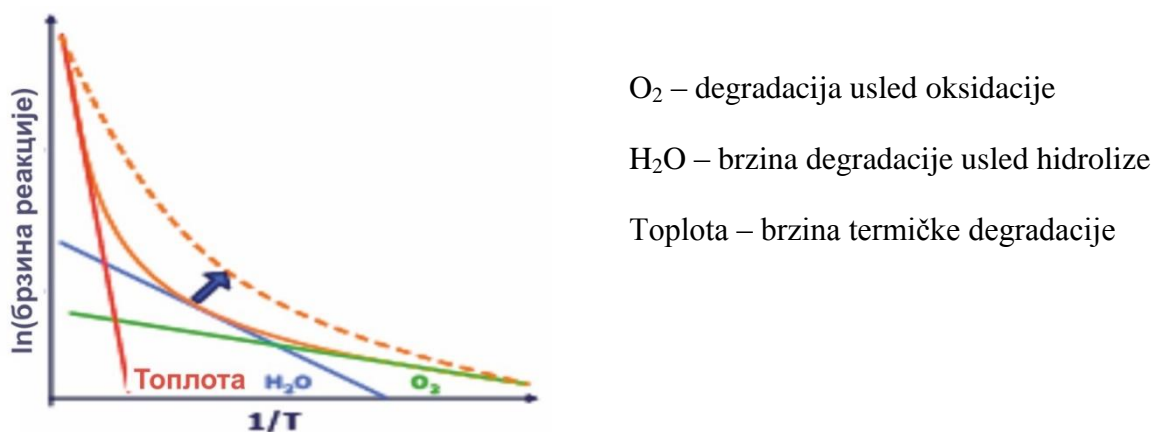
Pod uticajem vode dolazi do hidrolitičkog razlaganja celuloze. Ovaj proces ubrzava prisustvo kiselina, pošto tada reakcija biva katalizovana pod uticajem vodoničnih jona iz molekula kiselina (H^+ jonima). Pošto oksidacijom ulja, pored ostalih produkata, nastaju i kiseline, oksidacija ulja posredno pospešuje degradaciju papira [2].

Uticaj kiseonika na degradaciju celuloznih materijala

Zahvaljujući tome što je celulozna izolacija u ET impregnirana i prekrivena uljem, samo mala količina kiseonika se rastvara u celulozi. Zbog toga je uticaj kiseonika na degradaciju papira u najvećoj meri posredan, odnosno preko produkata degradacije ulja. Izolaciono ulje u prisustvu kiseonika oksiduje pri čemu se stvaraju kiseline koje pospešuju

degradaciju papirne izolacije. Ovo se pre svega odnosi na mineralna ulja. Određena istraživanja pokazala su da kiseline koje nastaju degradacijom biljnih ulja imaju manji negativan uticaj na degradaciju papira, nego što je to slučaj kod mineralnih ulja. Pretpostavlja se da je razlog u tome što degradacijom mineralnih ulja nastaju tzv. niskomolekularne kiseline koje se apsorbuju u papiru i pospešuju degradaciju papira. S druge strane, degradacijom biljnih ulja nastaju više masne kiseline, veće molekulske mase, koje su po svojoj prirodi slabije kiseline i ne bivaju apsorbivane u papiru, te imaju manji uticaj na degradaciju papira [10]. Ova oblast u hemiji izolacionih ulja još uvek nije dovoljno istražena.

Na *Slici 1.2.4.* prikazano je kako porast temperature utiče na mehanizam degradacije celuloze: na nižim temperaturama dominantan mehanizam je oksidacija, u srednjem opsegu dominira hidroliza, a na temperaturama iznad 105 °C naglo raste brzina degradacije usled termičke razgradnje [2][11].



Slika 1.2.4 Uticaj temperature, prisustva vode i kiseonika na ukupnu brzinu degradacije celuloze [2]

1.3. DEGRADACIJA CELULOZNE IZOLACIJE I ŽIVOTNI VEK ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Kao što je već rečeno, pouzdanost rada ET, odnosno njegov radni vek, u velikoj meri zavisi od ostarelosti papira koji izoluje bakarne namotaje. S obzirom da je stanje izolacionog papira oko bakarnih provodnika nemoguće utvrditi direktnim merenjima sve dok ET ne završi svoj životni vek, godinama unazad radilo se na razvoju metoda za procenu stanja

izolacionog papira kod ET u pogonu. Ovo je i dalje ostalo veoma bitno tehničko pitanje i predmet istraživanja.

1.3.1. Procena potrošenog životnog veka prema standardu IEC 60076-7

U vodiču za opterećenje uljem punjenih energetskih transformatora IEC 60076-7 [7], opisan je način za procenu potrošenog životnog veka ET koji uzima u obzir samo uticaj temperature na starenje papirne izolacije. Ovaj pristup se sastoji u računanju tzv. relativne brzine starenja, koja zatim biva pomnožena sa ukupnim vremenom eksploatacije ET. Na ovaj način dobija se vremenski interval starenja u nominalnim uslovima rada, odnosno tzv. normalna brzina starenja. Nominalni uslovi rada za običan Kraft papir koji nije termički poboljšani definisani su temperaturom najtoplije tačke namotaja od 98 °C i sadržajem vlage u izolaciji od 0,5%. Da bi se na ovaj način izveo kvalitetan proračun potreban je veliki broj podataka i to za ceo eksploatacioni vek ET. Potrebni podaci su pre svega termički parametri ET koji se određuju još u fabrici prilikom proizvodnje, ali se često dešava da ovi parametri nisu dostupni. U ovom slučaju, mogu se koristiti tipične vrednosti u skladu sa preporukama u standardu [7][12], što uvek predstavlja potencijalni izvor greške u proračunima.

Na osnovu dostupnih podataka određuje se dijagram temperature najtoplije tačke namotaja, engl. *hot-spot*, a zatim se računa brzina starenja izolacije na najtoplijem delu namotaja, pri čemu se vrši aproksimacija da je temperatura papira jednaka temperaturi namotaja. Kako bi proračuni bili što tačniji, u novije vreme se u ET ugrađuju fiber optički senzori na mesta koja se termičkim proračunima odrede kao najtoplija mesta, a zatim se ove vrednosti temperatura direktno koriste u proračunu relativne brzine starenja.

Relativna brzina starenja $V(t)$, prema vodiču za opterećenje uljnih ET [7] predstavlja brzinu smanjenja životnog veka u odnosu na normalnu brzinu starenja, tj. u odnosu na brzinu starenja pri nominalnim uslovima rada. Relativna brzina starenja računa se kao srednja vrednost relativnih brzina starenja koje se računaju se za svaki minut vremena i tom prilikom u proračun ulaze vrednosti temperature najtoplije tačke namotaja izračunate konkretno za taj minut. Proračun relativne brzine starenja za vremenski interval od godinu dana bi izgledao ovako:

$$V_{god} = \frac{\sum_{i=1}^{365 \cdot 24 \cdot 60} V_i}{365 \cdot 24 \cdot 60} \quad (1.3.1)$$

gde je V_i vrednost relativne brzine starenja u i-tom minutu starenja.

Normalna brzina starenja za ceo period eksploatacije ET dobija se množenjem usrednjene relativne brzine starenja i datog perioda eksploatacije ET i ona predstavlja period starenja kao da je ET sve vreme radio sa nominalnim opterećenjem, pri nominalnoj temperaturi ambijenta i nominalnom sadržaju vlage.

Za normalan Kraft papir nominalni uslovi rada prema standardu definisani su *hot-spot* temperaturom od 98 °C ($\theta_{hs} = 98^\circ\text{C}$), a relativno starenje u svakom trenutku, računa se prema sledećoj jednačini:

$$V = 2^{\frac{\theta_{hs} - 98}{6}} \quad (1.3.2)$$

Uticaj vlage na degradaciju izolacionog sistema ET je u ovaj koncept uključen tek u novije vreme, ali nije obavezujući, već opcioni, pošto se nalazi u aneksu A standarda IEC 60076-7 [7].

1.3.2. Kinetika degradacije celulozne izolacije prema Arrheniuss-ovom modelu

Kinetika degradacije celulozne izolacije energetskih transformatora se proučava decenijama unazad, pri čemu se došlo do mnogih saznanja, ali i dalje postoje mnoge nepoznanice. Istraživanja su pokazala da brzina starenja celulozne izolacije ET zavisi od radnih temperatura ET, od ovlaženosti IS, konstrukcije samog ET, ali od raznih drugih karakteristika samog papira i ulja. Izolacioni kraft papir sastoji se od kristalnih zona sačinjenih od polimernih lanaca celuloze (75 – 85%) i amorfni zona koje čine hemiceluloza (10-20%), lignin (2-6%) i neorganske primese (manje od 0,5%). Vrednosti stepena polimerizacije (DP) novog papira kreću se obično između 1200 i 1400. Prilikom degradacije papirne izolacije stepen polimerizacije relativno brzo opada do vrednosti od oko 400, nakon čega opada mnogo sporije. Smatra se da se degradacija amorfni struktura odigrava brže, a kristalnih značajno sporije. Kao rezultat mnogobrojnih istraživačkih napora postavljeno je više različitih teorija o kinetici degradacije papirne izolacije [11], a teorija koja je uključena u

i IEC i IEEE standarde[7][13] razvili su Ekenstam, Emsley, R. Gilbert, J. Jalbert i drugi [11][14][15][16][17]. Na osnovu ove teorije, brzina degradacije celulozne izolacije definiše se preko stepena polimerizacije papira i proporcionalna je broju neraskinutih veza unutar molekula celuloze. Broj neraskinutih veza definiše se na sledeći način:

$$\eta = \frac{DP_{start}}{DP_{end}} - 1 \quad (1.3.3)$$

Brzina starenja definisana je kao brzina reakcije prvog reda i može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$\frac{1}{DP_{start}} \cdot \left(\frac{DP_{start}}{DP_{end}} - 1 \right) = k \cdot t \quad (1.3.4)$$

odnosno

$$\frac{1}{DP_{end}} - \frac{1}{DP_{start}} = k \cdot t \quad (1.3.5)$$

gde je:

D_{start} – vrednost stepena polimerizacije (DP) na početku vremenskog intervala t

D_{end} – vrednost DP na kraju vremenskog intervala t

k – konstanta brzine reakcije, 1/h

t – posmatrani vremenski interval starenja papira, h

Konstanta brzine reakcije iz jednačine (1.3.4) opisuje se „Arrheniuss“-ovim termokinetičkim modelom, odnosno:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad (1.3.6)$$

gde je:

E_A - energija aktivacije, kJ/mol - najniža energija potrebna za odigravanje reakcija degradacije celuloznih lanaca,

R – univerzalna gasna konstanta (iznosi 8,314 J/(K·mol)),

T - temperatura najtoplije tačke, *hot-spot*, izražena u Kelvinima (odnosno $\theta_{hs} + 273$),

A – predeksponencijalni faktor, konstanta koja zavisi od tipa i kvaliteta papira, a zatim i od sadržaja vode, kiseline i kiseonika u izolacionom sistemu

S obzirom da se degradacija izolacionog papira najčešće odvija po tri ranije pomenuta mehanizma: oksidacijom, hidrolizom i pirolizom, ukupna brzina degradacije može se prikazati kao zbir brzina degradacije po svakom od ovih mehanizama [2][11]:

$$\eta_{Tot} = \left(A_{Oxi} e^{-\frac{E_{Oxi}}{R \cdot T}} + A_{Hyd} e^{-\frac{E_{Hyd}}{R \cdot T}} + A_{Pyr} e^{-\frac{E_{Pyr}}{R \cdot T}} \right) \cdot t \quad (1.3.7)$$

gde je:

E_{AOxy} - najniža energija potrebna za odigravanje reakcija degradacije celuloznih lanaca mehanizmom oksidacije, kJ/mol,

A_{Oxy} – predeksponencijalni faktor reakcije degradacije papira mehanizmom oksidacije, h^{-1} ,

E_{AHyd} - energija aktivacije, kJ/mol - najniža energija potrebna za odigravanje reakcija degradacije celuloznih lanaca mehanizmom hidrolize, kJ/mol,

A_{Oxy} – predeksponencijalni faktor reakcije degradacije papira mehanizmom hidrolize, h^{-1}

E_{APyr} - najniža energija potrebna za odigravanje reakcija degradacije celuloznih lanaca mehanizmom oksidacije, kJ/mol,

A_{Oxy} – predeksponencijalni faktor reakcije degradacije papira mehanizmom pirolize, h^{-1} ,

R – univerzalna gasna konstanta (iznosi 8,314 J/(K·mol)),

T - temperatura najtoplije tačke, *hot-spot*, izražena u Kelvinima (odnosno $\theta_{hs} + 273$),

Ovo praktično znači da je brzina starenja papira na određenoj temperaturi uslovljena energijom aktivacije različitih mehanizama degradacije. Samim tim, dominantni mehanizam tokom starenja će se menjati sa promenom temperature, kao što je prethodno prikazano na *Slici 1.2.4*.

U literaturi postoji više različitih vrednosti parametara E_A i A , nastalih u okviru do sada sprovedenih istraživanja u specifičnim laboratorijskim uslovima od strane više autora, pri čemu se ove vrednosti međusobno često dosta razlikuju. Kada je u pitanju kraft papir i sadržaj vlage u izolaciji u opsegu 1% - 4%, u literaturi se vrednosti za predeksponencijalni

faktor A kreću u opsegu $(3-6) \cdot 10^8$ do $(20-28) \cdot 10^8$ 1/h, dok se vrednosti za E_A nalaze u opsegu od 37 do 163 KJ/mol [14][18][19]. Na osnovu sprovedenih istraživanja, Emsley je zaključio da se uzimanjem konstantne vrednosti za energiju aktivacije od 111 kJ/molK i odgovarajućih vrednosti za predeksponencijalni faktor A, dobijaju se dovoljno tačne procene preostalog životnog veka papira nezavisno od dominantnog mehanizma degradacije. Ovo je u svojim istraživanjima potvrdio i Lundgaard [20].

Lelekakis i Martin sa saradnicima su u laboratorijskim uslovima istraživali uticaj kiseonika i vlage na brzinu degradacije normalnog kraft papira. Držeći konstantnim sve parametre koji utiču na degradaciju papira, došli su do model jednačine za konstantu A u zavisnosti od prisustva vlage i kiseonika u izolacionom sistemu [21][22][23][24]:

Nizak sadržaj kiseonika u ulju (< 7000 mg/kg)

$$A = (1.78 \cdot 10^{12}) \cdot \omega^2 + (1.10 \cdot 10^{10}) \cdot \omega + 5.28 \cdot 10^7 \quad (1.3.8)$$

Srednji sadržaj kiseonika u ulju (7000 – 14000 mg/kg)

$$A = (2.07 \cdot 10^{12}) \cdot \omega^2 + (5.61 \cdot 10^{10}) \cdot \omega + 2.31 \cdot 10^8 \quad (1.3.9)$$

Visok sadržaj kiseonika u ulju (>16500 mg/kg)

$$A = (2.29 \cdot 10^{12}) \cdot \omega^2 + (9.78 \cdot 10^{10}) \cdot \omega + 3.86 \cdot 10^8 \quad (1.3.10)$$

U standardu IEC 60076-7 [7] uticaj vlage i kiseonika na relativno starenje papira dat je u Aneksu A, u skladu sa *Arrhenius*-ovom zakonom starenja, odnosno preko parametara A i E_A . Vrednost relativnog starenja papira uz uvažavanje uticaja prisustva vlage i kiseonika računa se prema jednačini [7]:

$$V = \frac{A}{A_r} e^{\frac{1}{R} \left(\frac{E_{ar}}{\theta_{hs} r + 273} - \frac{E_a}{\theta_{hs} + 273} \right)} \quad (1.3.11)$$

U standardu je data tabela sa vrednostima A i E_A , pri čemu se referentne vrednosti ovih parametara (sa indeksom r) za normalan Kraft papir uzimaju vrednosti bez kiseonika i sa 0,5% vlage, dok se vrednosti bez indeksa r uzimaju vrednosti koje su najbliže stanju u kome se nalazi IS čija se ostarelost računa. Ovde je važno napomenuti da su u standardu date vrednosti parametara A i E_A za kraft papir i termički poboljšan papir samo za četiri slučaja: Bez kiseonika i sa 0,5% vlage, bez kiseonika i sa 1,5% vlage, Bez kiseonika i sa 1,5% vlage i

Bez kiseonika i sa 0,5% vlage, što je daleko od toga da su ovim pokriveni svi slučajevi ET u pogonu.

1.4. PROCENA PREOSTALOG ŽIVOTNOG VEKA ET

Preostali životni vek određenog ET praktično predstavlja preostale godine pogona od posmatranog trenutka do kraja eksploatacije. Procena preostalog životnog veka bi u tom smislu trebalo da obuhvati sve faktore koji utiču na degradaciju izolacionog sistema, kao što su: temperatura, sadržaj vlage u IS, sadržaj kiseonika i kiselih produkata starenja u ulju, ali i druge faktore koji mogu da oslabe IS i dovedu do električnog proboja kao što su: električna naprezanja i stresovi, promene režima rada, razni kvarovi, odnosno konstrukcioni defekti ET.

U ovoj disertaciji procena preostalog životnog veka ET posmatraće se isključivo sa aspekta starenja papirne izolacije pod uticajem temperature i sadržaja vlage u IS. Ovi faktori obuhvaćeni su Arrhenius-ovim termokinetičkim modelom, pri čemu se za kraj životnog veka uzima takvo stanje papirne izolacije pri kojem rad ET postaje nepouzdan, odnosno verovatnoća od proboja je dostigla određene kritične vrednosti. Ovo stanje papirne izolacije u standardima IEC 60076-7 i IEEE Std C57.91-2011 definisano je DP vrednošću papira od 200, dok se u literaturi koristi i DP vrednost od 150 [8].

U cilju procene preostalog životnog veka, potrebno je proceniti i trenutno stanje papirne izolacije, odnosno odrediti tzv. potrošeni životni vek ET.

Trenutna vrednost DP papira (DP_{end}) može se izračunati na osnovu jednačine izvedene iz Arrhenius-ovog termokinetičkog modela:

$$\frac{1}{DP_{end}} - \frac{1}{DP_{start}} = A \cdot e^{-\frac{E_A}{RT}} \cdot t \quad (1.4.1)$$

odnosno:

$$\frac{1}{DP_{end}} = \frac{1}{DP_{start}} + A \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot (\theta_{hs} + 273)}} \cdot t \quad (1.4.2)$$

Na osnovu prethodnog izraza, može se izračunati DP vrednost papira nakon vremenskog intervala, t (DP_{end}), pri čemu bi tokom ovog perioda faktori koji utiču na starenje papirne izolacije trebalo da budu konstantni (temperatura najtoplije tačke θ_{hs} , sadržaj

vlage, sadržaj kiseonika, sadržaj kiselina), u suprotnom se uzimaju usrednjene vrednosti za parametre A i E_A .

U cilju što tačnije procene trenutne vrednosti DP papira ET u pogonu, potrebno je ceo period pogona raščlaniti na vremenske intervale $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ tokom kojih su svi faktori koji utiču na starenje bili konstantni. U tom slučaju DP_{end} jednog intervala, treba uzeti kao vrednost za DP_{start} narednog intervala, i tako sve dok se ne dođe do poslednjeg intervala t_n , kada bi izračunato DP_{end} predstavljalo DP na kraju celokupnog perioda pogona ET [25].

Preostali životni vek ET u godinama moguće je izračunati transformacijom jednačine (1.4.2) u jednačinu (1.4.3), pri čemu za DP_{start} treba uzeti procenjenju trenutnu vrednost DP papira, a za DP_{end} vrednost koja se smatra krajem životnog veka ET. U ovom slučaju potrebno je za budući period eksploatacije ET na neki način predvideti sadržaj vlage, kiseonika i kiselina u IS, kao i temperaturu najtoplije tačke transformatora, θ_{hs} , a onda u skladu s tim odabrati odgovarajuće vrednosti za faktore A i E_A .

$$Preostali\ životni\ vek = \frac{\frac{1}{DP_{end}} - \frac{1}{DP_{start}}}{A \cdot 24 \cdot 365} \cdot e^{\frac{E_A}{R \cdot (\theta_{hs} + 273)}} \quad (\text{u godinama}) \quad (1.4.3)$$

Rezultati dobijeni na ovaj način imaju ograničenu primenu i tom prilikom se moraju imati u vidu usvojene aproksimacije.

1.4.1. Procena preostalog životnog veka prema M. Pradhan-u

M. Pradhan je u okviru svojih istraživanja, koristeći model transformatora i prateći promene u koncentraciji produkata degradacije celuloze, zavisnosti DP od gasova, oksida ugljenika i derivata furana, kombinacijom individualnih linearnih funkcija i težinskih faktora, došao do sledeće jednačine za izračunavanje preostalog životnog veka papirne izolacije [8]:

$$Potrošeno\ vreme\ (\text{u godinama}) = 20,5 \cdot \ln \frac{DP_0}{DP} \quad (1.4.4)$$

gde je

DP – trenutna vrednost stepena polimerizacije papira, DP_0 – početna vrednost stepena polimerizacije papira.

Prema M. Pradhan-u za kraj životnog veka treba uzeti DP vrednost od 150, pri čemu se na osnovu procenjene trenutne vrednosti DP papira i naredne jednačine može izračunati preostali životni vek ET:

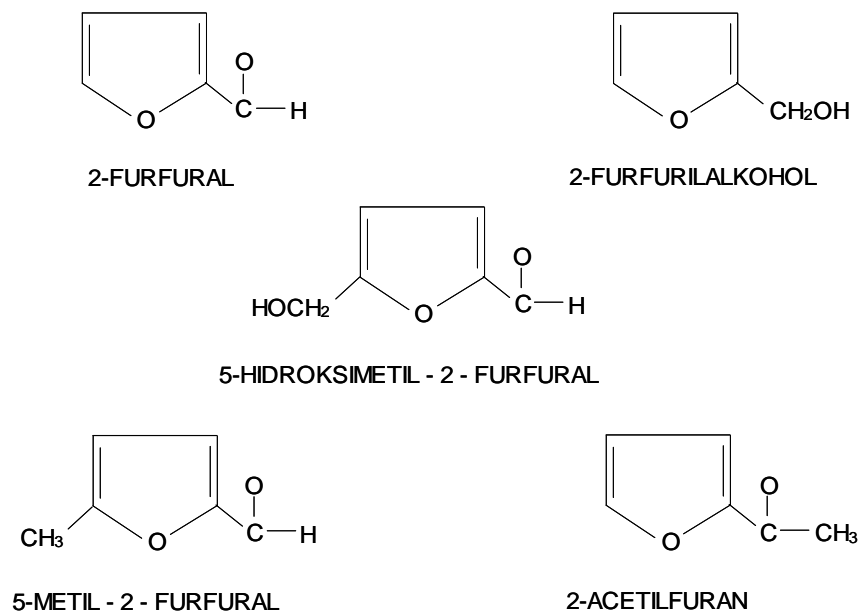
$$\text{Preostali životni vek (u godinama)} = 20,5 \cdot \ln \frac{DP}{150} \quad (1.4.5)$$

Prema ovoj teoriji, ukupni životni vek ET zavisi isključivo od početne vrednosti DP papira, a ne zavisi od drugih parametara kao što su temperatura i karakteristike izolacionog sistema konkretnog ET, što ovu metodu procene čini prilično grubom. Na osnovu jednačine (1.4.4) može se zaključiti da će ukupni životni vek ET kod koga je početna vrednost DP papira 1000, iznositi 40 godina.

1.4.2. Procena trenutne vrednosti DP papira na osnovu sadržaja derivata furana u ulju

Više od 30 godina aktuelna su istraživanja koja se odnose na razvoj metode za procenu trenutne vrednosti stepena polimerizacije papira ET u pogonu na osnovu sadržaja derivata furana rastvorenih u mineralnom izolacionom ulju.

Derivati furana predstavljaju produkte degradacije celulozne izolacije koji se u određenom stepenu rastvaraju u izolacionom ulju i čija se koncentracija u ulju može izmeriti odgovarajućom standardizovanom metodom ispitivanja. U pitanju su sledeća jedinjenja: 2-furfural (2-FAL), 2-furfuril-alkohol (2-FOL), 2-acetofuran (2-ACF), 5-hidroksi metil-2-furfural (5-HMF), 5-metil-2-furfural (5-MEF), pri čemu je eksperimentalnim istraživanjima utvrđeno da se u najvećim koncentracijama javlja derivat 2-FAL, kao i da ima najveću stabilnost u odnosu na ostale derivate [26][27][28]. Na *Slici 1.4.1.* su prikazane strukturne formule ovih jedinjenja.



Slika 1.4.1. Strukturne formule molekula derivata furana [2]

Rezultati brojnih eksperimenata veštačkog starenja mineralnog ulja i papira pokazali su da smanjenje stepena polimerizacije papira (kao i njegove i mehaničke čvrstoće), prati porast koncentracije derivata furana u ulju i to pre svega derivata 2-FAL [1][2]. Na osnovu ovih istraživanja formirane su i u literaturi prikazane brojne korelacije DP- 2-FAL, ali za sada nije postavljena jedna univerzalna korelacija koja bi obuhvatila sve faktore koji utiču na koncentraciju derivata furana u ulju. Razvoj univerzalne korelacije otežavaju sledeće činjenice [29]:

- Derivati furana nastali degradacijom papira rastvaraju se u celokupnoj zapremini papira, pri čemu je u transformatoru vrlo često prisutna neuniformna raspodela temperatura, a samim tim i neuniformna raspodela intenziteta degradacije papira, odnosno neuniformna raspodela DP vrednosti u transformatoru. Takođe, u transformatoru mogu postojati i lokalne vruće tačke, gde je DP papira mnogo niži u odnosu na preostali aktivni deo transformatora. Ovo značajno otežava procenu najmanje DP vrednosti u ET koja praktično i određuje ukupni životni vek ET.
- Derivati furana u velikoj meri ostaju apsorbovani u celulozi, a samo manji procenat biva rastvoren u ulju. Rastvorljivost derivata furana u ulju u velikoj meri zavisi od

temperature, ovlaženosti IS, ostarelosti ulja, tipa papira i vrste ulja, konstrukcije transformatora (zaptiveni ili u kontaktu sa atmosferom) [1][11][30][31]

- Rezultati eksperimentalnih istraživanja [2][32] pokazali su da je uticaj ovlaženosti na raspodelu derivata furana između ulja i papira značajan. S druge strane, uticaj temperature na rastvorljivost 2-FAL u ulju je izraženiji kod suve, nego kod ovlažene izolacije [2].
- Većina materijala koji čine čvrstu izolaciju ET prilikom starenja proizvode derivate furana i to pre svega 2-FAL [1][2]. Na koncentraciju derivata furana u ulju ET veliki uticaj ima i kvalitet celuloznih materijala, pri čemu se pre svega misli na udeo lignina i hemiceluloze. Ograničavajuća okolnost je i da među transformatorima postoje određene razlike u ukupnom masenom udelu celuloznih materijala prema ulju, ali je za najveći broj ET viših naponskih nivoa i snaga taj odnos 25 % ukupne mase celuloze u odnosu na ulje, dok udeo Kraft papira i presborda iznosi oko 10% [33].
- U cilju procene trenutne vrednosti DP papira transformatora neophodno je odrediti ukupni priraštaj sadržaja 2-FAL u ulju nastalog degradacijom papirne izolacije tokom svih godina pogona. Ovu vrednost je često veoma teško odrediti iz sledećih razloga:
 - Prilikom bilo kakve obrade transformatorskog ulja dolazi do uklanjanja derivata furana koji su do tog trenutka bili rastvoreni u ulju, pri čemu određeni procenat ovih jedinjenja zaostaje rastvoren u papiru. Prilikom ponovnog ulaska transformatora u pogon dolazi do uspostavljanja nove ravnotežne koncentracije furana u sistemu papir-ulje. Ukoliko je tokom pogona ET vršena jedna ili više obrada ulja, treba sabirati priraste sadržaja furana u ulju u odnosu na uspostavljeno ravnotežno stanje nakon svake završene obrade. S obzirom da nije poznato koliko je vremena potrebno da se uspostavi ravnotežna raspodela derivata furana u izolacionom sistemu ET tokom pogona, često je teško proceniti da li je nakon obrade ulja dolazilo do dalje degradacije papira ili je u pitanju samo rastvaranje derivata furana iz papira u ulje.

- Tokom eksploatacije ET može doći i do razgradnje određene količina derivata furana rastvorenih u ulju, jer su ova jedinjenja relativno nestabilna, odnosno mogu se razgraditi pod dejstvom toplote, UV zračenja, kiseonika.
- U realnim ET često dolazi do fluktuacije apsolutnih koncentracija derivata furana u ulju usled promene operativnih uslova. Tako npr. sa porastom radne temperature ulja dolazi do pomeranja ravnoteže ka ulju, odnosno dolazi do rastvaranja veće količine derivata furana u ulju. Često je teško utvrditi da li je porast koncentracije posledica samo Le Šateljeovog principa ili je u međuvremenu došlo i do dalje degradacije papira.

U literaturi postoji veliki broj korelacija koje povezuju vrednost DP - 2-FAL i u glavnom su nastale obradom rezultata dobijenih u eksperimentima ubrzanog starenja ulja i papira u specifičnim laboratorijskim uslovima (temperatura, ovlaženost izolacije, sadržaj kiseonika u ulju) [1]. Ovde će biti prikazane one najpoznatije korelacije i u stručnoj literaturi do sada najčešće citirane:

- Korelacija koju je postavio De Pablo [34] pretpostavljajući sledeće: početna vrednost DP papira iznosi 800, molekulska masa 2FAL je 96, jedan molekul 2FAL nastaje kidanjem tri veze unutar celuloze i odnos ulja i papira je 25. Ova jednačina je dakle nastala na osnovu teorijskih postavki, a ne na osnovu eksperimentalnih rezultata i glasi:

$$DP = \frac{7100}{8.8 + 2FAL} \quad (1.4.6)$$

- Prethodnu korelaciju je modifikovao Pahlavanpour [35] uz pretpostavku da se u transformatoru 20 % ukupne količine papira nalazi uz bakarne namotaje, gde se degradacija odvija dva puta brže u odnosu na druge lokacije i dobio sledeću korelaciju:

$$DP = \frac{800}{(0.186 \cdot 2FAL) + 1} \quad (1.4.7)$$

- Autor Xue Chendong je 1991. postavio sledeću korelaciju [36]:

$$\text{Log (2-FAL in mg/l)} = 1,51 - 0,0035\text{DP} \quad (1.4.8)$$

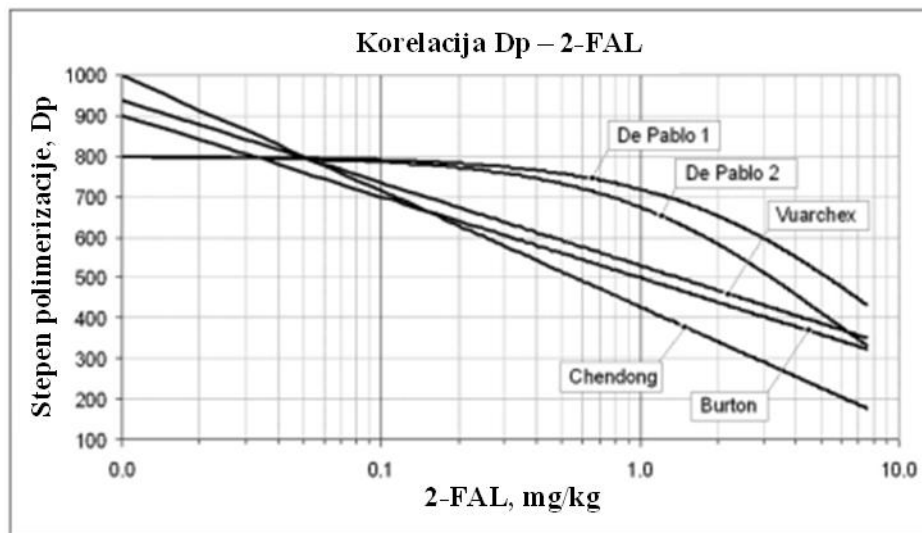
- Korelacija koju je postavio Burton [37]:

$$\log(2\text{FAL}) = 2.5 - 0.005\text{DP} \quad (1.4.9)$$

- Paul Vuarchex korelacija [38]:

$$\log(2\text{FAL}) = 2.6 - 0.0049\text{DP} \quad (1.4.10)$$

Na *Slici 1.4.2* prikazano je svih 5 korelacija DP-FAL u logaritamskoj skali (DE Pablo 2 je De Pablo korelacija koju je modifikovao Pahlavanpur). Posmatrajući prikazani dijagram, lako se mogu uočiti velike razlike u rezultatima.



Slika 1.4.2 Najčešće citirane korelacije DP-FAL prikazane u logaritamskoj skali [38]

Zajednički nedostatak nabrojanih korelacija je što ne uključuju zavisnost od parametara koji u značajnoj mjeri utiču na rastvorljivost furana u ulju, kao što su: temperatura, ovlaženost izolacije, sadržaj kiseonika/kiselina u ulju.

J.Jalbert i M.-C. Lessard u svojim radovima [1][39][40] predložili su koeficijente za preračunavanje izmerene koncentracije određenih derivata furana u ulju uzorkovanom na radnoj temperaturi ET na referentnu temperaturu od 20 °C. Na ovaj način, isključuje se uticaj temperature na porast sadržaja derivata furana u ulju tokom pogona, ali nije isključen uticaj vlage i sadržaja kiselina u ulju.

2. METODE ZA ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA I STEPENA DEGRADACIJE PAPIRNO/ULJNE IZOLACIJE U POGONSKIM USLOVIMA TRANSFORMATORA

Tokom eksploatacije transformatora dolazi do starenja izolacionog sistema, pri čemu nastaju produkti degradacije koji se u određenom meri rastvaraju u ulju. U okviru CIGRE organizacije i IEEE i IEC tela za standardizaciju, razvijen je i standardizovan veći broj metoda za ispitivanje ulja u cilju praćenja rada ET punjenih izolacionim uljem. Energetski transformatori predstavljaju važan i veoma skup deo opreme elektroenergetskog sistema. Bilo kakve manipulacije i popravke na transformatorima predstavljaju značajan izdatak, a eventualne havarije donose ogromne ekonomske posledice i druge probleme. Imajući ovo u vidu, analize ulja predstavljaju prilično jednostavan, brz i jeftin način za dobijanje velikog broja korisnih informacija. Na osnovu ispitivanja ulja može se utvrditi ispravnost rada ET, odnosno detektovati kvar, ali se mogu izvesti i određeni zaključci o ostarelosti i pogonskom stanju celokupnog izolacionog sistema. U svetu je i dalje prisutan rad na unapređenju postojećih i razvoju novih metoda, a sve u cilju što preciznije dijagnostike pogonskog stanja ET punjenih uljem. Naravno, postoji i veliki broj električnih metoda za ispitivanje energetskih transformatora, ali one neće biti predmet ove doktorske disertacije.

Među najvažnije metode ispitivanja izolacionog ulja ET ubrajaju se:

1. Određivanje sadržaja gasova rastvorenih u ulju,
2. Određivanje sadržaja vode rastvorene u ulju,
3. Ispitivanje fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja,
4. Određivanje sadržaja derivata furana u ulju.

2.1. ODREĐIVANJE SADRŽAJA GASOVA RASTVORENIH U ULJU

Analiza sadržaja gasova rastvorenih u izolacionom ulju ET je osnovna analiza koja se vrši u okviru preventivnog održavanja ET i služi pre svega za utvrđivanje ispravnosti rada ET. Ovom analizom se može detektovati kvar u ranoj fazi, što omogućava sprečavanje većih problema i eventualnih havarija ET. S druge strane, na osnovu rezultata ove analize, mogu se izvesti i određeni zaključci o ostarelosti izolacionog sistema.

U svetu postoji dugogodišnja praksa ispitivanja ulja ET gasnohromatografskom analizom u sklopu redovnog održavanja, tako da su baze podataka obimne i postoji veliko znanje iz ove oblasti, ali samo kada je u pitanju mineralno ulje. U slučaju biljnog ulja, podaci vezani za praćenje rada realnih transformatora su skromni. Za ET punjene mineralnim uljem razvijene su metode za ispitivanje sadržaja gasova rastvorenih u mineralnom ulju [41] i metode za interpretaciju rezultata dobijenih ispitivanjem sadržaja gasova rastvorenih u mineralnom ulju [42][43]. U cilju ispitivanja promenljivosti metoda razvijenih za mineralna ulja na slučajeve ET punjene biljnim uljem, vršeni su eksperimenti u laboratorijskim uslovima, pri čemu su u simulirane temperature koje se u ET obično javljaju kada je prisutan određeni kvar ili defekt.

Teorijske osnove

Energetski transformatori se pune degaziranim izolacionim uljem pod vakuumom, tako da se na početku pogona ET u ulju ne nalaze rastvoreni gasovi (osim kiseonika i azota u slučaju konstrukcija kod kojih je ulje u kontaktu sa atmosferom). Tokom eksploatacije ET dolazi do degradacije izolacionog sistema pri čemu među produktima starenja nastaju i gasoviti molekuli koji se rastvaraju u ulju. U normalnim eksploatacionim uslovima nastaju manje količine gasova, dok pod uticajem visokih temperatura, koje nastaju usled termičkih ili električnih kvarova, nastaju veće količine gasova.

Pri povišenim temperaturama kidaju se C-C i C-H veze i nastaju slobodni radikali: $H\cdot$, $CH_3\cdot$, $CH_2\cdot$, $CH\cdot$, $C\cdot$. Nastali slobodni radikali su nestabilni i rekombinacijom formiraju gasovite molekule kao što su: vodonik (H-H), metan (CH_3-H), etan (CH_3-CH_3), etilen ($CH_2=CH_2$) i acetilen ($CH\equiv CH$). Pri kvarovima gde su prisutne niže temperature, kidaju se slabije veze C-H, pri čemu nastaju vodonik, metan i etan, dok pri višim temperaturama dolazi do kidanja C-C veza i onda nastaju metan, etan, etilen i acetilen.

Gasovi čije je koncentracije važno pratiti tokom rada ET su: vodonik (H_2), metan (CH_4), etilen (C_2H_4), acetilen (C_2H_2), etan (C_2H_6), ugljen monoksid (CO) i ugljen dioksid (CO_2). Ugljovodonici i ugljen monoksid nastaju degradacijom ulja, dok degradacijom papira nastaju ugljen monoksid i ugljen dioksid. Koncentracije nastalih gasova zavise od prirode, mesta i intenziteta kvara.

Dugogodišnjim praćenjem rada ET analizom sadržaja gasova rastvorenih u ulju, istraživanjem kvarova i havarija, kao i sprovođenjem mnogobrojnih eksperimenata, razvijene su metode za interpretaciju rezultata ove analize, odnosno za dijagnostiku ispravnosti ET. Interpretacija rezultata se bazira na računanju odnosa koncentracija ugljovodoničnih gasova u ulju, a najvažnije metode interpretacije su prema IEC 60599, Rogers-u, Dorenberg-u i Duval-ov trougao [42][43].

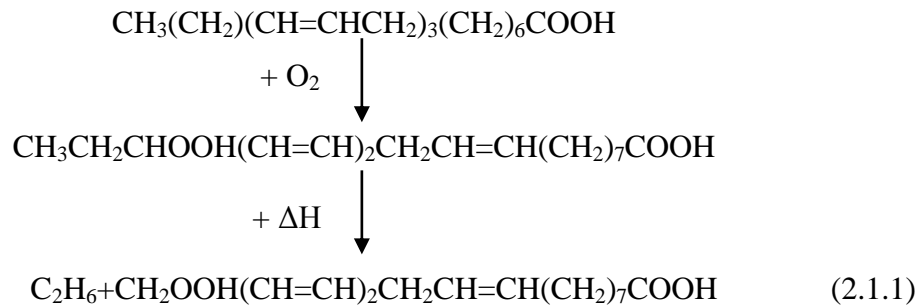
Na osnovu rezultata do sada sprovedenih istraživanja na biljnim izolacionim uljima, zaključeno je da se kod biljnih ulja u karakterističnim opsezima temperatura stvaraju isti gasovi kao kod mineralnih ulja, ali u nešto izmenjenim odnosima. Primećeno je da je kod biljnih ulja u uslovima koji odgovaraju termičkim kvarovima dominantan gas etan, što nije slučaj kod mineralnih ulja [44][45][46]. Na osnovu rezultata do sada izvršenih istraživanja, u CIGRE brošuri su dati modifikovani Duval-ovi trouglovi za tumačenje rezultata gasnohromatografske analize biljnih ulja koje treba potvrditi u praksi [45].

Osnovni princip formiranja gasova kod biljnih ulja, sličan je kao i kod mineralnih ulja: pod uticajem termičkih ili električnih stresova dolazi do cepanja veza ugljenik – vodonik i ugljenik-ugljenik pri čemu se formiraju slobodni radikali koji dalje reaguju međusobno i formiraju gasovite ili kondenzovane molekule. Prilikom ovih reakcija nastaju isti gasovi kao kod mineralnih ulja, ali u izmenjenim odnosima. Ovo je posledica drugačije hemijske strukture biljnih ulja, koja sadrže estarske funkcionalne grupe, dvostruke veze ugljenik-ugljenik i ugljovodonične nizove sa 16 do 18 ugljenikovih atoma, ali ne sadrže aromatske i naftenske strukture.

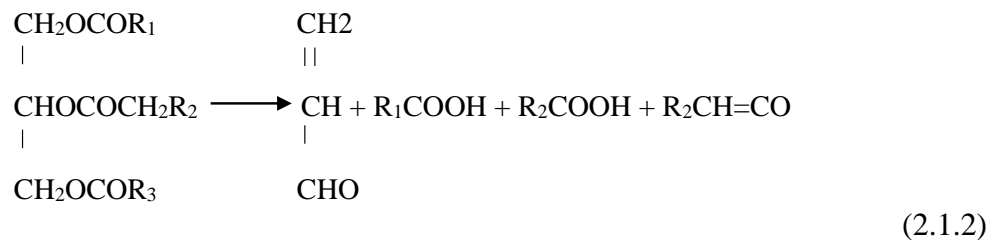
Najveće razlike u proizvodnji gasova kod biljnih ulja ogledaju se u sledećem [46]:

- Usled **električnih stresova** u biljnim uljima se formiraju isti gasovi kao kod mineralnih, ali je koncentracija stvorenih gasova oko deset puta niža,
- Biljna ulja pod uticajem **termičkih stresova** stvaraju gasove usled više hemijskih reakcija, a to su: *stray gassing* reakcije, termička dekompozicija disosovanih kiselinskih grupa, termička razgradnja ugljovodoničnih ostataka. Ukupna količina stvorenih gasova može da bude dva ili više puta veća nego kod mineralnih ulja pod istim uslovima,

- Biljna ulja koja sadrže linoleinsku kiselinu stvaraju etan pod uticajem toplote kroz tzv. *stray gassing* reakcije do kojih dolazi iako u transformatoru nije prisutan kvar. Linoleinska kiselina u reakciji sa kiseonikom gradi hidroperoksid koji se pod uticajem toplote dalje raspada i daje etan. Biljna ulja koja ovu kiselinu sadrže u većim količinama su sojino ulje i ulje uljane repice (čak 7%). Istraživanjima je utvrđeno da izlaganjem ovih ulja uticaju kiseonika, svetlosti ili toplote dolazi do stvaranja značajnih količina etana, pa je veoma važan način čuvanja uzoraka. Takođe je primećeno da nakon određenog vremena koncentracija stvorenog etana dostiže određeni nivo, nakon čega prestaje da se stvara ili se stvara u mnogo manjim količinama. Reakcije oksidacije linoleinske kiseline pri čemu dolazi do stvaranja etana, mogu se prikazati na sledeći način:



- Prilikom pirolize estara dolazi do dekompozicije triglicerida na dve slobodne više masne kiseline i keten nastao od treće više masne kiseline. Tokom ove reakcije ne dolazi do proizvodnje gasovitih proizvoda, ali produkti koji nastaju dalje reaguju i formiraju gasove. Tokom ove reakcije dolazi i do porasta kiselinskog broja što predstavlja potvrdu da su gasovi nastali reakcijom pirolize estara. Termička razgradnja triglicerida biljnih ulja na propenal, dve više masne kiseline i keten može se prikazati na sledeći način:



- Sa porastom temperature pirolizom estara nastaju značajne količine ugljenikovih oksida. U poređenju sa mineralnim uljima, nastale količine oksida pod istim uslovima, najčešće su veće za ceo red veličine. Stvaranje velikih količina ugljenikovih oksida kod biljnih ulja mogu maskirati formiranje ugljen dioksida koji nastaje degradacijom celuloze. Ugljen dioksid i ugljen monoksid nastaju u velikim količinama usled pregrevanja biljnih ulja i uzrokuju dalje stvaranje gasova.
- Metan, etan i etilen se pod uticajem toplote u biljnim uljima stvaraju u većim količinama na temperaturama koje su niže od 50° do 100° C nego u slučaju mineralnih ulja,
- Metan, etan i etilen se pod uticajem toplote stvaraju u drugačijim odnosima i količinama kod biljnih ulja u odnosu na mineralna ulja, što je posledica drugačije strukture ugljovodoničnog niza.

I. Reakcije pri kojima nastaju oksidi ugljenika i etilen:



termička degradacija više masne kiseline pri čemu nastaje ugljen dioksid



termička degradacija više masne kiseline pri čemu nastaje ugljen monoksid



termička degradacija viših masnih kiselina pri čemu nastaju ugljen dioksid, ugljen monoksid i etilen



termička degradacija ketena pri čemu nastaje ugljen monoksid



termička razgradnja propenala pri čemu nastaje ugljen monoksid i etilen

II. Reakcije pri kojima nastaju vodonik i ugljovodonici

Ugljovodonični delovi viših masnih kiselina su slične strukture kao kod mineralnih ulja, pa su i reakcije u koje stupaju slične:



razgradnja na elemente pri čemu nastaje vodonik



Dehidrogenizacija parafina na olefine pri čemu nastaje vodonik i može se formirati etilen



Dekompozicija parafina na niže ugljovodonike, pri čemu nastaje metan, etan i etilen



Formiranjem aromatskih jedinjenja od cikličnih parafini nastaje vodonik kao sporedni proizvod



Dehidrogenacija olefina u alkin nastaje vodonik, pri čemu može doći i do formiranja acetilena

2.2. FIZIČKE, HEMIJSKE I ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE IZOLACIONIH ULJA

Izolaciona ulja u energetske transformatorima imaju veoma važnu ulogu hlađenja i izolacije aktivnog dela, tako da određene fizičke, hemijske i električne karakteristike ovih ulja moraju da zadovolje propisane kriterijume. Kriterijumi za nova mineralna izolaciona ulja

definisana su standardom IEC 60296 [47]. Tokom pogona ET, izolaciona ulja stare i njihove karakteristike slabe, a produkti starenja negativno utiču na dalju degradaciju ulja, a pospešuju i degradaciju papirne izolacije. U tom smislu, tokom pogona ET u određenim vremenskim intervalima potrebno je proveriti ključne karakteristike ulja i po potrebi izvršiti obradu ili zamenu ulja, a sve u cilju produženja životnog veka ET. Standardom IEC 60422 [48] za nadzor i održavanje ulja u električnoj opremi, definisane su karakteristike mineralnih ulja iz eksploatacije koje je potrebno kontrolisati, kriterijumi koje ulja treba da zadovolje zavisno od naponskog nivoa ET u kome se nalaze, kao i periodika ispitivanja. Takođe, standardom su definisane i određene standardizovane metode koje je potrebno primeniti za ispitivanje navedenih karakteristika.

Sva ispitivanja karakteristika mogu se podeliti u osnovna i specijalna, odnosno dodatna ispitivanja ulja:

- Osnovne hemijske karakteristike ulja: sadržaj vode u ulju, sadržaj kiselina u ulju (kiselinski ili neutralizacioni broj), sadržaj inhibitora oksidacije ulja, sadržaj taloga.
- Dodatna ispitivanja hemijskih karakteristika ulja: korozivnost ulja (kvalitativni testovi i kvantifikacija korozivnih sumpornih jedinjenja u ulju), oksidaciona stabilnost ulja, ugljovodonični sastav ulja (udeo parafina, naftena i aromata), gas-apsorpcione karakteristike ulja.
- Osnovne fizičke karakteristike ulja: gustina, viskoznost, tačka paljenja, tačka stinjanja,
- Dodatna ispitivanja fizičkih karakteristika ulja: broj i veličina čestica u ulju, indeks prelamanja.
- Osnovne električne karakteristike: dielektrična čvrstoća ulja, faktor dielektričnih gubitaka ulja i specifična električna otpornost ulja.

2.2.1. Kratak uporedni pregled karakteristika mineralnih i biljnih ulja

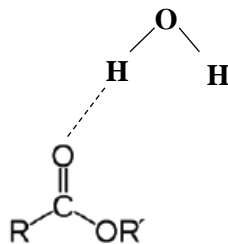
Usled razlike u hemijskoj strukturi mineralnih i biljnih izolacionih ulja, postoje i određene razlike u njihovim karakteristikama.

Fizičke karakteristike

Prednost izolacionih ulja biljnog porekla u odnosu na mineralna, ogledaju se pre svega u njihovoj biorazgradivosti i dobrim protiv požarnim karakteristikama, kao što su veće vrednosti tačke paljenja. S druge strane, biljna ulja karakterišu i veće vrednosti gustine, kinematičke viskoznosti i tačke stinjanja u odnosu na mineralna ulja. Ove karakteristike se mogu posmatrati kao nedostaci, jer veće vrednosti tačke stinjanja mogu dovesti do problema prilikom eksploatacije transformatora pri niskim radnim temperaturama ulja. Veće vrednost kinematičke viskoznosti ulja mogu dovesti do slabije pokretljivosti ulja, a samim tim i do manje efikasnog prenosa toplote, odnosno do slabijeg hlađenja IS. Ovo je naročito slučaj kod ET koji se hlade prirodnim putem, što je najčešće slučaj kod distributivnih ET, kod kojih se biljna ulja najviše i koriste. Na osnovu podataka u literaturi [4], viskoznost izolacionih ulja biljnog porekla značajno opada s porastom temperature, pa je npr. vrednost viskoznosti na 100 °C značajno manja od vrednosti na 40 °C. Na visokim temperaturama razlike između biljnog i mineralnog ulja po pitanju viskoznosti postaju praktično neznatne.

Hemijske karakteristike

Tokom eksperimentalnih istraživanja, primećeno je da su vrednosti sadržaja vode rastvorene u biljnim izolacionim uljima značajno više u odnosu na vrednosti primećene kod mineralnih ulja, a međupovršinski napon sistema ulje voda je manji kod biljnih nego kod mineralnih ulja. Ovo je posledica veće polarnosti biljnih ulja u odnosu na mineralna ulja. Estarske veze prisutne u molekulima biljnih ulja grade vodonične veze sa vodom (*Slika 2.2.1*), što utiče na veću rastvorljivost vode u ovim uljima i manji međupovršinski napon između biljnih ulja i vode.



Slika 2.2.1 Prikaz vodoničnih veza između molekula estera i vode

Električne karakteristike

Tipične vrednosti faktora dielektričnih gubitaka su kod biljnih ulja značajno više nego kod mineralnih ulja. Faktor dielektričnih gubitaka predstavlja meru prisutnih naelektrisanih čestica koje se slobodno kreću pod dejstvom električnog polja. Molekuli mineralnih ulja su nepolarni pa faktor dielektričnih gubitaka raste kada su prisutne određene polarne nečistoće u ulju ili kada usled oksidacije mineralnih ulja nastanu polarna jedinjenja kao što su peroksidi. S druge strane, molekuli biljnih ulja sami po sebi imaju visok polaritet, pa je vrednost faktora dielektričnih gubitaka i kod novih ulja visok.

Vrednosti dielektrične čvrstoće kod novih biljnih i mineralnih ulja su visoke i slične. Dielektrična čvrstoća ulja predstavlja sposobnost ulja da izdrži električni proboj. Vrednosti dielektrične čvrstoće će kod obe vrste ulja opadati kada su u ulju prisutne nečistoće kao što su čvrste čestice ili emulgovana/slobodna voda.

Oksidaciona stabilnost

Izolaciona ulja biljnog porekla su osetljivija na prisustvo kiseonika od mineralnih ulja i zbog toga je primena ovih ulja ograničena na zaptivene konstrukcije transformatora, bez direktnog kontakta ulja sa atmosferom. Osetljivost biljnih ulja na oksidaciju je posledica dvostrukih veza prisutnih u višim masnim kiselinama vezanim za molekul glicerola (*Slika 1.1.5*). Prilikom odabira biljnih ulja pogodnih za upotrebu u transformatorima, mora se praviti kompromis između zadovoljavajuće oksidacione stabilnosti i dobre tečljivosti na nižim temperaturama. Veći procenat zasićenih viših masnih kiselina (više masne kiseline koje ne sadrže dvostruke veze) povećavaju otpornost ulja prema oksidaciji, ali u isto vreme povećavaju i tačku stinjavanja ulja, što znači da će tečljivost ulja na nižim temperaturama biti lošija.

2.3. ODREĐIVANJE SADRŽAJA VODE RASTVORENE U ULJU

Sadržaj vode u izolacionom ulju predstavlja hemijsku karakteristiku izolacionih ulja, a kriterijumi vezani za ovu karakteristiku nalaze se u standardu IEC 60422 [48], zajedno sa ostalim fizičkim, hemijskim i električnim karakteristikama. Prilikom ispitivanja ulja u okviru redovnog održavanja ET, ovo se ispitivanje često posmatra zasebno i prilikom tumačenju rezultata, kao i prilikom davanja preporuke za naredno ispitivanje. Ovo je zbog toga što

prisustvo vode ima višestruki značaj u dijagnostici stanja ET: voda ima negativan uticaj na dielektrične karakteristike izolacionog sistema, a učestvuje i kao katalizator u reakcijama degradacije celokupnog izolacionog sistema. U slučaju ovlaženih IS na višim radnim temperaturama ulja može doći do prelaska veće količine vode iz celuloze u ulje, ukoliko ulje ne može da rastvori svu vodu, može doći do formiranja i izdvajanja mehurova što dalje može dovesti do proboja izolacionog sistema ET. Osim navedenog, prisustvo vode u IS može uticati na rezultat drugih analiza, kao što je npr. određivanje sadržaja derivata furana u ulju, tako da je dobijene rezultate neophodno tumačiti u zavisnosti od ovlaženosti IS.

Vlasnici ET Prilikom eksploatacije ET veoma je važno održavati nizak procenat vlage u IS, kako bi rad ET bio pouzdan, a životni vek dugačak. Najčešći uzroci prekomerne ovlaženosti IS su sledeći [49][50][51]:

- Nedovoljno osušena celulozna izolacija u fabrici prilikom proizvodnje ET,
- Prodor vlage prilikom ugradnje ili popravki ET,
- Neadekvatna zaptivenost uljnih pumpi ili samog suda ET,
- Vlaga iz atmosfere dospela putem konzervatora ili isteklog silika gela,
- Voda nastala tokom degradacije celulozne izolacije.

Sa aspekta održavanja ET, važno je poznavati sadržaj vode u ulju, ali i u celuloznoj izolaciji. Sadržaj vode u celuloznoj izolaciji se ne može utvrditi direktnim merenjima, već se određenim metodama vrši procena vlage u čvrstoj izolaciji.

