






Primena čiste tehnologije za uklanjanje PCB iz mineralnih ulja i energetskih transformatora do postizanja veoma niskih vrednosti PCB-a za potrebe remonta i reciklaže

Draginja Mihajlović¹, Jelena Janković¹, Valentina Vasović¹, Vladimir Ivančević¹, Jelena Lukić¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, , Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

draginja.mihajlovic@ieent.org, jelena.jankovic@ieent.org,
valentina.vasovic@ieent.org, vladimir.ivancevic@ieent.org, jelena.lukic@ieent.org

Kratak sadržaj: Republika Srbija je kao potpisnica Stokholmske konvencije o dugotrajnim organskim zagađujućim supstancama usvojila niz zakonskih u podzakonskih akata koji su definisani kroz Nacionalni implementacioni plan i Akcioni plan na osnovu koga je izrađen Projekat Pravilno upravljanje i finalno odlaganje polihlorovanih bifenila (PCB) u čijoj realizaciji je učestvovao i Institut Nikola Tesla (INT). U periodu od 2015. do 2022. godine INT mobilnim postrojenjem dekontaminirano je uspešno 601 tona PCB ulja, odnosno postignut je sadržaj PCB ispod 50 mg/kg, čime su predmetni energetski transformatori (ET) klasifikovani kao nekontaminirani [1,2]. Ukoliko se ET proglašava otpadom ili u slučaju neophodne popravke/regeneracije ulja, vrednost PCB treba da bude manja od 10 mg/kg. Pretragom baze podataka INT utvrđeno je da postoji još 2637 ET koja sadrže PCB u opsegu koncentracija od 2 do 50 mg/kg. U radu je prikazana primena INT postupka dekontaminacije ET do postizanja niskih vrednosti PCB u ulju, koja je u skladu sa pravilima zaštite životne sredine i bezbednosti i zdravlja na radu.

Cljučne reči: energetski transformator, polihlorovani bifenili (PCB), ekološki postupak, remont, reciklaža

1. Uvod

Procesi obrade ulja koji nemaju negativan uticaja na životnu sredinu su veoma značajni za pouzdan rad elektroenergetskog sistema. Primenjuju se tokom životnog veka ET u cilju blagovremenog održavanja, kako bi se uklonila

neželjena jedinjenja (produkti starenja ili kontaminacije ulja) i kako bi se obezbedio pouzdan rad i produžio radni vek ET.

Upotreba sintetičkih izolacionih tečnosti polihlorovanih bifenila (PCB) koja je našla svoju primenu u industriji zbog izuzetno dobrih protivpožarnih karakteristika, zabranjena je 1980-ih godina zbog visoke toksičnosti i kancerogenosti [3]. Na listi opasnih supstanci koje daje Agencija za toksične supstance i registar bolesti, eng. (ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry) najbrojnija su jedinjenja koja u sebi sadrže hlor. Na ovoj listi PCB zauzima visoko peto mesto, što ga stavlja u vrh toksičnih supstanci. Prestankom upotrebe PCB ulja i njihovom zamenom mineralnim uljima došlo je do kontaminacije ulja i opreme PCB-om. Obrada ili dolivanje ulja i korišćenje mobilnih jedinica za filtraciju ulja izazvalo je masovno širenje PCB kontaminacije u ET punjenim mineralnim uljem.

Dozvoljena granična vrednost sadržaja PCB u mineralnom ulju i ET za odlaganje otpada, sagorevanje i spaljivanje u Republici Srbiji je 10 mg/kg. Pretragom baze podataka INT utvrđeno je da postoji još 2637 ET koji sadrže tragove PCB-a (PCB od 2 i 50 mg