2.3.1. Apsolutni sadržaj vode u ulju

Direktno merenje sadržaja vode moguće je vršiti isključivo u laboratoriji na uzorku ulju uzetom iz ET. Standardom IEC 60422 [48] definisana je metoda ispitivanja sadržaja vode u ulju putem Karl Fischer kulometrijske titracije opisanoj u standardu IEC 60814 [52]. U ovom standardu opisan je postupak i za merenje sadržaja vode u uzorcima papira i presborda, ali se ovi materijali ne mogu uzorkovati sve dok je ET u upotrebi, odnosno dok ET ne završi svoj životni vek. Kriterijumi vezani za apsolutni sadržaj vode u ulju veoma su strogi i zavise od naponskog nivoa i značaja ET u sistemu.

Vrednost apsolutnog sadržaja vode u ulju ima veliki značaj sa aspekta dielektričnih karakteristika izolacionog ulja, naročito u slučajevima kada su radne temperature ulja

prilično visoke, a uz to ET ima i nagle prelaze na režim rada sa nižom temperaturom i obrnuto. S druge strane, ova vrednost apsolutnog sadržaja vode u ulju se dalje koristi u metodama za procenu sadržaja vlage u celuloznoj izolaciji.

2.3.2. Procena ovlaženosti izolacionog sistema energetskih transformatora na osnovu analize ulja

Tokom višedecenijskog rada na razvoju metoda za dijagnostiku pogonskog stanja ET, razvijeno je nekoliko načina za izvođenje zaključaka o ovlaženosti celokupnog IS na osnovu izmerenog sadržaja vode u ulju, kao što su:

- Vrednost izmerenog sadržaja vode u ulju korigovana na referentnu temperaturu od 20 °C,
- Relativni sadržaj vode u ulju (RS, %),
- Procenom sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji korišćenjem ravnotežnih dijagrama.

Voda se u IS ET većim delom nalazi rastvorena u celuloznoj izolaciji (u procentima, %), a veoma mali deo se nalazi rastvoren u ulju (u milionitim delovima, mg/kg), što je posledica velikih razlika u polarnosti celuloze i ulja. Sa porastom temperature raste rastvorljivost vode u ulju, a usled toga i do difuzije vode iz celuloze u ulje.

Svođenjem apsolutnog sadržaja vode na referentnu temperaturu, isključen je uticaj radne temperature ulja, odnosno režima rada ET, na rastvaranje vode iz celulozne izolacije u ulje. Ovim se postiže bolje praćenje ET tokom pogona, odnosno izvođenje zaključaka o porastu ovlaženosti izolacionog sistema tokom eksploatacije, ukoliko je prethodno potvrđeno da je uzorkovanje ulja izvršeno na adekvatan način. U prethodnoj verziji standarda IEC 60422 [53] u Tabeli 5, nalazili su se kriterijumi za dozvoljen sadržaj vode u ulju korigovan na referentnu temperaturu od 20 °C. Ipak, da se ne bi izgubio značaj apsolutne vrednosti sadržaja vode u ulju, ali i usled činjenice da su razvijene preciznije metode za procenu ovlaženosti celulozne izolacije, ovi su kriterijumi u novijoj verziji standarda izostavljeni.

Relativni sadržaj vode u ulju, RS

Relativni sadržaj vode u ulju predstavlja zasićenost ulja vodom i računa se kao količnik izmerenog apsolutnog sadržaja vode u ulju i najvećeg sadržaja vode koje na datoj temperaturi ulje može da rastvori. Izražava se u procentima, a računa se prema sledećoj formuli:

$$RS = \frac{SV}{SV_{max}} \quad (2.3.1)$$

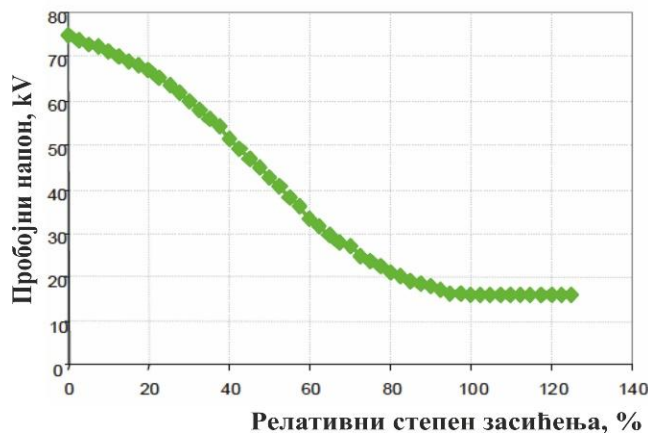
gde je,

RS – Relativni sadržaj vode u ulju, %

SV – apsolutni sadržaj vode izmeren u ulju, mg/kg,

SV_{max} – Maksimalni sadržaj vode u ulju koji ulje može da rastvori na datoj temperaturi.

RS praktično predstavlja meru ovlaženosti ulja na datoj temperaturi i ima najveći značaj kada su u pitanju karakteristike samog ulja, u prvom redu dielektrična čvrstoća ulja. Vrednost dielektrične čvrstoće značajno pada kada se u ulju nalazi slobodna voda, odnosno voda koja nije rastvorena u ulju. Porast apsolutnog sadržaja vode u ulju neće imati negativan uticaj na dielektričnu čvrstoću, sve dok je taj porast postepen, a vrednost apsolutnog sadržaja značajno manja od maksimalnog sadržaja vode koje ulje na datoj temperaturi može da rastvori. Maksimalna količina vode koju ulje na datoj temperaturi može da rastvori, a samim tim i RS ulja, zavisi od vrste ulja, ali od ostarelosti konkretnog ulja, odnosno prisustva polarnih produkata starenja ulja. Na *Slici 2.3.1* prikazan je grafik koji pokazuje kako dielektrična čvrstoća mineralnog izolacionog ulja opada sa porastom RS ulja [54].

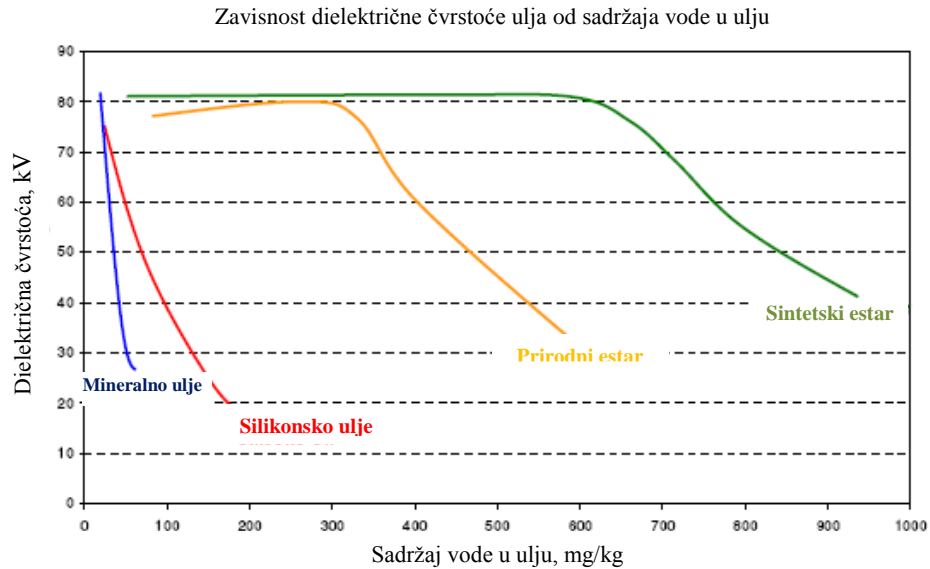


Slika 2.3.1. Zavisnost dielektrične čvrstoće ulja od RS ulja [54]

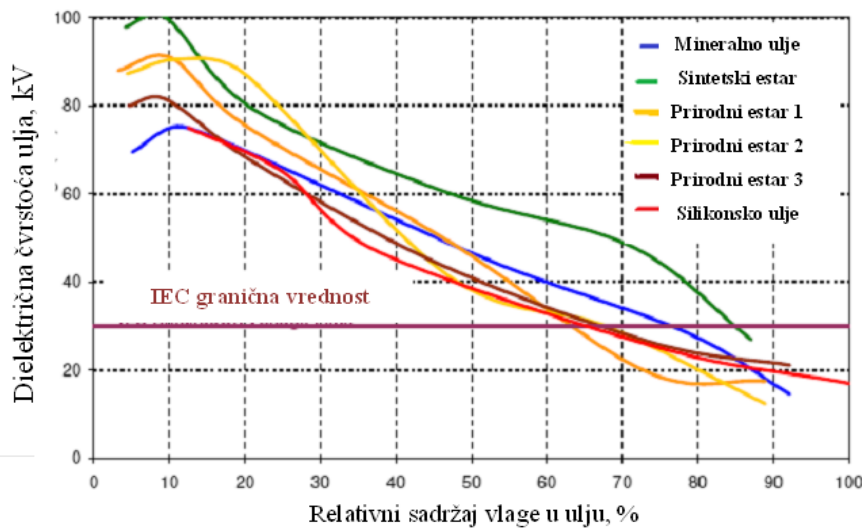
Primena ovog dijagrama je značajna kod procene vrednosti dielektrične čvrstoće na radnoj temperaturi ulja, naročito kod ET koji rade na visokim temperaturama i usled toga sa povišenim apsolutnim sadržajem vode u ulju, usled čega je dielektrična čvrstoća ulja izmerena na sobnoj temperaturi niska i nezadovoljavajuća. Kod ovih ET se pomoću izmerene vrednosti RS ulja i dijagrama prikazanog na Slici 1. može proceniti dielektrična čvrstoća ulja na radnoj temperaturi.

Sve češća praksa je da se u ET ugrađuju on-line senzori sa kojih se direktno može očitati vrednost RS i na taj način pratiti ovlaženost IS.

Činjenica da dielektrična čvrstoća ulja ne zavisi isključivo od vrednosti apsolutnog sadržaja vode u ulju, već i od maksimalne količine vode koje ulje na određenoj temperaturi može da rastvori, veoma je značajna kada je u pitanju upotreba biljnih ulja u ET. Kod biljnih ulja su primećeni značajno viši apsolutni sadržaji vode u ulju, nego što je to slučaj kod mineralnih ulja, što je posledica razlike u hemijskom sastavu, odnosno u većoj polarnosti biljnih ulja. Zbog veće sposobnosti biljnih ulja da rastvore vodu, za isti apsolutni sadržaj vode u ulju, RS biljnih ulja će biti znatno niži nego RS mineralnih ulja. Na *Slikama* 2.3.2 i 2.3.3, dat je uporedni prikaz promene dielektrične čvrstoće ulja sa porastom apsolutnog (*Slika* 2.3.2) i relativnog (*Slika* 2.3.3) sadržaja vode u ulju za različite vrste ulja. Sa *Slike* 2.3.2 se vidi da veći apsolutni sadržaj vode kod biljnih ulja u odnosu na mineralna, ne znači nužno lošiju vrednost dielektrične čvrstoće ulja. Zavisnost vrednosti dielektrične čvrstoće ulja od relativnog sadržaja vode u ulju je slična za različite vrste izolacionih ulja [4].



Slika 2.3.2 Zavisnost dielektrične čvrstoće ulja od apsolutnog sadržaja vode u ulju [4]



Slika 2.3.3 Zavisnost dielektrične čvrstoće ulja od relativnog sadržaja vode u ulju [4]

Procena sadržaja vlage u celuloznoj izolaciji na pomoću ravnotežnih dijagrama

Na osnovu izmerenog sadržaja vode u uzorku ulja i odgovarajućih ravnotežnih dijagrama, može se na relativno komforan način izvršiti procena sadržaja vode u papirnoj izolaciji ET.

Ravnotežni dijagrami raspodele vode u sistemu papir/ulje daju zavisnost sadržaja vode u papiru (u procentima) od izmerenog apsolutnog sadržaja vode u ulju (u mg/kg) za različite

temperature. U literaturi se može naći veći broj ovakvih dijagrama, a najpoznatiji su od sledećih autora: Oommen, Griffin, Fabre-Pichon, Weidmann, Nomogram FIST itd. Ovi su dijagrami formirani na osnovu rezultata laboratorijskih eksperimenata, pri čemu se postupak i materijali koji su u eksperimentima korišćeni prilično razlikuju, a često nisu sasvim jasno definisani. Neki od ovih eksperimenata sprovedeni su u sistemu papir-vazduh, neki u sistemu papir-ulje-vazduh, a neki pod vakuumom, pri čemu je vršeno uravnotežavanje parcijalnih pritisaka i napona vodene pare.

Procena sadržaja vlage u papiru primenom ravnotežnih dijagrama kod ET u pogonu, pokazala se kao prilično pouzdan i brz metod, i to naročito kada su ispunjeni sledeći uslovi [4][55]:

- Radna temperatura ulja u ET prilikom uzorkovanja $\geq 35^{\circ}\text{C}$
- ET tokom dužeg vremenskog perioda radi pod ujednačenim opterećenjem
- Nije vršeno sušenje izolacionog sistema ili obrada ulja u poslednjih 6 meseci.

Metode električnih ispitivanja ET koje se koriste za procenu sadržaja vode u celuloznoj izolaciji su: metode dielektrične spektroskopije u vremenskom domenu (PDC i RVM) i metoda dielektrične spektroskopije u frekventnom domenu (FDS). Ove je metode moguće primeniti dok se transformator nalazi van pogona. Zbog različitih principa na kojima se metode zasnivaju, može doći do određenih odstupanja u proceni sadržaja vlage metodom ravnotežnih dijagrama i električnim metodama.

2.4. ODREĐIVANJE SADRŽAJA DERIVATA FURANA U ULJU

Prilikom degradacije celulozne izolacije ET nastaju sledeći produkti: ugljen monoksid, ugljen dioksid, voda, metanol (CH_3OH), etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) i derivati furana: 2-furfural (2-FAL), 2-furfuril alkohol (2-FOL), 2-acetil furan (2-ACF), 5 hidroksimetil 2- furfural (5-HMF), 5 metil 2-furfural (5-MEF) [2]. Derivati furana predstavljaju specifične i selektivne markere degradacije čvrste izolacije, jer nastaju isključivo kao posledica degradacije celuloze, dok ostali produkti mogu nastati degradacijom ulja. Na osnovu rezultata ispitivanja sadržaja derivata furana u ulju mogu se izvesti određeni zaključci o stepenu ostarelosti

papirne izolacije ET, dok se praćenjem produkcije ovih jedinjenja na godišnjem nivou utvrđuje da li je proces degradacije aktivan i kolika je brzina starenja [56].

Kao što je već rečeno u poglavlju 1.4.2, procenu stanja papirne izolacije na osnovu merenja sadržaja derivata furana u ulju otežavaju sledeće činjenice: veći deo furana ostaje apsorbovan u papiru, a manji procenat biva rastvoren u ulju, rastvorljivost derivata furana u ulju u velikoj meri zavisi od temperature, prisustva vlage, kiseonika, kiselih produkata starenja, tipa papira, hemijskog sastava ulja (npr. mineralno ulje ili prirodni estar), a osim toga, obradom ulja se uklanjaju derivati furana iz ulja, nakon čega dolazi do rastvaranja novih količina ovih jedinjenja iz papira u ulje.

Prilikom dijagnostike stanja papirne izolacije na osnovu izmerenog sadržaja derivata furana u ulju, od velikog je značaja podatak o ovlaženosti izolacionog sistema. S obzirom da se ovlaženost papirne izolacije ne može utvrditi direktnim merenjima, već samo procenama, ovo može biti dodatni izvor greške za ovu metodu.

Prema navodima u literaturi [1][57], veće koncentracije određenog derivata furana mogu da ukažu na dominantni mehanizam degradacije celulozne izolacije: derivat 2-FAL generiše se u slučajevima kada dolazi do opšteg pregrevanja papirne izolacije (odnosno degradacija celuloze se odvija po termičkom mehanizmu), derivat 5-HMF u većim količinama nastaje kada se degradacija odvija u prisustvu kiseonika (odnosno degradacija celuloze se odvija po oksidativnom mehanizmu), derivat 2-FOL nastaje u ovlaženim izolacionim sistemima, odnosno degradacija celuloze se odvija po mehanizmu hidrolize, veće koncentracije derivata 5-MEF ukazuju na termičku degradaciju celuloze pri veoma visokim temperaturama. Kada su u pitanju veće koncentracije derivata 2-ACF, nije određeno na koji mehanizmu degradacije bi mogle da ukažu.

3. EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimentalna istraživanja ove doktorske disertacije organizovana su u tri celine:

- Eksperiment I – Formiranje dijagrama ravnotežne raspodele vlage u izolacionom sistemu papir/presbord/ulje za normalan Kraft papir i mineralno, odnosno biljno ulje
- Eksperiment II – Simulacija ubrzanog starenja izolacionog sistema energetskih transformatora u laboratorijskim uslovima sa mineralnim odnosno biljnim uljem
- Eksperiment III – Ubrzano starenje dva eksperimentalna energetska transformatora punjena mineralnim uljem i odgovarajućih laboratorijskih modela

3.1. MATERIJALI I REAGENSI

Materijali korišćeni u eksperimentu

1. Novo nekorišćeno mineralno-naftensko, neinhibirano izolaciono ulje u skladu sa standardom IEC 60296 [47],
2. Novo nekorišćeno biljno izolaciono ulje u skladu sa standardom ASTM D6871 [59],
3. Normalan Kraft papir za barijere, debljine 0,25 mm, gustine 1,2 – 1,3 g/cm³, u skladu sa standardom IEC 60641-3-2 [60],
4. Presbord debljine 1,0 mm i gustine 1,0 – 1,2 g/cm³, u skladu sa standardom IEC 60641-3-1[61].

Rastvarači i reagensi

U eksperimentima i analitičkim ispitnim metodama korišćeni su rastvarači: HYDRANAL – Coulomat Oil, HYDRANAL – Coulomat Oven, HYDRANAL – Coulomat CG, hloroform, petrol etar, Gasovi čistoće 5.0 – azot, argon, vazduh (bez ugljovodonika) i vodonik, metanol HPLC čistoće, acetonitril HPLC čistoće, Voda HPLC čistoće, heksan HPLC čistoće, n-pentan, kuprietilen-diamin (CED), destilovana voda, aceton, Standardni alkoholni rastvor kalijum-hidroksida (KOH) 0,05 mol/dm³, izopropanol, p.a, hlorovodonična

kiselina (HCl) 0,1 mol/dm³, rastvor indikatora alkalno plavo 6b (2 %), kalijum-hidrogenftalat, [KHC₆H₄(COO)₂], terc-butilhidrokinon (TBHQ), 2,6-di-terc-butilparakrezola (DBPC), biljno transformatorsko ulje koje ne sadrži inhibitor oksidacije

3.2. ANALITIČKE METODE

3.2.1. Ispitivanje sadržaja vode u izolacionom ulju i papiru prema standardu IEC 60814

Za određivanje apsolutnog sadržaja vode u izolacionom ulju, papiru i presbordu korišćena je metoda opisana u standardu IEC 60814 [52]. U pitanju je potenciometrijska titracija pomoću Karl-Fischer kulometra. Metoda se zasniva na sledećoj reakciji vode sa Karl-Fischer reagensom (rastvor joda, sumpor dioksida i piridina u metil alkoholu):



proizvodi reakcije dalje reaguju sa metanolom na sledeći način:



S obzirom da je reakcija (3.2.1) povratna reakcija, metanol služi da se ravnoteža reakcije pomeri u desno, da bi sva prisutna voda izreagovala, što predstavlja završnu tačku titracije.

Ovom metodom se mogu detektovati veoma male koncentracije vode u ulju, a izražavaju se u mg/kg (odnosno ppm).

Postupak ispitivanja sadržaja vode u izolacionom ulju

Ovaj postupak je u standardu definisan za ulja čiji je sadržaj vode iznad 2 mg/kg, a kinematička viskoznost na 40°C je ispod 100mm²/s.

Aparatura

Metrohm kulometar 831 KF, slika 3.2.1.

Reagensi

Anolit - Hydranal Coulomat Oil,

Katolit Hydranal – Coulomat CG

Postupak

- Uključiti uređaj i sačekati uspostavljanje **stabilnog drifta $\pm 2 \mu\text{g}/\text{min}$ (u opsegu 4-12 $\mu\text{g}/\text{min}$)**.
- Otvoriti špric sa uzorkom i pričvrstiti slavinu na otvor šprica.
- Isprati iglu i plastični špric uzorkom ulja.
- Optimalna količina uzorka je oko 5 ml za ulja koja sadrže između 2 i 100 ppm vode.
- Tarirati vagu sa uzorkom (ulje u špricu sa iglom)
- Pritisniti Start na KF Kulometru. Na uređaju će se pojaviti masa prethodnog uzorka.
- Injektovati uzorak u titracionu posudu preko septe.
- Izmeriti prazan špric sa iglom i masu (masu injektovanog uzorka, koja predstavlja razliku između punog i praznog šprica i negativna je). Masu uzorka ukucati u Kulometar (u gramima) i pritisnuti Enter da bi uređaj „zapamtio“ novu masu i započeo titraciju.
- Očitati sadržaj vode u uzorku (u ppm).
- Ponoviti postupak sa još dve probe. Srednja vrednost 3 probe je konačan rezultat ukoliko se probe nalaze u intervalu $0,6\sqrt{x}$ ppm, gde je x srednja vrednost 3 probe.
- Sadržaj vode u ulju računa se prema formuli:

$$SV=m/M, \quad (3.2.3)$$

gde je,

SV – sadržaj vode u ulju (mg/kg) m – masa istitriscane vode iz uzorka (μg) M – masa injektovanog uzorka izolacionog ulja u gramima (g)



Slika 3.2.1. Karl Fischer Metrohm kulometar 831 - uređaj za merenje sadržaja vode u ulju

Postupak ispitivanja sadržaja vode u izolacionom papiru i presbordu

Aparatura

Metrohm kulometar 737 KF sa 832 KF termoprepom, *Slika 3.2.2.*

Reagensi

Anolit - Hydranal Coulomat Oven

Katolit - Hydranal Coulomat CG

Postupak

- Uključiti termoprep i podesiti radnu temperaturu. Temperatura pećnice treba da je 130°C za papir ili trafobord impregnisan niskoviskoznim uljem ili 140°C za papir ili trafobord impregnisan viskoviskoznim uljem.
- Otvoriti bocu sa azotom i podesiti protok suvog azota na 50 - 100 mL/min.
- Ubaciti u pećku praznu zatvorenu vialu i spustiti iglu za odvođenje vlage.

- Uključiti Kulometar i mešanje, sačekati uspostavljanje stabilnog drifta ± 2 $\mu\text{g}/\text{min}$ (u opsegu 4-12 $\mu\text{g}/\text{min}$).
- Izmeriti uzorak na analitičkoj vagi (između 0,05 g i 0,10 g papira) i zapisati masu uzorka.
- Brzo zatvoriti vialu i ubaciti u pećku umesto prazne viale. Spustiti iglu za odvođenje vlage i pritisnutu taster Start na uređaju.
- Na displeju instrumenta će se pojaviti masa prethodnog uzorka. Ukucati masu novog uzorka (u gramima) i pritisnuti taster Enter da bi uređaj „zapamtio“ novu masu i započeo titraciju.
- Sačekati 20 min. da se završi ekstrakcija vlage.
- Nakon završene ekstrakcije potvrditi titraciju pritiskom na taster Start na kulometru. Nakon završene titracije, pojavljuje se rezultat na displeju kulometra u % koji se pritiskom na taster Select na Kulometru prebacuje u μg (m_2).
- Uraditi slepu probu sa istim uslovima ispitivanja kao i uzorak. Zapisati izmereni sadržaj vode (m_1)(na displeju kulometra pojavljuje se poruka “Confirm start” ali se još ne potvrđuje).
- Izvaditi vialu iz pećnice, otvoriti je i odmastiti uzorak papira (naliti hloroform u vialu, 2-3 puta) i sušiti papir u peći na 110°C , 2 sata. Nakon toga ohladiti uzorak u eksikatoru i izmeriti masu papira (M, g).
- Umesto viale sa ispitanim uzorkom u pećku ubaciti praznu zatvorenu vialu, ponoviti kondicioniranje. Ponoviti ispitivanje sa još jednom probom.
- Sadržaj vode u papiru/trafobordu, računa se prema formuli:

$$SV = (m_2 - m_1 / M) \cdot 10^{-4} \quad (3.2.4)$$

gde je, SV (sadržaj vode u uzorku, %), m_1 – masa istitrisane vode iz slepe probe (μg), m_2 – masa istitrisane vode iz uzorka (μg), M – masa odmašćenog i osušenog uzorka papira u gramima (g).



Slika 3.2.2 Karl Fischer Metrohm kulometar 737 KF sa 832 KF termoprepom – uređaj za merenje sadržaja vode u papiru i presbordu

3.2.2. Određivanje koncentracije gasova rastvorenih u ulju prema IEC 60567

U ovoj disertaciji je za određivanje sadržaja gasova rastvorenih u izolacionom ulju koršćena metoda parcijalne ekstrakcije – „head space“ metoda, opisana u standardu IEC 60567 [41]. Ova metoda se sastoji iz sledećih postupaka: izdvajanje gasova iz ulja pogodnom ekstrakcionom tehnikom (u ovim slučajju parcijalnom ekstrakcijom – head space metoda) i razdvajanje, identifikacija i kvantifikacija prisutnih gasova metodom gasne hromatografije.

Oprema i materijali

Gasni hromatograf – Agilent 7890B

Headspace sampler Agilent 7697A

Gasovi čistoće 5.0 – argon, vazduh (bez ugljovodonika) i vodonik,

Staklene vijale, zapremine 20 ml

Plastični špric, zapremine 10 ml

Igla za plastični špric

Slavinica

Septe, sa PTFE/butil gumom, nepropusne za gasove

Boca sa argonom za inertizaciju vijala

Gumena i plastična creva

Rastvarači za odmaščivanje (petrol-etar)

Priprema uzoraka

Za pripremu svakog uzorka koristi se jednokratna oprema (špric, slavina, igla i vijala), koja se nakon upotrebe baca. Prvo je potrebno inertizovati vijale argonom, što se radi tako što se prvo zatvore vijale odgovarajućim septama. U septu se ubode tanja igla koja služi za odušak, a zatim se preko druge igle uvodi argon oko 2 minuta.

Na špric za uzorkovanje postavi se slavina preko koje se postavi plastični špric, a zatim se odmeri 10 ml ulja. Pre ubacivanja ulja u vijalo odstrane se zaostali mehuri vazduha iz šprica. U inertizovanu vialu se istovremeno zabodu i špric i igla za odušak, a zatim se ubaci uzorak ulja (10 ml) i istovremeno se izvuku obe igle.

Nakon ovog postupka uzorak se postavlja u autosempler i spreman je za analizu.

Kalibracija

Kalibracija uređaja vrši se upotrebom referentnih smeša gasova u ulju i to koncentracije od 10, 100 i 500 ppm (komponente: H₂, O₂, N₂, CH₄, CO, CO₂, C₂H₄, C₂H₆, C₂H₂).

Obrada podataka

Otvoriti hromatogram date analize i integrisati ga uz pomoć alata za integraciju i poslednje izvršene kalibracije.

Tačnost

Tačnost se određuje analizom referentnog standarda kojim se vrši kalibracija. Dozvoljeno odstupanje dobijenih koncentracija gasova je dato standardom IEC 60567:2011 i za ekstrakciju headspace metodom iznosi 18% za srednje nivoe koncentracija, odnosno 37% za niske koncentracije.

3.2.3. Određivanje koncentracije derivata furana u ulju metodom tečne hromatografije prema IEC 61198

Postupak za određivanje sadržaja derivata furana u izolacionom ulju opisan je u standardu IEC 61198. Bazira se na izdvajanju derivata furana iz ulja putem tečno-tečne ili

tečno-čvrste (SPE) ekstrakcije i analizi ekstrakta tehnikom tečne hromatografije visokih performansi sa UV-VIS detektorom - HPLC (High Performance Liquid Chromatography) [62].

U ovoj disertaciji korišćena je SPE tehnika za ekstrakciju derivata furana iz izolacionog ulja.

Referentni materijali

5-hidroksimetil-2-furfural (5HMF)

2-furfurilalkohol (2FOL)

2-furfural (2FAL)

2-acetilfuran (2ACF)

5-metil-2-furfural (5MEF)

Aparatura

Silika kertridži 1000 mg, sa veličinom čestica od 15 μm do 100 μm

Vakuum manifold

Špric od 10 ml

Meskolben od 2 ml

HPLC Hromatograf Agilent 1200 series

Reagensi

Acetonitril, HPLC grade

Metanol, HPLC grade

Voda, HPLC grade

n-pentan, p.a.

Priprema uzorka SPE ekstrakcijom

Odmeriti tačno 10 g \pm 0,1 g (oko 20 ml) uzorka ulja i rastvoriti ga u 10 ml n-pentana. SPE kertridž se kondicionira propuštanjem 2 ml n-pentana. Odmah zatim propustiti rastvor

sa uzorkom kroz kertridž maksimalnog protoka 3 ml/min, a zatim još 20 – 25 ml n-pentana. Kertridž ne sme da ostane suv između kondicioniranja i dolivanja uzorka. Sav eluat odbaciti. Kertridž se suši primenom vakuuma najmanje 10 do 15 minuta, a zatim se zaostale polarne komponente procede istim eluentom koji se koristi u prvim minutima hromatograma. Prva 2 ml eluata se sakupe u graduisani sud od 2 ml i analiziraju HPLC hromatografom.

S obzirom da je primećeno lošije rastvaranje biljnih ulja u pentanu, prilikom pripreme kalibracionih rastvora, a kasnije i uzoraka, SPE ekstrakcija je vršena tako što je ista količina ulja $10 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$, rastvarana u 20 ml heksana. Kondicioniranje i kasnije ispiranje kertridžom vršeno je takođe heksanom, u sitim količinama kao što je navedeno za pentan u slučaju mineralnog ulja. Ova izmena je u skladu sa standardom.

Uslovi ispitivanja

Izokratski uslovi, Mobilna faza: voda 60 %, metanol 40 % , Protok 1 ml/min

Temperatura kolone: 40 °C

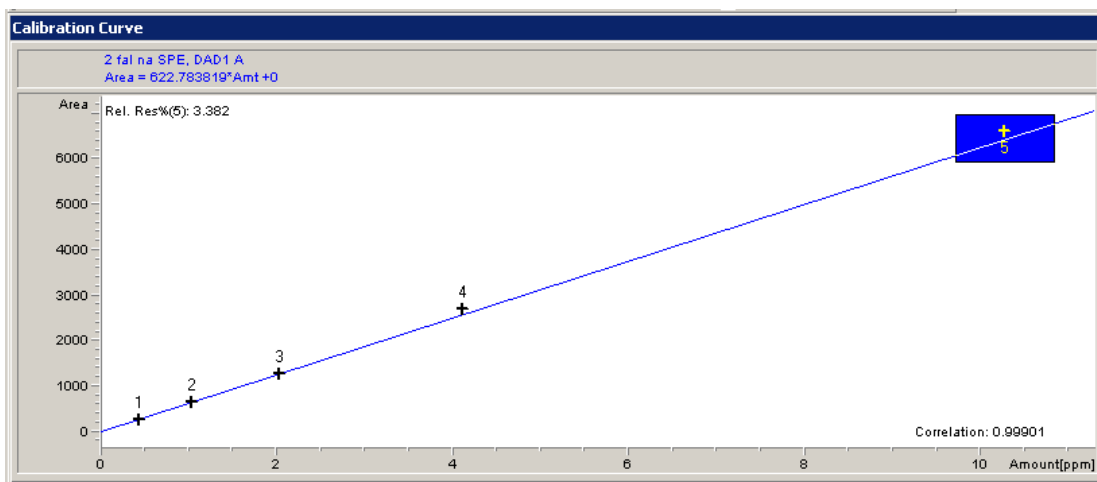
Talasne dužine za UV- VIS detektor:

277 nm za 2-furfural

275 – 280 nm za ostale komponente

Kalibracija

Za određivanje koncentracije derivata furana u nepoznatom uzorku, potrebno je napraviti kalibraciju instrumenta pomoću referentnih materijala, tako što se za svako jedinjenje napravi set kalibracionih rastvora u ulju. Smatra se da je dovoljno napraviti 5 standardnih rastvora. Kalibraciona prava formira se vezivanjem površine absorbance (odziv detektora) i koncentracije propuštenog standarda *Slika 3.2.3*). Određivanje koncentracije nepoznatog uzorka se vrši očitavanjem sa kalibracione krive za odgovarajuću površinu površinu absorbance.



Slika 3.2.3 Kalibraciona prava za određivanje sadržaja derivata furana u izolacionom ulju

3.2.4. Određivanje srednjeg viskozimetrijskog stepena polimerizacije papira prema IEC 60450

Metoda za određivanje srednjeg viskozimetrijskog stepena polimerizacije izolacionog papira opisana je u standardu IEC 60450 [63]. Princip metode se sastoji u merenju specifične viskoznosti rastvora papira u kuprietilen-diaminu (CED-u) i određivanju graničnog viskozitetnog broja (η) ovog rastvora. Iz graničnog viskozitetnog broja se zatim izračunava srednji viskozimetrijski stepen polimerizacije papira, \overline{DP}_v .

Aparatura i reagensi

- termostatsko kupatilo sa mogućnošću održavanja temperature $20 \pm 0,1$ °C
- kalibrisan viskozimetar prema ISO 3105 sa konstantom 0,005 ili 0,01
- referentna tečnost za kalibraciju viskozimetra
- štoperica sa tačnošću $\pm 0,1$ s
- pogodan blender za mlevenje papira
- posude zapremine 50 ml koje mogu da se zatvore tako da CED rastvor ne dolazi u kontakt sa vazduhom tokom rastvaranja
- kuprietilen-diamin (CED), 1M rastvor

- destilovana voda
- aceton, čistoće najmanje 99,0 %
- pentan ili heksan čistoće najmanje 99,0 %
- 20 % rastvor azotne kiseline
- sušnica termostatski kontrolisana na 105 ± 2 °C
- analitička vaga tačnosti $\pm 0,1$ mg
- soksletov ekstraktor
- pipeta tačnosti $\pm 0,1$ ml
- magnetna mešalica

Priprema uzorka

Sa uzorkom papira treba rukovati isključivo pincetom i uz korišćenje rukavica. Celulozne materijale debljine veće od 1 mm, treba podeliti u tanje slojeve.

Impregnisani papir je potrebno odmastiti pomoću sokslet aparata upotrebom pentana ili petrol-etra (minimum 5 ciklusa). Odmašćeni uzorak ostaviti da se osuši na vazduhu i uravnoteži sa atmosferskom vlagom (nekoliko sati). Neimpregnisani uzorak se ne odmašćuje, a ostatak postupka je isti.

Uzorak podeliti u dva dela, pri čemu jedan služi za određivanje sadržaja vlage u uzorku. a druga za određivanje DP_v vrednosti papira.

Određivanje sadržaja vode u papiru

Određivanje sadržaja vode u odmašćenom uzorku papira određuje se u isto vreme kada se i priprema rastvor papira u CED-u, a prema metodi opisanoj u standardu IEC 60814 (postupak opisan u poglavlju.3.2.1 ove disertacije) i u skladu sa uputstvom za određivanje sadržaja vlage pomoću KF Oven metode (IEC 60814).

Postupak ispitivanja

Za svaki uzorak potrebno je uraditi dve probe ukoliko nije drugačije naglašeno. Prva proba se koristi u preliminarnom ispitivanju da bi se sakupili podaci za drugu probu (odnosno za glavni test). Ukoliko se u prvoj probi dobije proizvod $[v] \cdot c$ izvan opsega 0,5 – 1,5 radi se još jedna proba preliminarnog testa, ali sa drugom masom papira kako bi proizvod $[v] \cdot c$ bio u traženom opsegu.

Razdvajanje vlakana

Celulozna vlakna je potrebno razdvojiti da bi se obezbedilo dobro rastvaranje u CED-u, i to na sledeći način: Papir se u blenderu suvo usitni do paučinastog izgleda (rast temperature tokom mlevenja ne sme uzrokovati štetne efekte na uzorak). Samleveni uzorak se ostavi na vazduhu dok se ne uspostavi ravnoteža sa vlagom iz atmosfere (oko sat vremena). Na analitičkoj vagi se odmeri potrebna količina uzorka sa tačnošću 0,1 mg i stavi u erlenmajer sa šlifom zapremine 50 ml. Izmerena masa papira se zabeleži kao m , a zatim se preračuna masa suvog papira, m_D . U erlenmajer sa uzorkom se doda destilovana voda ($25 \text{ ml} \pm 0,1 \text{ ml}$) i magnetna mešalica, a zatim se stavi na mešanje tokom 30 minuta, kako bi se vlakna dobro razdvojila.

Rastvaranje papira u CED-u

Nakon što su se vlakna u vodi lepo razdvojila, u erlenmajer se pomoću pipete doda zapremina CED-a, jednaka zapremini vode koja je već dodata ($25 \text{ ml} \pm 0,1 \text{ ml}$). Rastvor CED-a sa papirom tokom rastvaranja ne sme da dođe u kontakt sa vazduhom, a da bi se to izbeglo neophodno je dodati staklene kuglica u dovoljnoj količini da tečnost potpuno ispuni erlenmajer.

Rastvor se meša na mehaničkoj mešalici sve dok se uzorak na rastvori i to:

- Za jako ostarele papire ($\overline{DP}_v < 350$) vreme od 1 – 2 h za rastvaranje je obično dovoljno
- Za većinu papira ($\overline{DP}_v > 350$) period rastvaranja od 16 h (preko noći) je obično dovoljan za kompletno rastvaranje

- Neke vrste novih papira se teško rastvaraju na sobnoj temperaturi, pa se rastvaranje može ubrzati mešanjem uzorka na 4°C u frižideru tokom noći.

Određivanje viskoznosti rastvora papira u CED-u

Izabrani viskozimetar postavi se u termostatsko kupatilo na temperaturu od $20 \pm 0,1$ °C. Viskozimetar treba da je čist, suv i produvan azotom. Punjenje viskozimetra se vrši prema instrukcijama proizvođača. Tokom punjenja vizuelno se ispita ima li nerastvorenih čestica u rastvoru. U slučaju otkrića nerastvorenih čestica, rastvor se odbacuje i ispitivanje se ponavlja.

Pre merenja neophodno je jednom isprati viskozimetar rastvorom čija se viskoznost određuje, a zatim ponovo napuniti viskozimetar. Nakon što je viskozimetar napunjen rastvorom treba sačekati 10 minuta pre samog merenja kako bi rastvor dostigao temperaturnu ravnotežu.

Meri se vremenski interval za koji gornji meniskus rastvora pređe put između dve oznake na viskozimetru, i beleži sa tačnošću $\pm 0,1$ s. Treba izvršiti ukupno tri merenja i izračunati njihovu srednju vrednost, t_s .

Razlika između maksimalnog i minimalnog vremena proticanja ne treba da bude veća od 0,5 s, a maksimalno dozvoljeno odstupanje između dva vremena proticanja ne sme biti veće od 1 %. Ukoliko se to ne može postići, treba očistiti viskozimetar i uzeti novu količinu rastvora i zatim ponovo izvršiti merenja. Postupak treba ponavljati sve dok razlika između maksimalnog i minimalnog vremena isticanja rastvora ne bude u dozvoljenim granicama. Ukoliko se to nikako ne može postići, uzeti tri vremena proticanja koja se najbolje slažu i zabeležiti da postoji loše slaganje među rezultatima.

Na isti način kao sa uzorkom, meri se vreme proticanja samog rastvarača koji čine CED i voda u odnosu 1:1. Merenje se vrši tri puta i izračuna njihova srednja vrednost, t_0 .

Izračunavanje srednjeg viskozimetrijskog stepena polimerizacije papira

Izračunati koncentraciju rastvora (u g/dl) za uzorke prema jednačini:

$$c = \frac{m_D}{V_{H_2O} + V_{CED}} \quad (3.2.5)$$

Izračunati specifičnu viskoznost v_s prema sledećoj jednačini:

$$v_s = \frac{t_s - t_0}{t_0} \quad (3.2.6)$$

gde su t_s i t_0 srednja vremena proticanja rastvora sa uzorkom i čistog rastvarača.

Gраниčni viskozitetni broj $[\nu]$ se izračunava iz Martinove formule:

$$v_s = [\nu] \cdot c \cdot 10^{k[\nu]c} \quad (3.2.7)$$

gde je c – koncentracija, a k konstanta koja za Kraft papir iznosi 0,14.

Alternativno, granični viskozitetni broj $[\nu]$ se izračunava pomoću linearne interpolacije podataka iz tabele u kojoj se nalaze vrednosti proizvoda $[\nu]c$ u funkciji od v_s (aneks D, tabela D. 1, standarda IEC 60450)

Srednji viskozimetrijski stepen polimerizacije \overline{DP}_v^α izračunava se pomoću jednačine:

$$\overline{DP}_v^\alpha = \frac{[\nu]}{K} \quad (3.2.8)$$

gde su K i α konstante karakteristične za sistem polimer rastvarač, u ovom slučaju izolacioni papir i kuprietilendiamin: $\alpha = 1$, $K = 7,5 \cdot 10^{-3}$.

Rezultat se izdaje kao srednja \overline{DP}_v vrednost dva rezultata merenja, pri čemu njihova razlika ne treba da bude veća od 2,5%.

3.2.5. Određivanje kinematičke viskoznosti i izračunavanje dinamičke viskoznosti ulja prema metodi SRPS ISO 3104:2003

Kinematička viskoznost izolacionih ulja merena je prema metodi opisanoj u standardu SRPS ISO 3104:2003 [64]. Ova ispitna metoda zasniva se na merenju vremena potrebnog da tačno određena zapremina tečnosti protekne pod dejstvom sile gravitacije kroz kapilaru kalibrisanog viskozimetra – Cannon Fenske, na konstantnoj temperaturi od 40 °C. Kinematička viskoznost je proizvod izmerenog vremena proticanja tečnosti i kalibracione

konstante, C . Dinamička viskoznost, η , se može izračunati iz proizvoda kinematičke viskoznosti i gustine, ρ , tečnosti.

Reagensi

Hrom sumporna kiselina za čišćenje viskozimetra

Rastvarač potpuno mešljiv sa uzorkom (petrol etar, toluol)

Rastvarač za sušenje (aceton)

Destilovana voda

Overeni referentni standard za kalibraciju (Cannon N10)

Aparatura

Etaloniran viskozimetar sa staklenom kapilarom, tip Cannon Fenske

Držać viskozimetra

Vodeno kupatilo, sa regulacijom i kontrolom temperature (termostat), tip: TS -20, sadrži providnu tečnost dubine dovoljne da uzorak u viskozimetru ni u jednom trenutku merenja nije manje od 2 cm ispod površine tečnosti u kupatilu, ili manje od 2 cm iznad dna kupatila. Kontrolna temperatura u kupatilu je automatska i može se pratiti na displeju uređaja ili putem računara, a treba da bude takva da ne odstupa za više od $\pm 0,02$ °C od zahtevane temperature.

Etalonirana laboratorijska štoperica sa odstupanjem od 0,1 s

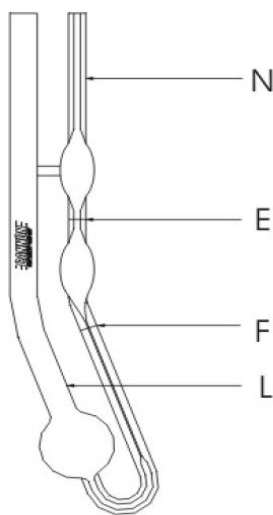
Opis postupka

Viskozimetar se očisti pogodnim rastvaračima i osuši produvanjem suvog, filtriranog vazduha da bi se otklonili poslednji tragovi rastvarača. Ukoliko postoji mogućnost da prašina ili drugi čvrsti materijali nađu u tečnom uzorku potrebno je profiltrirati uzorak.

Viskozimetar se puni, obrtanjem kapilare naopačke i primenom slabog vakuuma na cev L, dok je drugi kraj cevi N zaronjen u uzorak. Uzorak se usisava u kapilaru do oznake F. Nakon punjenja, kapilara se vrati u normalan položaj i obriše.

Viskozimetar se zatim postavi u vodeno kupatilo tako da uzorak u viskozimetru nije manje od 2 cm ispod površine tečnosti u kupatilu, ili manje od 2 cm iznad dna kupatila. Napunjen viskozimetar treba da bude u termostatiranom kupatilu dovoljno dugo da se postigne temperatura merenja (oko 1 h).

Primenom vakuuma se podigne nivo uzorka ulja iznad prve crte (oznaka E, slika 3.2.4). Meriti vreme prolaska tečnosti slobodni padom kroz kapilaru od prve (E) do druge crte (F, Slika 3.2.4), pomoću štoperice etalonirane štoperice. Ako je vreme proticanja manje od zahtevanog minimuma (200 s), odabrati kapilaru sa manjim prečnikom i manjom konstantom, C i ponoviti merenje.



Slika 3.2.4 Viskozimetar za merenje viskoznosti izolacionih ulja

Izračunavanje rezultata

Kinematička viskoznost se izračunava iz jednačine:

$$v = C \cdot t \quad (3.2.9)$$

gde je: v - kinematička viskoznost izražena u mm^2/s , C – konstanta kapilare izražena u mm^2/s^2 , t - srednje vreme proticanja tečnosti kroz kapilaru izraženo u s.

Dinamička viskoznost se izračunava iz jednačine:

$$\eta = v \cdot \rho \cdot 10^{-3} \quad (3.2.10)$$

gde je: η - dinamička viskoznost ulja izražena u m Pas, ρ - gustina ulja merena na istoj temperaturi na kojoj je merena viskoznost, izražena u kg/m^3 . ν - kinematička viskoznost izražena u mm^2/s

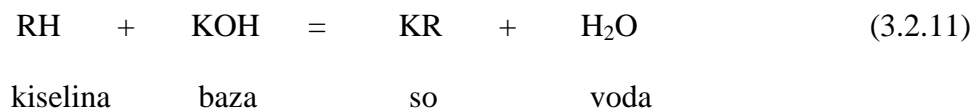
Izdavanje rezultata

Rezultati ispitivanja za kinematičku i/ili dinamičku viskoznost se izdaju sa četiri značajne cifre, zajedno sa temperaturom ispitivanja.

3.2.6. Određivanje neutralizacionog broja kolorimetrijskom titracijom prema SRPS EN 62021-2:2010 (IEC 62021-2:2007-05)

Tokom pogona ET dolazi do degradacije ulja te sadržaj kiselina u ulju raste i on predstavlja stepen degradacije izolacionog ulja.. Prisustvo kiselina u transformatorskom ulju ubrzava degradaciju čvrste izolacije transformatora i dovodi do korozije metala, a određuje se u skladu sa metodom opisanom u standardu IEC 62021 [66].

Neutralizacioni broj predstavlja broj miligrama kalijum hidoksida, KOH, koji je potreban za neutralizaciju jednog grama ulja. Reakcija kalijum hidoksida (baza) i kiselina iz ulja (RH) se odigrava na sledeći način:



R je општа ознака за киселински остатак. Reakcija neutralizacije u laboratoriji se vrši titracijom uzorka odgovarajućim rastvorom kalijum hidoksida sve ne izreaguju sve kiseline iz uzorka, što u stvari predstavlja trenutak kada je dostignuta završna tačka titracije. Неутрализація узорка уља у лабораторијским условима се врши додавањем базе уљу све до завршне тачке титрације односно до момента када је сва присутна киселина изреаговала са базом.

Oprema i materijali

Standardni alkoholni rastvor kalijum-hidoksida (KOH) $0,05 \text{ mol/dm}^3$

Izopropanol, p.a

Hlorovodonična kiselina (HCl) 0,1 mol/dm³

Rastvor indikatora alkalno plavo 6b (2 %): 2 g alkalnog plavog se rastvori u 100 ml izopropanola koji sadrži 1 ml hlorovodonične kiseline, 0,1 mol/dm³. Nakon 24h proveriti se titracijom da li je osetljivost indikatora dovoljna. Indikator zadovoljava ako se boja jasno menja iz plave u crvenu, a upoređuje se sa bojom 10 % rastvora kobalt-nitrata [Co(NO₃)₂*6H₂O] – završna tačka titracije.

Kalijum-hidrogenftalat, [KHC₆H₄(COO)₂]

Mikrolitarski špric zapremine 1 mL

Opis postupka

Titracija slepe probe

Napraviti 0,5% rastvor indikatora alkalnog plavog, tako što se 0,5 ml prethodno napravljenog i zakišeljelog rastvora indikatora (od 2 %) rastvori u 100 ml izopropanola. U titracionu posudu se odmeri 10 mL ± 0,1 mL 0,5% rastvora indikatora alkalno plavo 6B u izopropanolu i neutrališe rastvorom KOH, 0,05 mol/dm³. Završna tačka titracije dostignuta je kada se dobije crvena boja koja se upoređuje sa bojom 10 % rastvora kobalt-nitrata [Co(NO₃)₂*6H₂O], koja je postojana najmanje 15 sekundi. Za proračun se uzima srednja vrednost tri merenja slepe probe sa preciznošću od 0,001 mL.

Titracija uzorka

U čistu titracionu posudu se odmeri 5 g uzorka sa preciznošću od 0,01 g. U istu posudu se doda 10 mL ± 0,1 mL 0,5% rastvora indikatora alkalno plavo 6B u izopropanolu i uz mešanje titriše rastvorom KOH, 0,05 mol/dm³ do navedene završne tačke titracije.

Izračunavanje neutralizacionog broja

Sadržaj kiselina se računa na sledeći način:

$$TAN = \frac{(V_1 - V_0) \cdot c \cdot 56,1}{m} \quad (3.2.12)$$

gde je: V₁- broj mililitara rastvora KOH, 0,05 mol/dm³ upotrebljen za titraciju uzorka, mL V₀- broj mililitara rastvora KOH, 0,05 mol/dm³ upotrebljen za titraciju slepe probe, mL, c – koncentracija KOH, mol/dm³, m – masa uzorka ulja, g

Rezultat se izdaje kao srednja vrednost dva merenja sa preciznošću od $\pm 0,01$ mg KOH/g ulja.

3.2.7. Određivanje sadržaja inhibitora oksidacije u izolacionom ulju

Utrošak inhibitora oksidacije u mineralnom ulju tokom eksperimenta starenja praćen je standardizovanom metodom IEC 60666 [67], dok je utrošak inhibitora u biljnom ulju praćen modifikovanom IUPAC – AOAC 983.15 metodom [68].

3.2.7.1. Metoda za određivanje sadržaja inhibitora oksidacije u mineralnom ulju

Inhibirano mineralno ulje sadržalo je inhibitor 2,6-de-terc-butil-parakrezola (DBPC). Tokom eksperimenta starenja utrošak ovog inhibitora praćen je metodom infracrvene spektrofotometrije opisanoj u standardu IEC 60666 [67]. U pitanju je inhibitor fenolnog tipa, a metoda se zasniva na merenju apsorpcije kod frekvencije hidroksilne grupe fenola.

Referentni materijali i reagensi

Bazno ulje koje se koristi za proizvodnju inhibiranog ulja

Polistirenski film za proveru karakterističnih absorpcionih traka u infracrvenoj oblasti spektra od $4000 - 600 \text{ cm}^{-1}$

2,6-di-terc-butil-parakrezola, p.a.

Aparatura

Spektrometar sa infracrvenom Furijerovom transformacijom - FTIR, Nicolet iS10, Program Smart Omni Transmission

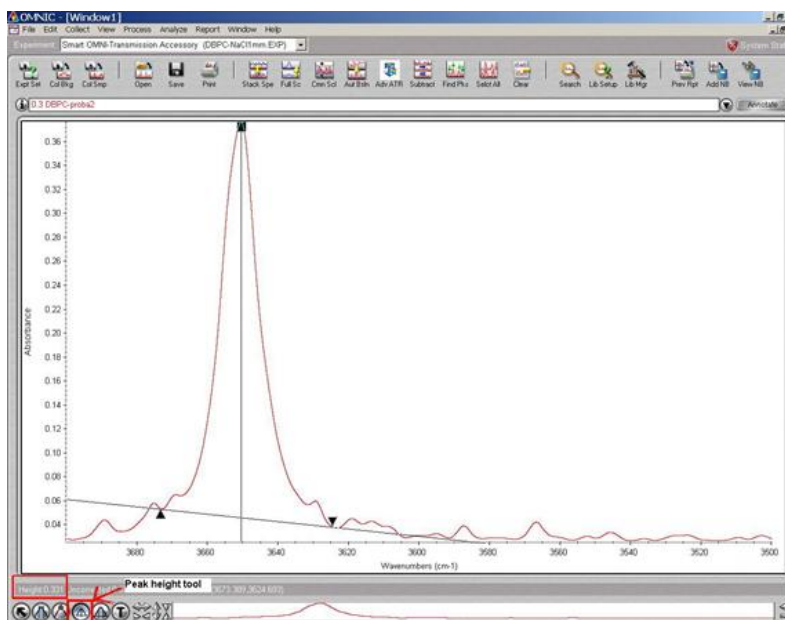
Ćelija za tečnost sa prozorima od natrijum-hlorida, debljine 0,5 mm

Opis postupka

Apsorbanca frekvencije hidroksilne (OH) grupe se javlja na talasnoj dužini 3650 cm^{-1} i meri se u IR ćeliji, debljine 0,5 mm. Koncentracija DBPC se određuje pomoću standardne kalibracione krive. Standardni rastvori za kalibraciju se pripremaju rastvaranjem određenih količina DBPC u osušenom baznom ili parafinskom ulju.

Pre ispitivanja uzorka ulja potrebno je snimiti spektar ulja koje ne sadrži jedinjenje DBPC. Ovaj spektar se naziva *background* i za ove potrebe se najčešće koristi parafinsko ulje. Prilikom snimanja spektra uzorka ulja za koje želimo da odredimo sadržaj DBPC-a, *background* spektar će automatski biti oduzet.

Nakon snimljenog spektra ispitivanog ulja, potrebno je izmeriti visinu apsorbance na talasnoj dužini $3650 \pm 1,5 \text{ cm}^{-1}$, *Slika 3.2.5*. Množenjem visine apsorbance sa faktorom dobijenog kalibracijom, dobija se maseni procenat inhibitora, DBPC u ulju, %m/m. Rezultat se izdaje kao srednja vrednost najmanje dva merenja, na dve decimale.



Slika 3.2.5 Izgled spektra DBPC-a sniman FTIR spektrometrom

Kalibracija

Kalibraciona prava predstavlja zavisnost visine apsorbance od koncentracije, a formira se snimanjem 5 kalibracionih rastvora u opsegu koncentracija od 0,02% - 0,5% DBPC u ulju. Standardni rastvori se prave rastvaranjem određenih količina DBPC-a odmerenih sa tačnošću 0.0001 g u mineralnom ulju koje ne sadrži DBPC (bazno naftensko ili parafinsko ulje). Primenom Lambert-Beerovog zakona na osnovu koga važi da je apsorbancija infracrvenog zračenja jednaka:

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I} = K \cdot D \cdot C \quad (3.2.13)$$

gde je: A – apsorbanca, I_0 - intenzitet upadnog zraka, I – intenzitet propuštenog zraka, K – ekstinkcioni koeficijent, D – debljina sloja uzorka, mm, C – koncentracija DBPC u uzorku

S obzirom da su i K i D konstante, apsorbanacija praktično zavisi od koncentracije DBPC u uzorku na sledeći način:

$$A = B \cdot C \quad (3.2.14)$$

gde je B u stvari nagib kalibracione prave, dok 1/B predstavlja faktor s kojim se množi visina apsorbanacije kako bi se dobila nepoznata koncentracija DBPC u uzorku.

3.2.7.2. Metoda za određivanje sadržaja inhibitora oksidacije u biljnom ulju

Inhibitori prisutni u biljnom ulju su bili terc-butyl-hidrokinon (TBHQ) i DBPC. Utrošak ovih inhibitora tokom eksperimenta starenja biljnih ulja određivani su tehnikom tečne hromatografije (HPLC) prema metodi IUPAC – AOAC 983.15 [68] modifikovanoj u hemijskoj laboratoriji Elektrotehničkog Instituta Nikola Tesla.

Referentni materijali

terc-butylhidrokinon (TBHQ), p.a.

2,6-di-terc-butyl-parakrezola (DBPC), p.a.

Biljno transformatorsko ulje koje ne sadrži inhibitor oksidacije

Aparatura

Levak za odvajanje zapremine 250 mL

Špric zapremine 10 mL

Meskolben zapremine 2 mL

Meskolben zapremine 50 mL

HPLC Hromatograf sa UV-VIS detektorom, Agilent 1200 series

Reagensi

Acetonitril, HPLC grade

Heksan, HPLC grade

Voda, HPLC grade

Priprema rastvarača za tečno tečnu ekstrakciju

Za ekstrakciju je potrebno da rastvarači koji se koriste budu potpuno čisti, tj. oslobođeni komponenti suprotne polarnosti nego što su oni sami (acetonitril ne sme sadržati nepolarne supstance, a heksan ne sme sadržati polarne). Zbog toga se rastvarači pre upotrebe moraju “oprati” u levkovima za odvajanje i to na sledeći način:

Heksan se u levku za odvajanje pomeša sa 10 vol% acetonitrila, a zatim se rastvarači razdvoje. U istu količinu heksana se zatim doda novih 10 vol% acetonitrila i posle mešanja ponovo razdvoje. Na isti način se pere i acetonitril sa dva puta po 10 vol% heksana.

Tečno tečna ekstrakcija TBHQ i DBPC iz ulja

Odmeriti oko 1 g ulja i rastvoriti u 10 mL heksana, a zatim vršiti ekstrakciju u levku za odvajanje mešanjem tri puta sa po 15 mL acetonitrila. Ekstrakt sakupljati u mernom sudu od 50 mL i na kraju dopuniti do crte sa acetonitriplom. Uzorak zatim profiltrirati u vialu od 2 mL i analizirati HPLC tečnim hromatografom.

Uslovi ispitivanja

Izokratski uslovi, Mobilna faza: 2,5% voda, 97,5 % acetonitril, Protok 1 ml/min

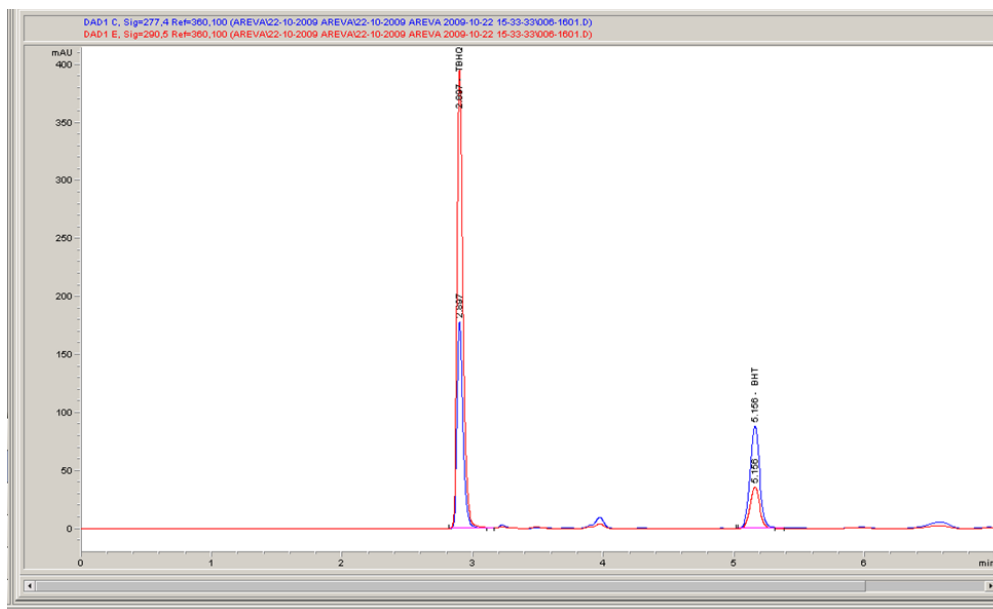
Temperatura kolone: 40 °C

Talasne dužine za UV- VIS detektor:

TBHQ 290 nm

DBPC 277 nm

Na *Slici 3.2.6* prikazana je izgled hromatograma sa jedinjenjima TBHQ i DBPC detektovanim biljnom ulju.



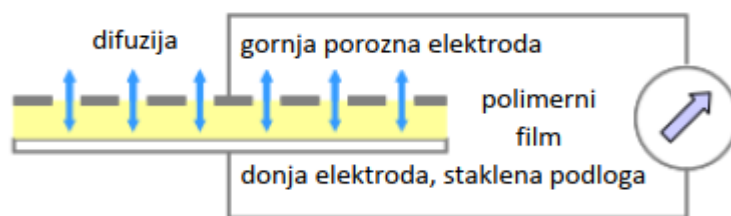
Slika 3.2.6 Izgled hromatogram sa jedinjenjima TBHQ i DBPC (BHT)

Kalibracija

Za određivanje koncentracije TBHQ i DBPC u uzorku ulja, neophodno je formirati kalibracionu krivu pravljenjem standardnih rastvora TBHQ i DBPC u biljnom ulju koje ne sadrži inhibitor oksidacije. Potrebno je napraviti 5 standardnih rastvora sa koncentracijom TBHQ i DBPC u ulju u opsegu od 0,5% do 5%. Kalibraciona prava predstavlja zavisnost površine apsorbance i koncentracije TBHQ, odnosno DBPC u ulju. Na osnovu kalibracione prave, program kasnije sam očitava koncentraciju traženih jedinjenja u uzorku na osnovu površine apsorbance.

3.2.8. Određivanje relativnog sadržaja vode u ulju kapacitivnim senzorom

Relativni sadržaj vode u ulju, odnosno relativni stepen zasićenja ulja vodom (RS) može se izmeriti kapacitivnim senzorima. Ove senzore čine dve elektrode, a između njih se nalazi higroskopni dielektrik, najčešće polimerni materijal (*Slika 3.2.7*). Princip merenja se zasniva na merenju promene kapaciteta dielektrika, budući da se difuzijom vode kroz poroznu elektrodu dolazi do značajne promene permitivnosti, a samim tim i do promene kapaciteta polimernog filma[50]. S obzirom da ostali produkti starenja izolacije imaju značajno manju permitivnost, smatra se da oni ne mogu značajno uticati na ukupni rezultat.



Slika 3.2.7. Prikaz elektroda kapacitivnog senzora sa polimernim filmom između njih [50]

Kapacitivni senzori praktično mere aktivnost vode, a_w , koji predstavlja udeo vode u ulju, raspoložive za difuziju u odnosu na tačku zasićenja, kada dolazi do izdvajanja slobodne vode. Apsolutni sadržaj vode se zatim izračunava iz sledeće jednačine:

$$C_w = a_w \cdot 10 \cdot \left(\frac{A}{t+273,16} \right) + B \quad (3.2.15)$$

gde je: a_w – aktivnost vode ($a_w = \%RS/100$), t – temperatura ulja, °C, A i B – konstante koje zavise od vrste i ostarelosti ulja.

Prednost kapacitivnih senzora ogleda se u tome što ih je njihova instalacija veoma jednostavna i što se može vršiti kontinuirano merenje sadržaja vode u ulju energetskih transformatora tokom njihovog pogona, ili prilikom procesa obrade ulja. Veoma je važno voditi računa o mestu gde se senzori instaliraju, odnosno potrebno je da se senzori nalaze u uljnom toku. Ukoliko se senzor nalazi u ulju koje stagnira, promene RS usled promene temperature kod transformatora u radu neće biti adekvatno zabeležene.

3.2.9. Metoda dielektrične spektroskopije u frekventnom domenu - FDS

Metode električnih ispitivanja transformatora koje se koriste za indirektnu procenu sadržaja vode u papirnoj izolaciji su metode dielektrične spektroskopije u vremenskom (*PDC - Polarization-Depolarization Current* i *RVM - Recovery Voltage Measurement*) odnosno u frekventnom domenu (*FDS*) [70]. Metoda FDS se pokazala kao najpogodnija metoda, a njene prednosti u odnosu na metodu PDC se sastoje pre svega u tome što za obradu rezultata merenja nije neophodno poznavati detaljne konstrukcione podatke o geometriji izolacionog sistema transformatora i permitivnosti ulja. Nedostatak sve tri metode ogleda se

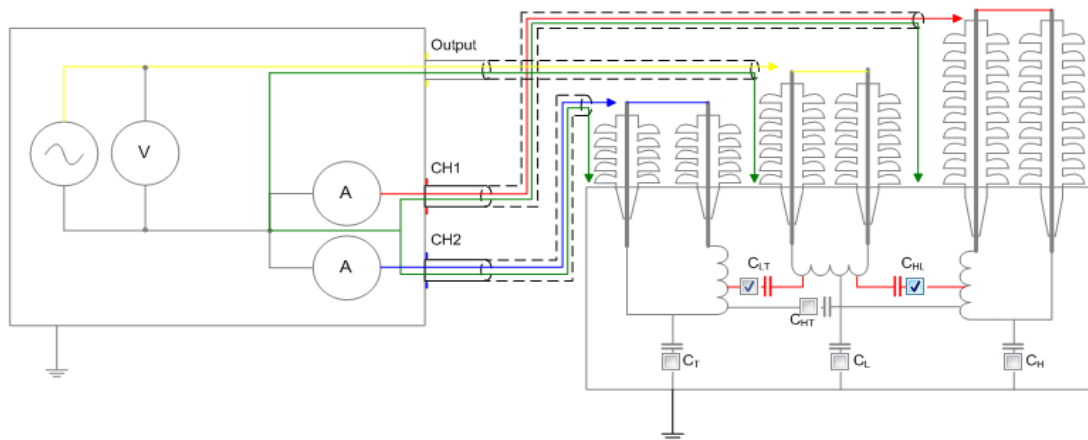
u trajanju ispitivanja i što transformator mora biti isključen tokom ovih merenja. U praksi se može uspešno koristiti i kombinacija metoda FDS/PDC.

Metodom *FDS* vrše se merenja dielektričnih gubitaka i kapaciteta pri učestanosti 50 Hz na frekventnom opsegu najčešće od 1 mHz do 1 kHz, ali se može proširiti i na opseg od 0,1mHz do nekoliko MHz, što predstavlja značajno širi frekventni opseg u odnosu na konvencionalne metode. Efektivna vrednost ispitnog napona iznosi od 5 do 200 V, a najčešće 100-200 V. Ovom metodom se prilikom merenja obuhvata izolacija između pojedinačnih namotaja transformatora jer se tu nalazi najveći maseni udeo papirne izolacije. Kod transformatora sa tri faze sinusoidalni signal se dovodi na priključke SN prolaznih izolatora, a meri se struja odvoda kroz izolaciju prema VN i NN namotaju pri čemu se učestanost menja u širokom opsegu (*Slika 3.2.8*).

Merenjem se dobija karakteristika faktora dielektričnih gubitaka ($\text{tg}\delta$) uljno-papirne izolacije u funkciji od učestanosti, na osnovu koje se kao krajnji rezultat dobija procenjeni sadržaj vlage u čvrstoj izolaciji i vrednost specifične provodnosti ulja transformatora (*Slika 3.2.9*).

Na dielektrični odziv uljno-papirne izolacije ET utiče više faktora, kao što su geometrija uljnih kanala, provodnost i permitivnost ulja, dielektrični odziv čvrste izolacije i temperatura celog izolacionog sistema.

Analiza rezultata zasnovana je na metodi najboljeg poklapanja (fitovanja) izmerene krive dielektričnog odziva realnog ET i krive modelovanog odziva sistema ulje-papir poznatih parametara (maseni udeo, sadržaj vlage, provodnost ulja), tako što postojeći algoritam poredi izmerene podatke sa podacima koje sadrži model i proračunava geometriju izolacije, sadržaj vlage i specifičnu provodnost ulja ET.



Slika 3.2.8 Ispitna šema prilikom ispitivanja ET sa tri namotaja metodom FDS[70]



Slika 3.2.9 Faktor dielektričnih gubitaka izolacije zajedno sa efektom međupovršinske polarizacije (geometrija izolacije) i uticaj određenih polarnih produkata i nečistoća na dielektrične gubitke u različitim opsezima frekvencija prikazan za sadržaj vlage u čvrstoj izolaciji od 1%

3.3. EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

3.3.1. EKSPERIMENT I – Istraživanje fenomena ravnotežne raspodele vode u izolacionom sistemu energetskih transformatora

U okviru Eksperimenta I istraživani su fenomeni distribucije vode u izolacionom sistemu energetskih transformatora sastavljenom od papira, presborda i izolacionog ulja, a sve u cilju unapređenja procene sadržaja vlage u papirnoj izolaciji energetskih transformatora

u pogonu. Kao rezultat istraživanja formirani su dijagrami ravnotežne raspodele vode za sistem Kraft papir-presbord-mineralno izolaciono ulje i Kraft papir-presbord-biljno izolaciono ulje. Formiranje ravnotežnih dijagrama ima veliki značaj kada su u pitanju izolaciona ulja biljnog porekla, budući da za ove, relativno nove izolacione tečnosti, u literaturi još uvek nema dovoljno podataka o distribuciji vode između celulozne izolacije i ulja. Unapređenje metode ogleda se u tome što su ovi dijagrami formirani eksperimentalnim putem, uspostavljanjem ravnoteže u zajedničkom sistemu ulje-papir-presbord u kontrolisanim laboratorijskim uslovima, pri čemu su maseni odnosi celuloze i ulja bili slični kako kod energetskih transformatora, odnosno: 90% ulje i 10 % celuloza. Ravnotežni dijagrami sadržaja vlage u izolacionom sistemu formirane su za konvencionalni Kraft papir i presbord u mineralnom, odnosno u biljnom ulju, za sadržaj vlage u opsegu 0,5 do 5%, i temperature od 40 do 120 °C.

3.3.1.1. Opis Eksperimenta I

Eksperimenti su se odvijali u vijalama zapremine 50 mL koje su bile zatvorene nepropusnim butil septama. Maseni odnosi ulja, papira i presborda u vijalama bili su slični kao kod energetskih transformatora velikih snaga: 90% ulje, 4% papir i 6% presbord. Vijale sa izolacionim materijalima grejane su na temperaturama od: 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 100 °C i 120°C tokom tačno određenog vremenskog perioda, neophodnog za uspostavljanje ravnotežne raspodele vode između ulja, papira i presborda. Nakon postizanja ravnoteže, sadržaj vode u ulju, papiru i presbordu određivan je direktnim merenjima pomoću Karl-Fisher titracije, u skladu sa standardom IEC 60814. Eksperimentalni postupci su ponavljani za pet početnih sadržaja vode u papiru i presbordu: 0.5%, 1%, 2%, 3% i 5%.

3.3.1.2. Priprema materijala za eksperimente

Degazacija i sušenje ulja

Mineralno ulje je sušeno na temperaturi od 70 °C i filtrirano kroz levak od sinterovanog stakla poroznosti 4 -10 µm, na pritisku od oko 1-2mBar , a zatim je tokom 40 min degazirano Toepler vakuum sistemom na pritisku od oko 0.1 – 0.6 mBar.

Biljno ulje je sušeno na temperaturi od 100 °C i filtrirano kroz levak od sinterovanog stakla poroznosti 4 -10 µm, na pritisku od oko 1-2mBar , a zatim je tokom 40 min degazirano Toepler vakuum sistemom na pritisku od oko 0.1 – 0.6 mBar.

Na početku eksperimenta sadržaj vode u mineralnom ulju bio je ispod 5 ppm, a u biljnom ulju ispod 30 ppm, dok je koncentracija kiseonika rastvorenog u ulju bio manji od 10 000 ppm.

Sušenje i impregnacija papira i presborda

U cilju postizanja uniformne raspodele vlage u celuloznim materijalima, naročito kod nižih sadržaja vlage, celulozni materijali su prvo sušeni i impregnisani pod vakuumom, a zatim vlaženi u komori za vlaženje (*Slika 3.3.1*). Papir i presbord su sušeni tokom 96 h na temperaturi od 90 °C i pri dubokom vakuumu (oko 0,1-0,5 kPa). Impregnacija celuloznih materijala vršena je suvim, degaziranim uljem tokom 24h. Impregnacija mineralnim uljem vršena je na temperaturi od 70°C, a biljnim na 90 °C [71][72][73].



Slika 3.3.1 Priprema materijala za eksperiment: levo – sušenje papira i presborda, sredina - impregnacija, desno - vlaženje papira i presborda u vlažnoj komori

Vlaženje papira i presborda

Nakon sušenja i impregnacije, sadržaj vode u papiru i presbordu je bio manji od 0,2%. Početni sadržaji vode u celuloznim materijalima (0,5%, 1%, 2%, 3% i 5%), postignuti su tako što su papir i presbord podvrgnuti odgovarajućim procedurama vlaženja u komori za vlaženje koje su napravljene u skladu podacima iz literature [74][75][76] i dijagramom prikazanom na *Slici 3.3.2*. U cilju bržeg postizanja željenih sadržaja vlage, proces vlaženja materijala vršeno je na blago povišenim temperaturama.

Papir i presbord impregnisani mineralnim uljem

- Uslovi za postizanje sadržaja vlage od 5%: temperatura 40°C, relativna vlažnost (RH) 40-50%. Nešto veća relativna vlažnost bila je neophodna za postizanje zadovoljavajućeg sadržaja vlage u presbordu (50%).
- Uslovi za postizanje sadržaja vlage od 3%: temperatura 50°C, relativna vlažnost (RH) 20-25%. Nešto veća relativna vlažnost bila je neophodna za postizanje zadovoljavajućeg sadržaja vlage u presbordu (25%).
- Uslovi za postizanje sadržaja vlage od 2%: temperatura 85°C, relativna vlažnost (RH) 20%. Nešto veća relativna vlažnost bila je neophodna za postizanje zadovoljavajućeg sadržaja vlage u presbordu (25%).
- Sadržaj vlage od oko 1% (0,7-0,8%) postignut je kombinacijom blagog i kratkotrajnog sušenja na temperaturi od 55°C pod vakuumom od oko 0,6 mBar i impregnacijom na 70°C tokom 24 h u dubokom vakuumu od oko 0,1-0,6 mBar.
- Najniži sadržaj vlage od oko 0,3 % postignut je vlaženjem materijala u veoma blagim uslovima (temperatura od 75°C i relativna vlažnost od oko 5%) pri čemu je sadržaj vlage papiru i presbordu nakon sušenja i impregnacije, a pre vlaženja bio ispod 0,1%.

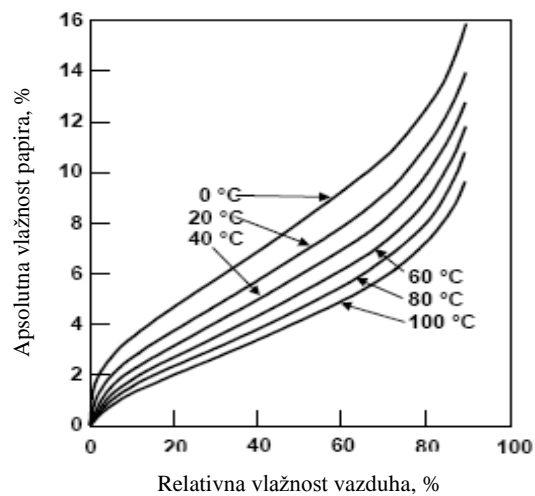
Papir i presbord impregnisani biljnim uljem

- Uslovi za postizanje sadržaja vlage od 5%: temperatura 40°C, relativna vlažnost (RH) 45-50%. Nešto veća relativna vlažnost bila je neophodna za postizanje zadovoljavajućeg sadržaja vlage u presbordu (50%).
- Uslovi za postizanje sadržaja vlage od 3%: temperatura 50°C, relativna vlažnost (RH) 20-25%. Nešto veća relativna vlažnost bila je neophodna za postizanje zadovoljavajućeg sadržaja vlage u presbordu (25%).
- Uslovi za postizanje sadržaja vlage od 2%: temperatura 85°C, relativna vlažnost (RH) 20%.
- Sadržaj vlage od oko 1% (0,7-0,8%) postignut je kombinacijom blagog i kratkotrajnog sušenja na temperaturi od 55 - 60°C pod vakuumom od oko 0,8 mBar i impregnacijom na 90°C tokom 24 h u dubokom vakuumu od oko 0,1-0,6 mBar.

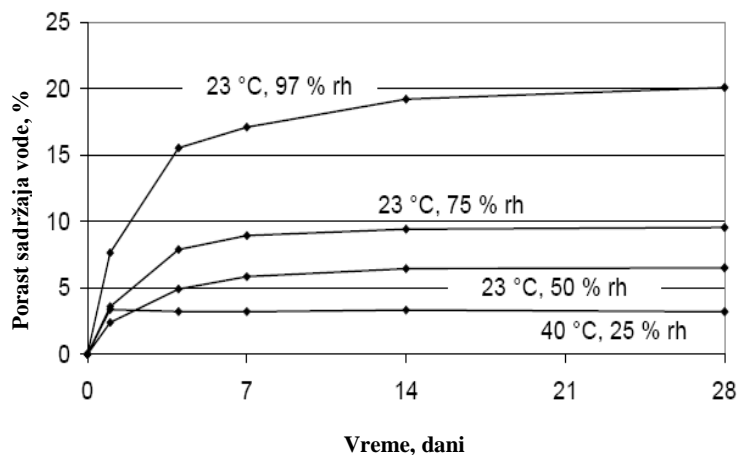
- Najniži sadržaj vlage od oko 0,3 % postignut je vlaženjem materijala u veoma blagim uslovima (temperatura od 75°C i relativna vlažnost od oko 5%) pri čemu je sadržaj vlage papiru i presbordu nakon sušenja i impregnacije, a pre vlaženja bio ispod 0,1%.

Procedure vlaženja trajale su tokom 5-14 dana (u skladu sa dijagramom na *Slici 3.3.3*)[50].

Nakon svake procedure vlaženja/sušenja, papir i presbord bi bili ostavljeni u zatvorenim posudama tokom 3-5 dana kako bi se uravnotežili sa temperaturom ambijenta pre nego što bi bili podvrgnuti kontrolnim merenjima.



Slika 3.3.2. Sadržaj vode u papiru u zavisnosti od relativne vlažnosti vazduha [74]



Slika 3.3.3. Porast sadržaja vlage u presbordu visoke gustine (debljine 3 mm) tokom vremena, u uslovima različite vlažnosti vazduha i na različitim temperaturama [50]

U cilju minimiziranja uticaja atmosferske vlage na materijale, priprema vijala za eksperimente vršeno je u inertnoj atmosferi Argona, engl. "glove box", Slika 3.3.4.



Slika 3.3.4. a) - Priprema materijala u "glove box"-u, b – pripremljene vijale sa izolacionim materijalima, c – uspostavljanje ravnotežne vlage u vijalama na određenoj temperaturi u pećnici

Pripremljene vijale s materijalima su grejane na temperature 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 100°C i 120°C tokom vremenskih intervala neophodnih za uspostavljanje ravnotežnih sadržaja vode u ulju, papiru i presbordu. Vremenski intervali potrebni za uspostavljanje ravnotežne raspodele vode na datim temperaturama, za različite početne sadržaje vlage u materijalima, izabrani su u skladu sa literaturnim podacima, za odgovarajući tip i debljinu materijala [50][75][76][77][78]. Potvrda da je na određenoj temperaturi i za određen početni sadržaj vode u celuloznim materijalima, došlo do uspostavljanja ravnotežnih sadržaja vode u ulju, papiru i presbordu, bilo je to što su se tri uzastopna merenja vode u sva tri materijala složila. Pri ravnotežnim uslovima, izmereni sadržaji vode u ulju nakon kratkih vremenskih

intervala nalazili su se u okviru ponovljivosti koja je propisana standardom IEC 60814, dok su se sadržaji vode u papiru i presbordu nalazili u okviru meren nesigurnosti koja je izračunata za ovu metodu u okviru hemijske laboratorije Elektrotehničkog Nikola Tesla. Merna nesigurnost je korišćena u slučaju celuloznih materijala, jer ovaj deo standarda nema definisanu ponovljivost rezultata merenja, a iznosila je 15%.

3.3.1.3. Vremena uravnotežavanja

Difuzija vode između materijala koji se nalaze u kontaktu se odvija sve dok se ne uspostavi ravnoteža na datoj temperaturi odnosno dok se ne izjednače relativni sadržaji vode u svim materijalima [79]. U uslovima kada je konstantna temperatura sistema u kom prenos mase (odnosno difuzija vode) zavise samo od koordinata u sistemu, površine i debljine materijala, difuzija je definisana prvim Fikovim zakonom:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3.3.1)$$

gde je,

J – fluks prenosa mase normalno na površinu materijala, x – pravac prenosa mase, D – koeficijent difuzije, c – koncentracija vode u materijalu, $\partial c / \partial x$ – gradijent koncentracije u posmatranom pravcu prenosa mase

Vreme potrebno da se izvrši prenos mase kroz papir i presbord proporcionalno je temperaturi i određeno je koeficijentom difuzije celuloznih materijala - D_{AB} .

U sistemu gde je papir impregnisan uljem i postoje temperaturne varijacije tokom vremena, potrebno je da se primeni jednačina za nestacionarni prenos mase (odnosno drugi Fikov zakon) i to za difuziju koja se odvija sa obe strane [75][80]:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = -D \frac{\partial c^2}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial D}{\partial c} \right) \cdot \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right)^2 \quad (3.3.2)$$

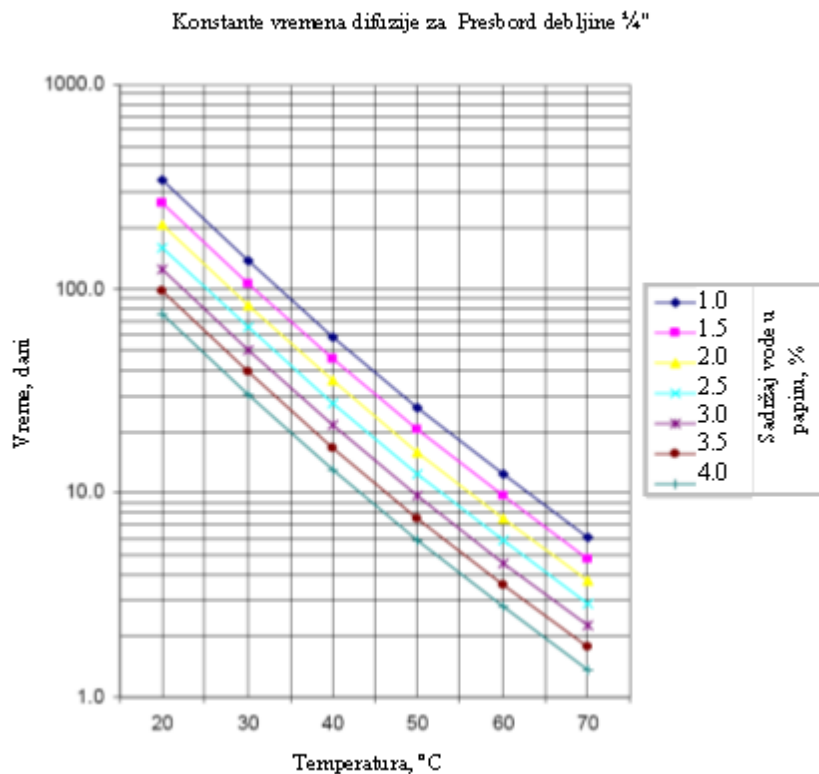
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial c^2}{\partial x^2} \quad (3.3.3)$$

Koeficijent difuzije vode kroz papir odnosno presbord, D_{AB} zavisi od temperature, parcijalnog pritiska vode i prirode materijala (hemijski sastav ulja, kinematička viskoznost, gustine papira i presborda, poroznosti i debljine celuloznih materijala).

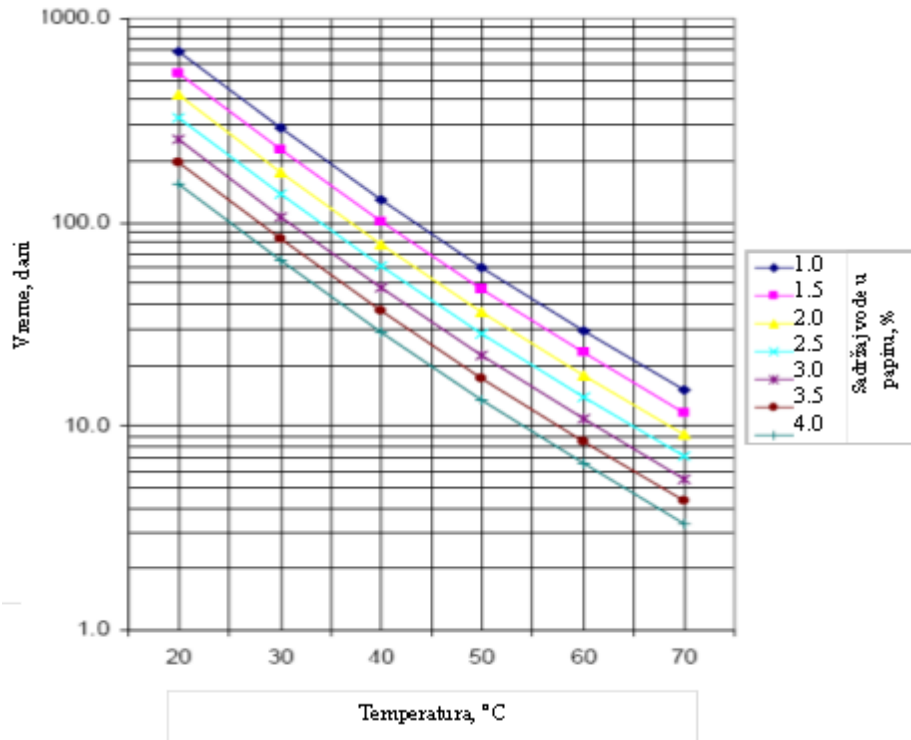
$$D_{AB} = f(T, P) \quad (3.3.4)$$

gde je, T - temperatura, P - pritisak

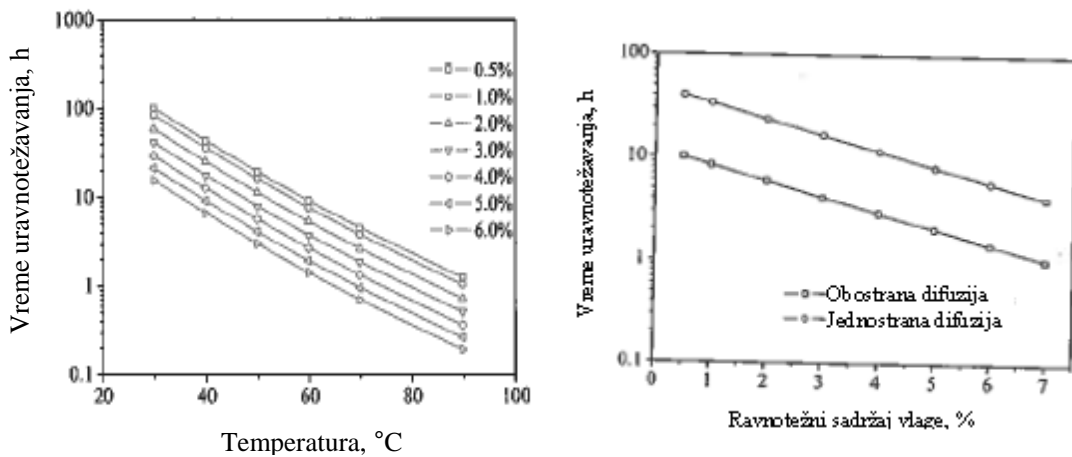
Da bi se odredili vremenski intervali neophodni za postizanje ravnotežnih sadržaja vode vode u papiru, presbordu i ulju, razmatrane su vremenske konstante difuzije vode kroz papir i presbord koje su dali autori Foss, Guidi-Fullerton i L.J. Zhou, a prikazani su na Slikama 3.3.5 – 3.3.7 [75][77][78][81].



Slika 3.3.5. Vremenske konstante difuzije za presbord debljine 6.35 mm, Foss [82]



Slika 3.3.6. Vremenske konstante difuzije za presbord debljine 6.35 mm, Guidi/Fullerton [83]



Slika 3.3.7. Vremenske konstante uravnotežavanja za papir debljine 1 mm, levo – na različitim temperaturama i za različite sadržaje vode u papiru, desno – za difuziju sa jedne strane i difuziju sa obe strane, L.J.Zhou [77]

Vremenske konstante date u literaturi su poredene korišćenjem sledeće jednačine koja daje zavisnost vremenske konstante difuzije (3.3.5) [4][77]:

$$t = B(T, C, S) \times \delta^2 \quad (3.3.5)$$

gde je: t – vremenska konstanta, odnosno vreme potrebno za odvijanje difuzije, B – funkcija koja zavisi od: C - koncentracija vode u sistemu papir-ulje, T – temperatura, S – parametar koji zavisi od toga da li se difuzija odvija samo sa jedne ili sa obe strane materijala. S obzirom da su u ovom slučaju parametri C , T i S bili konstantni, brzina difuzije je zavisila samo od debljine papira, odnosno presborda, na sledeći način:

$$t = K \times \delta^2 \quad (3.3.6)$$

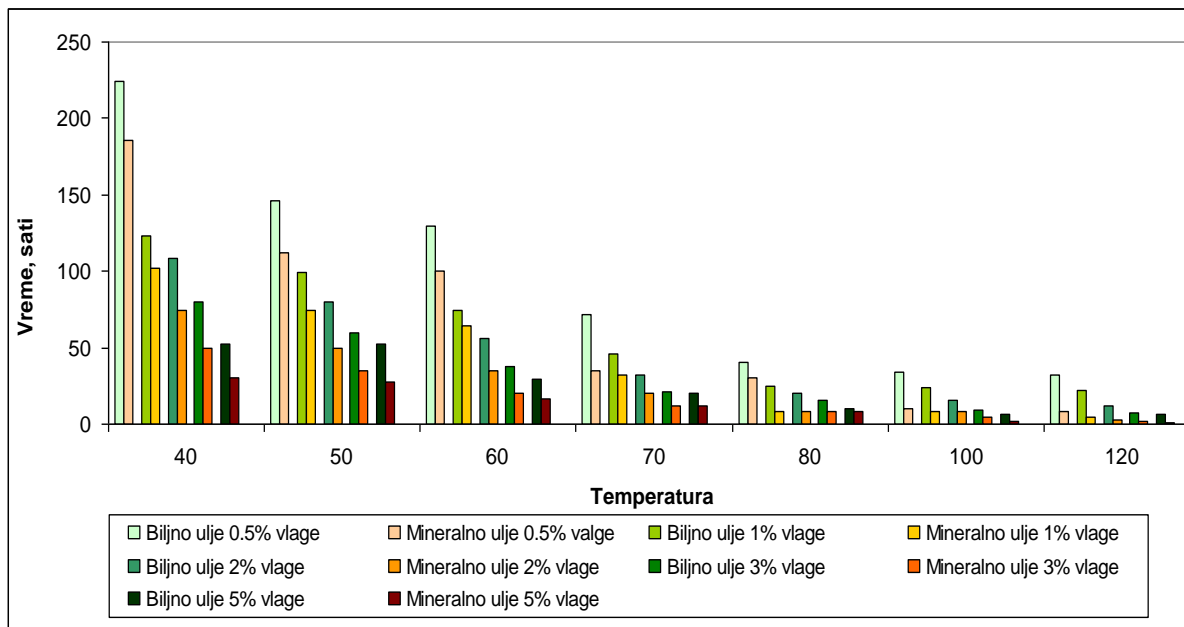
pri čemu je K – vremenska konstanta uspostavljanja ravnotežne raspodele vode u sistemu.

Vremenske konstante različitih autora, svedene na istu debljinu celuloznih materijala, imale su slične vrednosti.

U sistemu ulje-papir-presbord, brzinu difuzije je usled svoje debljine, u najvećoj meri ograničavao presbord (debljina presborda je bila 1 mm, a papira 0,25 mm), pa su kao teoretska vremena uravnotežavanja za sistem sa mineralnim uljem uzete vremenske konstante za obostranu difuziju i debljinu presborda 1 mm autora L.J.Zhou [77].

Imajući u vidu značajne razlike u fizičkim i hemijskim karakteristikama mineralnog i biljnog ulja, odlučeno je da se vremenske konstante difuzije za materijale u biljnom ulju malo povećaju u odnosu na izračunate vremenske konstante za mineralno ulje. S obzirom da je viskoznost biljnog ulja tri puta veća od mineralnog, odlučeno je da se vremenske konstante za sisteme sa biljnim uljem izračunaju množenjem vremenskih konstanti za mineralno ulje sa faktorom 1.33. Na *Slici 3.3.8* prikazana su vremenski intervali potrebni za uravnotežavanje sistema sa mineralnim i biljnim uljem za date temperature i početne sadržaje vode u celuloznim materijalima.

Izračunati vremenski intervali su malo produženi kako bi se potvrdilo da je ravnoteža zaista uspostavljena. Sadržaj vode u materijalima meren je u određenim inkrementima tokom uspostavljanja ravnoteže. Ukoliko bi se tri poslednja merenja sadržaja vode u ulju, papiru i presbordu nalazila u okviru ponovljivosti, odnosno merne nesigurnosti metode, smatrano je da je postignuta ravnotežna raspodela vode u sistemu.



Slika 3.3.8 Vremenski intervali potrebni za uspostavljanje ravnotežnih sadržaja vode u sistemu ulje-papir-presbord na različitim temperaturama za mineralno i biljno ulje

3.3.2. EKSPERIMENT II – Simulacija ubrzanog starenja izolacionog sistema energetskih transformatora u laboratorijskim uslovima sa mineralnim odnosno biljnim uljem

U cilju utvrđivanja podobnosti biljnih ulja za upotrebu u energetskim transformatorima kao izolacionih fluida, u laboratorijskim uslovima je vršena simulacija starenja izolacionih materijala energetskih transformatora. Radi poređenja performansi mineralnih ulja i biljnog ulja, napravljena je postavka eksperimenta sa oznakom „I exp“ u okviru kog je vršeno ubrzano starenje samo izolaciono ulje u prisustvu bakra kao katalizatora degradacije ulja. U cilju poređenja kinetike starenja Kraft papira u prisustvu mineralnih ulja odnosno biljnog ulja, napravljena je postavka eksperimenta sa oznakom „II exp“ u okviru koje su starena izolaciona ulja zajedno sa Kraft papirom i presbodom u prisustvu bakra kao katalizatora. Eksperiment je predstavljao simulaciju starenja izolacionih materijala u zaptivenim konstrukcijama gde je prisustvo kiseonika veoma ograničeno (sadržaj kiseonika na početku eksperimenta je bio manji od 10 000 mg/kg). Temperatura starenja je bila 140 °C, izabrana tako da se osigura da će celulozni materijali dostići kraj životnog veka (DP vrednost papira manja od 200), a s druge strane da eksperiment ne traje previše dugo. Vršeno je uporedno

starenje jednog neinhibiranog mineralnog ulja, jednog inhibiranog mineralnog ulja i jednog biljnog ulja.

3.3.2.1. Opis Eksperimenta II

U okviru Eksperimenta II vršena je simulacija ubrzanog starenja izolacionih materijala koji se nalaze u ET velike snage. Eksperiment II je organizovan u dva različita seta: „I exp“ u okviru koga je stareno izolaciono ulje u prisustvu bakra i „II exp“ u okviru koga je stareno izolaciono ulje i celulozni materijali (papir i presbord) u prisustvu bakra. Materijali su stareni u vijalama zapremine 50 mL koje su krimpovane septama na bazi silikona u cilju obezbeđenja uslova sa ograničenim dotokom kiseonika. Početni sadržaj kiseonika bio je manji od 10 000 mg/kg. Temperatura starenja je bila 140°C, a ukupna dužina trajanja eksperimenta je bila 120 dana. Stareno je jedno neinhibirano mineralno ulje označeno kao STMin, jedno inhibirano visokokvalitetno mineralno ulje označeno kao VKMin i jedno biljno ulje.

Neposredno pre početka ubrzanog starenja i nakon svake periode starenja vršene su sledeća ispitivanja izolacionih ulja, odnosno papira i presborda:

- Određivanje sadržaja gasova rastvorenih u ulju u skladu sa IEC 60567
- Određivanje sadržaja vode u ulju i celuloznim materijalima u skladu sa IEC 60814
- Određivanje sadržaj derivata furana u izolacionom ulju u skladu sa IEC 61198
- Određivanje stepen polimerizacije papira i presborda u skladu sa IEC 60450
- Određivanje viskoznosti na temperaturi od 40°C u skladu sa ISO 3104
- Određivanje tačke stinjanja izolacionih ulja u skladu sa ISO 3016,
- Određivanje neutralizacionog broja (sadržaja kiselina u ulju) u skladu sa IEC 62021
- Određivanje koncentracije prisutnog inhibitora 2,6-di-terc-butil-p-krezola (DBPC) u mineralnom ulju u skladu sa IEC 60666,
- Određivanje koncentracije prisutnog inhibitora DBPC i terc-butilhidrokinon (TBHQ) u biljnom ulju u skladu sa modifikovanom metodom IUPAC – AOAC 983.15,

- Određivanje faktora dielektričnih gubitaka ulja u skladu sa metodom IEC 60247

Eksperimentalni uslovi i priprema materijala

Celulozni materijali su sušeni u dubokom vakuumu na temperaturi od 60°C tokom 24 sata, a zatim impregnirani osušenim i degaziranim uljem na temperaturi od 90°C, pri dubokom vakuumu, tokom 48 sati. Sadržaj vode u mineralnim uljima pripremljenim za impregnaciju je bio oko 5 ppm, a 25 ppm u biljnom ulju. Početni sadržaj vode u kraft papiru i presbordu bio je oko 0,5%. Svi materijali u vijalama su se nalazili u masenom odnosu i odnosu površina koji odgovaraju stvarnom dizajnu ET velikih snaga: maseni odnos papir - ulje: 4%, maseni odnos presbord - ulje: 6% i maseni odnos bakar - ulje: 30%. Za svako ulje su vijale grejane u pećima na temperaturi od 140 °C tokom različitih perioda: 10, 20, 40, 60, 100 i 120 dana. Za svaku periodu starene su po dve vijale: jedna u kojoj je stareno samo ulje ("I exp ") i druga u kojoj je ulje stareno u prisustvu papira, presborda i bakra ("II exp ").

3.3.3. EKSPERIMENT III – Simulacija ubrzane degradacije izolacionog sistema dva eksperimentalna energetska transformatora punjena mineralnim uljem i odgovarajućih laboratorijskih modela

U okviru ovog dela istraživanja vršen je ogled ubrzanog starenja dva identična eksperimentalna energetska transformatora, sa različitim početnim sadržajem vlage u čvrstoj izolaciji. Uporedo sa starenjem eksperimentalnih ET, vršeno je starenje odgovarajućih laboratorijskih modela koji su predstavljali simulaciju starenja izolacionog sistema eksperimentalnih transformatora u laboratorijskim uslovima. Tokom ubrzanog starenja temperatura najtoplije tačke eksperimentalnih ET je održavana na temperaturi od oko 105 °C, dok se starenje laboratorijskih modela odigravalo u peći na konstantnoj temperaturi od 105 °C. Nakon 460 dana pogona, transformatori su dostigli kraj životnog veka sa aspekta ostarelosti papirne izolacije. Laboratorijski eksperimenti trajali su 300 dana, pri čemu je papirna izolacija takođe dostigla vrednosti DP oko 200.

Cilj istraživanja bio je istraživanje fenomena neuniformne raspodele temperature i vlage u realnim sistemima, u odnosu na homogene uslove u laboratoriji. Krajnji cilj ovih istraživanja bio je unapređenje dijagnostike stanja, kao i procene raspoloživosti i pogonske

spremnosti energetskih transformatora na osnovu hemijskih ispitivanja ulja, uz unapređenje procene potrošenog i preostalog životnog veka ET.

3.3.3.1. Konstrukcija eksperimentalnih energetskih transformatora

Prilikom definisanja konstrukcije transformatora za navedena istraživanja, bilo je potrebno da se ispoštuju sledeći zahtevi [84]:

1. Konstrukcija aktivnog dela ET trebalo je da bude što bliže konstrukciji ET srednjih i većih snaga i napona, što podrazumeva da namotaji budu izrađeni od papirom izolovanog bakarnog provodnika, dok izolacija između namotaja treba da obuhvata sistem barijera, odstojnika i ujinih kanala sa relativnim zapreminskim odnosom čvrsta izolacija/ulje reda 15-25 %.
2. Eksperimentalni transformatori su morali da budu ugrađeni u raspoloživ prostor u jednom elektroenergetskom postrojenju naponskog nivoa 6,6/0,4 kV. Mogućnost odvođenja toplote jednake snazi gubitaka u transformatorima u raspoloživom prostoru su predstavljali posebno ograničenje: uslovi hlađenja su ograničili snagu transformatora na par stotina kVA. Naznačena snaga i naponi ET, kao i njihove dimenzije su morale da budu u skladu sa mestom ugradnje,
3. Bilo je potrebno omogućiti i relativno lako uzorkovanje papira sa namotaja radi periodičnog merenja DP papira.
4. Visina namotaja je trebalo da bude što je moguće veća (preko 700mm), kako bi se postigao značajan temperaturni gradijent namotaja po visini (temperatura izolacije je rasla po visini namotaja, što je omogućilo istraživanje uticaja temperature na starenje izolacije)
5. Unutar suda eksperimentalnih transformatora, bilo je potrebno ugraditi senzore za praćenje temperature namotaja, kao i senzore za praćenje sadržaja vlage u ulju, ali i povezati ove senzore na merne instrumente.
6. Kao kriterijum se javlja i cena eksperimentalnih transformatora, što je praktično u skladu sa zahtevom da se snaga ograniči zbog uslova smeštanja u raspoloživi prostor i hlađenja transformatora u njemu.

Energetski transformatori koji su bili dostupni na tržištu, a koji bi prema snazi i dimenzijama odgovarali za ugradnju u TENT-B, imaju takav izolacioni sistem gde je relativni odnos *čvrsta izolacija/ulje* značajno manji i bakarni provodnici namotaja su izolovani lakom, a ne papirom. Osim toga, transformatorski sud komercijalnih ET je integrisan sa rashladnim sistemom u jednu celinu i ne postoje revizioni otvori, koji bi mogli poslužiti da uzorkovanje papirne izolacije.

Glavne karakteristike dva eksperimentalna ET su [84]:

1. Naznačena snaga $S_n=300\text{kVA}$, naznačeni napon $U_p/ U_s=6,7-6,8/0,39\text{kV}$, sprega ZNyn0, napon kratkog spoja $uk=6\%$.
2. Naznačena snaga ET od 300kVA je odabrana tako da se balansirane termičke karakteristike, mogu ostvariti odabirom rashladnog sistema (radijatora) i kanala za strujanje ulja kroz namotaje, polazeći od komercijalno dostupnog minimalnog preseka papirom izolovanog Cu provodnika (8mm x 1mm).
3. VN namotaj je „rušenog“ tipa sa pojačanom uljnom izolacijom (radijalni kanali između kolutova) radi mogućnosti periodičnog uzorkovanja papira sa poslednjih kolutova
4. NN namotaj „spiralnog“ ili „kolutnog“ tipa, pri čemu su kanali za strujanje ulja kroz namotaj definisani tako da se teži da temperatura najtoplije tačke NN i VN bude slična, kako bi se postigli slični hemijski procesi degradacije izolacije u oba namotaja.
5. Namotaji su bili tako konstruisani da porast temperature po visini namotaja, odnosno raspodela DP vrednosti bude što sličnija realnim ET.
6. Svaka od dve duže stranice ET se može skinuti, radi mogućnosti uzorkovanja papira sa VN namotaja duž celog obima i visine namotaja.
7. S obzirom da ambijentalne temperature tokom godine, na ovim prostorima, dosta osciluju, u tri od pet radijatora rashladnog sistema su postavljeni ventili koji su omogućavali uključenje /isključenje radijatora i na taj način promenu temperature ulja i posredno namotaja. Na ovaj način je, bilo moguće održavati temperaturu najtoplije tačke na određenoj vrednosti tokom cele godine. Pored ovog mehanizma, za

održavanje temperature najtoplije tačke korišćen je i mehanizam regulacije struje menjanjem pozicije sklopke na VN namotaju.

8. Inicijalni koncept da se postojeći suvi ET u elektroenergetskom postrojenju sa relativno kontinualnim teretom tokom godine isključe, odnosno zamene eksperimentalnim ET, je napušten, jer je opterećenje bilo premalo za minimalnu naznačenu snagu oglednog ET koju je bilo moguće realizovati (300kVA). Zbog toga je osmišljen specijalni način da se dva ogledna ET opterete i strujno i naponski sa naznačenim opterećenjem. Razvijen je postupak neregularnog paralelnog rada, gde se putem male razlike u sprežnom broju navedenih ET postiže struja izjednačenja jednaka naznačenoj vrednosti.

Materijali korišćeni prilikom izrade eksperimentalnih ET

- Ukupna masa ulja: 350 kg
- Ukupna masa Kraft papira: oko 7,7 kg
- Ukupna masa presborda: oko 10,8 kg
- Ukupna masa prešpana: oko 10,8 kg
- Maseni odnos (papir+prešpan) prema masi ulja: 9,8%
- Ukupna masa celuloznih materijala (papir + presbord + prešpan): 27,60 kg
- Maseni odnos celuloznih materijala (papir+presbord+prešpan) prema masi ulja: 10.6%
- Nosači od parene bukve: $16 \times 0,210 \text{ kg} = 3,36 \text{ kg}$
- Stranice od parene bukve 4 kom: $800 \times 60 \times 150 \text{ mm} = 20,3 \text{ kg}$
- Ukupna masa celuloze zajedno sa drvenim stranicama: 56 kg
- Sistem vazdušnog disanja (oko 1,5-2% kiseonika u ulju)
- Površina bakra: $4,644 \text{ m}^2$
- Magnetno kolo- površina: $1,84 \text{ m}^2$
- Однос површине магнетног кола према маси уља: $70,5 \text{ cm}^2/\text{kg}$



Slika 3.3.9 Fotografije eksperimentalnih energetskih transformatora

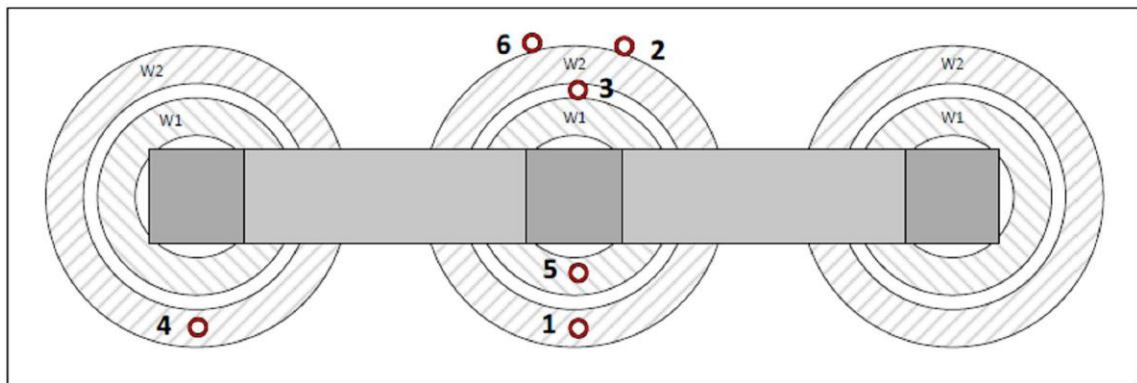
Senzori za kontinuirano praćenje transformatora

U cilju praćenja rada transformatora, odnosno temperature i sadržaja vlage, kao parametara koji u značajnoj meri utiču na brzinu degradacije izolacionog sistema ugrađeni su odgovarajući senzori za kontinualno praćenje ovih veličina.

U svaki od transformatora ugrađeno je po šest fiber-optičkih senzora, a njihove lokacije su prikazane na *Slici 3.3.10*. Tačne lokacije za postavljanje senzora su određene na osnovu rezultata termičkih proračuna [85] baziranih na termohidrauličkom modelu [86] čiji su rezultatu prikazani na *Slici 3.3.11*, kao i sagledavanjem mogućnosti praktične realizacije, tokom izrade u fabrici. Tri senzora su postavljena na mesta gde su očekivane najtoplije tačke

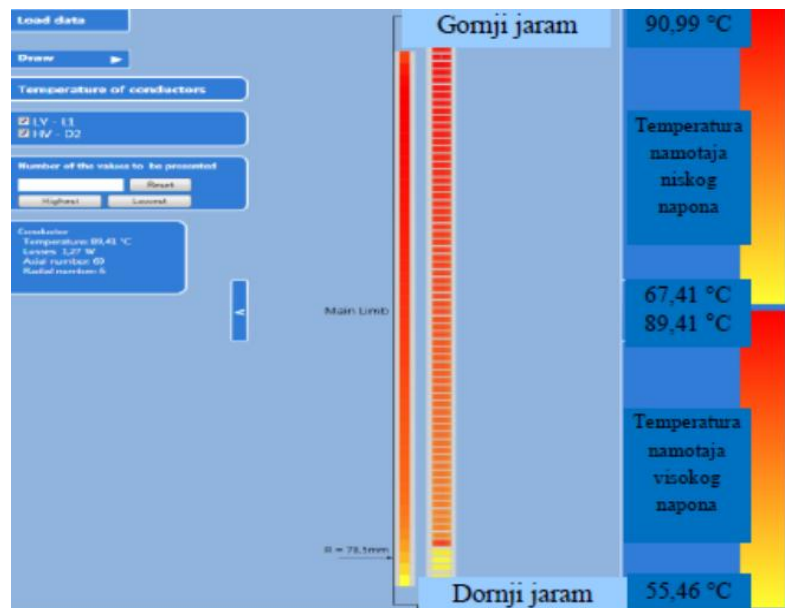
namotaja - VN srednje faze (1), VN jedne krajnje faze (4) i NN srednje faze (5). Senzori 2 i 6 su postavljeni na površini namotaja VN pri vrhu i pri dnu kako bi se pratile temperature namotaja u zoni uzorkovanja papira. Senzor 3 je postavljen tako da meri temperaturu ulja u kanalu između VN i NN namotaja srednje faze.

Temperature senzora 1, 2, 3 i 6 su tokom celog perioda starenja ET praćene kontinualno sa periodom merenja na 15 min, a podaci sa senzora 4 i 5 su očitavani periodično.



Slika 3.3.10 - Šematski prikaz mesta ugradnje fiber-optičkih temperaturnih senzora

Za merenje temperatura pomoću fiber-optičkih i PT00 senzora, kao i za merenje vlage korišćeni su komercijalni merni instrumenti sa mogućnošću memorisanja vrednosti i očitavanja sa računara.



Slika 3.3.11. Rezultati termičkog proračuna raspodele temperature po visini namotaja

Radne temperatura ET

- Temperatura namotaja oko 105 °C (realne vrednosti za date režime rada hts 90 – 129 °C za ET sa visokim sadržajem vlage); Početni sadržaj vlage u papiru i presbordu oko 4%,
- Temperatura namotaja oko 105 °C (realne vrednosti za date režime rada hts 95- 115 °C za ET sa niskim sadržajem vlage); Početni sadržaj vlage u papiru i presbordu oko 1%,

3.3.3.2. Definisanje laboratorijskih modela prema realnom model transformatoru

Uporedo sa ubrzanim starenjem eksperimentalnih transformatora, vršeno je i starenje laboratorijskih modela koji su predstavljali laboratorijsku simulaciju starenja izolacionog sistema eksperimentalnih transformatora.

Starenje se odvijalo u erlenmajerima zapremine 500 mL sa šlifovanim zaptivačima, pri čemu se iznad ulja nalazio prostor ispunjen vazduhom u cilju simulacije konstrukcije eksperimentalnih ET sa konzervatorom (tzv. vazdušno disanje).

U laboratorijskim modelima su korišćeni materijali u istim masenim odnosima kao i prilikom izrade eksperimentalnih ET, i to: Novo nekorišćeno inhibirano naftensko mineralno izolaciono ulje, Bakarni provodnici obmotani Kraft papirom, Presbord, Prešpan, Barijera, Gvožđe (jezgro).

Početni sadržaj vlage u celuloznoj izolaciji u jednom modelu je bio oko 1%, a u drugom oko 4%

Laboratorijski modeli su podvrgnuti ubrzanom starenju u peći na temperaturi od 105 °C. S obzirom da je hot spot temperatura eksperimentalnih transformatora, praćena fiberoptičkim senzorima, tokom starenja oscilovala, temperatura od 105 °C je odabrana kao srednja vrednost svih hot-spot temperatura tokom starenja.

Priprema materijala za eksperiment

Papir, presbord i prešpan su sušeni na temperaturi od 60 °C pod vakuumom (<0,1 kPa) tokom 48 sati, a zatim su impregnisani osušenim i degaziranim uljem tokom 24 sata na 90 °C, takođe pod vakuumom. Nakon sušenja i impregnacije, sadržaj vlage u celuloznim materijalima je

bio ispod 0,2 %. Sadržaj vlage u celuloznim materijalima od 1% i 4% postignut je na način kao i u Eksperimentu I (poglavlje 3.3.1)

3.3.3.3. Opis eksperimenta III

Eksperimenti ubrzanog starenja u laboratorijskim uslovima vršeni su u erlenmajerima. Ulje, bakar, papir, presbord i gvožđe su smeštani u erlenmajere u definisanim masenim udelima i sa odnosom površina materijala u skladu sa konstrukcijom realnih model transformatora. Erlenmajeri su tokom eksperimenta grejani na definisanoj temperaturi od 105 °C u peći. Svaki erlenmajer je podvrgnut testu veštačkog starenja u definisanoj vremenskoj periodi, pri čemu su svi celulozni materijali u jednom testu imali visok sadržaj vlage (oko 4%), a u drugom testu nizak sadržaj vlage (oko 1%).

Nakon obavljenih određenih pripremnih ispitivanja utvrđeno je da je tokom starenja modela dolazilo do prekomernog isušivanja materijala, naročito kod modela sa većim sadržajem vlage, kao i do utroška kiseonika na starenje ulja. S obzirom da su erlenmajeri bili zatvoreni šlifovanim rastvaračima, nije bilo moguće da se kiseonik nadoknadi rastvaranjem iz atmosfere, kao što je to slučaj kod transformatora sa vazдушnim disanjem. Zaključeno da je laboratorijske modele potrebno ovazdušavati jednom nedeljno barbotiranjem kiseonika/vazduha u ulje, dok je kod modela sa većim sadržajem vlage neophodno i vlaženje celuloznih materijala na svake dve nedelje.

Preliminarne periode testa ubrzanog starenja realnih model transformatora izračunate su na osnovu Montsigner – ovog pravila koje glasi da se brzina temperaturno zavisnih reakcija povećava duplo pri porastu temperature od 6 K (6 °C) [7]. U cilju dobijanja potrebnih tačaka za formiranje krive degradacije papirne izolacije i dostizanja kraja životnog veka papirne izolacije ($DP \leq 200$) izabrane su sledeće periode:

- Početno, 120 dana, 240 dana, 360 dana, 480 dana, 600 dana, 720 meseci

Nakon svake periode starenja, pomoću izmerenih vrednosti stepena polimerizacije papira, računate su vrednosti predeksponencijalnog faktora A iz Arrheniuss-ovog modela (jednačina 1.4.1) za dati interval starenja, na osnovu čega je dalje računato potrebno vreme

za dobijanje naredne željene DP vrednosti za formiranje krive, i u skladu s tim je vršena korekcija dužine trajanja narednog intervali starenja.

Realne periode za eksperimentalne ET su bile:

- 130, 180, 280, 400 i 460 dana.

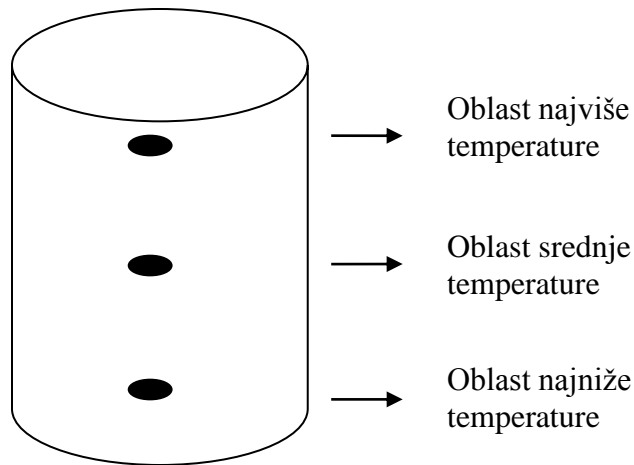
Za eksperimentalni trafo sa vlagom od 4% sva električna i hemijska ispitivanja su vršena i nakon periode od 60 dana, jer se u tom trenutku desio proboj na međuzavojnoj izolaciji namotaja faze A. Ovaj kvar je popravljen pri čemu je izvršeno premotavanje donjeg dela VN namotaja faze A i omogućen je nesmetan dalji rad transformatora.

Periode, odnosno vremenski intervali starenja za laboratorijske modele određeni su računanjem prema Arrheniuss-ovom zakonu (jednačina 1.4.3) potrebnog vremena za dostizanje kraja životnog veka ($DP \leq 200$). Vrednosti za predeksponencijalni faktor A su određene poređenjem vrednosti datih u literaturi [88] i vrednosti izračunatih za eksperimentalne model transformatore, s obzirom da su eksperimentalni transformatori počeli sa radom oko godinu dana pre nego što se započelo sa laboratorijskim eksperimentima.

Periode starenja za laboratorijski model sa sadržajem vlage od 1% u celuloznoj izolaciji su bile: 25, 60, 130, 180, 300 i 400 dana,

Periode starenja za laboratorijski model sa sadržajem vlage od 4% u celulozi su bile: 11, 25, 40, 60, 130, 180 i 300 dana.

Mesta za uzorkovanje papirne izolacije su određena na osnovu raspodele temperatura namotaja visokog napona prikazane na *Slici 3.3.10*. Izabrane su lokacije sa najvišom i najnižom temperaturom namotaja, kao mesta sa srednjom temperaturom u datom temperaturnom opsegu, *Slika 3.3.12*.



Slika 3.3.12 Lokacije sa kojih su uzimani uzorci papirne izolacije VN namotaja eksperimentalnih transformatora

Hemijske metode ispitivanja izolacionog ulja i papira i električne metode ispitivanja ET

Da bi se uspostavile korelacije među ispitivanjima i analizirao uticaj temperature, sadržaja vode, polarnih i kiselih produkata starenja ulja na starenje čvrste izolacije, na svim modelima ispitivani su sledeći parametri tokom eksperimenta starenja:

- Određivanje sadržaja gasova rastvorenih u ulju prema metodi IEC 60567 – opisano u poglavlju 3.2.2,
- Određivanje sadržaja derivata furana rastvorenih u ulju IEC 61198 – opisano u poglavlju 3.2.3,
- Određivanje apsolutnog sadržaja vode u ulju, papiru i presbordru Karl Fischer titracijom prema IEC 60814 - opisano u poglavlju 3.2.1,
- Određivanje relativnog sadržaja vode u ulju kapacitivnim senzorom – opisano u poglavlju 3.2.8,
- Sadržaj kiselina u ulju (neutralizacioni broj) prema metodi IEC 62021 – opisano u poglavlju 3.2.6,
- Određivanje stepena polimerizacije papira u skladu sa IEC 60450 – opisano u poglavlju 3.2.4.

Pored gore navedenih hemijskih ispitivanja ulja i papira, kod eksperimentalnih ET vršena je i:

- Procena sadržaja vlage u papirnoj izolaciji na osnovu izmerenog sadržaja vode u ulju i ravnotežnih dijagrama
- Procena sadržaja vlage u IS metodom dielektrične spektroskopije u frekventnom domenu FDS

Što se tiče kontinualnog praćenja rada eksperimentalnih ET, vršeno je praćenje sledećih veličina:

1. Temperature namotaja pomoću instalisanih fiber optičkih senzora,
2. Relativni sadržaj vode u ulju (RS, %). Kapacitivni senzor je bio instaliran na 1/3 visine namotaja sa niskonaponske strane,
3. Napon na VN strani i struja na NN i VN stranama.

U okviru ove disertacije prikazani su rezultati hemijskih ispitivanja od interesa za temu disertacije, kao i rezultati FDS električnih ispitivanja ET.

4. REZULTATI I DISKUSIJA

4.1. REZULTATI EKSPERIMENTA I - Istraživanje fenomena ravnotežne raspodele vode u izolacionom sistemu energetskih transformatora

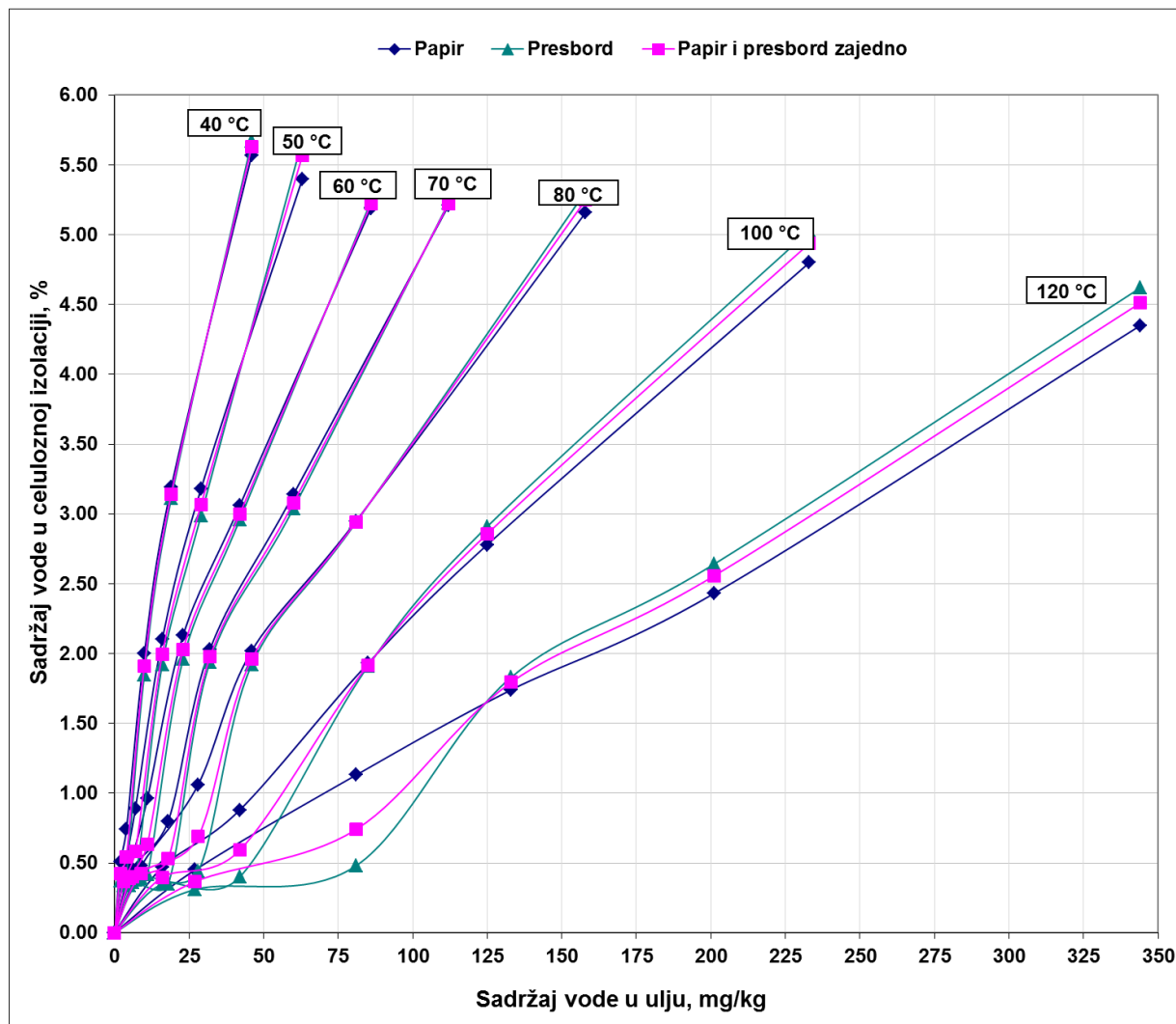
Obradom rezultata dobijenih u okviru eksperimenta opisanog u poglavlju 3.1 formirani su dijagrami ravnotežne raspodele vode u sistemu ulje-papir-presbord za mineralno i biljno ulje. Pojedinačni dijagrami za mineralno i biljno ulje prikazani su na *Slikama 4.1.1 - 4.1.2.* i prikazuju zavisnost sadržaj vode u papiru, sadržaja vode u presbordu i ukupnog sadržaja vode u papiru i presbordu od sadržaja vode u ulju za sedam temperatura u opsegu 40 – 120 °C. Sadržaji vode u ulju, papiru i presbordu određivani su direktnom Karl-Fisher titracijom, a ukupni sadržaj vode u celuloznim materijalima (papir+presbord) izračunat je prema sledećoj formuli:

$$SV_{cel} = \frac{(SV_{pap} \cdot m_{pap} + SV_{pres} \cdot m_{pres})}{m_{pap} + m_{pres}} \quad (4.1.1)$$

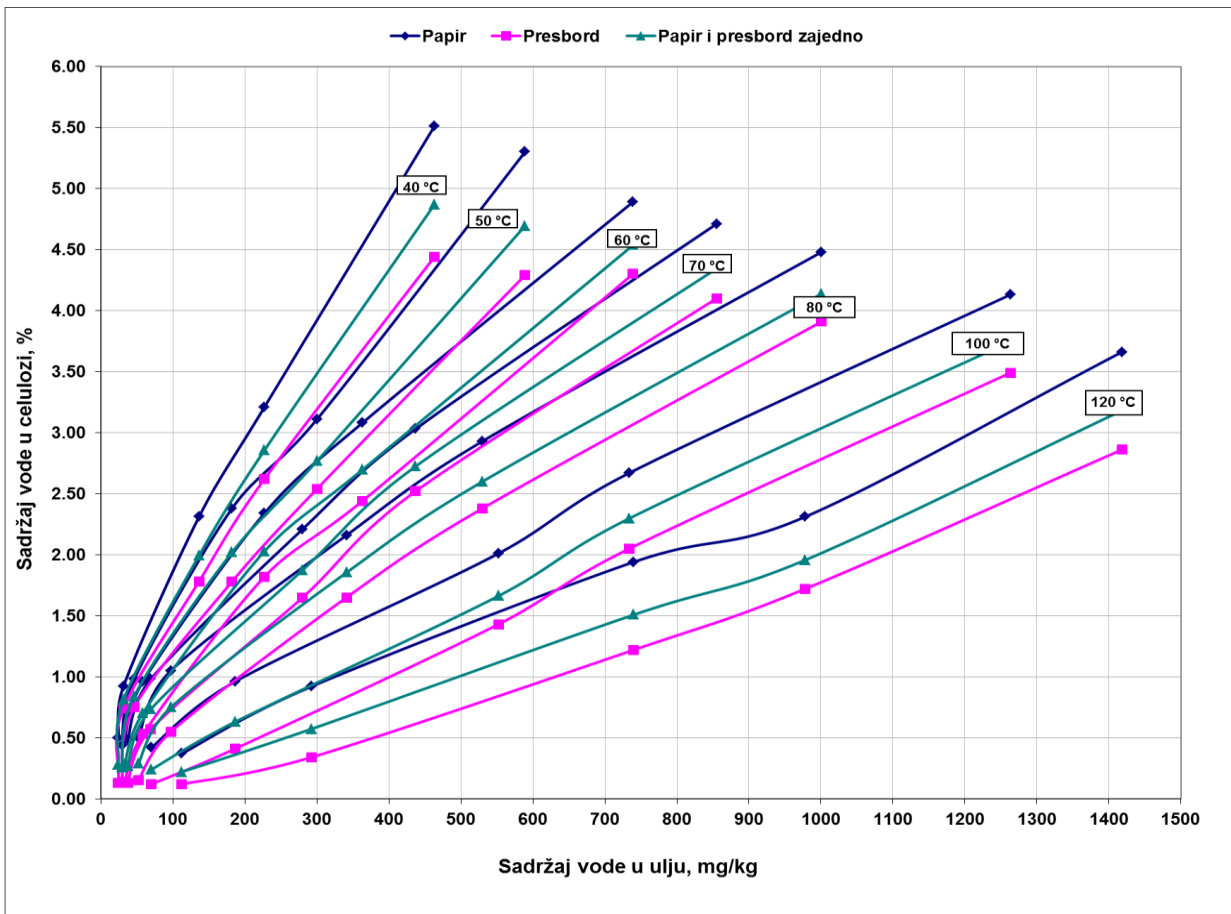
gde je: SV_{cel} – ukupni sadržaj vode u celuloznim materijalima, SV_{pap} – izmereni sadržaj vode u papiru, m_{pap} – ukupna masa papira po vijali, SV_{pres} - izmereni sadržaj vode u presbordu, m_{pres} – ukupna masa presborda po vijali

Razlike u sadržaju vode u mineralnom i biljnom ulju za iste sadržaje vode u papiru i presbordu bile su veoma izražene, što se najbolje vidi na *Slici 4.1.3.* gde su uporedo prikazane krive ukupnog sadržaja vode u papiru i presbordu za mineralno i biljno ulje na različitim temperaturama. Uočava se da je kod biljnih ulja ravnoteža više pomerenka ka ulju u odnosu na mineralna ulja. Ovo se može objasniti većom polarnošću biljnih ulja, odnosno prisustvom estarskih funkcionalnih grupa u molekulima koje grade vodonične veze sa molekulima vode (poglavljje 1.1). Usled ove pojave, biljna ulja imaju značajno veći kapacitet da rastvore vodu nego mineralna ulja. Primećeno je da sadržaji vode u biljnom ulju, za određene sadržaje vode u papiru i presbordu, mogu biti čak i do deset puta veći nego u mineralnom ulju [4] [89][90][91]. Takođe, uočeno je da je sadržaj vode u celuloznoj izolaciji u sistemu sa biljnim uljem bio često značajno niži u odnosu na izolaciju sa mineralnim uljem, na

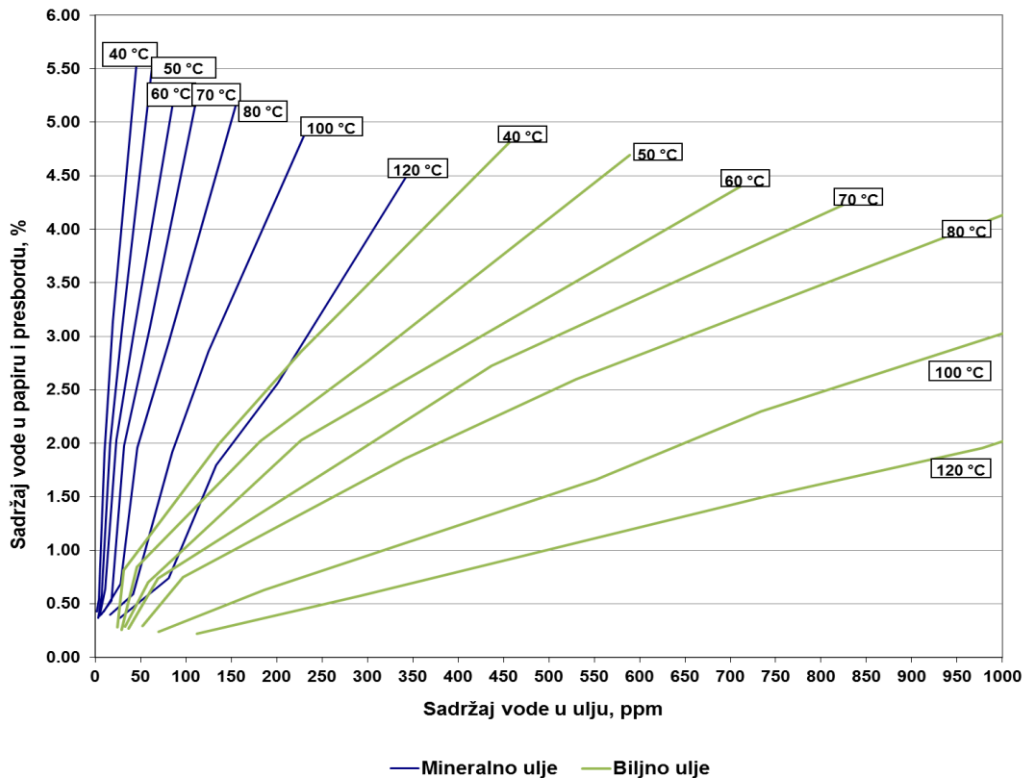
istoj temperaturi i za isti sadržaj vode u ulju. Tako je npr. za sadržaj vode u ulju od 40 mg/kg na temperaturi od 60 °C, u sistemu sa mineralnim uljem sadržaj vode u papiru i presbordu je bio oko 2,9 %, dok je u sistemu sa biljnim uljem sadržaj vode u papiru i presbordu bio oko 0,6 %.



Slika 4.1.1 Ravnotežne krive za papir, presbord i papir i presbord zajedno u mineralnom ulju



Slika 4.1.2 Ravnotežne krive za papir, presbord i papir i presbord zajedno u biljnom ulju



Slika 4.1.3 Uporedni prikaz ravnotežnih sadržaja vode u sistemu celuloza/ulje za sistem sa mineralnim i biljnim uljem

U cilju analize promene relativne zasićenosti mineralnog i biljnog ulja vodom sa temperaturom za različite sadržaje vode u papiru i presbordu, za svaki sadržaj vode u ulju izračunata je relativna zasićenost ulja vodom prema jednačini (2.3.1):

$$RS = \frac{SV}{SV_{max}} \quad (2.3.1)$$

gde je, RS – Relativni sadržaj vode u ulju, % SV – apsolutni sadržaj vode izmeren u ulju (Slike 4.1.2 i 4.1.3), mg/kg, SV_{max} – Maksimalni sadržaj vode u ulju koji ulje može da rastvori na datoj temperaturi.

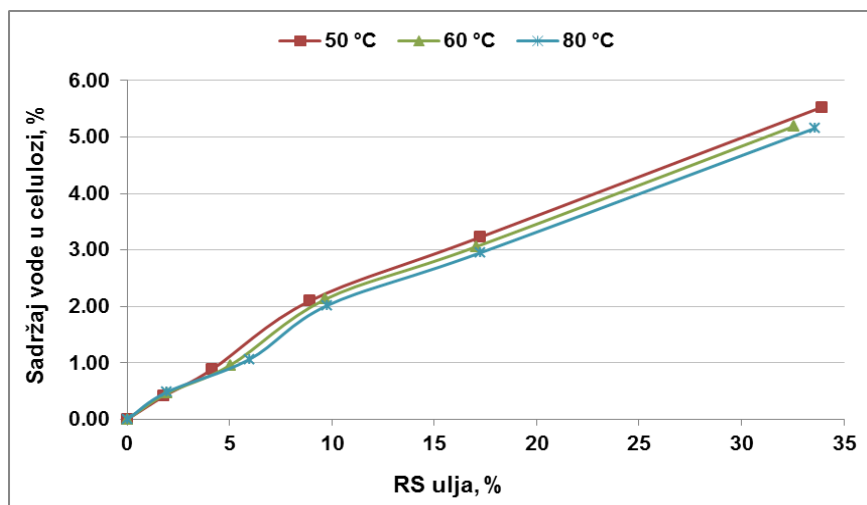
Na osnovu dijagrama prikazanih na *Slikama 4.1.1 i 4.1.2.* i odgovarajućih vrednosti SV_{max} , formirani su dijagrami zavisnosti ukupnog sadržaja vode u papiru i presbordu od RS ulja za temperature 50 °C, 60 °C i 80 °C. Dijagram za mineralno ulje prikazan je na *Slici 4.1.5*, a za biljno ulje na *Slici 4.1.6*. Temperature su izabrane kao najčešće radne temperature ulja

energetskih transformatora.

U literaturi postoje podaci za rastvorljivost vode u mineralnom ulju, SV_{max} [50] koji su u ovoj disertaciji provereni za konkretno ulje, sledećom eksperimentalnom procedurom: tri rastvora vode u mineralnom ulju u koncentraciji od oko 80 % RS na tri temperature: 50 °C, 60 °C i 80 °C . Sva tri rastvora su zatim zagrevana na odgovarajuće temperature u zatvorenom sistemu sa uronjenim senzorom za merenje RS ulja, kako bi se izbegao gubitak vode isparavanjem, *Slika 4.1.4*. Kada bi temperatura bila dostignuta, a ravnoteža uspostavljena, beležene su vrednosti za relativno zasićenje ulja kapacitivnim senzorom, i apsolutni sadržaj vode u ulju izmeren Karl Fischer titracijom. Na osnovu izmerenih podataka izračunato je SV_{max} na osnovu jednačine (2.3.1) pri čemu su dobijene vrednosti imale zadovoljavajuće slaganje sa podacima iz literature. Podaci za rastvorljivost vode u biljnom ulju, SV_{max} , na konkretnim temperaturama uzet je iz literature, budući da su se literaturni podaci odnosili na identično biljno ulje [92].

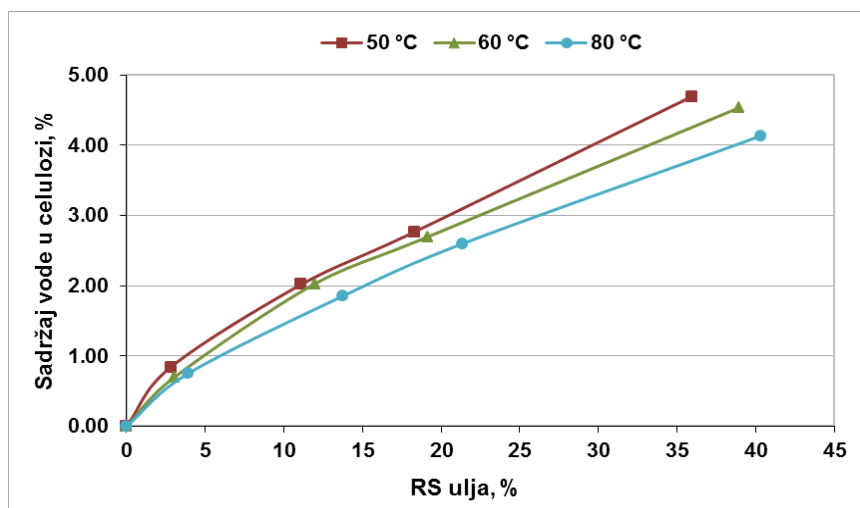


Slika 4.1.4 Aparatura za merenje RS ulja na željenoj temperaturi



Slika 4.1.5. Ukupni sadržaj vode u celuloznoj izolaciji u zavisnosti od izračunatog relativnog sadržaja vode u mineralnom ulju

Relativno zasićenje mineralnog ulja je blago poraslo za posmatrani opseg temperatura, od 50 °C do 80 °C, dok je kod biljnog ulja RS u istom temperaturnom opsegu značajno poraslo. Tako je npr. za isti ukupni sadržaj vode u papiru i presbordu od 3 % u temperaturnom opsegu od 50 °C do 80 °C, RS mineralnog ulja poraslo sa 16 na 18%, a kod biljnog sa 20 na 27% (Slike 4.1.5 – 4.1.6).



Slika 4.1.6. Ukupni sadržaj vode u celuloznoj izolaciji u zavisnosti od izračunatog relativnog sadržaja vode u biljnom ulju

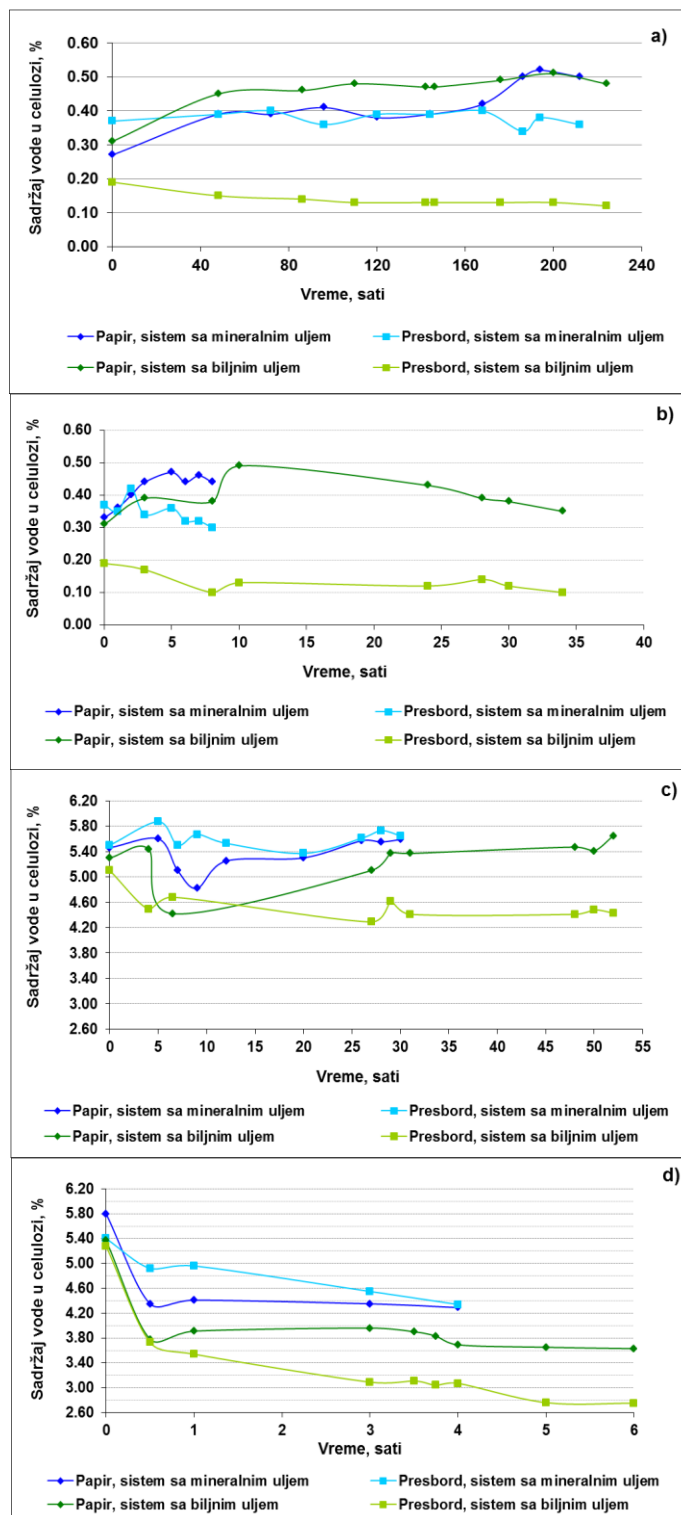
Sporiji porast RS mineralnog ulja sa promenom temperature u odnosu na RS biljnog ulja, može se objasniti sporijom migracijom vode iz celuloze u ulje usled male polarnosti mineralnog

ulja. S druge strane, usled velike polarnosti biljnog ulja i samim tim većeg afiniteta i kapaciteta ovog ulja da rastvori vodu, sa porastom temperature raste i brzina migracije vode iz celuloze u ulje. Ukupna rastvorljivost vode u biljnom ulju ne raste jednako brzo sa porastom temperature, kao afinitet ulja ka vezivanju vode, pa zato dolazi do porasta RS vrednosti.

4.1.1. Ravnotežna raspodela vode između papira i presborda u mineralnom i biljnom ulju

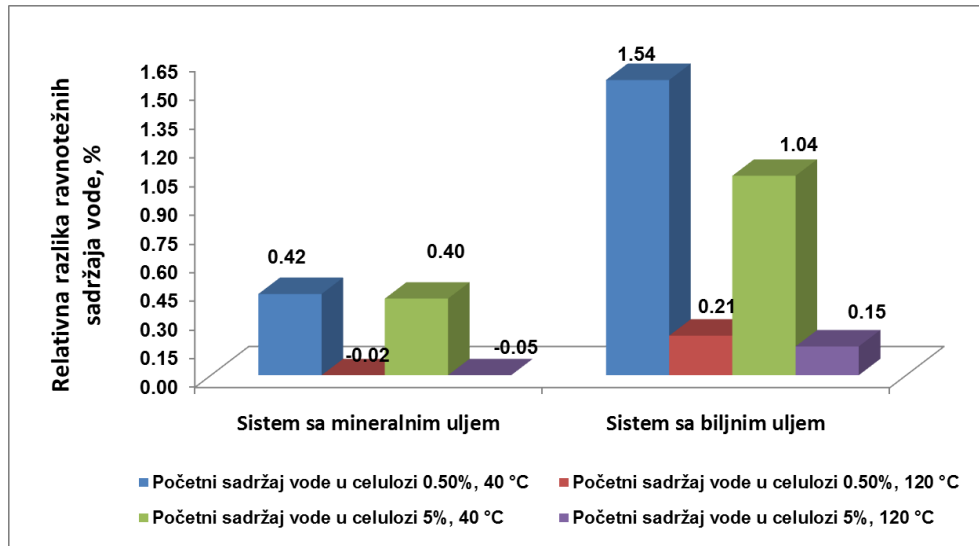
Na formiranim dijagramima ravnotežnih sadržaja vode u sistemu ulje-papir-presbord, prikazanih na *Slikama 4.1.1 – 4.1.2*, uočeno je da se uspostavljeni ravnotežni sadržaji vode u papiru i presbordu razlikuju u određenoj meri. Ove razlike izraženije su u slučaju biljnih ulja, a naročito za relativno niže temperature i niži ukupan sadržaj vode u izolacionom sistemu [91]. Takođe, praćenjem promena u sadržaju vode u papiru i presbordu tokom uspostavljanja ravnotežnih sadržaja vode, primećeno je da je dolazilo do difuzije vode iz presborda u papir. Tačnije, uočeno je da je dolazilo do blagog sniženja sadržaja vode u presbordu, a istovremeno i do blagog porasta sadržaja vode u papiru. Ova pojava prikazana je na *Slikama 4.1.7 a–d*, kao promena apsolutnog sadržaja vode u papiru i presbordu tokom perioda uspostavljanja ravnotežne raspodele vode između materijala. Grafici su prikazani za početni sadržaj vode u celulozi 0,5% i 5% i temperature 40 °C i 120 °C kao granične slučajeve.

U cilju boljeg poređenja razlika u uspostavljenim ravnotežnim sadržajima vode među materijalima za različite početne sadržaje vode, izračunate su relativne razlike ravnotežnih sadržaja vode između papira i presborda za granične slučajeve: najvišu i najnižu temperaturu i najveći i najmanji sadržaj vode u izolacionom sistemu, koje su zatim prikazane grafički na *Slici 4.1.8*. Relativne razlike u sadržaju vode između papira i presborda izračunate su kao razlike u apsolutnom sadržaju vode, koje su zatim podeljene sa ukupnom količinom vode u celuloznim materijalima.



Slika 4.1.7 Promena sadržaja vode u papiru i presbordu tokom perioda uravnotežavanja pri početnom sadržaju vode u celuloznim materijalima od oko 0,5%: a) na temperaturi od 40 °C, b) na temperaturi od 120 °C i pri početnom sadržaju vode u celuloznim materijalima od oko 5%: a) na temperaturi od 40 °C, b) na temperaturi od 120 °C

Rezultati prikazani na *Slici 4.1.8* jasno pokazuju da je nejednaka raspodela vode između papira i presborda bila najizraženija kod biljnih ulja i to pri temperaturi od 40 °C za najmanji početni sadržaj vode u izolacionom sistemu (0,5%), dok je na temperaturu od 120 °C za najmanji početni sadržaj vode u IS ovaj efekat bio znatno manje izražen. Za sadržaj vode od 5% u celuloznoj izolaciji, razlike su mnogo manje i to kod obe vrste ulja.

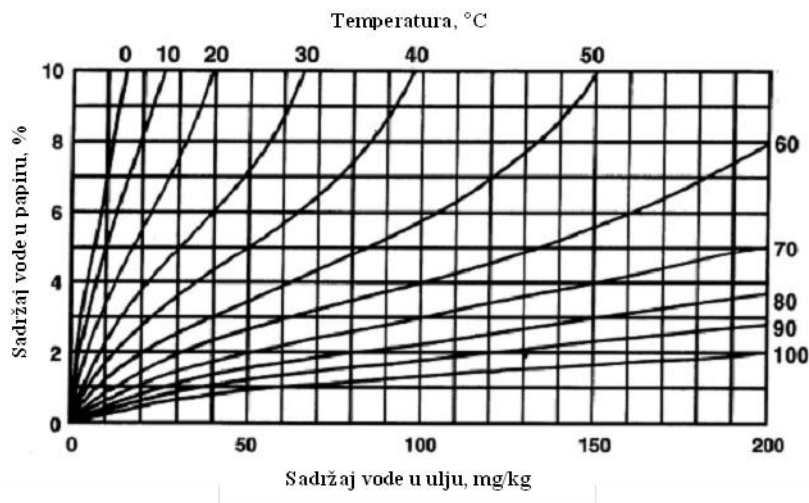


Slika 4.1.8 Relativna razlika ravnotežnih sadržaja vode u papiru i presbordu za granične uslove u mineralnom i biljnom ulju

Značajne razlike u ravnotežnim sadržajima vode u papiru i presbordu u sistemu sa biljnim uljem u odnosu na sistem s mineralnim uljem, može se objasniti postojanjem određenih ograničenja za prenos mase kroz papir i presbord (desorpcija/apsorpcija) najverovatnije usled veće viskoznosti biljnih ulja. Razlog nehomogene raspodele vode između celuloznih materijala u biljnom ulja može biti posledica veće debljine presborda, ali i možda manjeg afinitet presborda ka apsorpciji vode. Manje razlike u slučaju većih početnih sadržaja vode u IS su posledica značajno većeg gradijenta koncentracije vode, koji predstavlja pogonsku silu za odvijanje difuzije. S druge strane, u skladu sa Fick-ovim zakonom o prenosu mase, difuzija se na višim temperaturama brže i lakše odvija čime se mogu objasniti uočene manje relativne razlike u sadržaju vode između papira i presborda na temperaturi od 120 °C.

4.1.2. Poređenje eksperimentalno dobijenih dijagrama sa ravnotežnim dijagramima iz literature

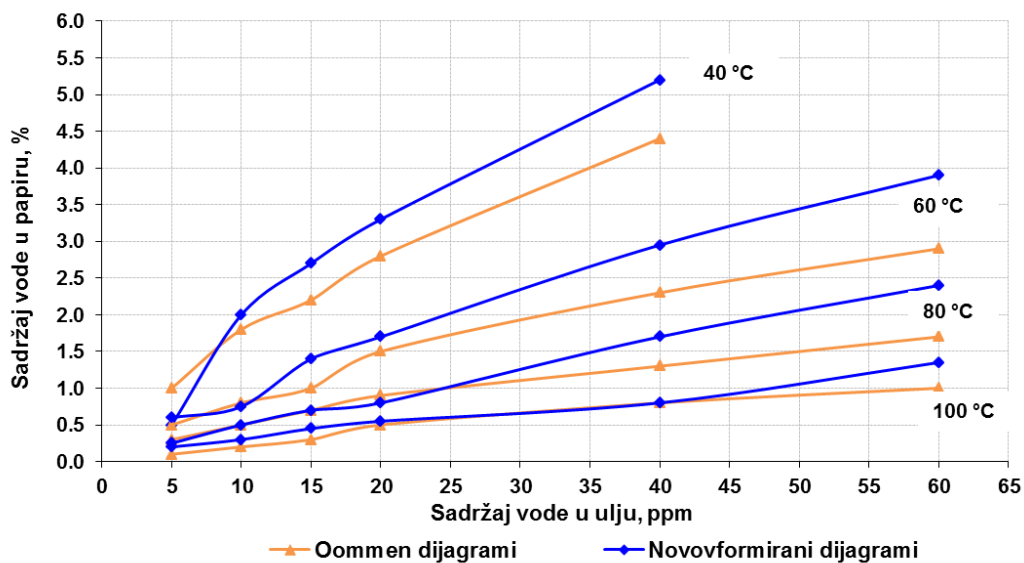
Dijagrami ravnotežnih sadržaja vode u sistemu sa mineralnim izolacionim uljem, papirom i presbordom, formirani u okviru ove disertacije, poređeni su sa često citiranim dijagramom autora Oommen [93]. Poređenje je izvršeno tako što su za određene sadržaje vode u ulju iz opsega 5 – 60 mg/kg i određene temperature 40, 60, 80 i 100 °C, sa oba dijagrama očitani sadržaji vode u papiru. Rezultati su prikazani na *Slici 4.1.10*.



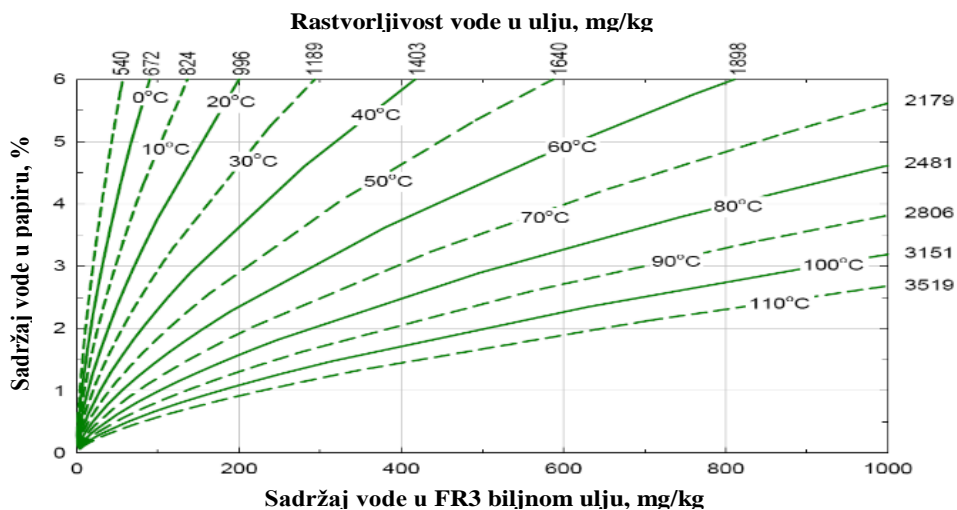
Slika 4.1.9. Dijagram ravnotežne raspodele vlage u izolacionom sistemu autora Oommen [93]

Rezultati poređenja pokazali su da postoje određena manja odstupanja, ali se generalno može zaključiti da je slaganje sasvim zadovoljavajuće. Za niže sadržaje vode u ulju, očitane vrednosti sa novoformiranih dijagrama su bile nešto niže u odnosu na vrednosti očitane sa Oommen dijagrama, dok je za veće sadržaje vode u ulju obrnut slučaj.

Poređenje ravnotežnih dijagrama formiranih za biljno ulje izvršeno je sa Cargill krivama, a rezultati poređenja su grafički prikazani na *Slici 4.1.12*. Poređenje je, kao i u slučaju mineralnih ulja, izvršeno za niske, srednje i visoke vrednosti sadržaja vode u biljnom ulju: 50 – 1000 mg/kg i za temperature: 40, 60, 80 i 100 °C.

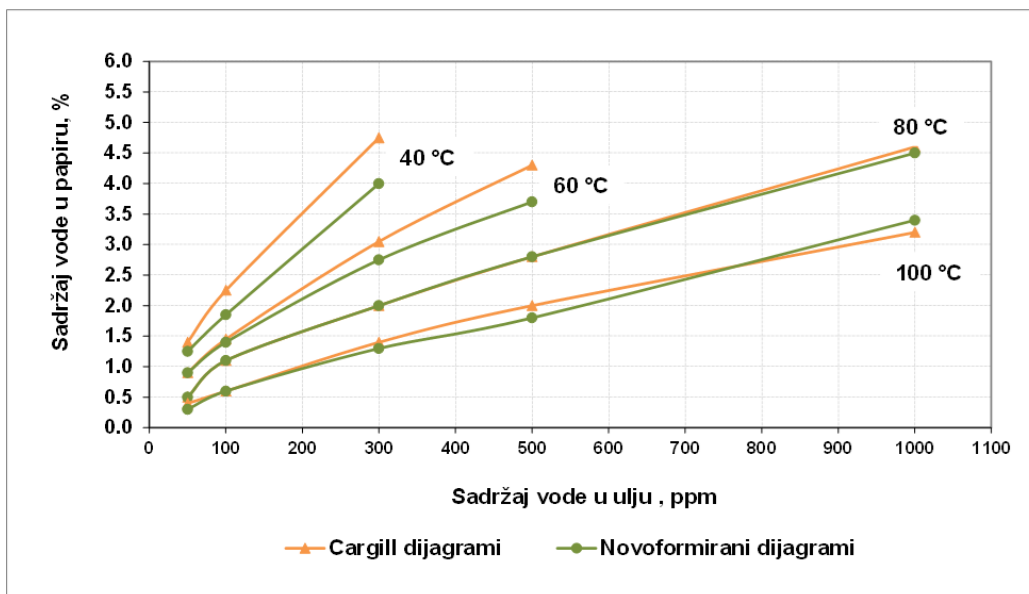


Slika 4.1.10 Rezultati poređenja procena sadržaja vlage u papiru sa Oommen dijagramom



Slika 4.1.11 Cargill ravnotežni dijagrami za triestar FR3 fluid [92]

Na osnovu prikazanih rezultata, može se primetiti da u slučaju temperature od 40 °C novoformirani dijagrami daju nešto manje vrednosti sadržaja vode u papiru za date sadržaje vode u ulju, dok su za ostale temperature očitane vrednosti sa dva dijagrama praktično poklapaju.



Slika 4.1.12 Rezultati poređenja procena sadržaja vode u papiru sa Cargill dijagramom za biljno ulje

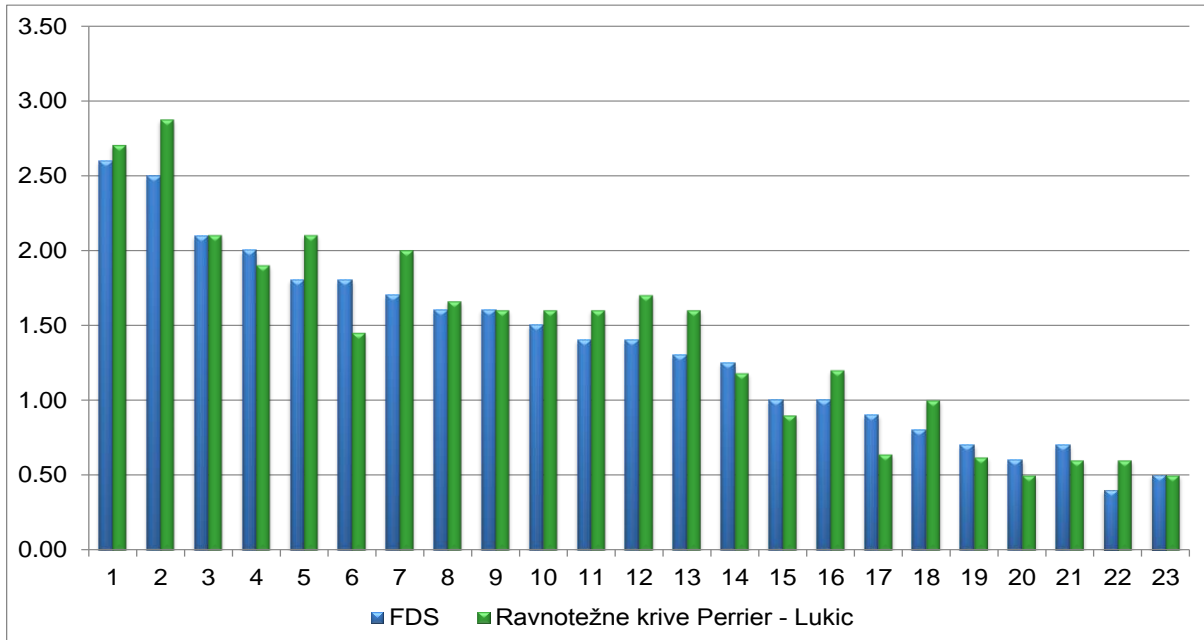
4.1.3. Upotreba ravnotežnih dijagrama za procenu sadržaja vode u papiru ET u pogonu - poređenje sa rezultatima procene putem električnih merenja metodom FDS

Praktična primena ravnotežnih dijagrama formiranih u okviru ove disertacije, ispitivana je na taj način što su na uzorku od 23 transformatora iz eksploatacije izvršena ispitivanja sadržaja vode u ulju na radnim temperaturama, a zatim su obavljena i električna merenja metodom FDS. Na osnovu obavljenih ispitivanja izvršena je procena ovlaženosti izolacionog sistema predmetnih transformatora metodom FDS i metodom pomoću novoformiranih ravnotežnih dijagrama.

Uporedni prikaz rezultata procene sadržaja vode u papiru energetskih transformatora iz eksploatacije dat je grafički na *Slici 4.1.13*. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da su slaganja sasvim zadovoljavajuća.

S obzirom da se u oba slučaja radi o indirektnim metodama, a ne direktnim merenjima, kod obe metode se usvajaju određene aproksimacije, pa samim tim postoje i potencijalni izvori grešaka. Međutim, budući da je metoda procene sadržaja vode u IS energetskih transformatora na osnovu izmerenog sadržaja vode u ulju, na radnoj temperaturi ulja, uz

korišćenje ravnotežnih dijagrama, neuporedivo jeftinija i lakša za izvođenje od električnih merenja, ravnotežni dijagrami formirani u okviru ove disertacije, mogu se smatrati veoma korisnim alatom u održavanju energetskih transformatora.



Slika 4.1.13 Uporedna analiza rezultata procene sadržaja vode u papirnoj izolacija ET u pogonu

Ograničenja i izvori grešaka metode FDS i metode zasnovane na merenju sadržaja vode u ulju i primeni ravnotežnih dijagrama, su:

- Tačnost temperature uzete za proračun, naročito kada postoje velike fluktuacije u temperaturi (obe metode),
- Pretpostavka da je u transformatoru uspostavljena termodinamička ravnoteža (obe metode),
- Mala pouzdanost rezultata na radnim temperaturama ulja ispod 30 °C (ravnotežni dijagrami),
- Neadekvatno uzorkovanje ulja za analizu sadržaja vode (ravnotežni dijagram),
- Visoka ostarelost izolacionog sistema (FDS).

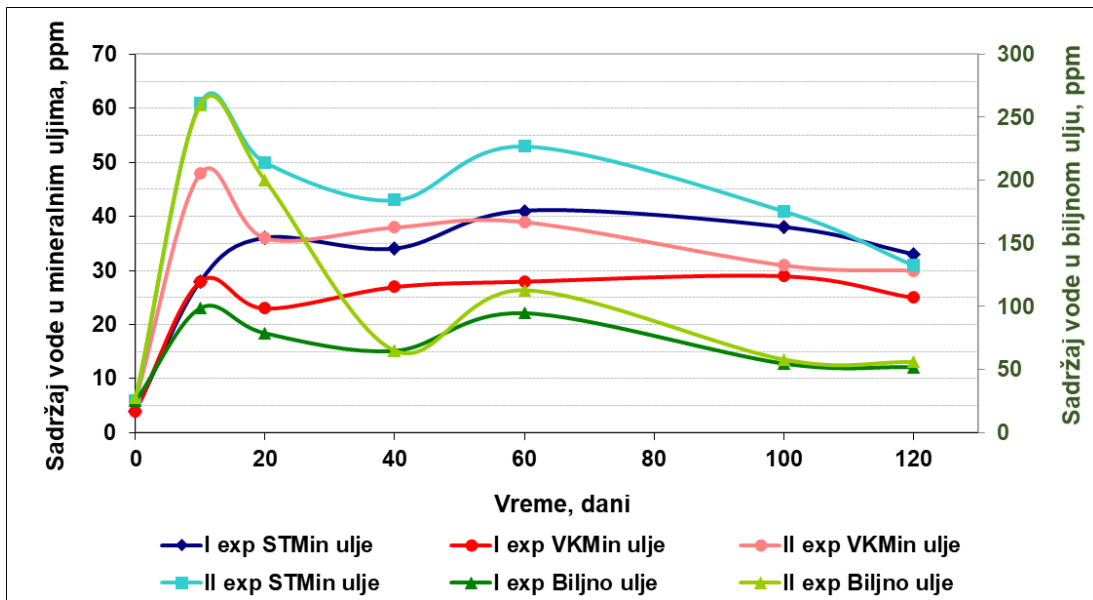
4.2. REZULTATI EKSPERIMENTA II - Simulacija ubrzanog starenja izolacionog sistema energetskih transformatora u laboratorijskim uslovima sa mineralnim odnosno biljnim uljem

U ovom poglavlju su prikazani rezultati eksperimenta II u okviru kog je vršeno veštačko starenje dva mineralna i jednog biljnog ulja u sistemu ulje/bakar (označen kao “I exp”) i u sistemu ulje/bakar/celulozna izolacija (označen kao “II exp”) u laboratorijskim uslovima. Visoko kvalitetno inhibirano mineralno ulje označeno je kao VKMin, dok je standardno neinhibirano mineralno ulje označeno kao STMin.

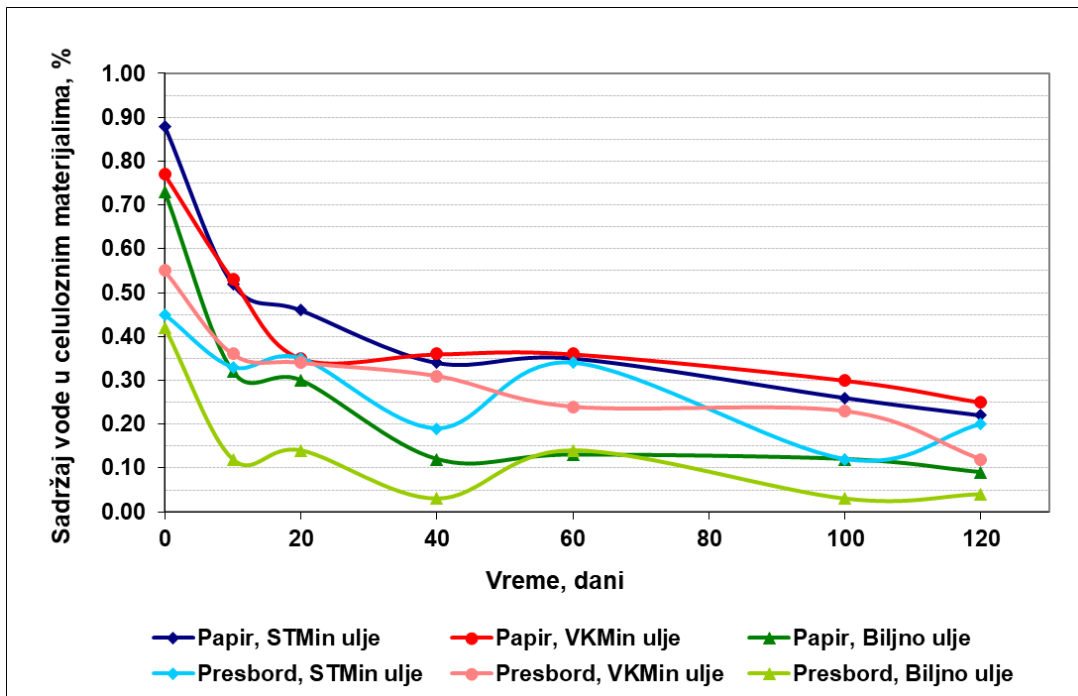
4.2.1. Rezultati ispitivanja sadržaja vode u ulju i celuloznim materijalima

Na *Slici 4.2.1*, prikazana je promena u sadržaju vode u ulju tokom eksperimenta starenja za sva tri ulja i oba sistema, sa i bez celulozne izolacije, dok je na *Slici 4.22* prikazana promena u sadržaju vode u celulozi. Primećuje se da je nakon 10 dana starenja došlo do značajnog porasta sadržaja vode kod sva tri ulja, a naročito u slučaju biljnog ulja. Tokom daljeg trajanja eksperimenta, primećeno je da sadržaj vode u ulju opada i to naročito u slučaju biljnih ulja. Ovaj početni porast sadržaja vode u ulju je naročito bio izražen u sistemu sa celuloznom izolacijom (II exp) i najvećim delom je posledica migracije vode iz celuloze u ulje i uspostavljanja ravnotežne raspodele vode na povišenoj temperaturi (140 °C). Tokom trajanja eksperimenta primećeno je da je sadržaj vode opadao i u celuloznim materijalima, odnosno dolazilo je do njihovog isušivanja (*Slika 4.2.2*). Porast sadržaja vode u ulju, ali i isušivanje celuloznih materijala je kod biljnog ulja bilo izraženije u odnosu na oba mineralna ulja. Migracija vode iz celuloze je bila izraženija u biljnom ulju, u odnosu na mineralno ulje, usled većeg afiniteta biljnog ulja ka rastvorljivosti vode. U biljnom ulju se voda najverovatnije dalje trošila u reakcijama hidrolize ulja, a moguće da je dolazilo i do isparavanja vode usled visoke temperature. Na ovaj način migracija vode iz celuloze u ulje je sve vreme bila pospešena, a kao rezultat dolazilo je do isušivanja celuloznih materijala. Isušivanje je naročito bilo izraženo u slučaju presborda. Ovo se slaže sa zapažanjima ekperimenta I, da se voda različito raspodeljuje između papira i biljnog ulja, a različito između presborda i biljnog ulja (poglavlje 4.1), kao i da je raspodela vode u sistemu

papir/mineralno ulje u značajnoj meri razlikuje u odnosu na raspodelu u sistemu papir/biljno ulje.



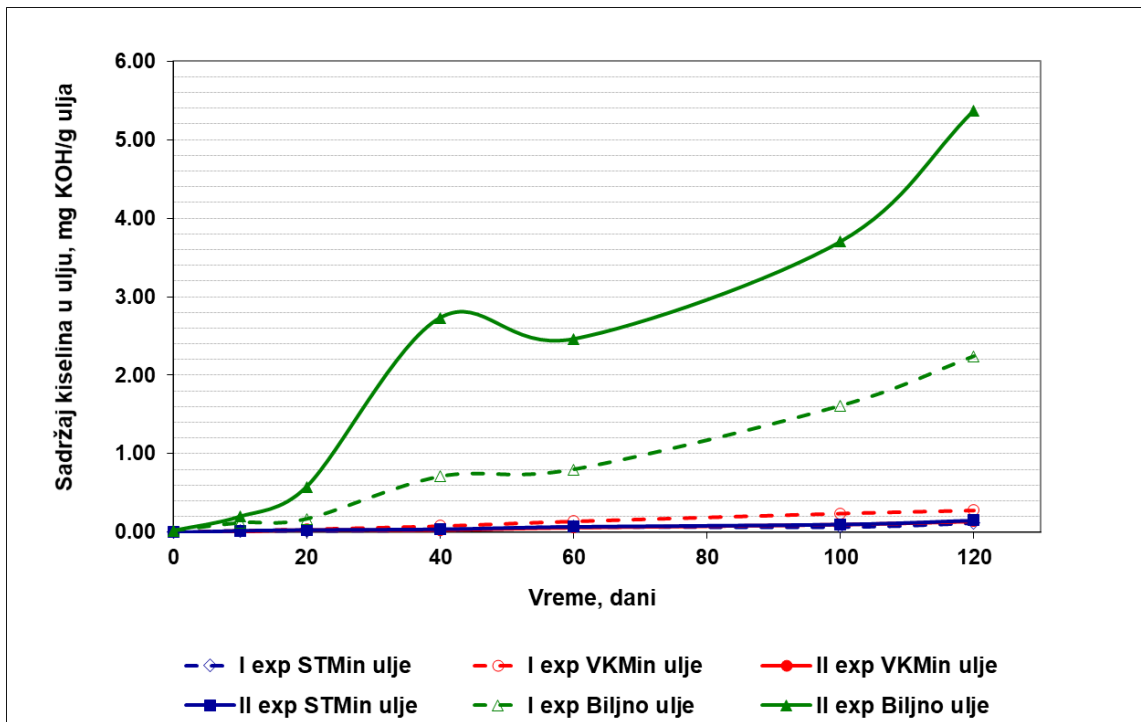
Slika 4.2.1 Promene u sadržaju vode u mineralnim uljima i u biljnom ulju tokom eksperimenta starenja



Slika 4.2.2 Promene u sadržaju vode u celuloznim materijalima tokom eksperimenta starenja sa mineralnim uljima i sa biljnim uljem

4.2.2. Rezultati fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja

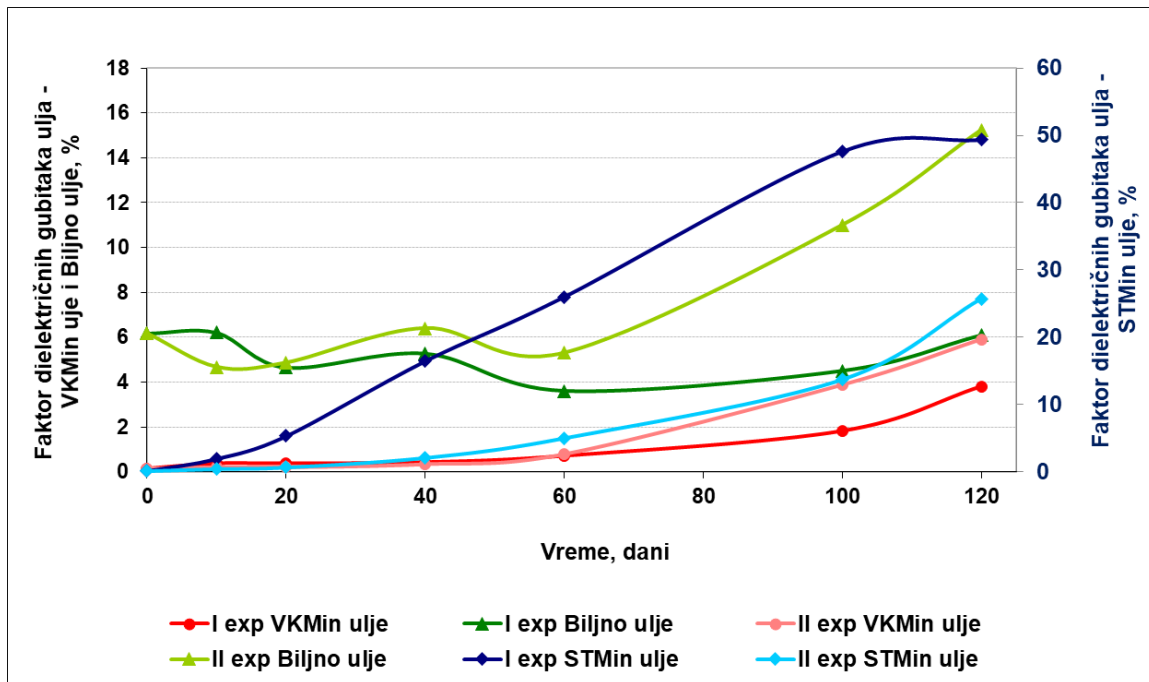
Promene u sadržaju kiselina u ulju tokom eksperimenta starenja u oba sistema (sa i bez celulozne izolacije) prikazan je na *Slici 4.2.3* za sva tri ulja. Može se primetiti da je sadržaj kiselina u slučaju biljnog ulja bio značajno veći nego u slučaju mineralnih ulja, kao i da je prisustvu celulozne izolacije sadržaj kiselina bio veći nego u sistemu bez celuloze. Nagli porast sadržaja kiselina u biljnom ulju od treće periode starenja (40 dana), se može povezati sa padom sadržaja vode u biljnom ulju, odnosno reakcijama hidrolize biljnih ulja u kojima se troši voda, a kao proizvod nastaju više masne kiseline [90][99]. U nastavku će biti prikazan pad stepena polimerizacije papira tokom eksperimenta starenja, gde se vidi da je papir u oba mineralna ulja brže ostario nego u biljnom ulju, *Slika 4.2.21*. Na osnovu navedenog, može se zaključiti da kiseline koje se stvaraju u biljnim uljima ne pospešuju degradaciju čvrste izolacije. Ovo se slaže sa podacima iz literature gde se navodi da se u biljnom ulju tokom degradacije stvaraju više masne kiseline koje, usled velike molekulske mase, ne mogu da se apsorbuju u papiru, i tako ne katalizuju njegovu degradaciju [100].



Slika 4.2.3 Promene u sadržaju kiselina u mineralnim uljima i u biljnom ulju tokom eksperimenta starenja za sistem ulje/bakar (I exp) i sistem ulje/bakar/celuloza (II exp)

Promena faktora dielektričnih gubitaka ulja za dva mineralna i jedno biljno ulje u sistemu bez celulozne izolacije (*I exp*) i u sistemu sa celuloznom izolacijom (*II exp*), prikazana je na *Slici 4.2.4*. Može se primetiti da je porast faktora dielektričnih gubitaka ulja bio značajno veći kod neinhibiranog mineralnog ulja, označenog kao *STMin*, u odnosu na inhibirano mineralno ulje, *VKMin* i biljno ulje. Vrednost faktora dielektričnih gubitaka neinhibiranog ulja, *STMin* bio je nešto niži u sistemu sa celuloznom izolacijom, nego u sistemu bez celuloze, što je najverovatnije posledica apsorpcije polarnih produkata starenja ulja u papiru i presbordu.

Ovaj parametar praktično predstavlja meru termičke degradacije ulja. U sistemu sa mineralnim inhibiranim uljem i biljnim uljem, vrednost faktora dielektričnih gubitaka ulja je bio značajno niži tokom celokupnog perioda starenja, što se može objasniti prisustvom inhibitora oksidacije koji je usporavao starenje ulja. Kod ova dva ulja primećene su nešto veće vrednosti u sistemu sa papirom i presbodom u odnosu na sistem bez celulozne izolacije, što je suprotno od onog što je primećeno u slučaju neinhibiranog mineralnog ulja.

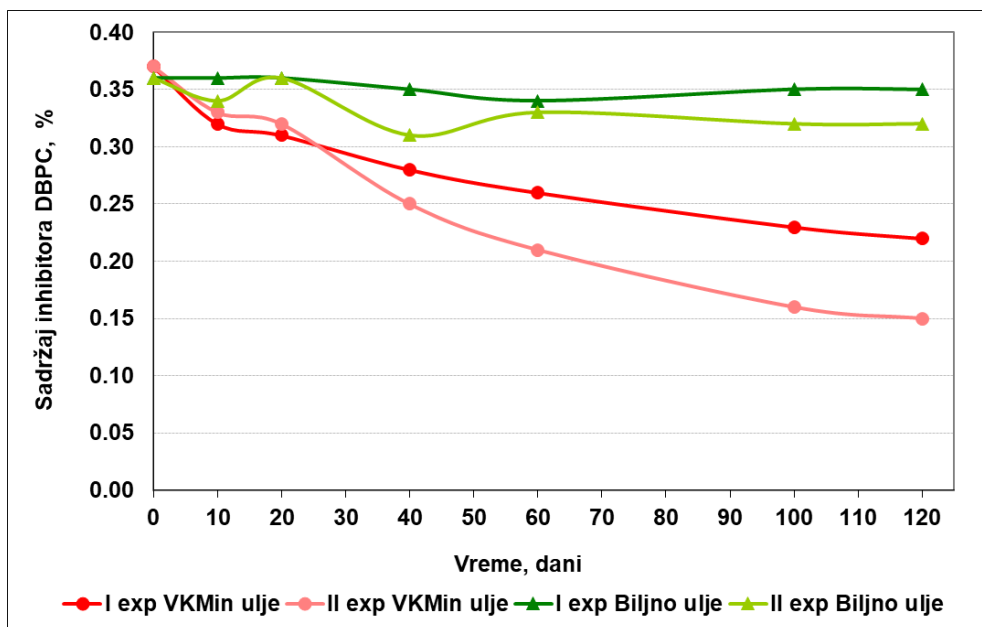


Slika 4.2.4 Promena faktora dielektričnih gubitaka ulja tokom eksperimenta starenja za sva tri ulja i sisteme ulje/bakar (*I exp*) i ulje/bakar/celuloza (*II exp*)

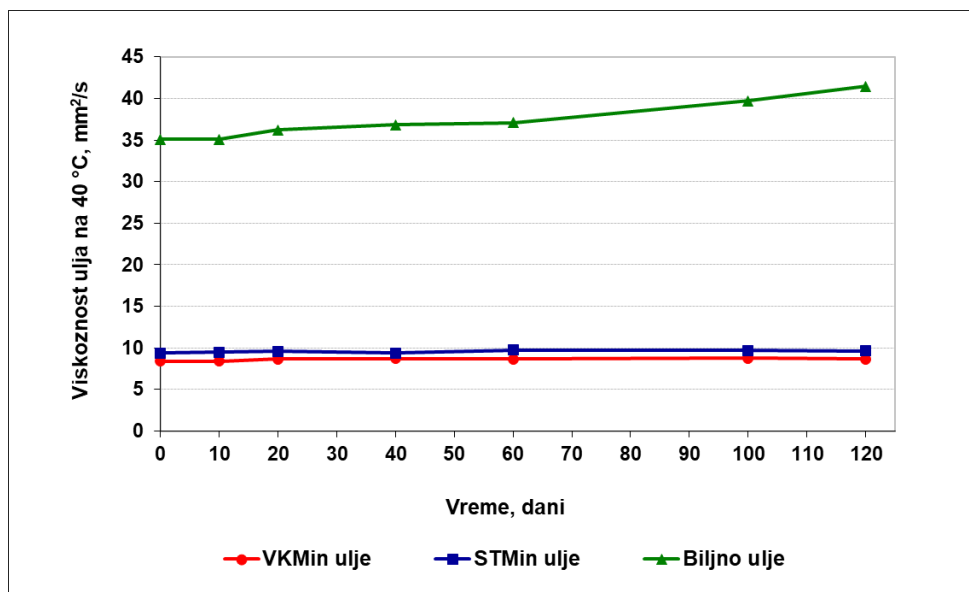
Potrošnja inhibitora oksidacije DBPC, prikazana je na *Slici 4.2.5*. i bila je izraženija u mineralnom inhibiranom ulju (VKMin) nego u biljnom ulju. Ovo se može objasniti većom termičkom stabilnošću biljnog ulja, jer je u uslovima niskog sadržaja kiseonika dominantan mehanizam degradacije ulja bio pirolitički, a ne oksidativan. Ipak, inhibitor oksidacije tokom eksperimenta starenja nije potpuno utrošen ni u mineralnom ulju, već je ostao prisutan u zadovoljavajućoj koncentraciji u ulju (prema zahtevima standarda IEC 60422).

Kinematčka viskoznost kod mineralnog ulja je ostala nepromenjena tokom eksperimenta starenja, dok je kod biljnog ulja primećen manji porast (*Slika 4.2.6*). Vrednost tačke stinjavanja je kod sva tri ulja ostala nepromenjena *Slika 4.2.7*.

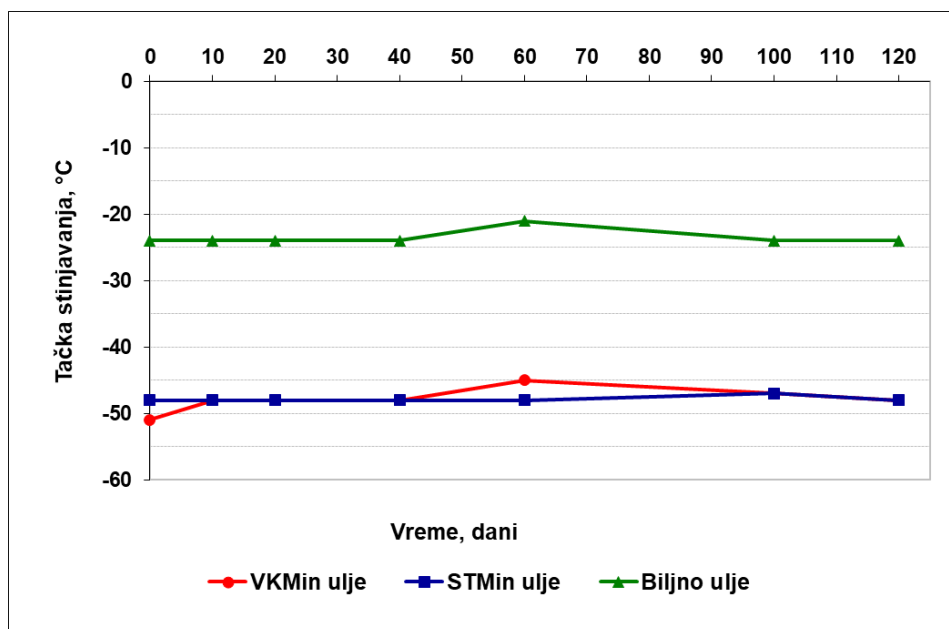
Rezultati dobijeni u okviru sprovedenih istraživanja upućuju na zaključak da su performanse biljnih ulja u poređenju s performansama mineralnih ulja sasvim zadovoljavajuće, te bi primena biljnih ulja kao izolacionih fluida mogla biti moguća kod transformatora kod kojih je prisustvo kiseonika u ulju ograničeno, kao što je to slučaj kod zaptivenih konstrukcija.



Slika 4.2.5 Potrošnja inhibitora oksidacije u mineralnom i u biljnom ulju tokom eksperimenta ubrzanog starenja za sistem ulje/bakar (*I exp*) i sistem ulje/bakar/celuloza (*II exp*)



Slika 4.2.6 Promena viskoznosti mineralnih ulja i biljnog ulja tokom eksperimenta ubrzanog starenja za sistem ulje/bakar/celuloza (*II exp*)

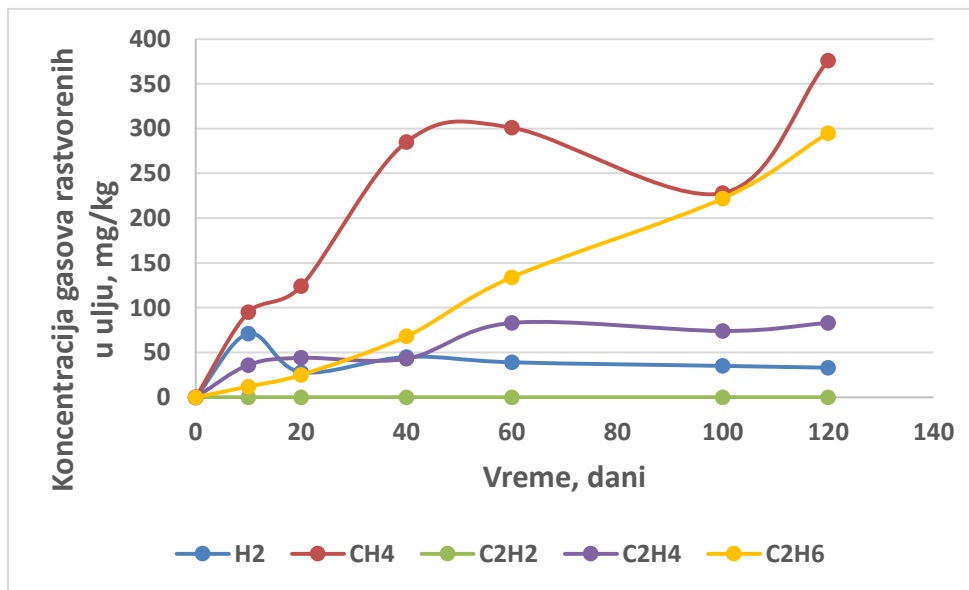


Slika 4.2.7 Promena tačke stinjavanja mineralnih ulja i biljnog ulja tokom eksperimenta ubrzanog starenja za sistem ulje/bakar/celuloza (*II exp*)

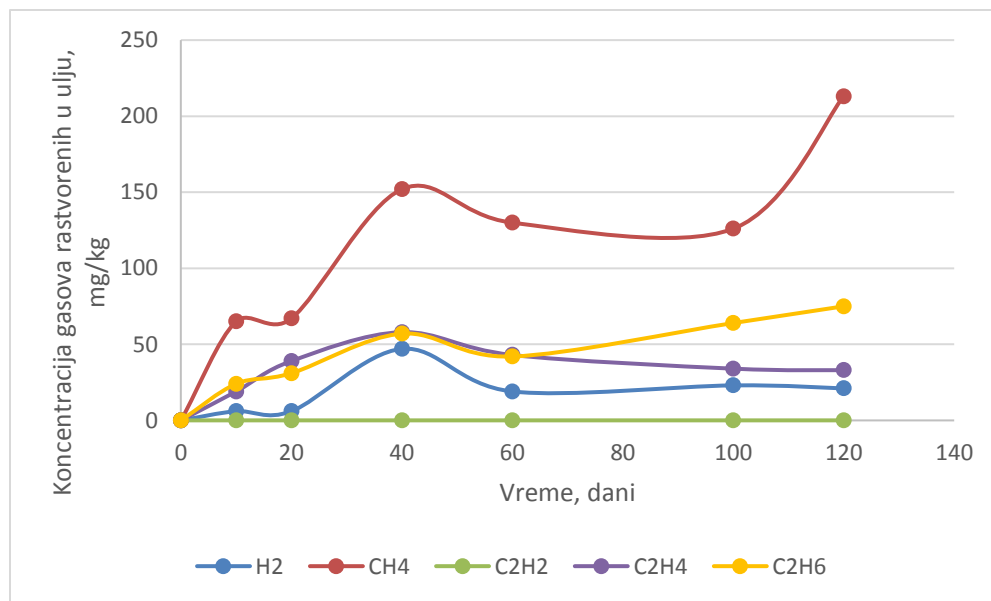
4.2.3. Rezultati gasnohromatografske analize ulja

Na *Slikama 4.2.8 – 4.2.19.* prikazani su rezultati gasnohromatografske analize ulja tokom eksperimenta starenja za sva tri ulja i oba sistema (*I exp* i *II exp*). Na *Slikama 4.2.8 – 4.2.13* prikazani su sadržaji ugljovodoničnih gasova i vodonika, dok su na *Slikama 4.2.14 – 4.2.19.* prikazani sadržaji oksida ugljenika rastvorenih u ulju. Sadržaj kiseonika u svim eksperimentima je bio manji od 3000 mg/kg što odgovara uslovima karakterističnim za energetske transformatore zaptivenih konstrukcija. Primenom standarda IEC 60599 u cilju interpretacije rezultata, u svim slučajevima vrednosti karakterističnih odnosa koncentracije gasova odgovaraju termičkom kvaru sa temperaturom kvara ispod 150 °C.

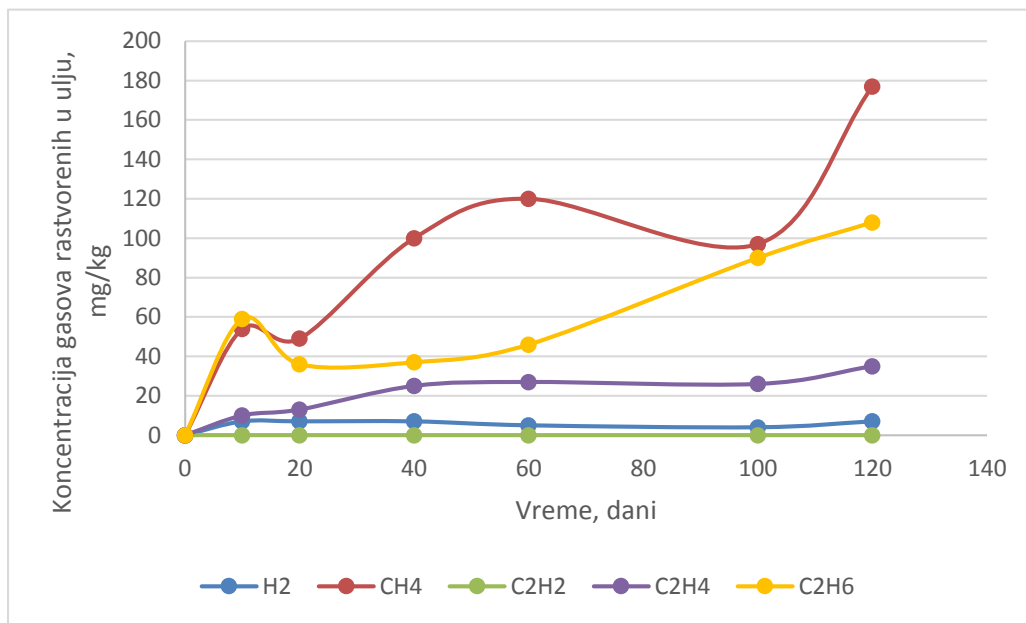
Poredeći mineralno inhibirano i mineralno neinhibirano ulje, može se primetiti da je koncentracija metana i etana bila značajno veća u slučaju neinhibiranog ulja i to u eksperimentu sa celuloznom izolacijom (*II exp*), *Slike 4.2.8 – 4.2.11.* U eksperimentu bez celulozne izolacije koncentracija ovih gasova je bila malo viša u slučaju inhibiranog mineralnog ulja. Koncentracija vodonika i etilena je u svim slučajevim bila niska, dok acetilen nije detektovan.



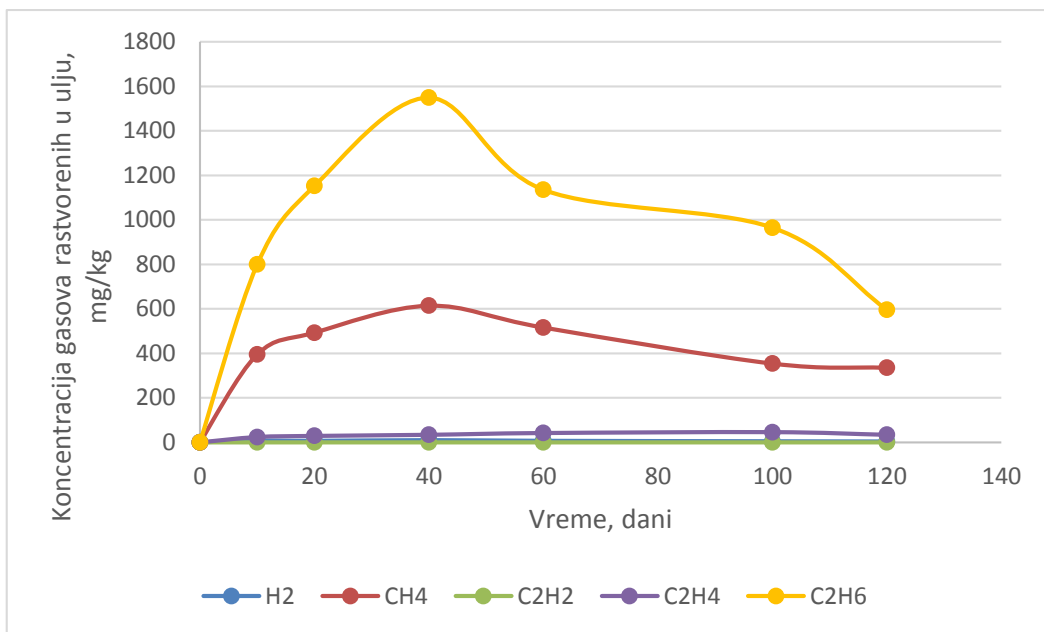
Slika 4.2.8 Promena sadržaja ugljovodoničnih gasova u ulju VKMin tokom starenja, *I exp*



Slika 4.2.9 Promena sadržaja ugljovodoničnih gasova u ulju VKMin tokom starenja, *II exp*

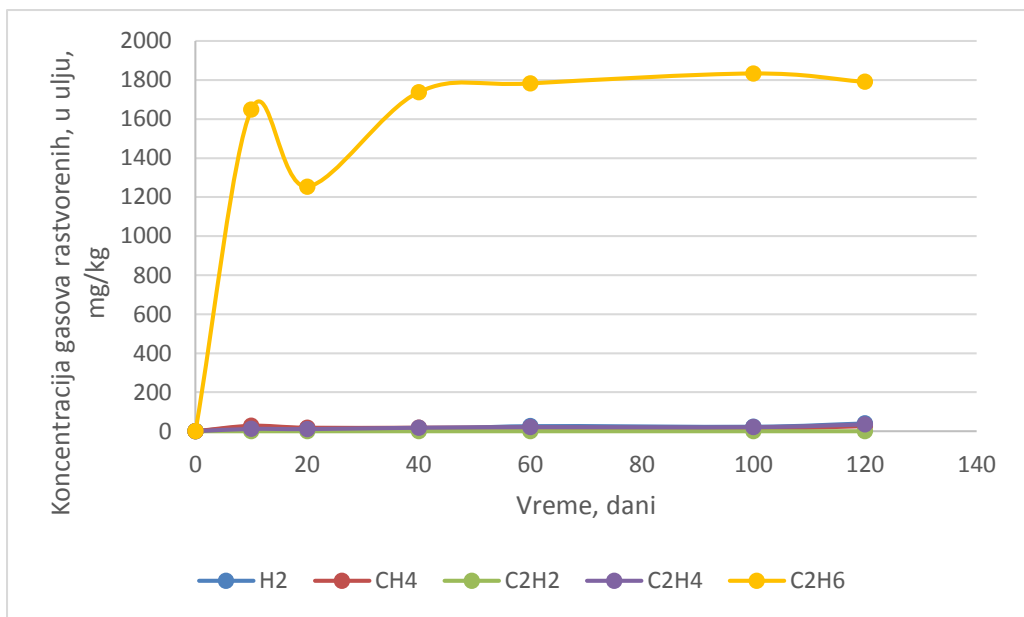


Slika 4.2.10 Promena sadržaja ugljovodoničnih gasova u ulju STMin tokom starenja, *I exp*

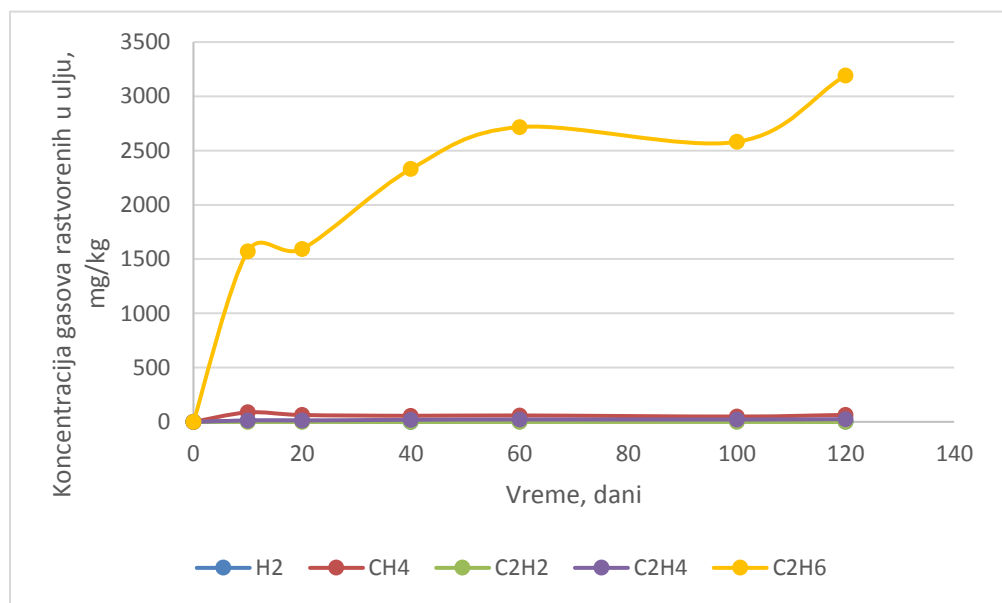


Slika 4.2.11 Promena sadržaja ugljovodoničnih gasova u ulju STMin tokom starenja, *II exp*

U slučaju biljnog ulja u oba eksperimenta je generisana visoka koncentracija etana u ulju tokom celokupnog trajanja testa ubrzanog starenja, dok je koncentracija ostalih gasova u ulju ostala prilično niska. Koncentracija etana je kod biljnog ulja u oba eksperimenta bila značajno viša u odnosu na koncentraciju etana u mineralnim uljima. Osim toga, u sistemu sa celuloznom izolacijom, koncentracija etana je bila skoro duplo veća nego u sistemu bez celulozne izolacije (*Slike 4.2.12 i 4.2.13*). Ova zapažanja se slažu sa navodima u literaturi gde je etan prepoznat kao gas karakterističan za degradaciju određenih tipova biljnih ulja u nižem temperaturnom opsegu [101][102].

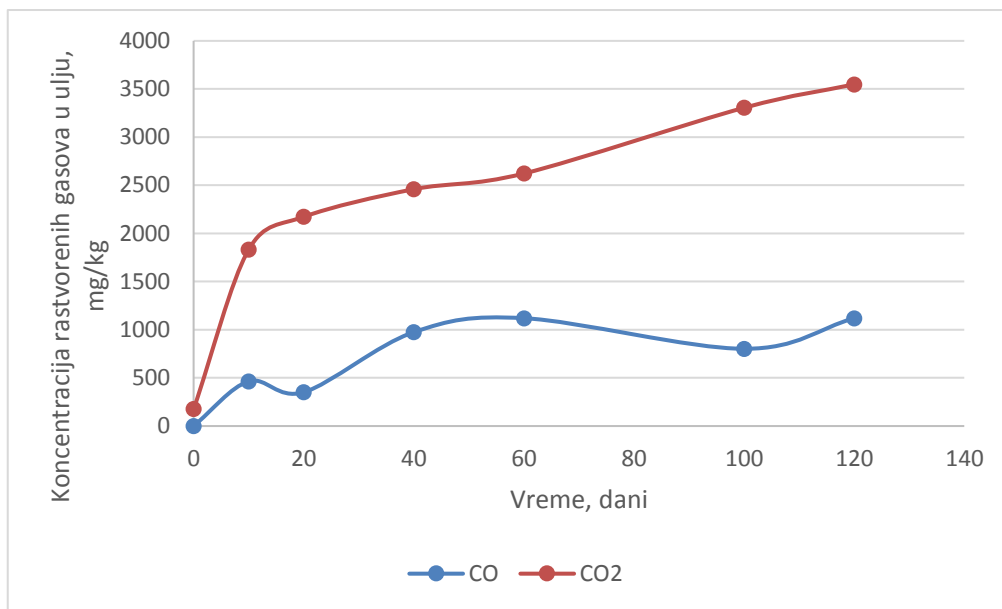


Slika 4.2.12 Promena sadržaja ugljovodoničnih gasova u biljnom ulju tokom starenja, *I exp*

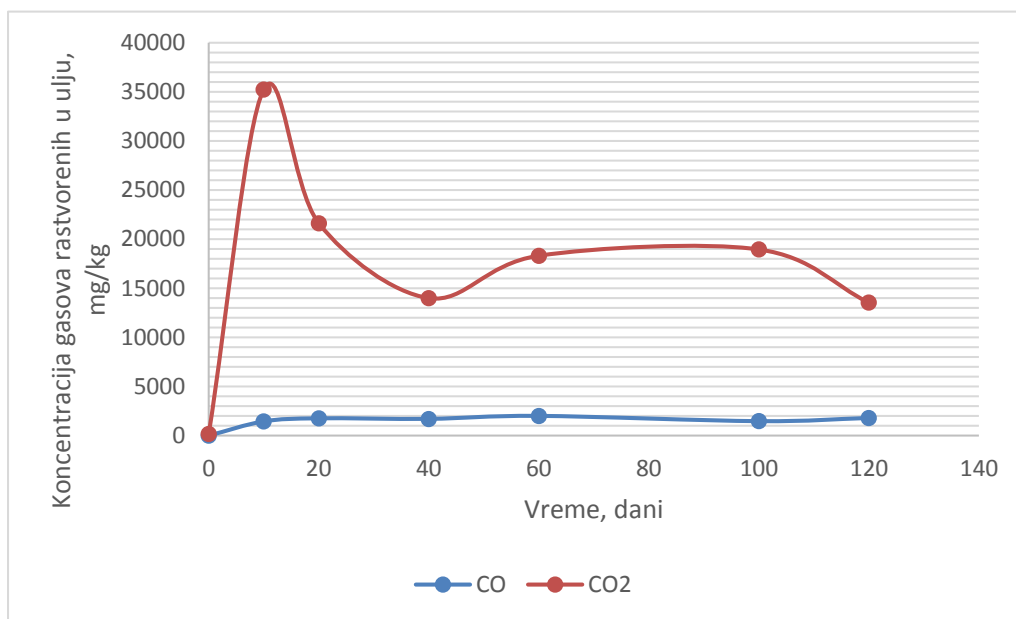


Slika 4.2.13. Promena sadržaja ugljovodoničnih gasova u biljnom ulju tokom starenja, *II exp*

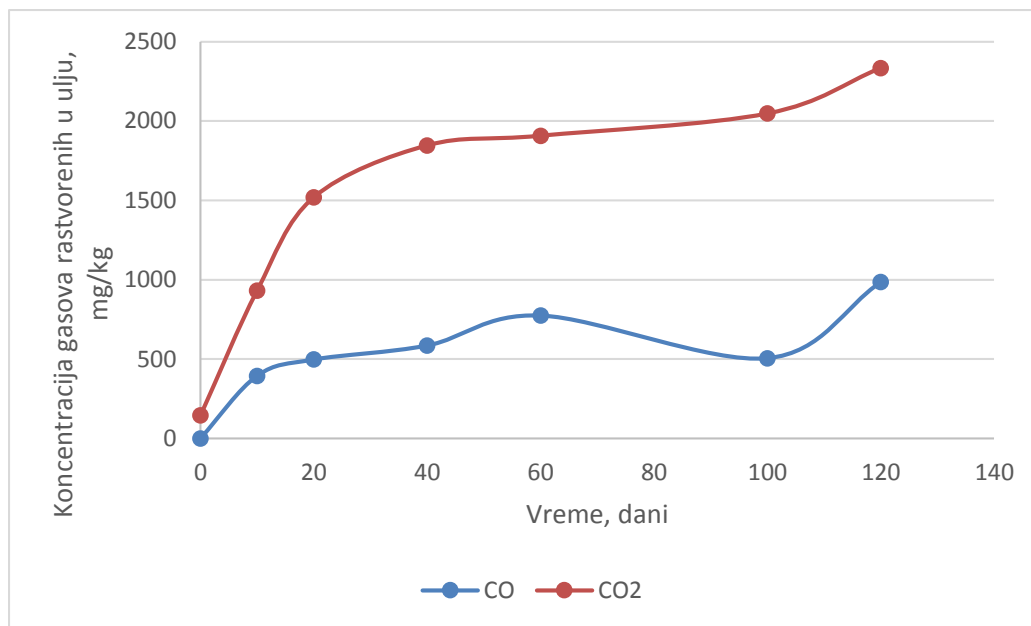
Sadržaj ugljen dioksida i ugljen monoksida u ulju za I exp i II exp i sva tri ulja prikazan je na *Slikama 4.2.14 - 4.2.19*. Može se primetiti da je sadržaj ugljen dioksida tokom celog perioda trajanja eksperimenta starenja bio i do deset puta veći u sistemu sa celuloznom izolacijom u odnosu na sistem bez celulozne izolacije i to kod sva tri ulja.



Slika 4.2.14. Promena sadržaja oksida ugljenika u ulju VKMin tokom starenja, *I exp*

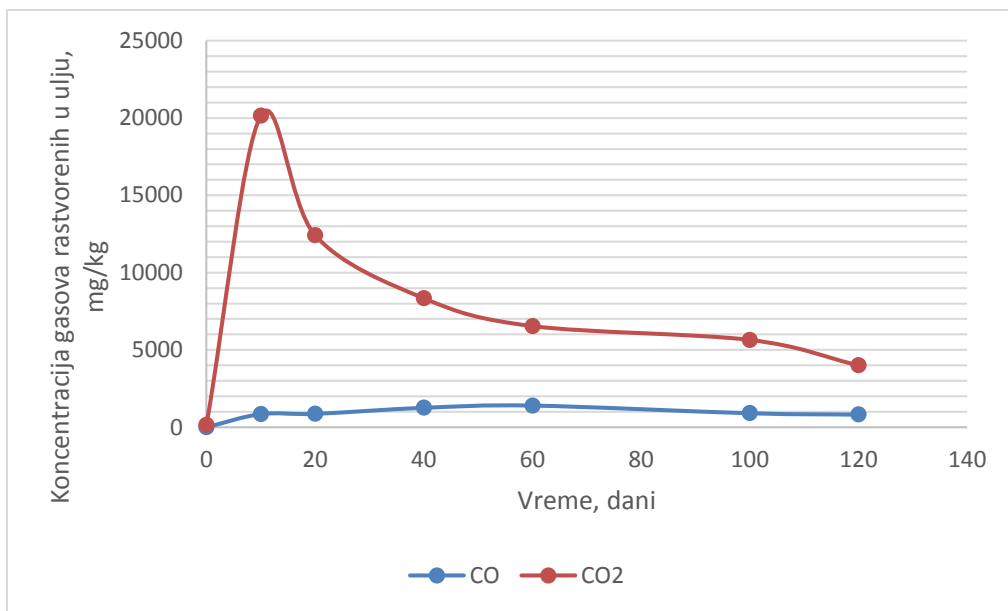


Slika 4.2.15. Promena sadržaja oksida ugljenika u ulju VKMin tokom starenja, *II exp*

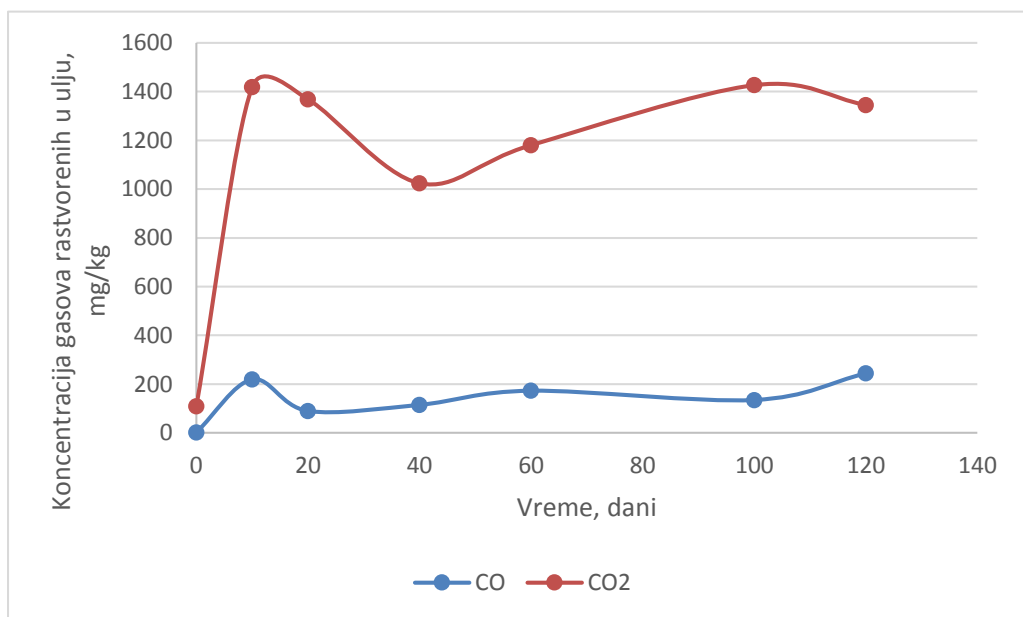


Slika 4.2.16. Promena sadržaja oksida ugljenika u ulju STMin tokom starenja, *I exp*

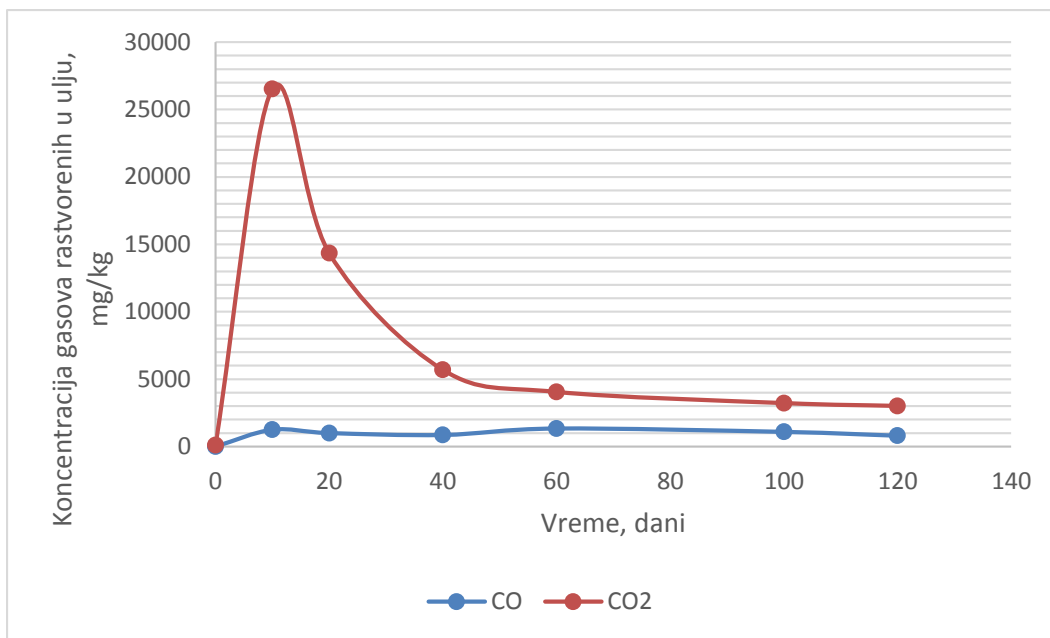
Posmatranjem prikazanih rezultata uočava se da je u sistemu bez celulozne izolacije bio prisutan relativno kontinualan rast koncentracije ugljen dioksida u ulju tokom celokupnog trajanja eksperimenta, dok je u *exp II* prisutan nagli porast koncentracije ugljen dioksida u ulju nakon prve periode testa veštačkog starenja, a zatim dolazi do značajnog smanjenja i zaravnjenja njegove koncentracije. Zaravnjenje koncentracije ugljen dioksida se može objasniti pretpostavljenim mehanizmom degradacije celuloze prema kom se degradacija amorfnih struktura odigrava brže, a kristalnih značajno sporije (poglavlje 1.3.2). Nakon početne intenzivne degradacije celuloze (do vrednosti stepena polimerizacije od oko 400), brzina degradacije papira se značajno usporava, a samim tim dolazi i do smanjene proizvodnje ugljen dioksida. Nagli pad koncentracije ugljen dioksida u ulju je najverovatnije posledica apsorpcije ovog gasa u papiru. Sličan obrazac promene koncentracije se vidi i prilikom praćenja koncentracije 2-FAL u ulju, jedinjenja koje nastaje kao posledica degradacije papira, što će biti prikazano u narednom poglavlju. Kada je u pitanju razlika u sadržaju ugljen monoksida u ulju kod dva eksperimenta, kod mineralnog inhibiranog i neinhibiranog ulja, koncentracija je bila oko dva puta veća u *exp II* u odnosu na *exp I*, dok je u slučaju biljnog ulja bila oko deset puta manja u slučaju *exp I*. Koncentracija ugljen monoksida u biljnom ulju u slučaju *exp II* je bila slična kao u slučaju mineralnog ulja, dok je u *exp I*, koncentracija ugljen monoksida bila čak pet puta manja.



Slika 4.2.17. Promena sadržaja oksida ugljenika u ulju STMin tokom starenja, *II exp*



Slika 4.2.18. Promena sadržaja oksida ugljenika u biljnom ulju tokom starenja, *I exp*

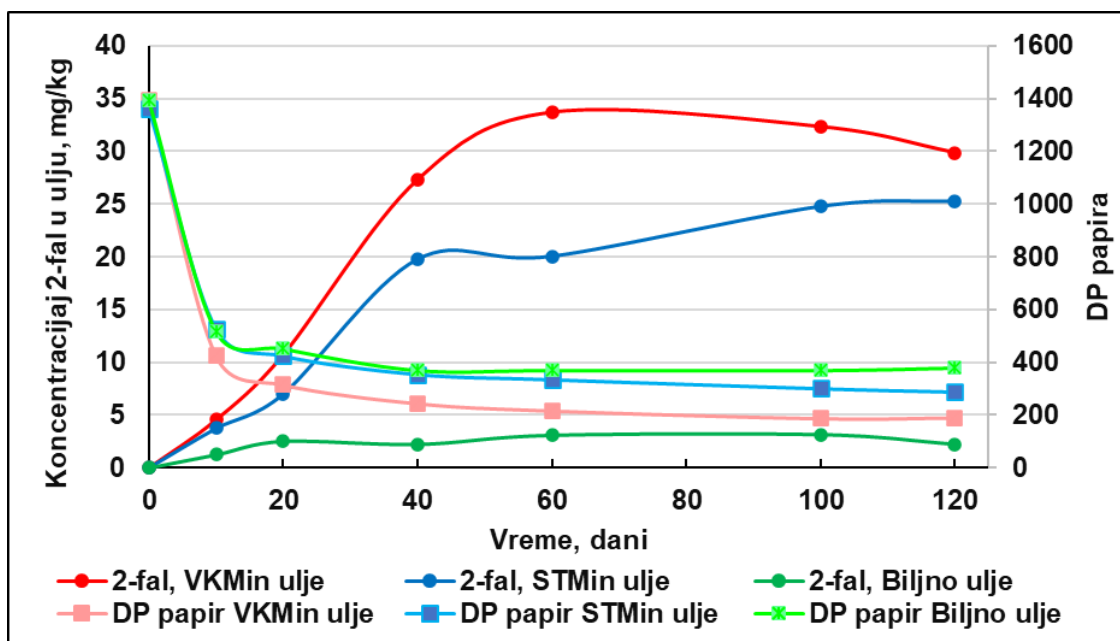


Slika 4.2.19. Promena sadržaja oksida ugljenika u biljnom ulju tokom starenja, *II exp*

4.2.4. Kinetika starenja i markeri degradacije papirne izolacije

U poglavlju 1.4.2 opisano je pet derivata furana koji se rastvaraju u izolacionom ulju prilikom degradacije celulozne izolacije ET i koji kao takvi predstavljaju specifične markere degradacije papirne izolacije, pri čemu je najdominantniji derivat 2-FAL, odnosno nastaje u najvećoj koncentraciji. Na *Slici 4.2.20.* prikazana je kinetika degradacije papirne izolacije tokom testa ubrzanog starenja u tri različita ulja, uz porast sadržaja 2-FAL u ulju. Kao mera degradacije papirne izolacije prikazana je vrednost stepena polimerizacije papira (DP), a kao marker degradacije papira koji se tokom rada realnih transformatora tokom pogona prati u ulju prikazan je sadržaj 2-furfurala (2-FAL) u ulju. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da je degradacija papira bila nešto sporija u sistemu sa biljnim uljem u odnosu na sistem sa mineralnim uljem. Takođe, u biljnom ulju su izmerene i značajno niže koncentracije 2-FAL (i do deset puta niže) u odnosu na mineralna ulja, za sličnu vrednost stepena polimerizacije papira. Niže koncentracije 2-FAL u biljnom ulju u odnosu na koncentracije izmerene u mineralnim uljima primećene su i u drugim radovima [89], na osnovu čega bi se mogao izvesti zaključak da derivat 2-FAL nije dovoljno dobar pokazatelj degradacije papira u biljnom ulju, kao u slučaju mineralnih ulja. Na *Slikama 4.2.21 – 4.2.24.* prikazane su koncentracije preostalih derivata furana u mineralnim uljima i u biljnom ulju

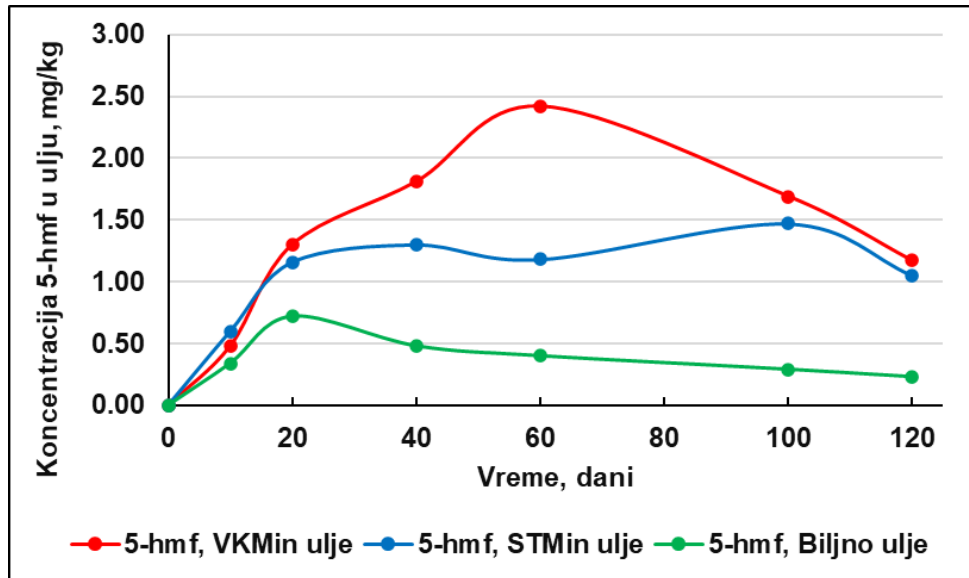
tokom testa ubrzanog starenja sistema ulje/bakar/celuloza. Izmerene vrednosti sadržaja derivata furana u sistemu bez celuloze bile su veoma niske (do 0,08 mg/kg) i nisu od značaja.



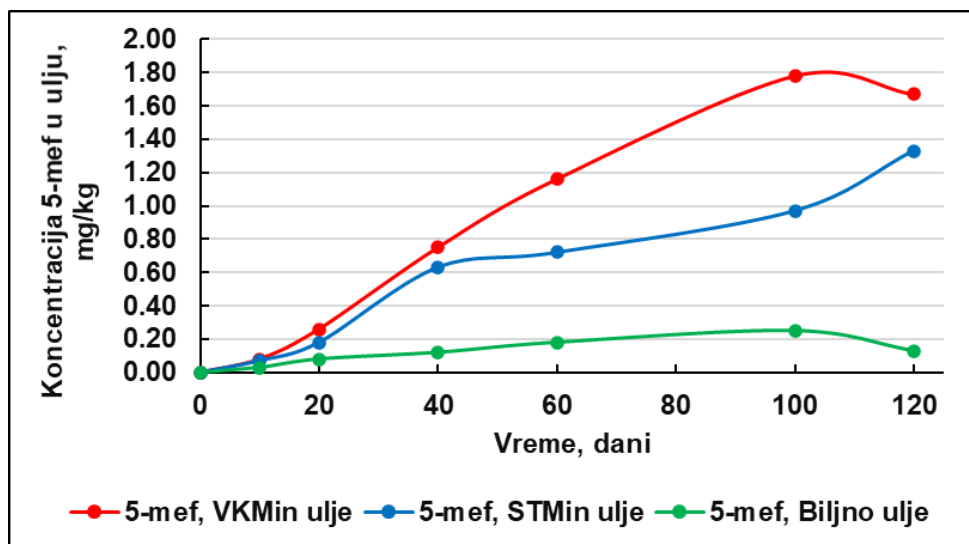
Slika 4.2.20. Porast koncentracije 2-FAL u mineralnim uljima i u biljnom ulju i pad stepena polimerizacije papira tokom eksperimenta ubrzanog starenja u sistemu ulje/bakar/celuloza[95]

Nakon derivata 2-FAL, koji prema podacima iz literature [1][57] ukazuje na opšte pregrevanje, odnosno termičku degradaciju papira, najveću koncentraciju i porast tokom eksperimenta u sistemu sa mineralnim uljima imao je derivat 5-HMF koji ukazuje na degradaciju nastalu kao posledica oksidacije, zatim 5-MEF koji ukazuje na termičku degradaciju papira pri visokim temperaturama, a zatim 2-FOL koji ukazuje na degradaciju po mehanizmu hidrolize i 2-ACF čiji uzrok nastanka još uvek nije precizno definisan. Koncentracije svih derivata furana su bile veće u slučaju mineralnog inhibiranog ulja nego u slučaju mineralnog neinhibiranog ulja, što je u koorelaciji i sa vrednostima DP papira. (Slika 4.2.20). Što se biljnog ulja tiče, posle derivata 2-FAL, najveća koncentracija je izmerena u slučaju 2-FOL, ali samo na početku eksperimenta starenja kada postoji skok, a zatim koncentracija naglo pada i ostaje prilično niska sve do kraja eksperimenta starenja. Sadržaj 2-FOL u uljima praktično ima isti trend kao i sadržaj vode u ulju, i izraženiji je kod biljnog ulja gde je sadržaj vode veći. Ova zapažanja se slažu sa navodima da 2-FOL nastaje kao

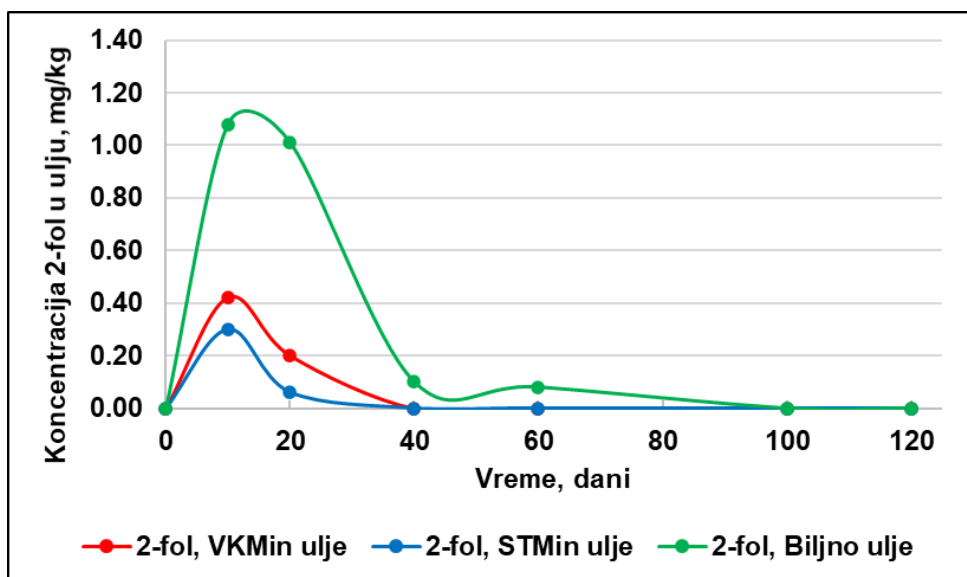
posledica degradacije papira po mehanizmu hidrolize. Koncentracije ostalih derivata furana u biljnom ulju su značajno niže u odnosu na koncentracije izmerene u slučaju mineralnih ulja. Imajući u vidu slične vrednosti stepena polimerizacije papira, pretpostavlja se da su razilke u sadržaju 2-FAL i ostalih derivata furana između mineralnog i biljnog ulja posledica slabije difuzije derivata furana iz papira u biljno u odnosu na mineralno ulje.



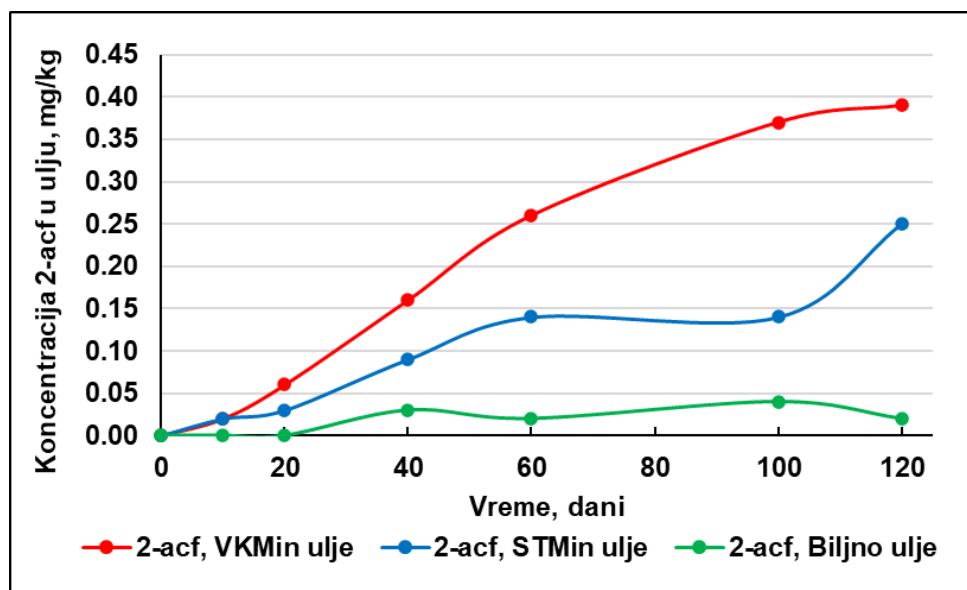
Slika 4.2.21 Porast koncentracije 2-HMF u mineralnim uljima i u biljnom ulju tokom eksperimenta ubrzanog starenja u sistemu ulje/bakar/celuloza



Slika 4.2.22 Porast koncentracije 2-MEF u mineralnim uljima i u biljnom ulju tokom eksperimenta ubrzanog starenja u sistemu ulje/bakar/celuloza



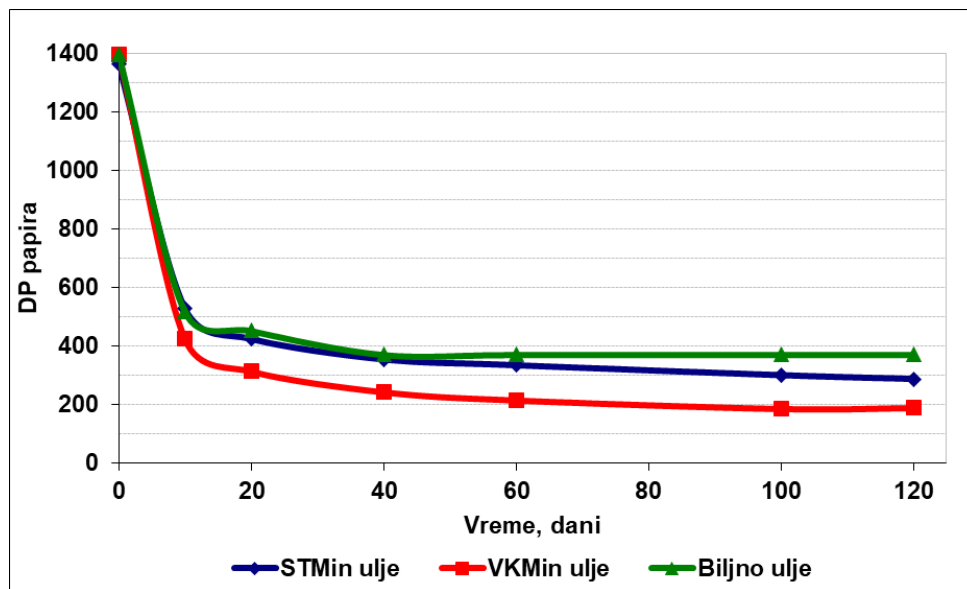
Slika 4.2.23 Porast koncentracije 2-FOL u mineralnim uljima i u biljnom ulju tokom eksperimenta ubrzanog starenja u sistemu ulje/bakar/celuloza



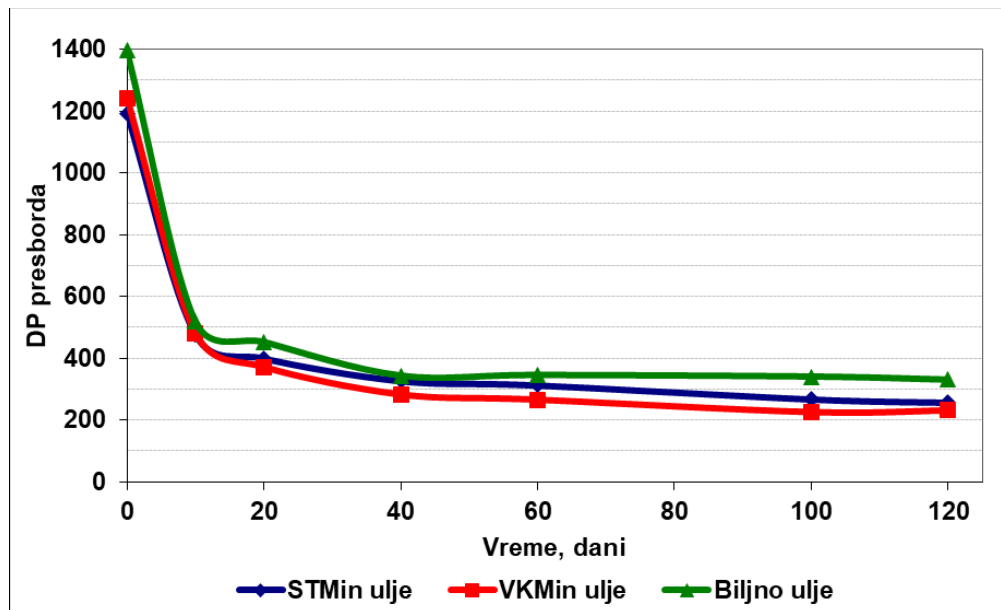
Slika 4.2.24 Porast koncentracije 2-ACF u mineralnim uljima i u biljnom ulju tokom eksperimenta ubrzanog starenja u sistemu ulje/bakar/celuloza

Na *Slikama 4.2.25 i 4.2.26* prikazana je promena stepena polimerizacije papira i presborda tokom eksperimenta ubrzanog starenja. Može se primetiti da su papir i presbord kod oba mineralna ulja dostigli kraj životnog veka nakon 120 dana starenja na 140 °C (*Slike*

4.2.25 i 4.2.26). Iako su postojale razlike u kvalitetu ulja i prisustvu inhibitora u ulju, DP vrednosti na kraju eksperimenta bile su slične.



Slika 4.2.25 Promena stepena polimerizacije papira tokom testa ubrzanog starenja



Slika 4.2.26 Promena stepena polimerizacije presborda tokom testa ubrzanog starenja

Brzina degradacije papirne izolacije - Arrhenius-ov termo-kinetički model

Uzimajući da je brzina degradacije papirne izolacije određena Arrhenius-ovim termo-kinetičkim modelom (jednačina 1.4.1) i da vrednost energije aktivacije za normalan Kraft papir iznosi 111 kJ/mol, izračunate su pojedinačne vrednosti konstante A za papir u sva tri ulja i sve vremenske intervale i date u *Tabeli 4.2.1*. Prilikom proračuna uzeto je da je početna vrednost DP konkretnog vremenskog intervala jednaka krajnjoj vrednosti prethodnog intervala.

Tabeli 4.2.1. Pojedinačni faktori A za svaki interval degradacije IS

Izolaciono ulje	VKMin ulje		STMin ulje		Biljno ulje	
	A	DP	A	DP	A	DP
Početno	/	1396	/	1364	/	1396
10	$7.36 * 10^8$	425	$5.22 * 10^8$	528	$5.46 * 10^8$	518
20	$3.79 * 10^8$	314	$2.09 * 10^8$	424	$1.27 * 10^8$	452
40	$2.07 * 10^8$	243	$1.35 * 10^8$	354	$1.10 * 10^8$	370
60	$1.21 * 10^8$	215	$0.079 * 10^8$	334	/	370
100	$8.16 * 10^8$	186	$0.37 * 10^8$	300	/	370
120	/	189	$0.36 * 10^8$	287	/	370

U cilju poređenja brzine starenja različitih ulja, izračunat je ukupni životni vek papira na temperaturi od 140 °C, uzimajući za početnu vrednost DP papira 1300, a za krajnju DP vrednost 200, kao i odgovarajuće vrednosti konstante A, *Tabela 4.2.2*. Konstante A izračunate su kao srednje vrednosti pojedinačnih konstanti datih u *Tabeli 4.2.1*. Prilikom proračuna uzeto je da je vrednost faktora A tokom konkretnog perioda bila konstanta.

Tabela 4.2.2. Izračunate vrednosti predeksponencijalnog faktora A i ukupnog životnog veka papira ($E_A = 111 \text{ kJ / mol}$, kao izračunat za odgovarajuće konstante A Temp=140 °C, $DP_0 = 1300$, $DP_{End} = 200$)

Izolaciono ulje	Predeksponencijalni faktor, A	Ukupni životni vek, dani
Mineralno inhibirano ulje, VKMin	$1.72 * 10^8$	112
Mineralno neinhibirano ulje, STMin	$1.03 * 10^8$	187
Biljno inhibirano ulje	$0.74 * 10^8$	259

Prikazani rezultati pokazuju da se na temperaturi od 140 °C u uslovima niskog sadržaja kiseonika u ulju i niske ovlaženosti IS, degradacija papira u mineralnom neinhibiranom ulja odvijala 1,4 puta brže nego u biljnom ulju, dok se u mineralnom inhibiranom ulju odvijala oko 2,3 puta brže nego u biljnom ulju.

4.3. REZULTATI EKSPERIMENT III – Ubrzano starenje dva eksperimentalna energetska transformatora punjena mineralnim uljem i odgovarajućih laboratorijskih modela

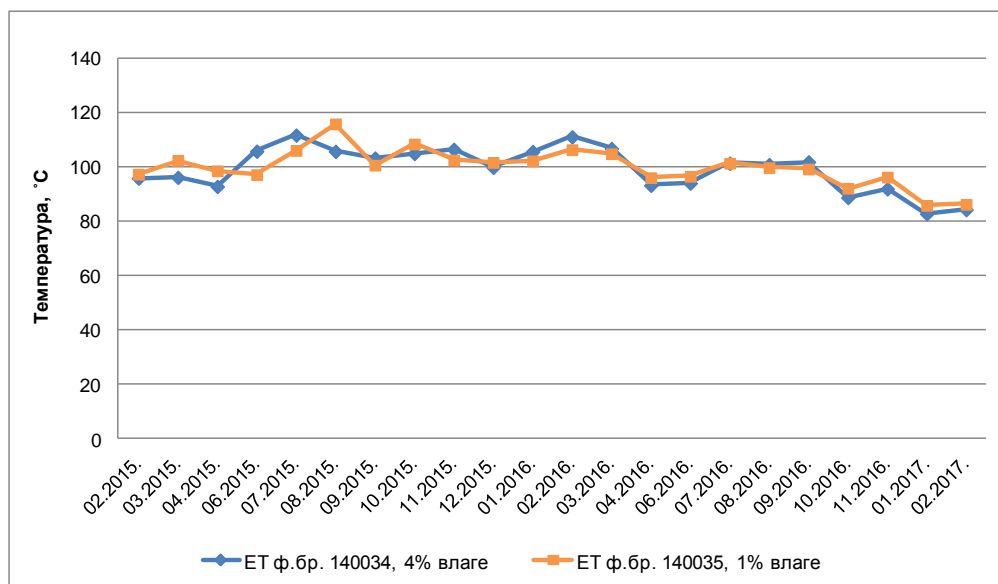
Eksperimentalna istraživanja označena kao Eksperiment III izvršena su u okviru studije izrađene za JP EPS pod nazivom „Istraživanje fenomena degradacije izolacionog sistema i procena životnog veka, eksperimentalni transformator u TENT B“. U okviru pomenute studije izvršen je veći broj električnih ispitivanja eksperimentalnih transformatora i hemijskih ispitivanja izolacionog ulja i papira. U ovoj disertaciji prikazani su rezultati samo onih ispitivanja koja su bila od interesa vezano za izučavanje fenomena degradacije izolacionog sistema energetskih transformatora i unapređenje metode za procenu ovlaženosti celulozne izolacije energetskih transformatora tokom eksploatacije, budući da prisustvo vode značajno uvećava brzinu degradacije celulozne izolacije ET. Izučavanje fenomena degradacije izolacionog sistema ET je od izuzetne važnosti kada je u pitanju eksploatacija ET i njihovo održavanje, što kao krajnji cilj ima produženje životnog veka transformatora. S obzirom da ulaganje u kupovinu novih energetskih transformatora predstavlja značajnu investiciju,

produženjem životnog veka postojećih ET može se izvršiti bolja raspodela finansijskih sredstava. U ovoj disertaciji, prikazani su rezultati sledećih ispitivanja izolacionog sistema eksperimentalnih ET i laboratorijskih modela:

- Rezultati gasnohromatografske analize ulja za eskperimentalne ET. S obzirom da je kod laboratorijskih modeli tokom eskperimenta redovno vršeno barbotiranje ulja vazduhom u cilju simulacije uslova karakterističnih za eksploataciju energetskih transformatora sa konzervatorom, dolazilo je do gubitka/isparavanja gasova rastvorenih u ulju, te ovi rezultati nisu bili od koristi.
- Rezultati ispitivanja sadržaja vode u ulju papiru i presbordu direktnim merenjima pomoću Karl Fischer titracije
- Sadržaj derivata furana u ulju kod eksperimentalnih ET i laboratorijskih modela
- Step en polimerizacije papira i presborda (DP) kod oba ET i oba laboratorijska modela
- Procena sadržaja vode u papirnoj izolaciji na osnovu sadržaja vode u ulju pomoću Karl Fischer titracije i ravnotežnih dijagrama Perrier-Lukic formiranih u okviru eksperimenta I, poglavlje 4.1
- Procena sadržaja vode u čvrstoj izolaciji eksperimentalnih ET pomoću električnih merenja (metodom FDS)
- Sadržaj kiselina u ulju (neutralizacioni broj).

4.3.1. Rezultati ispitivanja ulja transformatora i laboratorijskih modela

Tokom trajanja eksperimenta ubrzanog starenja eksperimentalnih transformatora, temperature ambijenta su značajno oscilovale, a usled toga i hot spot temperature namotaja. Na *Slici 4.3.1.* prikazane su srednje mesečne hot spot temperature namotaja za oba ET.



Slika 4.3.1 Pregled srednjih mesečnih *hot-spot* temperatura eksperimentalnih ET tokom ogleda starenja

Veštačko starenje laboratorijskih modela vršeno je u erlenmajerima u peći, na konstantnoj temperaturi od 105 °C. S obzirom da je starenje laboratorijskih modela započeto godinu dana nakon što je započeto starenje eksperimentalnih transformatora, temperatura starenja laboratorijskih modela je izabrana kao prosečna *hot-spot* temperatura oba ET.

Rezultati fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja pokazali su da je ulje umereno ostarelo tokom starenja u oba transformatora i oba laboratorijska modela. Sadržaj kiselina u ulju na kraju eksperimenta veštačkog starenja bio je oko 0,05 – 0,07 mgKOH/g ulja. Relativno niske vrednosti sadržaja kiselina u ulju bile su očekivane, s obzirom da su temperature na kojima je vršeno veštačko starenje bile umerene i da je ulje bilo inhibirano inhibitorom oksidacije, DBPC.

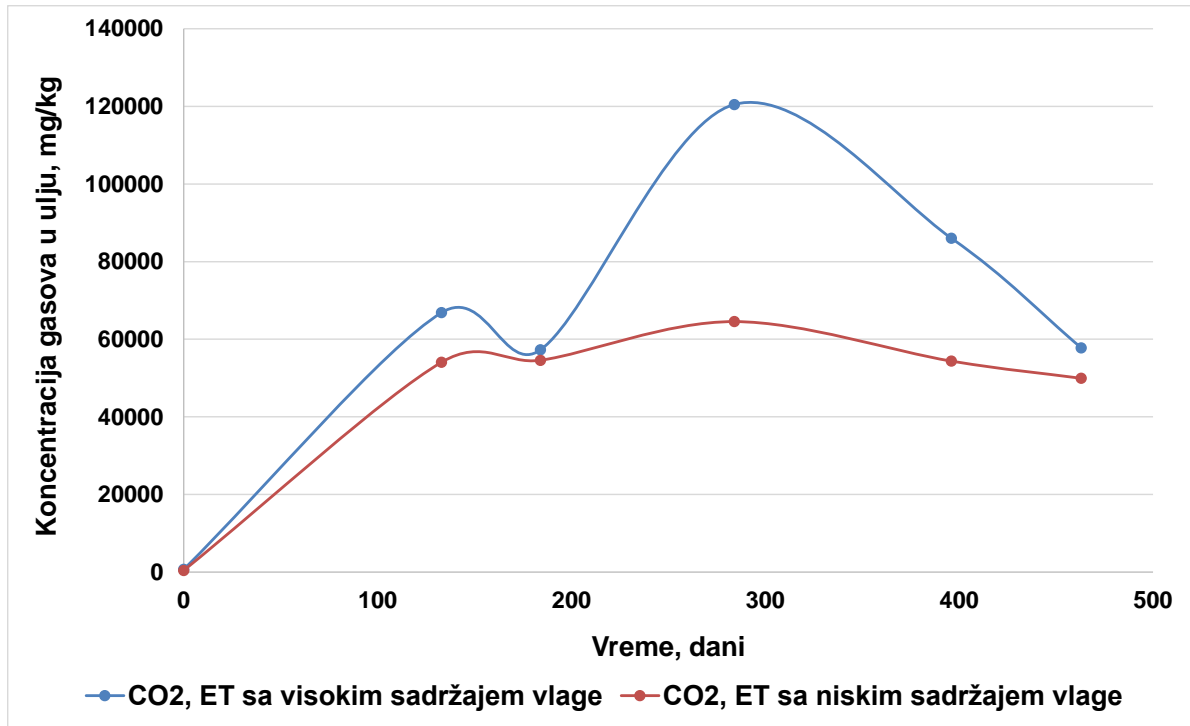
Rezultati gasnohromatografske analize ulja za eksperimentalne transformatore prikazani su na *Slikama 4.3.2 – 4.3.4*. Sadržaj kiseonika u ulju eksperimentalnih transformatora je bio nizak (<4000 mg/kg), dok je kod laboratorijskih modela bio umeren do visok (14000 mg/kg). Nizak sadržaj kiseonika u ulju eksperimentalnih transformatora najverovatnije je posledica utroška kiseonika usled intenzivnog procesa oksidacije na visokim temperaturama i nemogućnosti nadoknade kiseonika iz okoline odgovarajućom brzinom. Potpuna nadoknada kiseonika iz vazduha apsorpcijom preko konzervatora, dešavala

se na nižim temperaturama nakon isključenja transformatora radi uzimanja uzoraka papirne izolacije. Ulje je kod eksperimentalnih transformatora uzorkovano odmah nakon isključenja transformatora, praktično na radnoj temperaturi ulja, a zatim zatvorenim sistemom pretakano u prihvatne sudove zatvorene konstrukcije.

Kod oba ET, primećena je visoka koncentracija ugljen dioksida, CO₂, u ulju (*Slika 4.3.2*), što je uz odnos koncentracija ugljenikovih oksida, CO₂/CO > 20 ukazivalo na intenzivnu degradaciju celulozne izolacije prema standardu za interpretaciju rezultata gasnrohromatografskih ispitivanja ulja, IEC 60599 [42]. Kod transformatora sa visokim sadržajem vode u izolaciji, uočena je visoka koncentracija vodonika, H₂, u ulju koja je rasla tokom celokupnog perioda trajanja eksperimenta starenja (*Slika 4.3.4*). Ovo je posledica povišenog sadržaja vode u izolacionom sistemu ET. Korelacija visokog sadržaja vode i vodonika je poznata u literaturi i primećena je u praksi tokom praćenja pogonskog stanja energetskih transformatora iz eksploatacije [43]. Ova pojava se objašnjava elektrolizom vode u prisustvu metala, pri čemu vodonik nastaje kao proizvod:

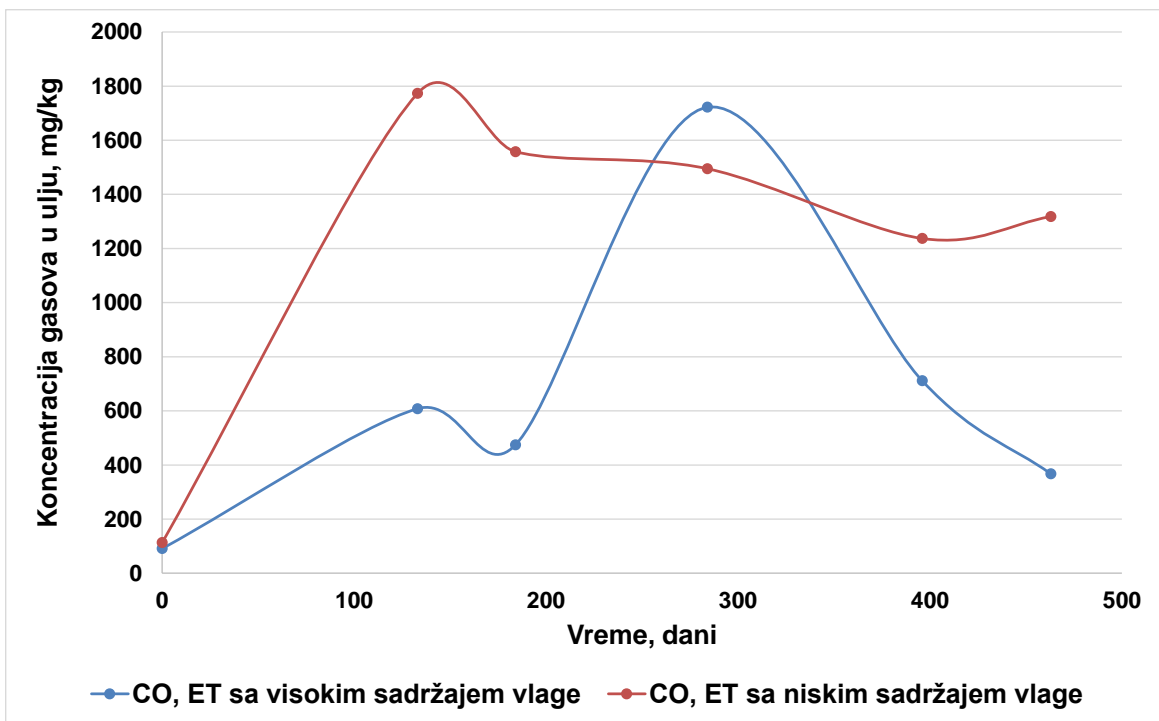


Povišen sadržaj vode u IS promovisao je i intenzivnu degradaciju celuloze, što je rezultiralo značajnim porastom koncentracije ugljen dioksida u ulju (*Slika 4.3.2*) i značajno većim apsolutnim koncentracijama ugljen dioksida u ulju kod ET sa visokim sadržajem vode u odnosu na ET sa niskim sadržajem vode. S druge strane, prisustvo vode nije značajno uticalo na porast koncentracije ugljen monoksida u ulju (*Slika 4.3.3*). U kasnijim fazama degradacije primećen je gubitak ugljendioksida (*Slika 4.3.2*).

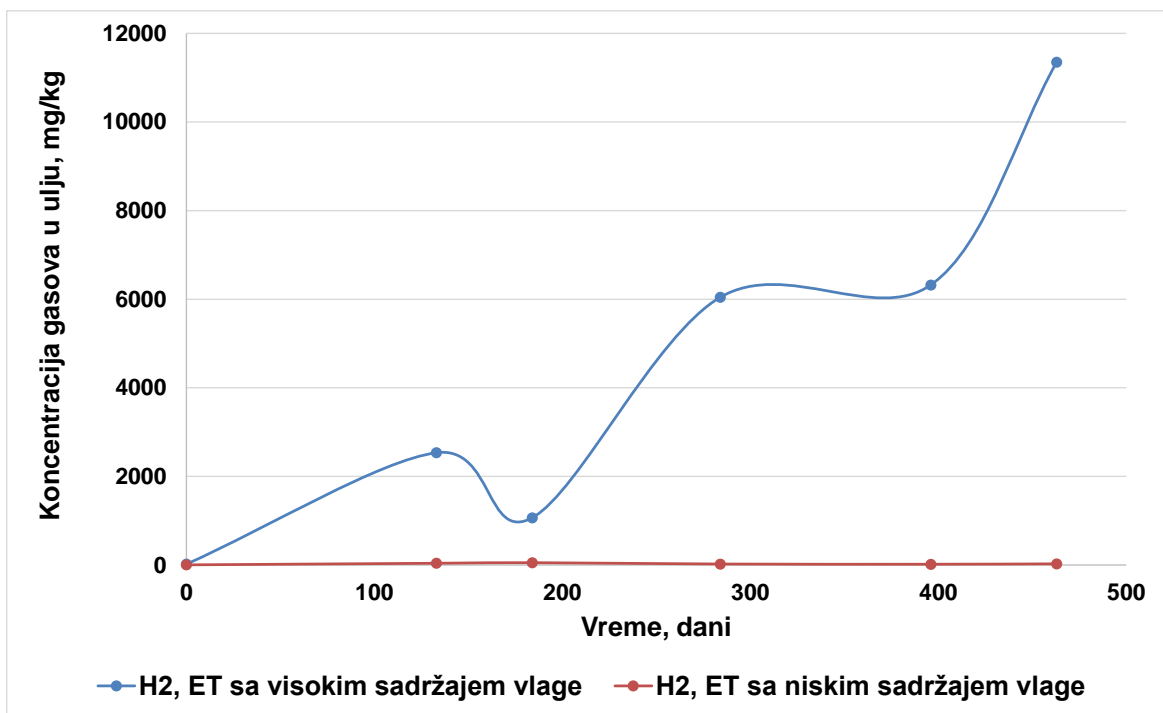


Slika 4.3.2 Promena koncentracije ugljen dioksida u ulju tokom eksperimenta starenja kod oba transformatora

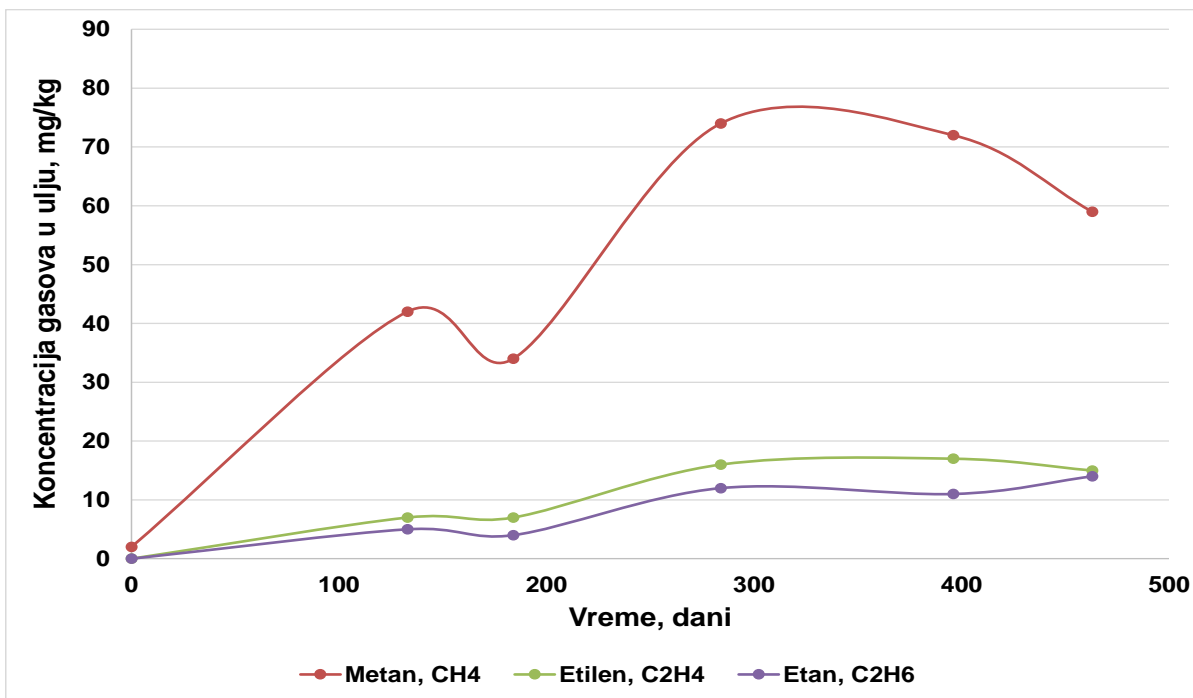
Na *Slikama 4.3.5 i 4.3.6* prikazane su koncentracije ugljovodoničnih gasova i vodonika kod ET sa niskim sadržajem vode, dok je kod ET sa visokim sadržajem vode, radi boljeg pregleda vodonik izostavljen zbog veoma visoke koncentracije i prikazan zasebno na *Slici 4.3.4*. U ulju oba transformatora ugljovodonični gasovi nisu detektovani u povišenoj koncentraciji koja bi ukazivala na prisustvo kvara u ET. Posle vodonika, među prisutnim gasovima najdominantniji su bili metan i etan, što je u skladu sa temperaturama njihovog nastanka (to su dominantni gasovi na temperaturama 100 - 200 °C)[42].



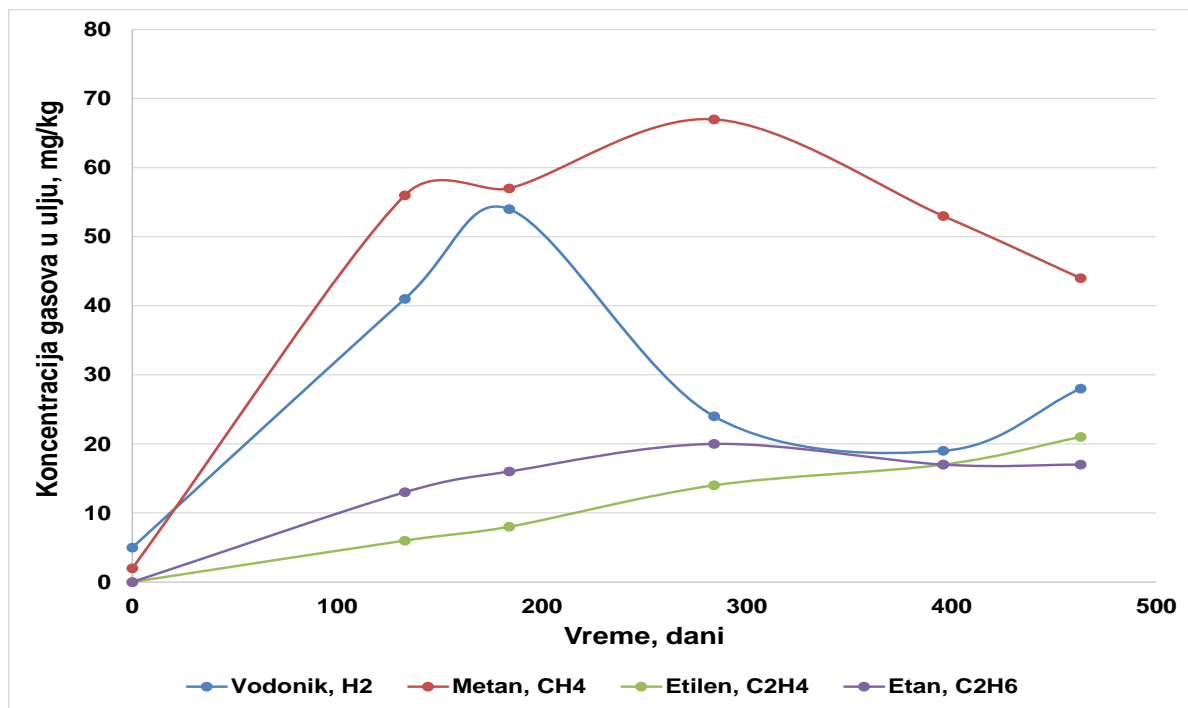
Slika 4.3.3 Promena koncentracije ugljen monoksida u ulju tokom eksperimenta starenja kod oba transformatora



Slika 4.3.4 Promena koncentracije vodonika u ulju tokom eksperimenta starenja kod oba transformatora



Slika 4.3.5 Promena koncentracije ugljovodoničnih gasova u ulju tokom eksperimenta starenja kod transformatora sa visokim sadržajem vode u izolaciji (4%)



Slika 4.3.6 Promena koncentracije vodonika i ugljovodoničnih gasova u ulju tokom eksperimenta starenja kod transformatora sa niskim sadržajem vode u izolaciji (1%)

Rezultati ispitivanja sadržaja vode u ulju i papirnoj izolaciji i rezultati procene sadržaja vode u izolacionom sistemu

Nakon svake periode starenja, papir je uzorkovan sa vrha, sredine i dna namotaja sa sve tri faze (prema šemi na *Slici 3.3.12*) za određivanje sadržaja vode u papiru metodom Karl Fischer titracije, kao i za merenje stepena polimerizacije papira. U cilju sprečavanja gubitaka vode iz izolacije isparavanjem, pre svakog uzorkovanja papira transformatori su bili isključeni dovoljno dugo da se potpuno ohlade. S druge strane vršena je procena sadržaja vode u papirnoj izolaciji eksperimentalnih transformatora indirektno, primenom FDS dielektrične metode i metodom baziranom na merenju sadržaja vode u ulju uz korišćenje ravnotežnih dijagrama formiranih u okviru Eksperimenta I ove disertacije (poglavlje 4.1). Rezultati ovih procena prikazani su u *Tabelama 4.3.1* i *4.3.2*, zajedno sa usrednjenim rezultatima direktnih merenja sadržaja vode u uzrocima papirne izolacije metodom Karl Fischer titracije.

Tabela 4.3.1 Procena sadržaja vode u papiru metodom ravnotežnih dijagrama i metodom FDS, i usrednjene vrednosti direktnih merenja uzoraka papira Karl Fischer titracijom ET sa 4% vlage

Period starenja, dani	Temperatura ulja	Izmerni sadržaj vode u ulju, mg/kg	Procenjeni sadržaj vode u papiru-ravnotežni dijagrami, %	Procenjeni sadržaj vode u papiru - FDS, %	Izmereni sadržaj vode u papiru - srednja vrednost, %
0	27	/	/	4,2	4,53
120	102	199	4,11	4,3	3,53
180	101	147	3,22	4,1	2,19
300	80	81	2,94	4,1	3,02
400	86	116	3,59	3,8	2,84
460	75	105	4,30	3,8	2,86

Tabela 4.3.2 Procena sadržaja vode u papiru metodom ravnotežnih dijagrama i metodom FDS, i usrednjene vrednosti direktnih merenja uzorka papira Karl Fischer titracijom za ET sa 1% vlage

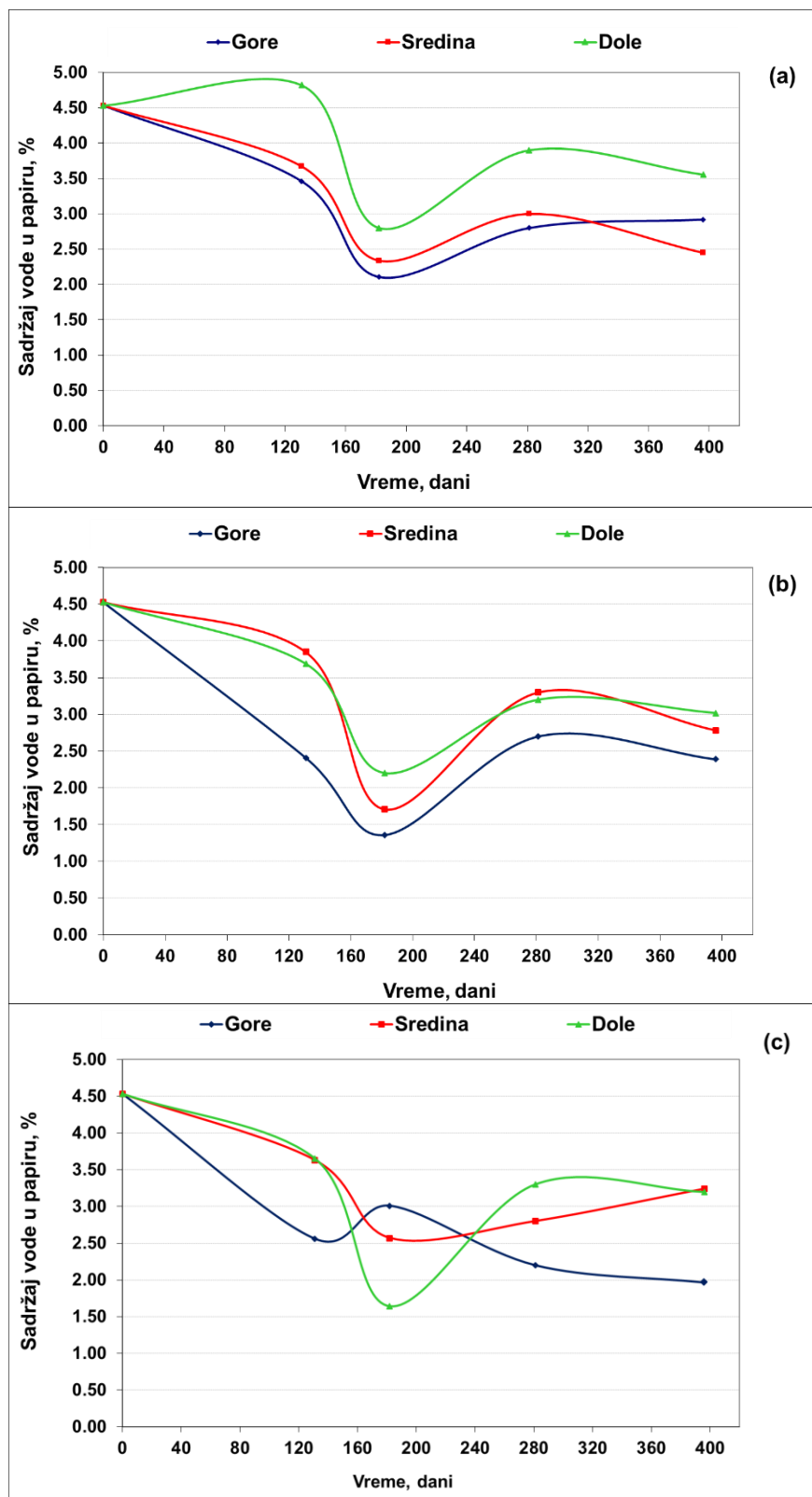
Period starenja, dani	Temperatura ulja	Izmerni sadržaj vode u ulju, mg/kg	Procenjeni sadržaj vode u papiru-ravnotežni dijagrami, %	Procenjeni sadržaj vode u papiru - FDS, %	Izmereni sadržaj vode u papiru - srednja vrednost, %
0	29	/	/	1,0	1,15
120	91	25	0,55	1,2	2,50
180	90	28	0,59	1,2	1,14
300	79	24	0,69	1,4	1,54
400	85	38	1,19	1,6	1,72
460	72	29	1,49	1,6	1,41

Analizom rezultata prikazanih u *Tabelama 4.3.1 i 4.3.2* može se primetiti da postoje značajne razlike između procenjenih vrednosti metodom FDS i metodom pomoću ravnotežnih dijagrama i vrednosti dobijenih direktnim merenjima. Ove razlike se mogu objasniti nehomogenom raspodelom vlage između debljih i tanjih elemenata čvrste izolacije eksperimentalnih transformatora, kao i difuzijom vode iz papira u ulje tokom starenja, sušenjem izolacije tokom starenja, kao i gubitkom vode na visokim radnim temperaturama. Ovo je potvrđeno i ispuštanjem vodene pare preko Buchholz releja u slučaju transformatora sa visokim početnim sadržajem vode. Pretpostavlja se da pri ekstremnim uslovima kao što su ovako visoke temperature, ne može da se uspostavi ravnotežna raspodela vode između ulja i čvrste izolacije. Ovo stanovište potvrđuje bolje slaganje procenjenih vrednosti sadržaja vode u papiru pomoću dve metode sa izmerenim sadržajem vode u poslednje dve periode starenja, kada je temperatura starenja bila nešto niža (perioda 400 i 460 dana, *Tabele 4.3.1 i 4.3.2*). Ovaj fenomen je naročito bio izražen kod eksperimentalnog transformatora sa visokim početnim sadržajem vode u IS. Na osnovu ovoga se može zaključiti da pri visokim radnim temperaturama transformatora primena ravnotežnih dijagrama za procenu sadržaja vlage u

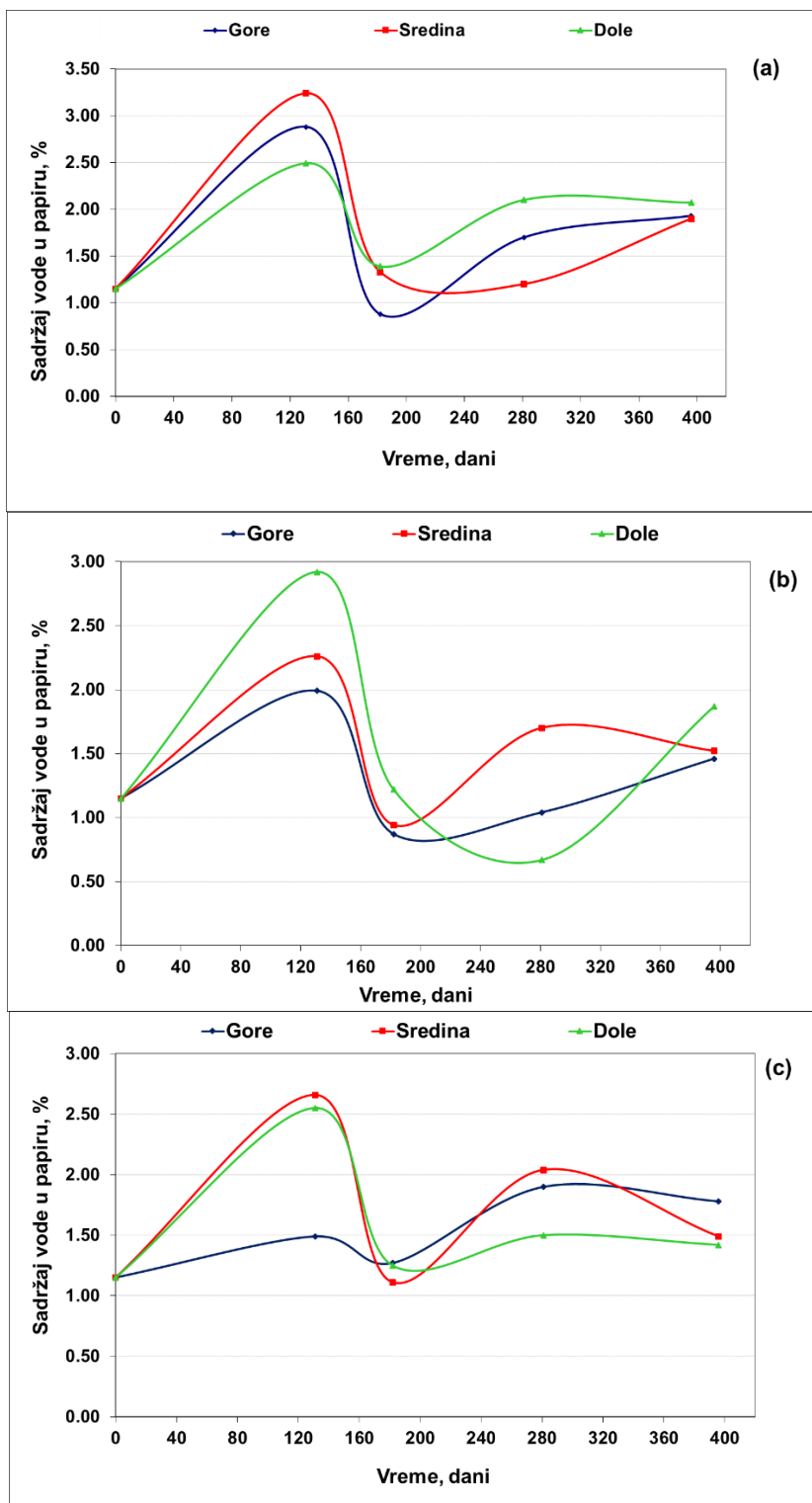
čvrstoj izolaciji možda nije dovoljno pouzdana. Osim toga, razlike u proceni sadržaja vode metodom FDS i metodom pomoću ravnotežnih dijagrama posledica su i činjenice da se pomoću ravnotežnih dijagrama procenjuje manje više srednja vrednost sadržaja vode u čvrstoj izolaciji, dok se metodom FDS procenjuje ukupan sadržaj vode u izolacionom sistemu između namotaja visokog i niskog napona. Razlike će naravno biti veće, ukoliko nije uspostavljen ravnotežni sadržaj vode između svih elemenata čvrste izolacije (debljih i tanjih struktura).

Rezultati ispitivanja sadržaja vode u papiru direktnim merenjima metodom Karl Fischer titracije pokazala su nehomogenu raspodelu vode po visini namotaja kod sve tri faze (*Slike 4.3.7a-c i 4.3.8a-c*) što je primećeno i od strane drugih autora [50][96][97][98]. Najveći sadržaj vode u izolaciji kod oba transformatora bio je u donjim zonama namotaja, a najniži u gornjim zonama sve tri faze. Ovo je posledica efekta isušivanja usled visokih temperatura, pri čemu su najviše temperature bile pri vrhu namotaja, a najniže pri dnu.

Na osnovu prikazanih rezultata (*Slike 4.3.7a,b,c i 4.3.8a,b,c*) može se zaključiti da je tokom eksperimenta starenja na visokoj temperaturi dolazilo do isušivanja celokupnog izolacionog sistema i to je naročito izraženo kod kasnijih perioda starenja (120 do 300 dana). Ovo je rezultiralo u lošijoj proceni sadržaja vode u čvrstoj izolaciji na osnovu ravnotežnih dijagrama i sadržaja vode u ulju. Sa druge strane, u transformatoru sa niskim sadržajem vode u IS direktnim merenjima je izmeren niži sadržaj vode, nego što je u transformatoru zaista bio prisutan. Određena količina vode je zaostala u debljim strukturama čvrste izolacije. Tokom ubrzanog starenja, voda je migrirala iz debljih struktura celulozne izolacije u ulje, a zatim je bivala apsorbovana od strane papira na namotaju nakon 120 dana (prvi maksimum na *Slikama 4.3.8 a,b,c*), zatim je nakon 180 dana sadržaj vode opao, da bi se stabilizovao nakon 400 dana na 1,5 %. Pri kraju eksperimenta starenja, voda je bila prilično homogeno raspodeljena u čvrstoj izolaciji. Procenjene vrednosti sadržaja vode metodom FDS i metodom ravnotežnih dijagrama slagale su se mnogo bolje sa izmerenim vrednostima.

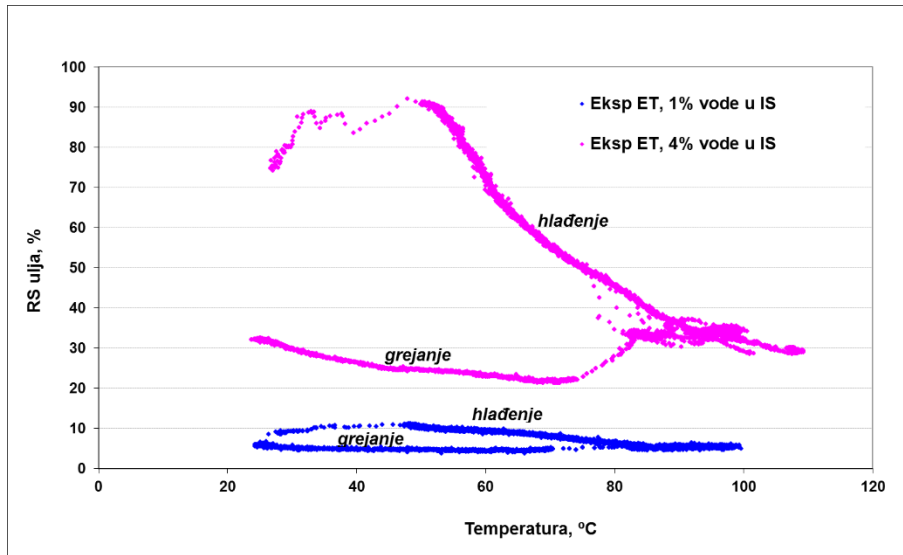


Slika 4.3.7. Raspodela vlage u papiru po visini VN namotaja tokom eksploatacije ET sa visokim sadržajem vlage u IS:(a) faza A, (b) faza B, (c) faza C

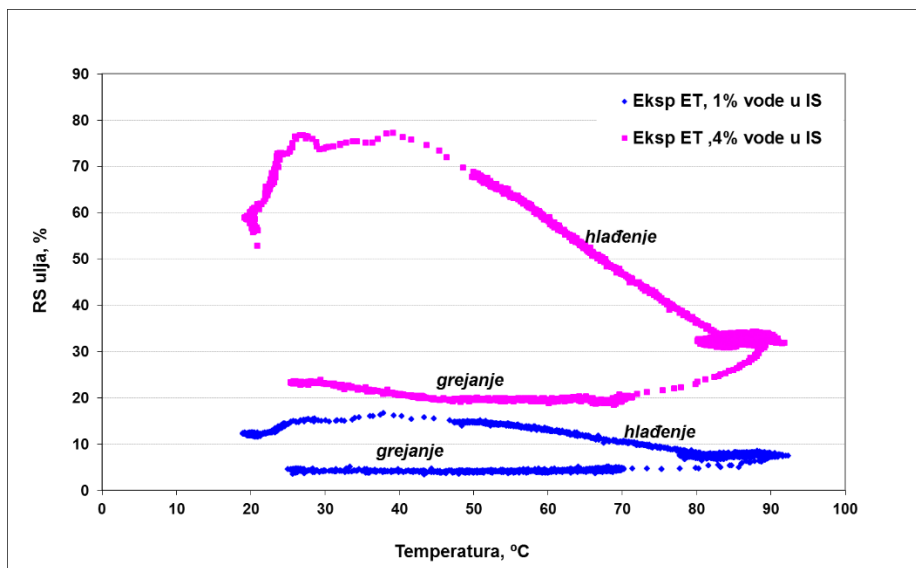


Slika 4.3.8. Raspodela vlage u papiru po visini VN namotaja tokom eksploatacije ET sa niskim sadržajem vlage u IS:(a) faza A, (b) faza B, (c) faza C

Na Slikama 4.3.9 i 4.3.10 prikazana je promena vrednosti RS ulja, merenog pomoću ugrađenih senzora, tokom hlađenja, odnosno grejanja oba eksperimentalna transformatora. Na osnovu dijagrama se može zaključiti da zbog većeg sadržaja vode u izolacionom sistemu, i samim tim sporijeg prelaska vode iz ulja u celulozu, kod ET sa povišenim sadržajem vode u IS dolazilo do značajnijeg porasta RS ulja prilikom hlađenja, te je i histerezis kriva šira nego kod ET sa niskim sadržajem vode u IS.



Slika 4.3.9 Promena relativnog stepena zasićenja ulja prilikom hlađenja/grejanja za oba eksperimentalna transformatora – II uzorkovanje papira

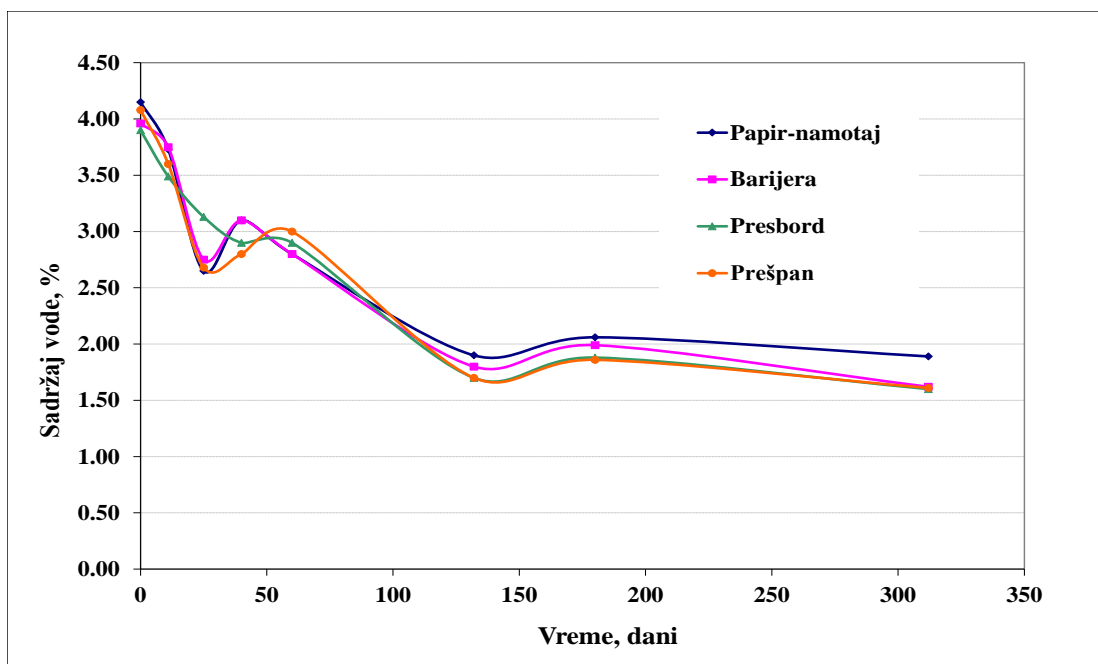


Slika 4.3.10 Promena relativnog stepena zasićenja ulja prilikom hlađenja/grejanja za oba eksperimentalna transformatora – IV uzorkovanje papira

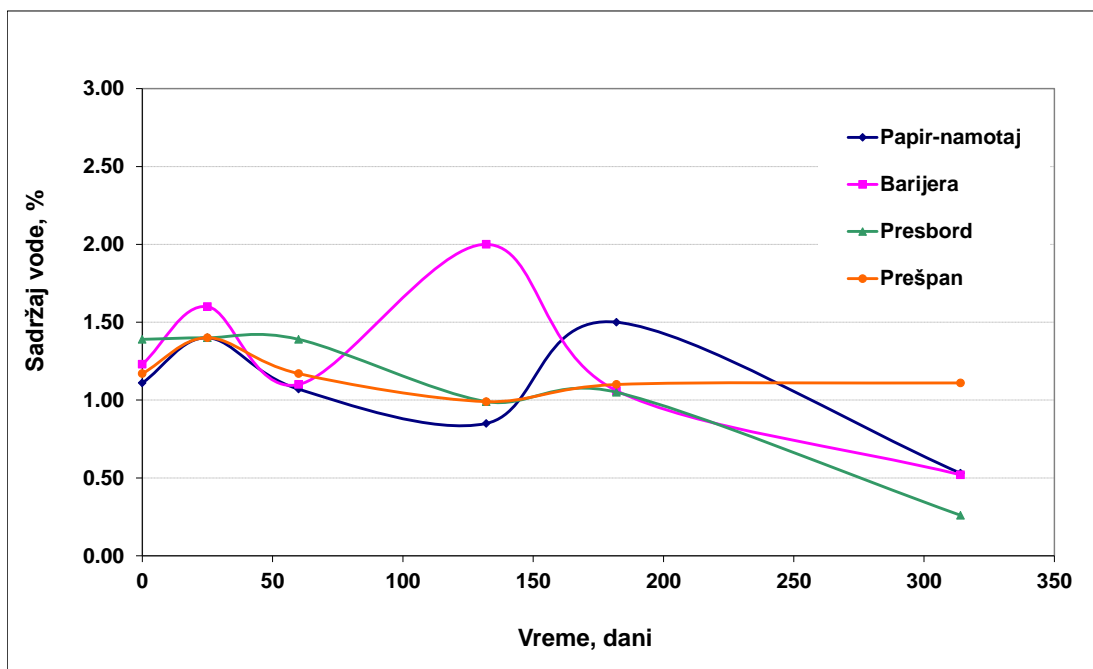
Poredeći histerezis krive prilikom II i prilikom IV uzorkovanja papirne izolacije može se uočiti da je kod transformatora sa povišenim sadržajem vode u IS došlo do blagog isušivanja izolacionog sistema, dok je kod transformatora sa niskim sadržajem vode tokom pogona došlo do prelaska veće količine vode iz celulozne izolacije u ulju. Izdvojena voda iz IS tokom pogona kod ET sa povišenim sadržajem vode, oslobađala se preko Buholc relea u atmosferu. Kod ET sa niskim sadržajem vode, moguće je da je došlo do vlaženja izolacionog sistema usled degradacije celulozne izolacije i/ili je prosto došlo do migracije vode iz debljih struktura celulozne izolacije (npr. presbord, drvo) u ulje.

4.3.1.1. Poređenje sadržaja vode u celuloznim materijalima tokom eksperimenta ubrzanog starenja laboratorijskih modela

Na osnovu rezultata određivanja sadržaja vode u celuloznim materijalima laboratorijskih modela zapaženo je da je kod oba modela dolazilo do isušivanja materijala tokom eksperimenta (*Slike 4.3.11 i 4.3.12*). Materijali iz laboratorijskog modela sa povišenim sadržajem vode su na svake dve nedelje vlaženi, ali je proces isušivanja vremenom bio sve izraženiji, te nije bilo moguće održati konstantnu ovlaženost. Poredeći sadržaj vode u različitim materijalima kroz vreme, može se zaključiti da je kod laboratorijskog modela sa povišenim sadržajem vode (*Slika 4.3.11*) bio prisutan proces isušivanja kod svih materijala podjednako, dok su kod modela sa niskim sadržajem vode primećene oscilacije u sadržaju vode kod različitih materijala tokom trajanja eksperimenta. Tokom testa ubrzanog starenja kod modela sa nižim sadržajem vode (*Slika 4.3.12*), bilo je prisutno kontinuirano isušivanje presborda, dok su papir na namotaju i barijera naizmenično upijali i otpuštali vodu, najverovatnije onu koju je presbord otpuštao. Ovakva difuzija vode iz presborda ka papiru, primećena je i u eksperimentu I (poglavlje 4.1). Sadržaj vode u prešpanu je tokom testa ubrzanog starenja u najvećoj meri bio konstantan.



Slika 4.3.11 Promene u sadržaj vode u celuloznoj izolaciji po svim materijalima tokom eksperimenta starenja laboratorijskog modela sa povišenim sadržajem vode u IS (4%)



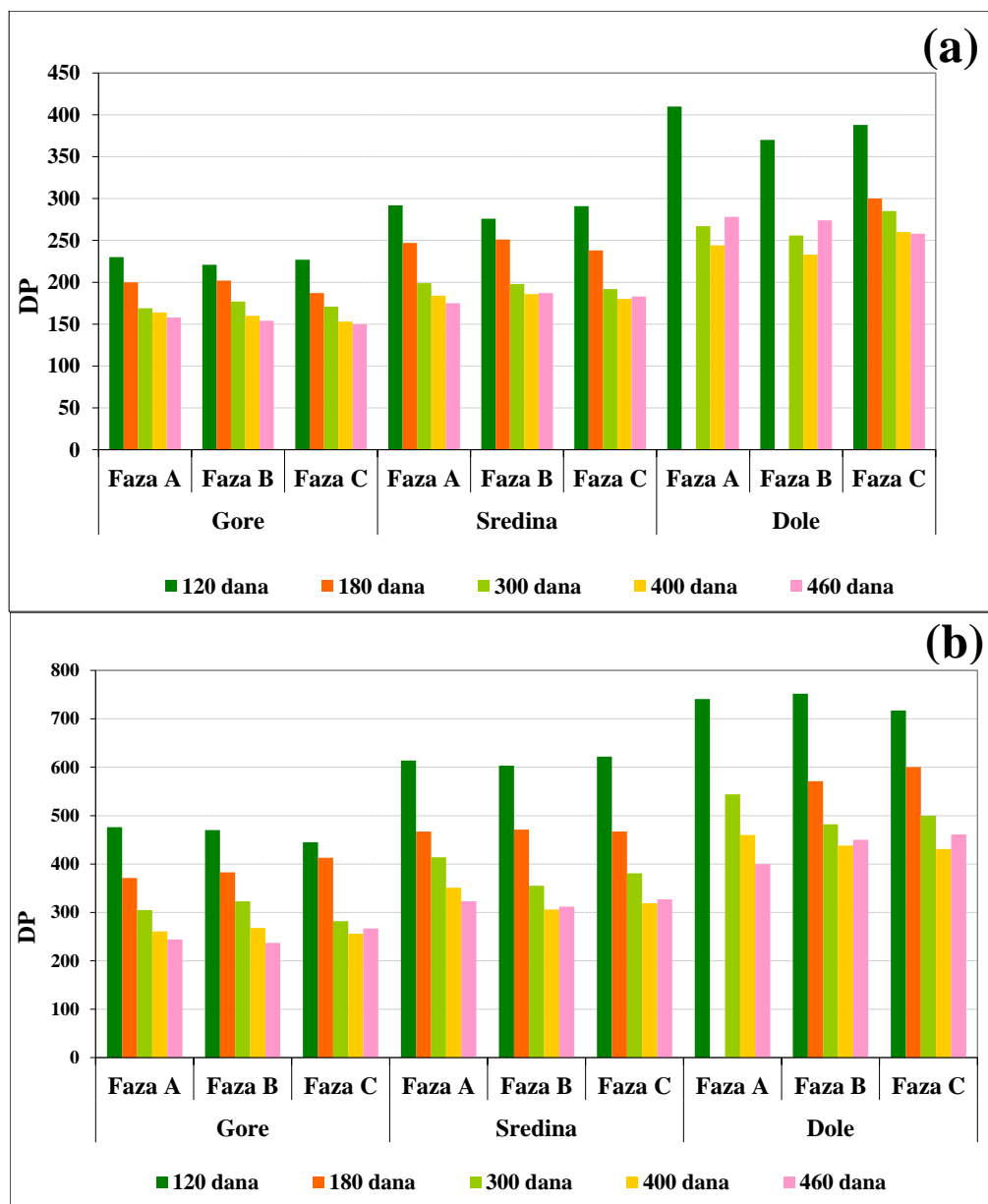
Slika 4.3.12 Promene u sadržaj vode u celuloznoj izolaciji u celuloznim materijalima tokom eksperimenta starenja laboratorijskog modela sa niskim sadržajem vode u IS (1%)

4.3.2. Kinetika starenja i markeri degradacije papirne izolacije eksperimentalnih transformatora i laboratorijskih modela

U ovom poglavlju biće razmatrana kinetika starenja papirne izolacije i produkcija markera degradacije kod eksperimentalnih transformatora i odgovarajućih laboratorijskih modela. Treba naglasiti da se rezultati odnose na izolacioni sistem mineralno ulje/normalan Kraft papir i to za sadržaj kiselina u ulju u opsegu 0,05 do 0,07 mgKOH/gulja i nizak sadržaj kiseonika (< 4000 mg/kg) kod eksperimentalnih transformatora, odnosno umeren sadržaj kiseonika (oko 14000 mg/kg) kod laboratorijskih modela.

Nakon određenih vremenskih intervala tokom trajanja eksperimenta, papir je uzorkovan sa vrha, sredine i dna namotaja sa sve tri faze (prema šemi na *Slici 3.3.12*) u cilju određivanja sadržaja vode i stepena polimerizacije papira. Rezultati DP merenja pokazuju da je intenzitet starenja papira bio u korelaciji sa temperaturom, odnosno najniže vrednosti DP papira bile su na vrhu namotaja, gde je temperatura bila najviša (*Slike 4.3.13 a-b*). Budući da je raspodela vode po visini namotaja bila obrnuta u odnosu na raspodela vrednosti stepena polimerizacije, može se zaključiti da su u ovom slučaju značajniji uticaj na brzinu degradacije papirne izolacije imale razlike u temperaturi nego u sadržaju vode (*Slike 4.3.7 i 4.3.8*).

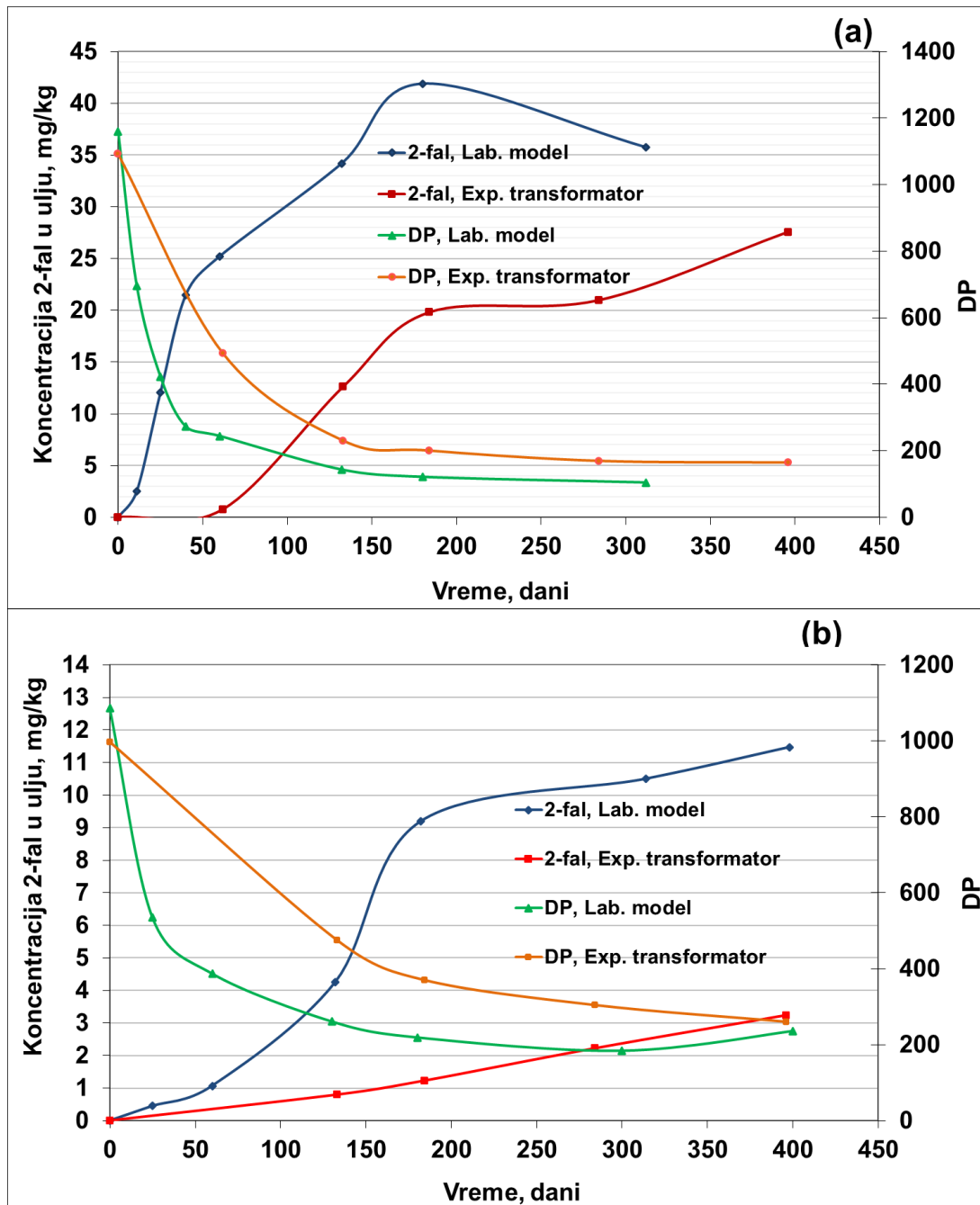
Na *Slikama 4.3.14a i 4.3.14b* prikazana je kinetika degradacije Kraft papira eksperimentalnih transformatora i laboratorijskih modela. Prikazano je smanjenje DP vrednosti Kraft papira i porast koncentracije derivata furana u ulju tokom vremena za eksperimentalne transformatore i laboratorijske. Kod eksperimentalnih transformatora uzimane su minimalne DP vrednosti. Može se primetiti da je oblik krive degradacije papira isti za laboratorijske modele i eksperimentalne transformatore, razlika je samo u brzini degradacije papira. Degradacija izolacionog papira se odvijala brže u laboratorijskim modelima nego u eksperimentalnim transformatorima, kao i u modelima sa većim sadržaja vode u izolaciji. Brža degradacija papira kod laboratorijskih modela je svakako delom posledica većeg sadržaja kiseonika u ulju laboratorijskih modela.



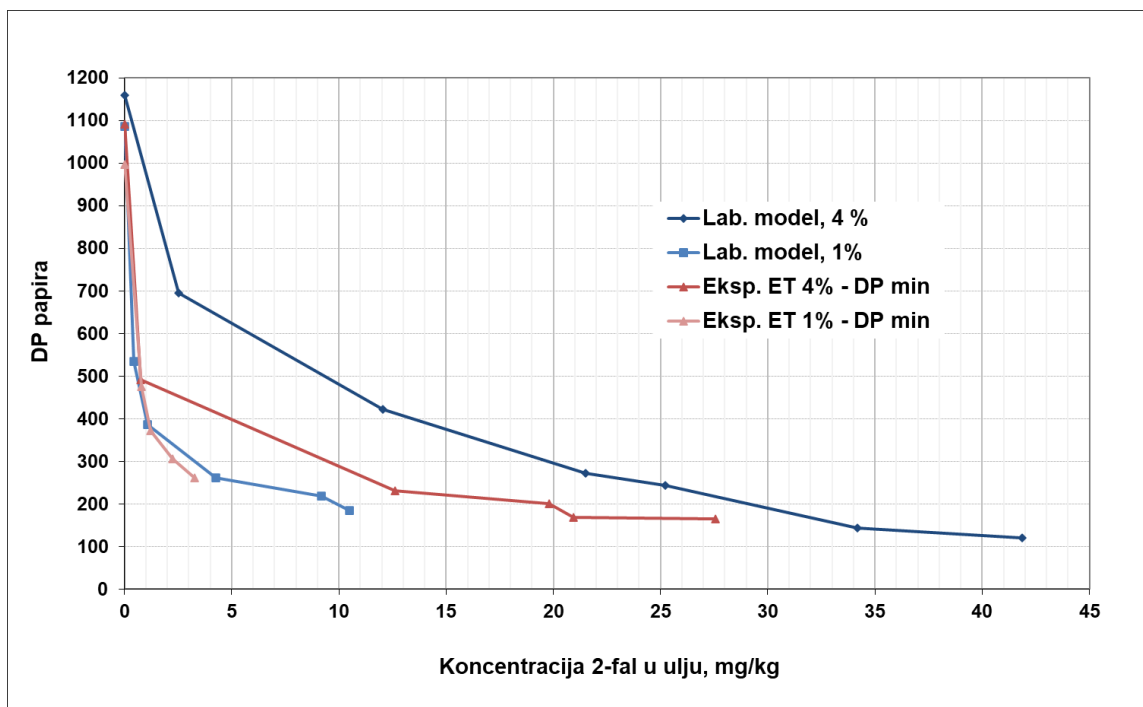
Slika 4.3.13 Raspodela vrednosti DP papira po visini VN namotaja tokom oglada starenja kod eksperimentalnih ET za početni sadržaj vode u IS **a)** oko 4%, **b)** oko 1%

Na *Slici 4.3.15* prikazane su korelacione krive između sadržaja derivata furana 2-fal u ulju i DP vrednosti papira za oba ET i oba laboratorijska modela. Poređenjem ovih korelacionih krivih, može se primetiti da postoje velike razlike u sadržaju derivata furana u ulju za istu DP vrednost papira, a različit sadržaj vode u izolaciji. Na primer za DP vrednost 400, sadržaj 2-fal u ulju transformatora sa većim sadržajem vode bio je oko 3 mg/kg, dok je u ulju transformatora sa nižim sadržajem vode bio 1.5 mg/kg. Primećeno je i da kada DP

papira dostigne vrednosti 250-200, kriva postaje praktično horizontalna, odnosno DP vrednost veoma sporo opada, dok sadržaj derivata furana u ulju i dalje značajno raste i praktično se udvostručuje. Moguće je da je ovo delom posledica porasta kiselina u ulju u kasnijim fazama degradacije, što pospešuje rastvaranje derivata furana u ulju.



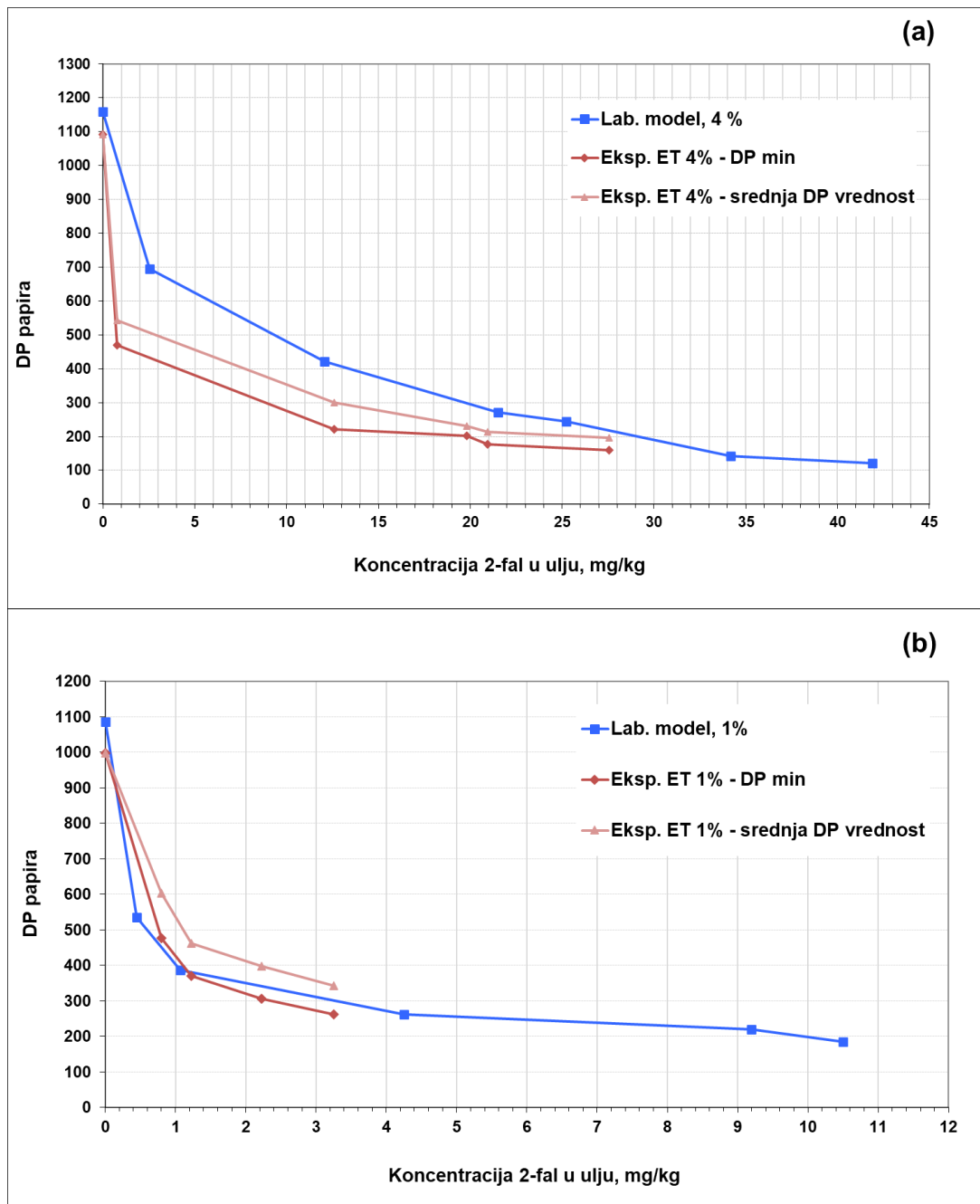
Slika 4.3.14 Smanjenje minimalne vrednosti DP papira i porast koncentracije 2-FAL u ulju tokom ubrzanog starenja eksperimentalnih ET i odgovarajućih laboratorijskih modela: a) početni sadržaj vode u IS oko 4%, b) početni sadržaj vode u IS oko 1%



Slika 4.3.15 Zavisnost minimalne i srednje DP vrednosti papira eksperimentalnih ET, odnosno DP vrednosti papira laboratorijskih modela, od sadržaja 2-FAL u ulju

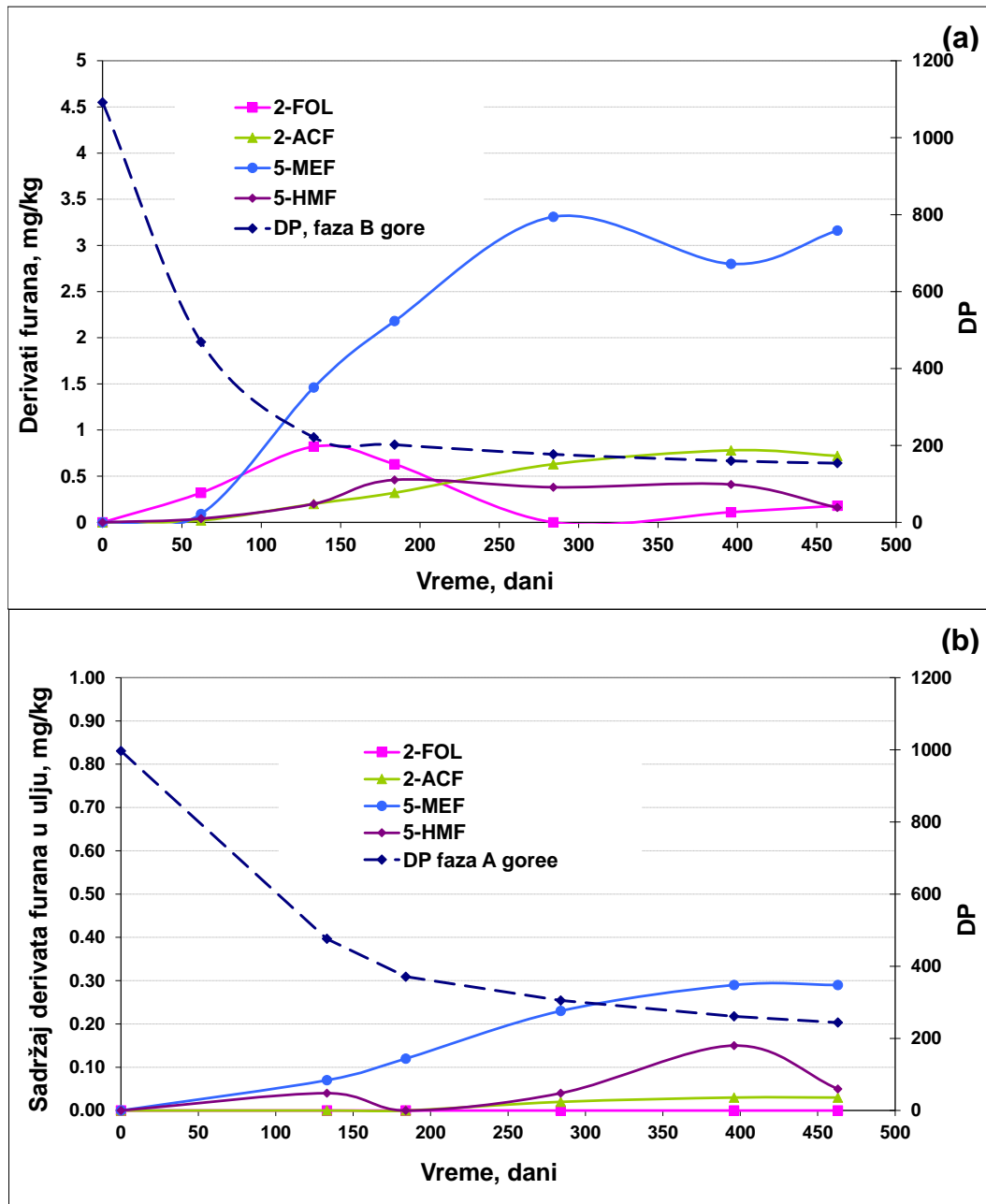
Za niži sadržaj vode u izolacionom sistemu, korelacije DP vrednosti i sadržaja derivata furana u ulju kod ET i laboratorijskog modela su praktično identične, odnosno preklapaju se (Slika 4.3.16b). Na osnovu ovih zapažanja može se zaključiti da se za niže sadržaje vode u IS, laboratorijskom simulacijom degradacije izolacionog sistema mogu dobiti korelacije DP-sadržaj furana u ulju koje su veoma bliske realnom sistemu. Ovo znači da nema značajnije razlike u rastvorljivosti derivata furana u ulju kod realnih transformatora u odnosu na laboratorijski model. U slučaju većeg sadržaja vode u IS, korelacione krive DP-sadržaj derivata furana u ulju se u velikoj meri razlikuju za laboratorijske modele i za eksperimentalne transformatore, naročito na početku degradacije (Slika 4.3.16a). Ovo je verovatno posledica neregularnog rada ET sa visokim sadržajem vode u IS pri povišenim radnim temperaturama ulja i nehomogenom raspodelom temperatura po visini ET, što je uslovalo i nehomogenu raspodelu vode među celuloznim materijalima u ET. S obzirom da je kod eksperimentalnog transformatora sa većim sadržajem vode u IS bilo omogućeno ispuštanje vodene pare preko Buholc releja tokom pogona, vrlo je moguće da je na ovaj način izgubljena i određena količina derivata furana iz ulja. Osim toga, nakon prvog vremenskog intervala kada su transformatori otvoreni, vršeno je sušenje ulja kod transformatora sa većim

sadržajem vod u cilju dobijanja zadovoljavajuće vrednosti dielektrične čvrstoće ulja za ponovno puštanje transformatora u rad. Ovde je važno napomenuti da sušenje ulja nije značajnije uticalo na ukupan sadržaj vode u IS.

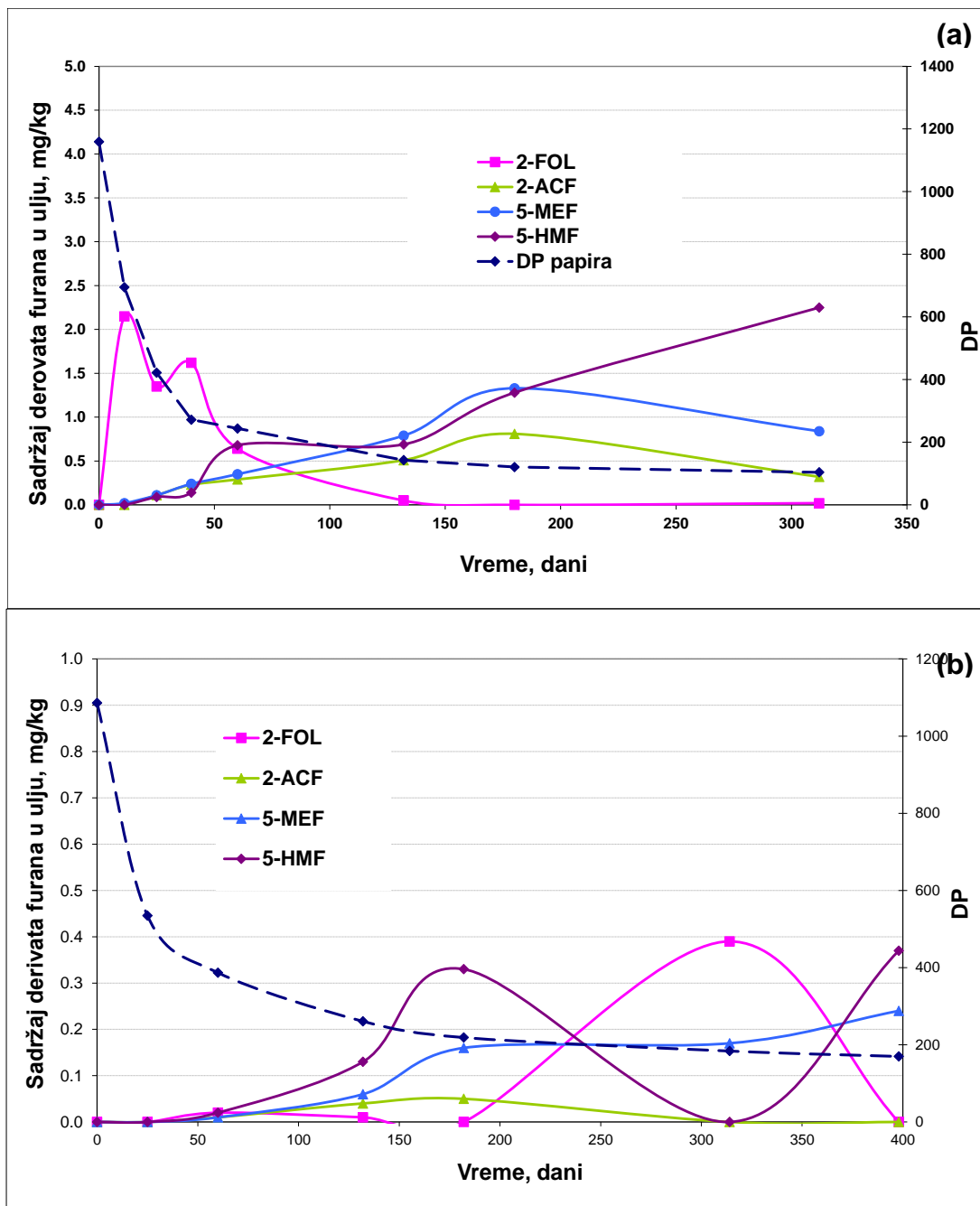


Slika 4.3.16. Zavisnost minimalne i srednje DP vrednosti papira eksperimentalnih ET, odnosno DP vrednosti papira laboratorijskih modela, od sadržaja 2-FAL u ulju a) početni sadržaj vlage u celulozi oko 4%, b) početni sadržaj vlage u celulozi oko 1%

Na Slikama 4.3.17 – 4.3.18 date su korelacije minimalnih stepena polimerizacije papira i koncentracije pojedinačnih derivata furana u ulju za oba ET i oba laboratorijska modela. S obzirom da je koncentracija derivata 2-furfural (2-FAL) bila značajno veća od koncentracije ostalih derivata i veoma bliska ukupnoj koncentraciji svih derivata, zbog boljeg pregleda ovaj derivat je na narednim slikama izostavljen.



Slika 4.3.17 Korelacija minimalnih stepena polimerizacije papira i sadržaja pojedinačnih derivata furana u ulju kod ET: a) početni sadržaj u IS oko 4%, b) početni sadržaj vode u IS oko 1%



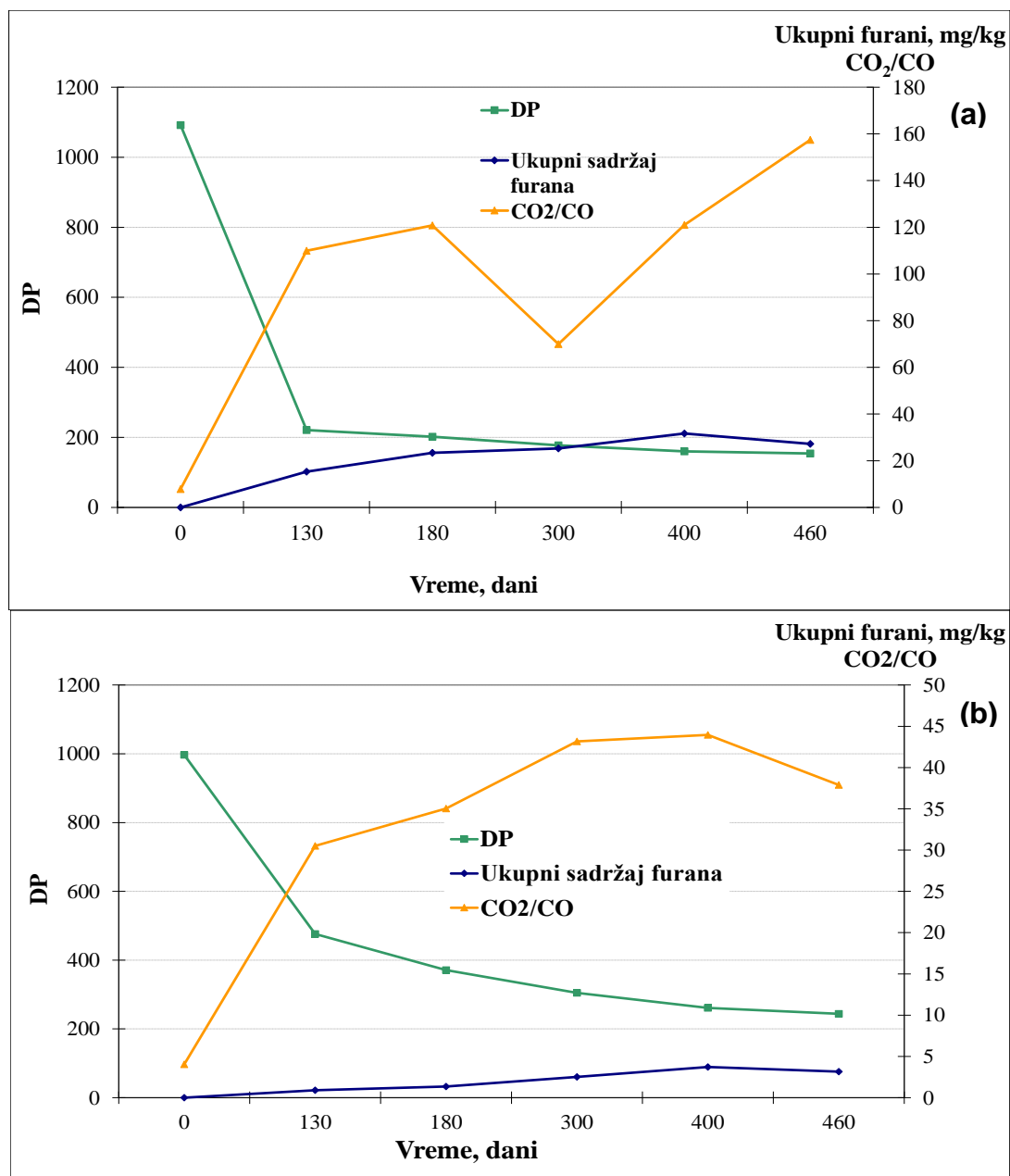
Slika 4.3.18 Korelacija stepena polimerizacije papira i sadržaja pojedinačnih derivata furana u ulju za laboratorijski model: a) početni sadržaj vode u IS oko 4%, b) početni sadržaj vode u IS oko 1%

Analizom dijagrama koncentracija pojedinačnih derivata furana u ulju kroz vreme, može se zaključiti sledeće:

- Derivat 2-fol se u većim koncentracijama stvarao u vlažnijim sistemima (kod ET i laboratorijskog modela sa većim sadržajem vode u ulju),
- Derivat 5-hmf se u većim koncentracijama stvarao kod laboratorijskih modela u odnosu na eksperimentalne transformatore, gde je usled veće koncentracije kiseonika u ulju, bila izraženija oksidacija,
- Derivat 5-mef je u najvećoj koncentraciji bio prisutan kod ET sa sadržajem vode od 4 %, i to naročito u kasnijim fazama starenja kada je dolazilo do opstrukcije hlađenja i dostizanja veoma visokih temperatura namotaja (čak do 129 °C).

Navedena zapažanja se slažu sa dosadašnjim literaturnim navodima [1][57].

Na *Slikama 4.3.19 a-b*, prikazane su korelacije DP papira, sadržaja ukupnih furana u ulju i odnosa koncentracije ugljenikovih oksida za oba ET i oba laboratorijska modela tokom eksperimenta ubrzanog starenja. Analizom dijagrama DP - ukupni furani - količnik ugljenikovih oksida, može se primetiti da odnos ugljen dioksida prema ugljen monoksidu raste tokom starenja čvrste izolacije, kao što je i očekivano u slučajevima kada dolazi do degradacije čvrste izolacije. Međutim, zanimljivo je primetiti da u kasnim fazama degradacije, za niske vrednosti DP, dolazi do migracije ugljen dioksida u papir i/ili do slabije proizvodnje ugljen dioksida u odnosu na gubitke, što je rezultiralo smanjenjem količnika ugljen dioksida prema ugljen monoksidu, naročito kod ET sa visokim sadržajem vode. Ovo je primećeno i u eksperimentu II, poglavlje 4.2.

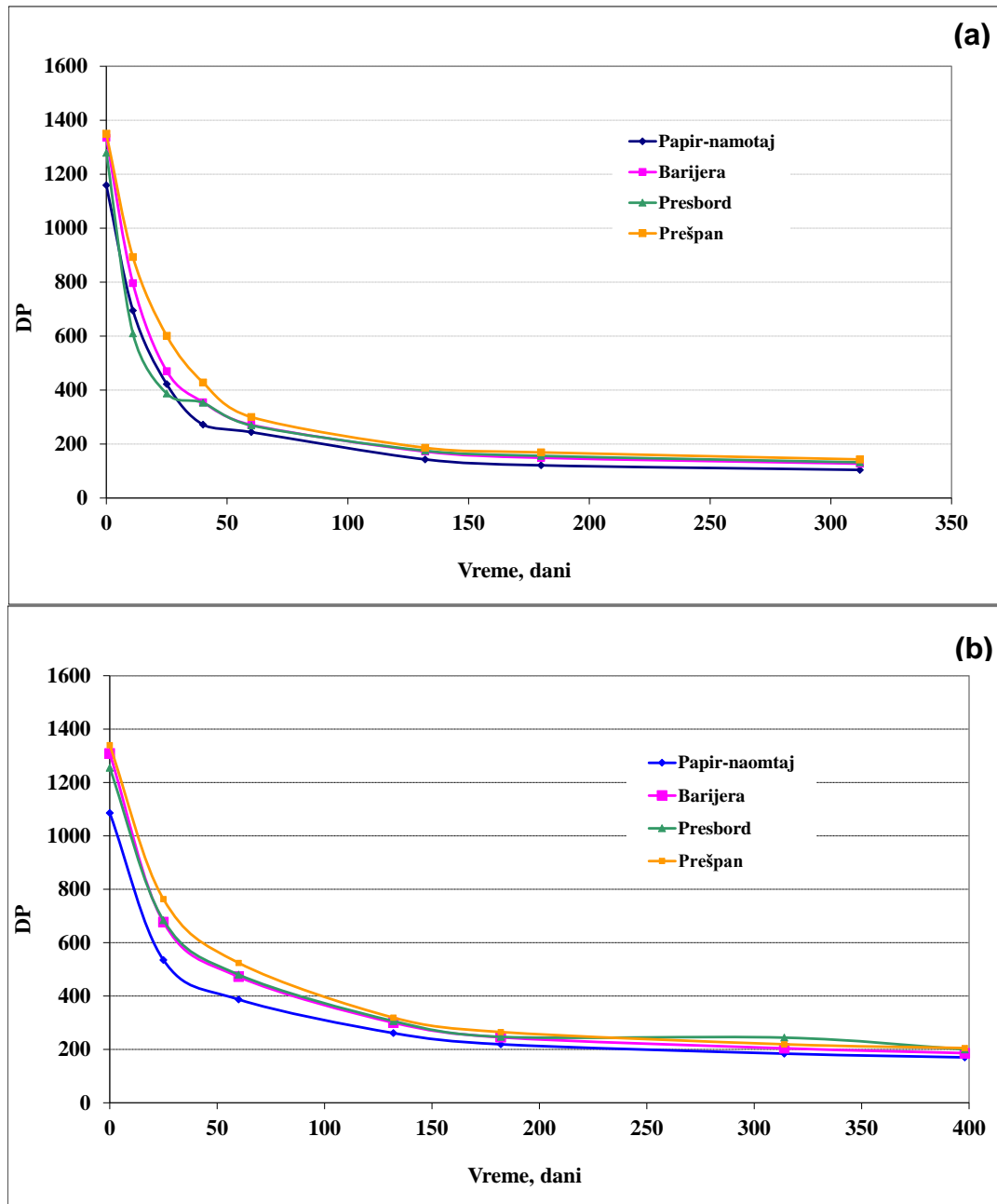


Slika 4.3.19 Korelacija minimalnih stepena polimerizacije papira, ukupnog sadržaja derivata furana u ulju i odnosa oksida ugljenika: a) ET sa povišenim sadržajem vode u izolaciji (4%), b) ET sa niskim sadržajem vode u izolaciji (1%)

4.3.3. Poređenje brzine starenja različitih celuloznih materijala

Na Slikama 4.3.20 a - b prikazano je smanjenje stepena polimerizacije (DP vrednosti) različitih celuloznih materijala tokom vremena. Rezultati su prikazani za laboratorijske modele, jer uzorkovanje različitih celuloznih materijala tokom starenja kod eksperimentalnih

transformatora nije bilo moguće. Na osnovu prikazanih dijagrama, može se zaključiti da je, kod oba laboratorijska modela, brzina smanjenja DP vrednosti, odnosno brzina starenja bila slična kod svih celuloznih materijala. Najveća brzina degradacije bila je u slučaju Kraft papira, a najmanja u slučaju prešpana.



Slika 4.3.20 b Poređenje brzine degradacije različitih celuloznih materijala kroz vreme kod laboratorijskog modela: a) sa povišenim sadržajem vode u celulozi (4%), b) sa niskim sadržajem vode u celulozi (1%)

4.3.4. Brzina starenja papirne izolacije - Arrhenius-ov termo-kinetički model

U ovom poglavlju biće razmatrana brzina degradacije papirne izolacije eksperimentalnih transformatora i odgovarajućih laboratorijskih modela, za izolacioni sistem mineralno ulje/normalan Kraft papir, sadržaj kiselina u ulju u opsegu 0,05 do 0,07 mgKOH/gulja i nizak sadržaj kiseonika (< 4000 mg/kg) kod eksperimentalnih transformatora, odnosno umeren sadržaj kiseonika (oko 14000 mg/kg) kod laboratorijskih modela.

Uzimajući da je brzina starenja papirne izolacije određena Arrhenius-ovim termo-kinetičkim modelom (jednačina 1.4.1) i da vrednost energije aktivacije za normalan Kraft papir iznosi 111 kJ/mol, izračunate su vrednosti konstante A za oba eksperimentalna transformatora i oba laboratorijska modela i date u *Tabeli 4.3.3*. U cilju poređenja brzine starenja eksperimentalnih transformatora i laboratorijskih modela, izračunat je ukupni životni vek svih modela na temperaturi od 105 °C, uzimajući za konstantu A vrednosti izračunate i prikazane u *Tabeli 4.3.3*, za DP početno vrednost 1100, a za DP kraj vrednost 200. Dobijeni rezultati su takođe prikazani u *Tabeli 4.3.3*. Konstante A prikazane u *Tabeli 4.3.3* izračunate su kao srednje vrednosti pojedinačnih konstanti izračunatih za svaku periodu starenja zasebno. Temperature namotaja eksperimentalnih transformatora su tokom pogona oscilovale, a s obzirom da su kontinualno praćene senzorima, za proračun faktora A su korišćene srednje vrednosti za konkretnu periodu starenja. Krajnja DP vrednost jedne periode, uzimana je kao početna DP vrednost naredne periode. Prilikom proračuna uzeto je da je vrednost faktora A tokom datog perioda bila konstanta. Pojedinačni faktori A za svaku periodu i sve modele dati su u *Tabeli 4.3.4*. Kod ET sa visokim sadržajem vlage u proračunu su korišćene DP vrednosti izmerene na papiru koji se nalazio pri vrhu namotaja faze B, a kod ET sa niskim sadržajem vlage DP papira koji se nalazio pri vrhu faze A. Ove su lokacije izabrane jer su se tu nalazile optičke sonde za praćenje temperatura (poglavlje 3.3.3).

Tabela 4.3.3. Izračunate vrednosti predeksponencijalnog faktora A za energiju aktivacije 111 kJ / mol, kao i ukupni životni vek izračunat za odgovarajuće konstante A na temperaturi od 105 °C, uzimajući za početnu vrednost DP 1100, a za krajnju vrednost 200.

	Predeksponencijalni faktor, A	Ukupni životni vek, dani
ET, 4% sadržaj vode u IS, nizak sadržaj kiseonika u ulju	21,0 * 10 ⁸	177
Laboratorijski model, 4 % sadržaj vode u IS, umeren sadržaj kiseonika u ulju	39,0 * 10 ⁸	95
ET, 1% sadržaj vode u IS, nizak sadržaj kiseonika u ulju	8,4 * 10 ⁸	443
Laboratorijski model, 1 % sadržaj vode u IS, umeren sadržaj kiseonika u ulju	15,5 * 10 ⁸	240

Na osnovu rezultata prikazanih u *Tabeli 4.3.3* može se zaključiti da su laboratorijski modeli starili 1,9 puta brže od eksperimentalnih transformatora za date sadržaje vode u celuloznoj izolaciji. Razlika u brzini starenja eksperimentalnih transformatora i laboratorijskih modela delom može biti posledica razlike u količini kiseonika. Kod eksperimentalnih transformatora sadržaj kiseonika u ulju je bio nizak (<4000 mg/kg), dok je kod laboratorijskih modela bio srednje do visok (oko 14000 mg/kg). Ovo je posledica činjenice da se tokom eksperimenta kiseonik iz ulja trošio u reakcijama degradacije ulja, pri čemu se nadoknada kiseonika odvijala na drugačiji način kod eksperimentalnih transformatora i kod laboratorijskih modela. Rastvaranje novih količina kiseonika u ulju kod eksperimentalnih transformatora se dešavalo prirodnim putem, u konzervatoru, gde je ulje bilo u kontaktu sa atmosferom, dok je kod laboratorijskih modela vršeno barbotiranje ulja vazduhom u određenim vremenskim intervalima, jer su erlenmajeri bili zatvoreni šlifovanim zatvaračima, pa nije postojao drugi način da se nadoknadi utrošak kiseonika. Ovo je rezultiralo u višim koncentracijama kiseonika u ulju laboratorijskih modela u odnosu na eksperimentalne transformatore, što je svakako uticalo i na brzinu starenja izolacionih sistema.

Tabela 4.3.4 Izračunate vrednosti predeksponencijalnog faktora A na osnovu izmerenih minimalnih vrednosti DP papira faze B, odnosno faze A, $E_a = 111$ kJ/mol

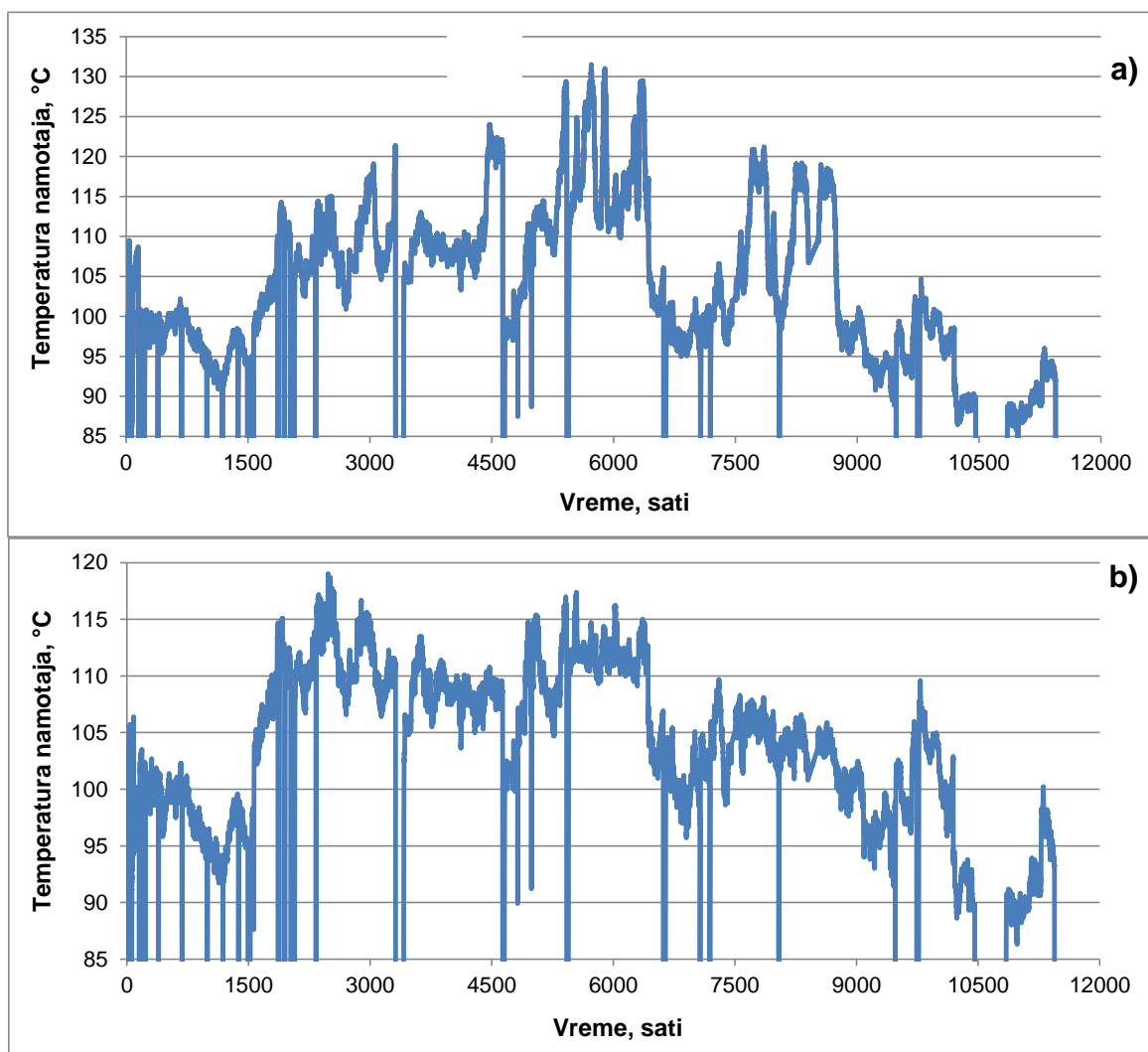
Perioda starenja, dani	ET, 4% sadržaj vlage		Laboratorijski model, 4% sadržaj vlage		ET, 1% sadržaj vlage		Laboratorijski model, 1% sadržaj vlage	
	A	DP, faza B	A	DP	A	DP, faza A	A	DP
11	/	/	$47,6 \cdot 10^8$	695	/	/	/	/
25	/	/	$60,7 \cdot 10^8$	421	/	/	$34,5 \cdot 10^8$	535
40	/	/	$65,7 \cdot 10^8$	289	/	/	/	/
60	$47,3 \cdot 10^8$	469	$29,0 \cdot 10^8$	244	/	/	$18,5 \cdot 10^8$	387
130	$39,0 \cdot 10^8$	221	$36,5 \cdot 10^8$	143	$9,80 \cdot 10^8$	476	$11,4 \cdot 10^8$	261
180	$57,4 \cdot 10^8$	202	$24,1 \cdot 10^8$	121	$14,0 \cdot 10^8$	371	$15,7 \cdot 10^8$	219
300	$70,4 \cdot 10^8$	177	$92,9 \cdot 10^8$	104	$4,44 \cdot 10^8$	305	$13,3 \cdot 10^8$	184
400	$57,7 \cdot 10^8$	160	/	/	$5,31 \cdot 10^8$	261	$5,98 \cdot 10^8$	170
Srednja vrednost	$21,0 \cdot 10^8$	/	$39,0 \cdot 10^8$	/	$8,4 \cdot 10^8$	/	$15,5 \cdot 10^8$	/

Razlike u brzini starenja izolacionog sistema eksperimentalnih transformatora u odnosu na laboratorijske modele je u određenoj meri verovatno posledica i razlike u veličini eksperimentalnih transformatora u odnosu na laboratorijske modele (erlenmajeri), što je za posledicu imalo razlike u brzini zagrevanja, razlike u efektima prenosa toplote, kao i eventualne razlike u realnoj temperaturi papira koji je uzorkovan i prethodno zabeleženoj temperaturi čvrste izolacije.

4.3.4.1. Zavisnost predeksponencijalnog faktora A od ovlaženosti IS

S obzirom da je računanjem individualnih predeksponencijalnih faktora A za svaku periodu starenja uočeno da je kod svih modela vrednost konstante A opadala tokom starenja, kao i da sadržaj vode u izolacionom sistemu nije bio konstantan, izvršena je detaljnija analiza podataka i rezultata dobijenih tokom eksperimenta starenja.

Jednačina (1.4.1) je primenjena za svaku zabeleženu vrednost temperature, pri čemu su merenja vršena na 15 min. Zabeležene vrednosti temperature tokom čitavog pogona za oba ET prikazane su grafički na *Slikama 4.3.21a i 4.3.21b*.



Slika 4.3.21. Temperature namotaja zabeležene tokom eksploatacije eksperimentalnih transformatora: a) pri vrhu VN namotaja faze B kod ET sa visokim sadržajem vlage b) pri vrhu VN namotaja faze A kod ET sa niskim sadržajem vlage

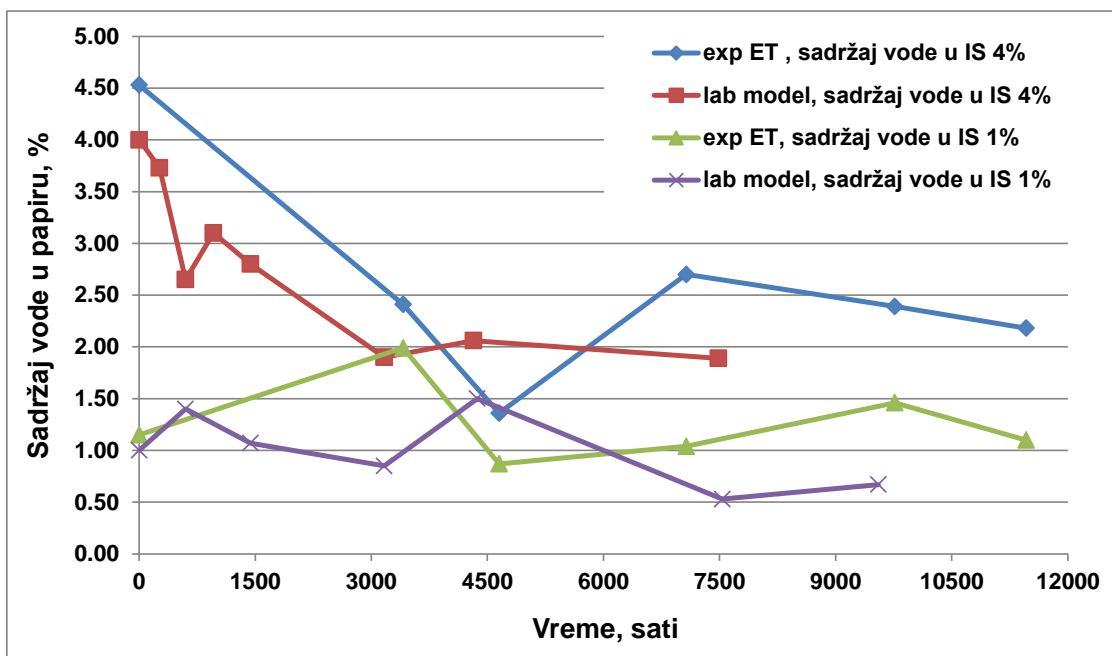
Na *Slici 4.3.22* prikazani su podaci za sadržaj vode u papiru koji su korišćeni u proračunu. Podaci su bazirani na direktnim merenjima vode Karl Fischer titracijom u uzorcima papira koji su uzorkovani nakon svake periode starenja. Mesto uzorkovanja bilo je spoljašnja površina faze B namotaja visokog napona kod transformatora sa visokim sadržajem vode, i spoljašnja površina faze A namotaja visokog napona kod transformatora sa niskim sadržajem vode u izolaciji. Uzeto je da se sadržaj vode u izolaciji kod eksperimentalnih transformatora menjao po linearnoj zavisnosti između dva uzorkovanja, dok je kod laboratorijskih modela uzeto da je sadržaj vode bio konstantan između dve periode i jednak aritmetičkoj sredini vrednosti izmerenih na početku i na kraju posmatranog perioda.

Pretpostavljeno je da predeskonencijalni faktor A zavisi od sadržaja vode na sledeći način:

$$A = a + b \cdot SV \quad (4.3.1)$$

gde je SV sadržaj vlage u papiru u %.

Parametri a i b su određeni metodom najmanjeg korena odstupanja izračunate DP vrednosti od izmerene DP vrednosti. Korišćen je metoda *GRG nonlinear solving method* implementiran u program *Excel*.



Slika 4.3.22 Vrednosti sadržaja vode u papiru korišćeni u proračunu

Rezultati dobijeni za parametre a i b za eksperimentalne transformatore i laboratorijske modele prikazani su u *Tabeli 4.3.5*.

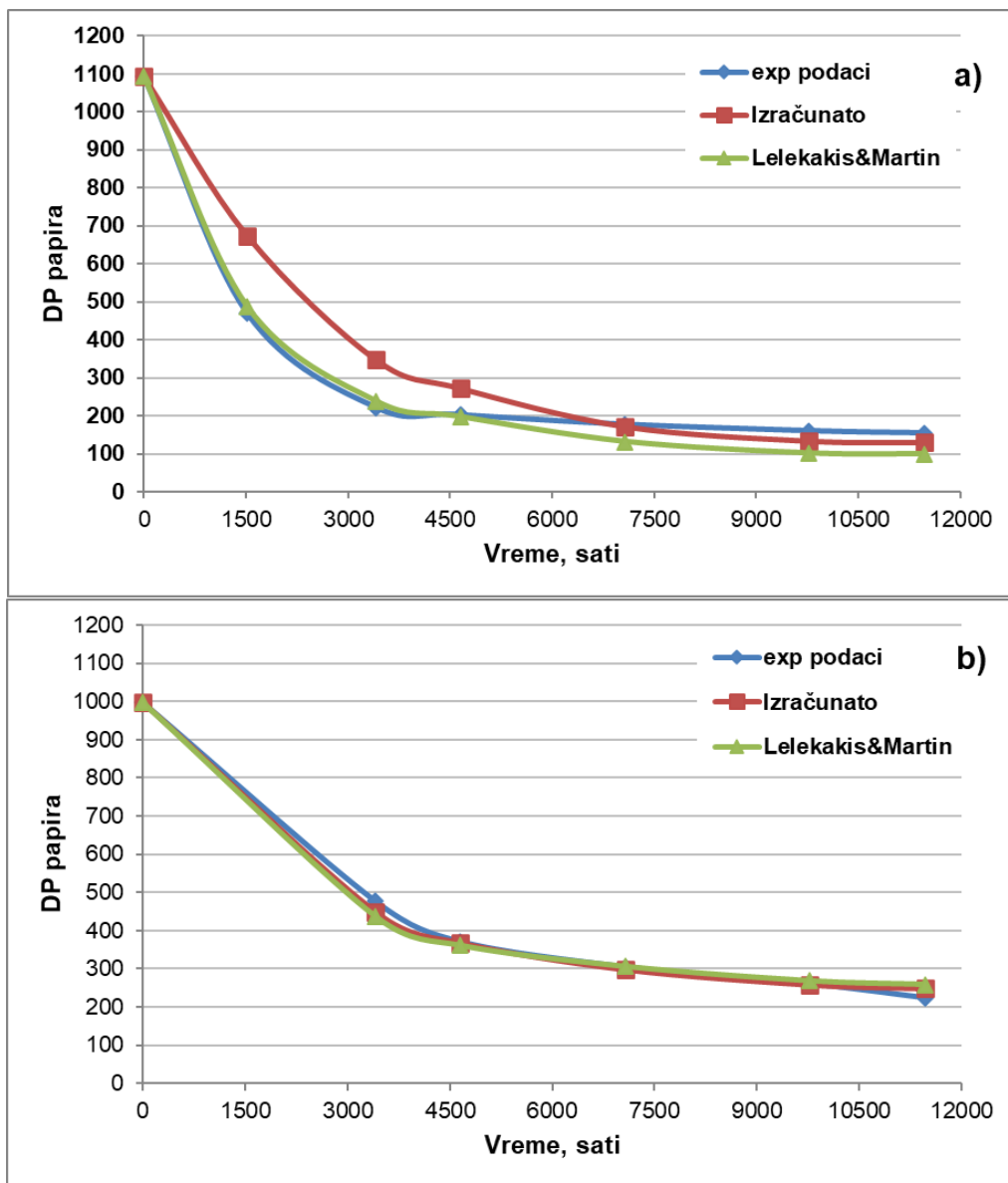
Tabela 4.3.5 Vrednosti parametara a i b u jednačini 4.3.1

	a	b
Eksperimentalni transformatori (ET)	0	$4.23 \cdot 10^8$
Laboratorijski modeli (LM)	$5.19 \cdot 10^8$	$13.1 \cdot 10^8$

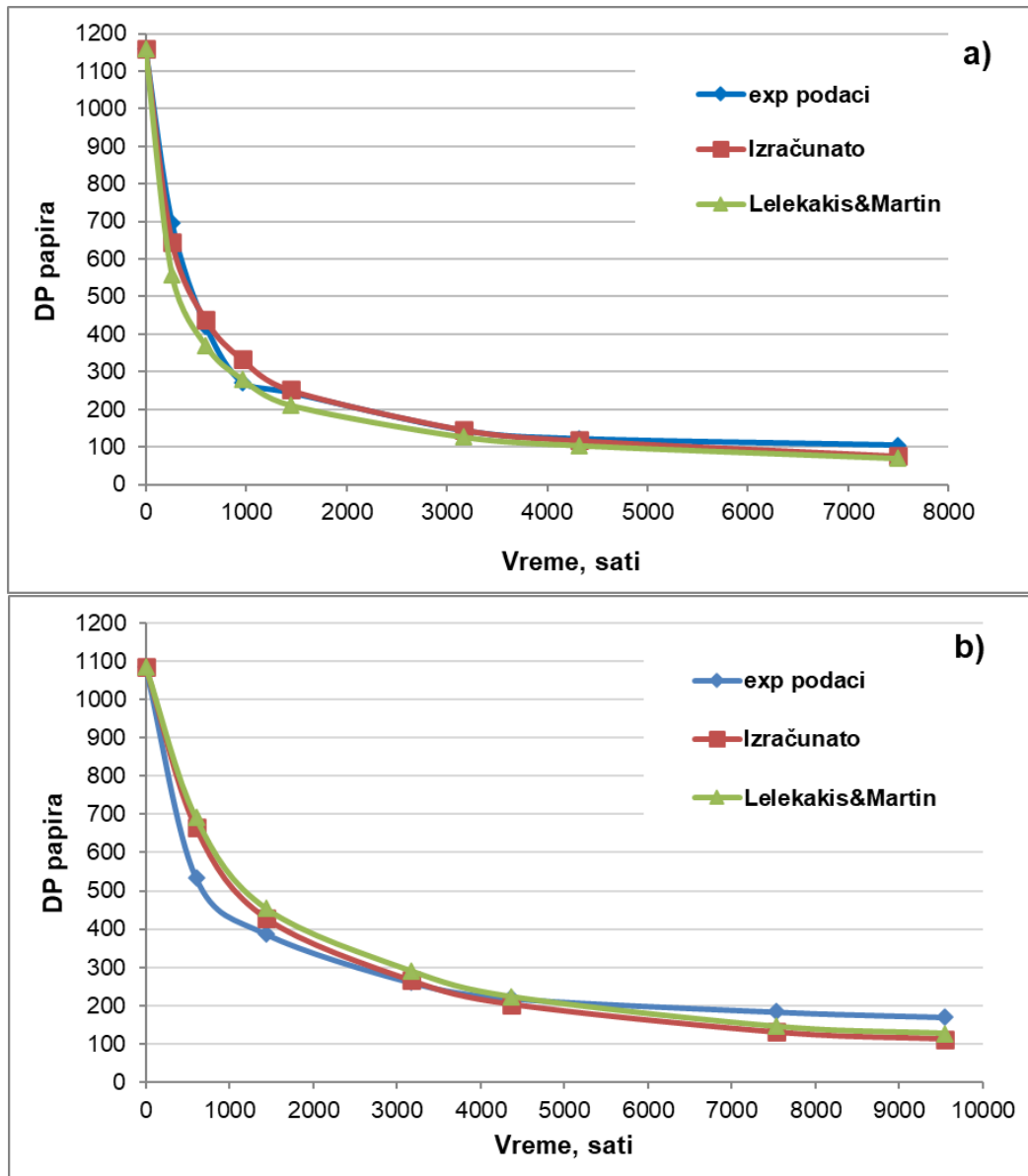
Jednačina zavisnosti predeksponencijalnog faktora A od sadržaja vode dobijena u okviru ovog istraživanja, poređena je sa jednačinama koje postoje u literaturi i ranije su već potvrđene na tri mala transformatora [25]. Poređenje je vršeno računanjem DP vrednosti na osnovu jednačine (1.4.1) i podataka datih na *Slikama 4.3.21a*, *4.3.21b* i *4.3.22*, a rezultati poređenja su grafički prikazani na *Slikama 4.3.23a* i *4.3.23b* za eksperimentalne ET odnosno na *slikama 4.3.24a* i *4.3.24b* za laboratorijske modele. Promena sadržaja vode u izolaciji tokom starenja, uzeta je u obzir kroz vrednost konstante A . Krive koje su na slikama označene kao „*Izračunato*“ dobijene su tako što je A faktor računat korišćenjem jednačine (4.3.1) i vrednosti parametara datih u *Tabeli 4.3.5*, dok su krive označene kao „*Lelekakis&Martin*“ dobijene tako što je A faktor računat korišćenjem odgovarajućih jednačina iz literature [24] (za eksperimentalne transformatore je korišćena jednačina za nizak sadržaj kiseonika 1.3.8, dok je za laboratorijske modele korišćena jednačina za srednji sadržaj kiseonika 1.3.9).

Na osnovu prikazanih rezultata (*Slike 4.3.23a*, *4.3.23b*, *4.3.24a* i *4.3.24b*) može se zaključiti da su DP vrednosti izračunate na osnovu jednačine (1.4.2) uz korišćenje jednačine (4.3.1) ili jednačine iz literature [24] za faktor A se veoma dobro slažu sa izmerenim DP vrednostima. Određena odstupanja se mogu primetiti kod eksperimentalnih transformatora sa visokim sadržajem vlage u izolaciji, najverovatnije zbog značajne potrošnje kiseonika tokom starenja. Može se zaključiti da jednačina (4.3.1) predstavlja dobar alat za predviđanje brzine degradacije za suv izolacioni sistem i nizak sadržaj kiseonika, čak i na visokim temperaturama, ali u slučaju izolacionog sistema sa visokim sadržajem vode i visokim

radnim temperaturama, javljaju se odstupanja usled zahtevnijih uslova rada transformatora. Može se zaključiti i da su korelacije razvijene u okviru ovog istraživanja dobro slažu sa zaključcima drugih autora [24].



Slika 4.3.23 Poređenje izmerenih DP vrednosti sa vrednostima izračunatim korišćenjem jednačine (1.4.2) i jednačine (4.3.1) za A faktor uz korišćenje parametara a i b iz tabele 4.3.3 datih za ET i sa vrednostima izračunatim korišćenjem jednačine iz literature za nizak sadržaj kiseonika: (a) ET sa visokim sadržajem vode u IS, (b) ET sa niskim sadržajem vode u IS



Slika 4.3.24 Poređenje izmerenih DP vrednosti sa vrednostima izračunatim korišćenjem jednačine (1.4.2) i jednačine (4.3.1) za A faktor uz korišćenje parametara a i b iz tabele 4.3.3 datih za laboratorijske modele i sa vrednostima izračunatim korišćenjem jednačine iz literature za srednji sadržaj kiseonika: (a) laboratorijski model sa visokim sadržajem vode u IS, (b) laboratorijski model sa niskim sadržajem vode u IS

5. ZAKLJUČAK

U okviru ove disertacije eksperimentalnim postupkom dobijeni su dijagrami ravnotežne raspodele vode u sistemu ulje/kraft papir/presbord za mineralno i biljno ulje. Ravnotežne krive su formirane za temperature 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 100 °C i 120 °C i sadržaje vode u IS 0,5%, 1%, 2%, 3% i 5%. Kao posledica razlike u hemijskom sastavu biljnih i mineralnih ulja, odnosno veće polarnosti biljnih ulja, ravnotežna raspodela vode u sistemu sa biljnim uljem pomerena je više ka ulju, u poređenju s mineralnim uljem. Za iste temperature i sadržaje vode u papiru i presbordu, sadržaji vode u biljnom ulju značajno su viši nego u mineralnom, što je posledica prisustva estarskih veza u molekulima biljnih ulja koje grade vodonične veze sa vodom i na taj način se značajno povećava afinitet biljnih ulja ka rastvaranju vode (*Slika 2.1.1*).

Kod sistema sa biljnim uljem primećena je i nejednaka raspodela vode između papira i presborda i to pre svega za umerene temperature i niže sadržaje vode u celuloznim materijalima, dok u sistemu sa mineralnim uljem ovo nije bio slučaj. Ovaj fenomen se najverovatnije može objasniti fizičkim i hemijskim osobinama biljnih ulja koje otežavaju proces difuzije, kao npr. veća viskoznost biljnih ulja. Moguće je i da je u slučaju presborda afinitet ka apsorpciji vode manji nego kod papira, jer je tokom perioda uspostavljanja ravnoteže primećeno da postoji migracija vode iz presborda u papir.

Mogućnost primene novoformiranih ravnotežnih dijagrama u održavanju energetske transformatora potvrđena je uspešnim poređenjem procena ovlaženosti IS kod 23 ET iz eksploatacije dobijenih električnim merenjima metodom FDS sa procenama dobijenih upotrebom predmetnih dijagrama.

Prednost ovih dijagrama bi mogao da bude u tome što se njihovom upotrebom može dobiti procena pojedinačnih sadržaja vode u papiru i presbordu, ali i procena ukupnog sadržaja vode u celulozi. S obzirom da je kod biljnih ulja primećena nehomogena raspodela vode između papira i presborda, primenom električnih metoda bi moglo doći do određenih grešaka prilikom procene sadržaja vode u papirnoj izolaciji. Električnim merenjima se procenjuje ukupan sadržaj vode u celuloznoj izolaciji ET, a zatim se preko masenih odnosa određuje procenat vode u papiru. Na umerenim radnim temperaturama ulja i za niže sadržaje

vode u IS, kada je nehomogena raspodela vode u celuloznim materijalima najviše izražena, kod ET koji su punjeni biljnim uljem, mogli bi biti procenjeni značajno niži sadržaji vode u papiru, nego što je to realan slučaj. U tom smislu, ovi dijagrami bi mogli imati značaj u minimiziranju takvih grešaka.

Potvrda značaja ovih dijagrama u održavanju ET predstavlja i činjenica da su uvršteni u najnoviju CIGRE tehničku brošuru koja se bavi problemima prisustva vode u IS energetskih transformatora [55].

U okviru aplikacije koju koristi Laboratorija za izolaciona ulja Instituta Nikola Tesla, ravnotežni dijagrami su aproksimirani polinomom u programskom jeziku Visual C#, čime je omogućena automatska procena sadržaja vode u papiru energetskih transformatora na osnovu izmerenog sadržaja vode u ulju i radne temperature ulja, što značajno unapređuje praćenje pogonskog stanja ET u pogonu.

Mehanizam degradacije izolacionog sistema koje su činili kraft papira sa biljnim odnosno mineralnim uljem u laboratorijskim eksperimentima sprovedenim na temperaturi od 140 °C i pri početnom sadržaju vode u celuloznim materijalima od oko 0,5% pretežno je bio pirolizan s obzirom da je sadržaj kiseonika u ulju bio nizak, a temperatura starenja visoka. Brzina degradacije papirne bila je najveća u slučaju mineralnog inhibiranog ulja, a najmanja u slučaju biljnog ulja. Sadržaj kiselina u biljnom ulju se značajno povećao tokom starenja, ali ove kiseline nisu značajnije uticale na brzinu degradacije čvrste izolacije. Najverovatnije su u pitanju više masne kiseline koje nastaju kao posledica hidrolize biljnog ulja, a zbog svoje veće molekulske mase ne mogu da se apsorbuju u papir i katalizuju njegovu degradaciju.

Koncentracije derivata furana u biljnom ulju bile su značajno niže u poređenju sa mineralnim uljima, što nije u korelaciji sa odgovarajućim DP vrednostima papira u različitim uljima. Ovaj fenomen je primećen i od strane drugih autora [4], ali još uvek nije razjašnjeno da li se radi o slabijoj rastvorljivosti derivata furana u biljnim uljima ili ova jedinjenja stupaju u određene reakcije nastale degradacijom biljnih ulja i na taj način se troše. S obzirom da derivati furana imaju veliki značaj u proceni stepena degradacije papirne izolacije energetskih transformatora tokom pogona, u budućim istraživanjima bi trebalo bolje istražiti ovaj fenomen.

Prilikom simulacije ubrzane degradacije izolacionih materijala došlo je do blagog porasta viskoznosti kod sva tri ulja. S obzirom da je sadržaj kiseonika u ulju bio nizak, nije došlo do izraženije oksidacije ulja i posledične polimerizacije molekula, čemu su naročito podložna biljna ulja. Ukupan porast viskoznosti kod biljnog ulja iznosio je oko 15% od početne vrednosti tako da je funkcija hlađenja, neophodna za primenu kod energetskih transformatora, ostala očuvana.

U okviru istraživanja utvrđeno je da je tokom degradacije biljnog ulja došlo do generisanja velike količina etana, C_2H_6 , pri čemu su izmerene koncentracije u biljnom ulju bile mnogo veće u odnosu na sve ostale gasove, kao i u poređenju sa koncentracijama u mineralnim uljima. Kod biljnih ulja koja sadrže linoleinsku kiselinu, kao što je ovde bio slučaj, hemizam cepanja molekula na povišenim temperaturama je takav da nastaje gas etan u većim količinama [45][46]. Ovo je značajna informacija kada se radi o tumačenju rezultata analize sadržaja gasova u ulju i davanju mišljenja o pogonskoj ispravnosti energetskih transformatora punjenih biljnim uljem.

Rezultati prikazanih istraživanja upućuju na zaključak da u uslovima sa ograničenim dotokom kiseonika, kakve su zaptivene konstrukcije transformatora, primena biljnog ulja kao izolacionog i rashladnog fluida bi se mogla pokazati uspešnom.

Ekperimentalni transformatori, dizajnirani i proizvedeni u svrhe istraživanja fenomena degradacije izolacionog sistema ulje/celulozna izolacija, radili su 460 dana i dostigli su kraj životnog veka, odnosno vrednosti DP papira blizu ili ispod 250. Uporedo sa ekperimentalnim transformatorima, stareni su i odgovarajući laboratorijski modeli u erlenmajerima (ulje, bakar, kraft papir, presbord, prešpan i gvožđe u odnosima istim kao kod ekperimentalnih ET). Temperature najtoplije tačke namotaja ekperimentalnih transformatora praćene su fiber-optičkim sensorima i održavane su na vrednostima od oko 105 °C, dok se starenje laboratorijskih modela odvijalo u peći na konstantnoj temperaturi od 105 °C. Pozicije senzora odabrane su na osnovu proračuna termo-hidrauličkog modela.

Na osnovu dobijenih rezultata, formirani su dijagrami zavisnosti minimalne DP vrednosti papira u ET od koncentracije 2-FAL u ulju za sadržaj vode u IS 1 – 1,5% odnosno 3 - 4% i sadržaj kiseonika u ulju oko 4000 mg/kg, na temperaturi od 105 °C. Tokom ubrzanog starenja izolacionih sistema sadržaj kiselina u ulju je porastao u sličnoj meri kao što

se to dešava tokom eksploatacije velikih energetskih transformatora (0,05-0,08 mgKOH/gulja) tako da je u okviru ovog eksperimenta obuhvaćen i uticaj kiselina na rastvorljivost derivata furana u ulju. Formirane korelacione krive DP papira - sadržaj 2-FAL u ulju pokazuju značajan uticaj prisustva vode u IS na rastvorljivost derivata furana u ulju. Za identične DP vrednosti papira, sadržaj 2-FAL u ulju može se razlikovati i 10 puta ukoliko je sadržaj vode u jednom IS oko 1%, a u drugom oko 4%.

Korelacione krive DP papira - Sadržaj derivata furana u ulju formirane u okviru ove disertacije, mogu imati veliki značaj za unapređenje procene stepena depolimerizacije celuloze na osnovu izmerenog sadržaja derivata furana u ulju kod ET u upotrebi, naročito zbog toga što su nastale kao rezultat eksperimenta koji je predstavljao veoma blisku simulaciju degradacije IS ET tokom eksploatacije.

Minimalna vrednost stepena polimerizacije Kraft papira na kraju eksperimenta starenja bila je oko 250 za transformator sa sadržajem vode u izolaciji od oko 1%, dok je kod transformatora sa sadržajem vlage od oko 4%, minimalna DP vrednost bila oko 150. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se brzina starenja uvećava oko 2,5 puta prilikom porasta sadržaja vlage u papiru sa 1-1,5% do 3-4%. Na osnovu rezultata ovih istraživanja formirane su jednačine koje opisuju zavisnost predeksponencijalnog faktora A, iz Arrhenius-ovog termokinetičkog modela, od sadržaja vlage u IS. Ova je jednačina je primenljiva za mineralno ulje i Kraft papir u naznačenim uslovima sadržaja kiseonika i nizak odnosno umeren sadržaj kiselina u ulju i mogla bi se koristiti za predviđanje brzine starenja celulozne izolacije energetskih transformatora različitih sadržaja vlage u IS. Rezultati dobijeni korišćenjem predložene jednačine su upoređeni sa rezultatima dobijenim primenom jednačina koje već postoje u literaturi i dobijena su zadovoljavajuća slaganja.

Ugradnja kapacitivnih i fiber optičkih senzora u ET prilikom njihove proizvodnje, omogućava kontinuirano praćenje sadržaja vlage u izolacionom ulju i temperatura namotaja u ET tokom pogona. Unapređenje metode za procenu sadržaja vode u papirnoj izolaciji ET na osnovu ravnotežnih dijagrama i formiranje jednačine za izračunavanje predeksponencijalnog faktora A u jednačini Arrhenius-ovog termokinetičkog modela za različite sadržaje vode, uz korišćenje pomenutih senzora, pruža mogućnost kontinuiranog praćenja degradacije celulozne izolacije ET u pogonu i predviđanja preostalog radnog veka.

Na ovaj način može se značajno unaprediti održavanje energetskih transformatora tokom pogona i bolje planiranje investicija. Kod transformatora koji se već nalaze u pogonu, formiranjem dijagrama zavisnosti DP papira u zavisnosti od sadržaja derivata furana u ulju, može se proceniti stepen polimerizacije papira ET, a zatim na osnovu unapređene metode za procenu životnog veka dalje proceniti kraj njihovog radnog veka.

6. LITERATURA

- [1] CIGRE Technical Brochure 494: “Furanic compounds for diagnosis”, 2012.
- [2] CIGRE Technical Brochure 323: “Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers”, 2007
- [3] CIGRE Technical Brochure 227: “Life management techniques for power transformer”, 2003
- [4] CIGRE Technical Brochure 436: „Experience in Service with New Insulating Liquids“, October 2010
- [5] CIGRE Technical Brochure 526: “Oxidation stability of Insulating Fluids”, February 2013
- [6] W.G. Lawson, M.A. Simmons, and P.S. Gale, “Thermal Ageing of Cellulose Paper Insulation”, IEEE Trans. Electrical Insul. Vol. EI- 12 (1977), pp. 61-66
- [7] IEC 60076-7, “Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers”, Edition 2.0, 2018-01-12
- [8] M.K. Pradhan “On the Estimation of Elapsed Life of Oil-Immersed Power Transformers”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, No 3, July 2005
- [9] S. Xu, T. Prevost, L. Cheim, D. Plattes “ Use of Furans as Diagnostics Tool to Estimate Insulation Life “, IEEE Transformer committee Technical Tutorial , Boston, MA, USA, November 2011
- [10] L. Lundgaard & al., “Aging of Kraft paper by acid catalysed hydrolysis”, IEEE TDEI, Vol. 15, No. 2, pp. 540-546, 2008.
- [11] CIGRE Technical Brochure no. 738, “Aging of liquid impregnated cellulose for power transformers,“ 2018
- [12] IEC 60076-2:2011 Power transformers - Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers
- [13] IEEE guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.91-2011, 2012
- [14] A.M. Emsley, “The kinetics and mechanisms of degradation of cellulosic insulation in power transformers, ” Polymer Degradation and Stability, vol. 44, no. 3, 1994, pp. 343-349

- [15] A. M. Emsley, X. Xiao, R. J. Heywood, and M. Ali, "Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 3: effects of oxygen and water on ageing in oil," in Proc. Inst. Elect. Eng., Sci., Meas. Technol., 2000, vol. 147, pp. 115–119
- [16] A. Ekenstam, "The behavior of cellulose in mineral acid solutions: kinetic study of the decomposition of cellulose in acid solutions, *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*, vol. 69, pp. 553–559, 1936
- [17] R. Gilbert, J. Jalbert J, P. Tetreault, B. Morin, Y. Denos, „Kinetics of the production of chain-end groups and methanol from the depolymerization of cellulose during the ageing of paper/oil systems. Part 1: standard wood Kraft insulation," *Cellulose* vol. 16, no. 2, pp. 327–338, 2009
- [18] T.K. Saha „, Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers“, *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10 no. 5, 2003, pp. 903-917
- [19] M.Koch "Improved determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts", *Proceeding of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, S. 508, Beijing, China, 2005
- [20] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, "Aging of oil-impregnated paper in power transformers," *IEEE Trans. Pow. Del.*, vol. 19, no. 1, pp. 230–239, Jan. 2004
- [21] N. Lelekakis, D.Martin, and J.Wijaya, "Ageing rate of paper insulation used in power transformers Part 1: oil/paper system with low oxygen concentration," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 6, pp.1999–2008, Dec. 2012
- [22] N. Lelekakis, D.Martin, and J.Wijaya, "Ageing rate of paper insulation used in power transformers Part 2: oil/paper system with medium and high oxygen concentration," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol.19, no. 6, pp. 2009–2018, Dec. 2012
- [23] N. Lelekakis, J. Wijaya, D. Martin, T. Saha, D. Susa, and C. Krause, "Aging rate of grade 3 presspaper insulation used in power transformers, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 5, pp. 2355 – 2362, 2014.
- [24] D. Martin, Y. Cui, T. Saha, N. Lelekakis, and J. Wijaya, "Life estimation techniques for transformer insulation," *AUPEC Conf. Australia*, 2013, session S21.7

- [25] D. Martin, Y. Cui, C. Ekanayake, H. Ma, and T. Saha, "An Updated Model to Determine the Life Remaining of Transformer Insulation," *IEEE Trans. Pow. Del.*, vol. 30, no. 1, pp. 395 – 402, 2015.
- [26] P.J. Burton et al., "Développements récents au CEGB pour l'amélioration de la prévision et de la surveillance des performances des transformateurs," *CIGRE Paper No. 12-09*, 1984.
- [27] J. Unsworth and F. Mitchell, "Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography," *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 4, pp 737-46, 1990.
- [28] N.Dominelli et al., "Recent developments in paper degradation products analysis," *Minutes of the 60th Annual International Conference of Doble Clients*, Sect. 10.41, 1993
- [29] Vasović V, Mihajlović D, Janković J, Lukić J. Procena stanja papirne izolacije energetskih transformatora na osnovu sadržaja 2-furfurala u mineralnom izolacionom ulju korigovanog na referentnu temperaturu od 20°C. *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*. 2019; 29(29):45-56. doi:10.5937/zeint9-23912 TR 33024
- [30] A. J. Kachler and I. Hohlein, "Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 1: Influence flu of type of oil and air on the degree of polymerization of pressboard, dissolved gases, and furanic compounds in oil," *Ieee Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, pp. 15-21, Mar-Apr 2005.
- [31] I. Hohlein and A. J. Kachler, "Aging of cellulose at transformer service temperatures. Part 2. Influence of moisture and temperature on degree of polymerization and formation of furanic compounds in free-breathing systems," *Ieee Electrical Insulation Magazine*, vol. 21, pp. 20-24, Sep-Oct 2005.
- [32] G.Csepes, I. Kispal, J. Fekete, Z. Romvari, M.Syebeni, A. Bogнар, E. Uri and S. Babos, „ Correlation Between Electrical and Chemical Testing Techniques for Assessing Degradation of oil-paper insulation“, *Intern. Conf. Large HV, Electric Systems, CIGRE, Paris, France, Paper No. 15-202*, 1998
- [33] F. Jakob, "LTC Condition Assessment by Diagnostic Testing", *Weidmann-ACTI*
- [34] A.De Pablo, B.Pahlavanpour, *Cigre Task Force 15.01.03, Furanic Comp. Analysis, Electra No. 175*, December 1997

- [35] B.Pahlavanpour, Experimental Investigation in to the Thermal Ageing of Kraft Paper and Mineral Insulating Oil, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 2002
- [36] X. Chendong, Monitoring paper insulation aging by measuring furfural contents in oil, EPRI, 7th International Symposium on high Voltage Engineering, p.139-142, 1991.
- [37] P. J. Burton, "Applications of liquid chromatography to the analysis of electrical insulating material," presented at the CIGRE, Paris, 1988.
- [38] L. Cheim, D. Platts, T. Prevost, and S. Xu, "Furan analysis for liquid power transformers," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 28, pp. 8-21, 2012.
- [39] J. Jalbert, M.-C. Lessard, and M. Ryadi, "Cellulose Chemical Markers in Transformer Oil, Insulation Part 1: Temperature Correction Factors," Ieee Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, pp. 2287-2291, Dec 2013
- [40] M.-C. Lessard, J. Jalbert, M. Ryadi, and Ieee, "Establishing Correction Factors for the Partitioning of Furanic Derivatives between Oil and Paper Insulation," in 2013 Ieee Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2013, pp. 132-135.
- [41] Oil-filled electrical equipment - Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases – Guidance, IEC Standard 60567, 4th ed, 2011-10
- [42] Mineral oil-filled electrical equipment in service - Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis, IEC Standard 60599, 3rd ed, 2015-09
- [43] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.104-2008
- [44] I .Atanasova-Hoehlein et al, “Gassing and Oxidation Behaviour of Insulating Fluids under Thermal Stress”, CIGRE South Africa Regional Conference, Paper C107, 2009
- [45] CIGRE Brochure 443: “DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria”
- [46] IEEE Guide for Interpretation of Gases Generated in Natural Ester and Synthetic Ester-Immersed Transformers, IEEE Standard C57.155, Nov. 2014
- [47] Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear, IEC Standard 60296, 3rd ed., 2003-11

- [48] Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance, IEC Standard 60422, 4th ed, 2013-01
- [49] T.Gradnik, Institut Milan Vidmar: Moisture in transformer insulation, prezentacija, Seminar Životni vek energetske transformatora, Zadužbina Ilije M. Kolarca, Beograd, 10 – 12 Septembar 2014;
- [50] CIGRE Brochure 349: “Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems, June 2008
- [51] S. Jiroutek, Vaisala, Moisture Dynamics in Transformers Webinar/presentation September 2014
- [52] Insulating liquids - Oil-impregnated paper and pressboard - Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration, IEC Standard 60814, 2nd ed, 1997-08
- [53] Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance, IEC Standard 60422, 3rd ed, 2005-10
- [54] M. Koch, S.Tenbohlen, „Wasser in Leistungstransformatoren - Richtig messen und den Zustand beurteilen“, Stuttgarter Hochspannungs - Symposium 15.-16.März 2006, Leinfelden
- [55] CIGRE Technical Brochure no 741: “Moisture measurement and assessment in transformer insulation – evaluation of chemical methods and moisture capacitive sensors”, 2018
- [56] S. Teslić, V. Radin, J. Lukić, 2-Furfural u transformatorskom ulju – primeri iz prakse: značaj u održavanju energetske transformatora, JUKO CIGRE 2007
- [57] R. D. Stebbins, D. S. Myers, and A. B. Shkolnik, “Furanic Compounds in Dielectric Liquid Samples: Review and Update of Diagnostic Interpretation and Estimation of Insulation Age”, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp 921-926, 1-5 June 2003
- [58] A.Scaut; S.Autru,S.Eeckhoudt „Applicability of Methanol as a New Marker for Paper Degradation in Power Transformers“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 18, No. 2; April 2011
- [59] Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus, ASTM Standard D6871-03, 2008

- [60] Pressboard and presspaper for electrical purposes - Part 3: Specifications for individual materials - Sheet 2: Requirements for presspaper, types P.2.1, P.4.1, P.4.2, P.4.3 and P.6.1, IEC Standard 60641-3-2, 2nd ed., 2007-11
- [61] Pressboard and presspaper for electrical purposes - Part 3: Specifications for individual materials - Sheet 1: Requirements for pressboard, types B.0.1, B.0.3, B.2.1, B.2.3, B.3.1, B.3.3, B.4.1, B.4.3, B.5.1, B.5.3 and B.6.1, IEC Standard 60641-3-1, 2nd ed., 2008-07
- [62] Mineral insulating oils - Methods for the determination of 2-furfural and related compounds, IEC Standard 61198, 1st ed, 1993-09
- [63] Measurement of the average viscometric degree of polymerization of new and aged cellulosic electrically insulating materials IEC Standard 60450, 2nd ed, 2004-04
- [64] Petroleum products — Transparent and opaque liquids — Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity ISO Standard 3104, 2nd ed, 1994-10
- [65] Petroleum products — Determination of pour point, ISO Standard 3016, 2nd ed, 1994-08
- [66] Insulating liquids - Determination of acidity - Part 2: Colourimetric titration, IEC Standard 62021-2, 1st ed, 2007-05
- [67] Detection and determination of specified additives in mineral insulating oils, IEC Standard 60666, 2nd ed, 2010-04
- [68] AOAC 983.15 - Official methods of the Association of Analytical Chemists. 15th ed. vol. II, 1990.
- [69] J. Ponočko, D. Ilić, J. Lazić, D. Mihajlović, I. Klasnić, Đ. Jovanović, Procena sadržaja vode u čvrstoj izolaciji energetskih transformatora metodom FDS. ELEKTRANE 2014, Srbija, Zlatibor, 2014
- [70] OMICRON DIRANA User Manual, OMICRON electronics, 2010
- [71] J.Dai and Z.Wang, "A Comparison of the Impregnation of Cellulose Insulation by Ester and Mineral oil", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol 15, No.2, pp 374-381, Apr. 2008

- [72] B.V.Vanin, "Oil-impregnated Cellulose Insulation. Moisture diffusion and Equilibrium in View of Interfacial Adsorption Water Vapor by Cellulose in Insulation Microcapillaries", presented at CIGRE Session, Paris, 2000
- [73] C.Krause, H.P. Gasser, J. Husser and A. Sidler, "Effects of Moisture in Transformerboard insulation and the Mechanism of Oil Impregnation of Void", presented at the Transform 98, Forum of Technology, Munich, Germany, Apr. 1998.
- [74] T.V. Oommen, J.Thompson and B.Ward, "Moisture Estimation in Transformer Insulation", presented at the Panel Session of IEEE Transformers Committee, San Diego, California, Mar. 2004
- [75] J.A.Thompson, "Transformer Paper in Oil Water Diffusion Time Constant", presented at the IEEE Insulating Fluids Subcommittee, C 57.106 WG, Apr. 2002
- [76] R. Jeffries. "The Sorption of Water by Cellulose and Eight Other Textile Polymers", J. Textile Inst. Trans., Vol. 51, No.9, pp. 339-74, 1960.
- [77] L.J. Zhou, "Modeling of Transient Moisture Equilibrium in Oil-Paper Insulation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. vol. 15, no. 3, pp. 872-878, 2008.
- [78] B.D. Sparling and J. Aubin, "Assessing Water Content In Insulating Paper of Power Transformers", presented at the Fifth Conference Materials, Nov. 2006
- [79] M. Koch, S.Tenbohlen and T.Stirl, "Advanced Online Moisture Measurements in Power transformers", presented at the International Conference on CMD, Korea, 2006
- [80] Y. Du, A.V. Mamishev, B.C. Lesieture and M. Zahn, "Measurement of Moisture Diffusion as a Function of Temperature and Moisture Concentration in Transformer pressboard", in Annual Report of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998, vol.1, pp. 341-344
- [81] J.A.Thompson, "Moisture Dynamic parameters", presented at the IEEE Insulating Fluids Subcommittee, C 57.106 WG, Mar. 2003
- [82] S. D. Foss, Power Transformer Drying Model. Pittsfield, MA, USA: Dynamic Syst., 1987, pp. 16-19
- [83] W W Guidi and H. P. Fullerton, "Mathematical Methods for Prediction of Moisture Take-up and Removal in Large Power Transformers," Proceedings of IEEE Winter Power Meeting, C-74 pp. 242-244, 1974

- [84] N. Ilić, J. Lukić, Z. Radaković, U. Radoman, D. Radić, D. Milosavljević, “Experiment for accelerated insulation aging and construction of special exploration transformer,” CIGRE Conf., Serbia, 2015, A02-08
- [85] <http://hostcalculus.com>
- [86] Z. Radakovic, M. Sorgic, “Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers,” IEEE Trans. Power Del, vol. 25, no. 2, pp. 790-802, 2010.
- [87] V. Vasovic, J. Lukic, D. Mihajlovic, B. Pejovic, Z. Radakovic, U. Radoman, A. Orlovic, "Aging of transformer insulation — experimental transformers and laboratory models with different moisture contents: Part I — DP and furans aging profiles", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 26, No. 6 (2019), pp. 1840-1846
- [88] Nejedly, Newesely, Evaluation Of The Extent Of Ageing Of Paper In Oil-Immersed Power Transformers, D1-302, CIGRE Session 2004.
- [89] M.A.G.Martins, “Vegetable Oils, An Alternative to Mineral Oil for Power Transformers-Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil”, IEEE Electr. Insul. Mag. Vol.26, No. 6,7, 2010
- [90] M-L. Coulibaly, C. Perrier, M. Marugan and A. Beroual, “Aging behavior of cellulosic materials in presence of mineral oil and ester liquids under various conditions”, IEEE TDEI, Vol. 20, No. 6, pp. 1972-1976, December, 2013
- [91] Vasovic.V, Lukic J., Perrier.C, Coulibaly L., Equilibrium Charts for Moisture in Paper and Pressboard Insulations in Mineral and Natral Ester Transformer Oil, IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April, Vol.30, No.2. 2014.
- [92] Cargill, “Water Equilibrium Charts for Envirotemp™ FR3™ Fluid and Paper” in Cargill Technical Report TR -290, 2007.
- [93] T.V. Oommen, “Moisture Equilibrium in Paper-Oil Systems”, Proceedings of the Electrical/Electronics Insulation Conference, Chicago, pp. 162-166, October 3-6, 1983.

- [94] Lukic J, Vasovic V, Mihajlovic D, Pejovic B, Milosavljevic S, Radakovic Z, Radoman U, "Cellulose ageing and water content estimations - correlations of experimental transformers ageing to real transformers in service and post-mortem analyses", SC A2, B2 & D1 International Tutorials & Colloquium - CIGRE India, New Delhi, Proceedings D1, pp. 98-104, November 2019.
- [95] C. Perrier, M-L. Coulibaly, France J. Lukic, V. Vasovic, Serbia, "Ageing phenomena of cellulose/oil insulation in natural ester and mineral oil", 45th CIGRE Session, CD rom, SC A2, A2 – 302, Paris, 2014
- [96] K. Walczak, A. Graczkowski, J. Gielniak, S. Gubanski, H. Moscicka Grzesiak, "Assessment of insulation state of power transformer after 35 years of operation using different diagnostic methods," 14th Int. Symp. High Voltage Engineering, 2005, paper 422, G - 086.
- [97] P. Przybylek, „The influence of temperature and aging of cellulose on water distribution in oil paper insulation,” IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul., vol. 20, Iss. 2, pp. 552-556, 2013.
- [98] FIST 3-30, "Transformer Maintenance", United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, Oct. 2000
- [99] H. P. Gasser, C. Krause, M. Lashbrook and R. Martin, "Aging of pressboard in different insulating liquids", ICDL conference, 26-30 June, 2011. M-L,
- [100] L. Lundgaard & al., "Aging of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis", IEEE TDEI, Vol. 15, No. 2, pp. 540-546, 2008.].
- [101] I.U.Khan et al. „Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers“, IEEE Elec.Insul.Magazine, Vol.24, No.6, pp. 22-29, 2008.
- [102] M.Duval and R.Baldyga, „Stray gassing of FR3 oils in transformers in service“, Int. Conf. of Doble Clients, 2009

- [103] V.Vasovic, J.Lukic, D.Mihajlovic, B.Pejovic, M.Milovanovic, U.Radoman, Z.Radakovic, Aging of Transformer Insulation - Experimental Transformers and Laboratory Models with different Moisture Contents: Part II – Moisture Distribution and Aging Kinetics accepted for publication, IEEE Transaction on Dielectrics, December 2019,
- [104] K. J. Rapp, C. P. Mcshane, and J. Luksich, “Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 2005, pp 393–396.
- [105] Y. Bertrand and D. Laurichesse, “Comparison of the oxidation stabilities of vegetable based and mineral insulating oils” presented at the MatPost, Lyon, France, 2007.

PRILOG 1 Skraćenice i oznake:

ET – energetski transformatori punjeni izolacionim uljem sa bakarnim provodnicima

IS – izolacioni sistem energetskih transformatora koji čine izolaciono ulje i svi materijali izrađeni od celuloze

A – predeksponencijalni faktor, mera uticaja tipa papira, ovlaženosti i drugih parametara na brzinu starenja papirne izolacije

E_A – energija aktivacije reakcija degradacije izolacionog papira

DP – srednji viskozimetrijski stepen polimerizacije papira

DBPC – diterc.-butil parakrezol, inhibitor oksidacije ulja

TBHQ – terc. butil hidorkinon, inhibitor oksidacije ulja

FDS – eng., frequency domain spectorscopy – spektroskopija u frekventnom domenu

2-FAL – 2-furfural

2-FOL – 2-furfuril alkohol

2-ACF – 2 acetil furan

5 MEF – 5 metil furan

5 HMF – 5 hidroksi metil furan

BIOGRAFSKI PODACI O KANDIDATU

Valentina Vasović rođena je u Beogradu 1983. godine, gde je završila osnovnu školu i XIII beogradsku gimnaziju. Diplomirala je na Tehnološko-metalurškom fakultetu u Beogradu 2008. godine sa prosečnom ocenom 8,73 kod mentora dr Ljubičke Rajaković, red. prof, na Katedri za Analitičku hemiju.

Od novembra 2008. godine zaposlena je u Elektrotehničkom institutu „Nikola Tesla” u laboratoriji za ispitivanje izolacionih ulja i papira, prvo kao pripravnik, a danas kao stručni saradnik. Školske 2009/2010. godine upisala se na doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu, studijski program Hemijsko inženjerstvo, pod rukovodstvom mentora dr. Aleksandra Orlovića, red. prof.

Specijalizovana je u oblasti ispitivanja papirno-uljne izolacije i dijagnostici stanja energetskih i mernih transformatora, u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije, primenom analitičkih metoda za ispitivanje mineralnih izolacionih ulja.

Bavi se istraživanjem u oblasti fenomena i mehanizama starenja i raspodele produkata degradacije u papirno/uljnom izolacionom sistemu.

Učestvovala je u organizaciji i sprovođenju više istraživačkih projekata realizovanih za potrebe inostranih firmi, kao i na projektima finansiranim od strane Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja. Bila je saradnik na izradi većeg broja studija i internih standarda vezanih za održavanje energetskih transformatora za potrebe Javnog preduzeća Elektroprivreda Srbije i AD Elektromreže Srbije.

Bila je autor i koautor više radova prezentovanih na naučnim skupovima u zemlji i inostranstvu. Objavljeni naučni radovi koji su nastali kao rezultat rada na doktorskoj tezi su:

U istaknutim časopisima međunarodnog značaja M22

V.Vasović, J.Lukić, C.Perrier, M.Coulibably: „Equilibrium Charts for Moisture in Paper and Pressboard Insulations in Mineral and Natural Ester Transformer Oils“, - IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 30, no. 2, pp. 10-16, 2014 (IF= 1.643) Engineering, Electrical & Electronic (92/249) (ISSN 0883-7554) DOI: 10.1109/MEI.2014.6749568.

V.Vasovic, J.Lukic, D.Mihajlovic, B.Pejovic, U.Radoman, Z.Radakovic, A.Orlovic: „Aging of Transformer Insulation - Experimental Transformers and Laboratory Models with different

Moisture Contents: Part I – DP and Furans Aging Profiles“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, no. 6, pp. 1840 – 1846, 2019 (IF= 2.554), Engineering, Electrical & Electronic (120/266) (ISSN: 1558-4135), DOI:10.1109/TDEI.2019.008183.

V.Vasovic, J.Lukic, D.Mihajlovic, B.Pejovic, M.Milovanovic, U.Radoman, Z.Radakovic: „Aging of Transformer Insulation - Experimental Transformers and Laboratory Models with different Moisture Contents: Part II – Moisture Distribution and Aging Kinetics“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 26, no. 6 pp. 1847 – 1852, 2019 (IF=2.554), Engineering, Electrical & Electronic (120/266) (ISSN: 1558-4135), DOI: 10.1109/TDEI.2019.008184.

U časopisima nacionalnog značaja M53

V.Vasović, D.Mihajlović D, J.Janković, J.Lukić: „Procena stanja papirne izolacije energetskih transformatora na osnovu sadržaja 2-furfurala u mineralnom izolacionom ulju korigovanog na referentnu temperaturu od 20 °C“, Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", 2019; vol 29, br. 29, str. 45-56, (ISSN: 0350-8528), DOI:10.5937/zeint29-23912.

Radovi saopštjeni na skupovima nacionalnog značaja štampani u celini M63

V.Mandić, D. Nikolić, J. Lukić: Izolaciona ulja biljnog porekla i komparativna analiza sa mineralnim uljima, *Zbornik radova 30. savetovanja CIGRE Srbija*, cd rom, Zlatibor, Srbija, 2011.

V.Vasović, D.Mihajlović, J. Janković, K.Drakić, J. Lukić, “Analiza sadržaja gasova rastvorenih u ulju – značaj u dijagnostici pogonskog stanja transformatora”, *Zbornik radova X savetovanja CIRED Srbije*, cd rom, Vrnjačka Banja, Srbija, 2016.

V. Vasović, D. Mihajlović, J. Janković, J. Lukić, "Dijagnostika stanja energetskih transformatora na osnovu analize ulja – značaj baze podataka i iskustva iz prakse", *Zbornik radova 33. savetovanja CIGRE Srbije*, cd rom, Zlatibor, Srbija, 2017.

V.Vasović, J.Janković, D.Mihajlović, J.Lukić, Đ.Jovanović, D.Žukovski, M. Cvijanović, „Interesantni slučajevi dijagnostike stanja energetskih transformatora nakon kvara i havarije tokom 2017 i 2018 godine: Unapređenje dijagnostike primenom novih metoda i post-mortem analiza“, *Zbornik radova 34. savetovanja CIGRE Srbija*, cd rom, Vrnjačka Banja, Srbija, 2019.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Валентина З. Васовић

Број индекса 4041/2017

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

РАСПОДЕЛА ВЛАГЕ И ДЕГРАДАЦИЈА ИЗОЛАЦИОНОГ СИСТЕМА ЕНЕРГЕТСКИХ
ТРАНСФОРМАТОРА СА МИНЕРАЛНИМ И БИЉНИМ УЉЕМ

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 03.06.2021.



Prilog 3

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора Валентина З. Васовић

Број индекса 4041/2017

Студијски програм Хемијско инжењерство

Наслов рада РАСПОДЕЛА ВЛАГЕ И ДЕГРАДАЦИЈА ИЗОЛАЦИОНОГ СИСТЕМА
ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА СА МИНЕРАЛНИМ И БИЉНИМ УЉЕМ

Ментор др Александар Орловић, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 03.06.2021.



Prilog 4

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

РАСПОДЕЛА ВЛАГЕ И ДЕГРАДАЦИЈА ИЗОЛАЦИОНОГ СИСТЕМА ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА СА МИНЕРАЛНИМ И БИЉНИМ УЉЕМ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 03.06.2021

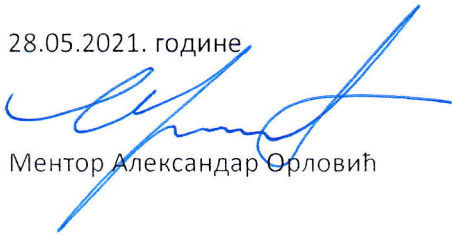
B. B. B. B. B. B.

ОЦЕНА ИЗВЕШТАЈА О ПРОВЕРИ ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма iThenticate којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације „**Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима**“, аутора Валентине Васовић, констатујем да утврђено подударане текста износи број 6%. Овај степен подударности доминантно је последица претходно публикованих резултата докторандових истраживања који су проистекли из његове дисертације, личних имена, библиографских података о коришћеној литератури и тзв. општих места и података, што је у складу са чланом 9. Правилника.

На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујем да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

28.05.2021. године



Ментор Александар Орловић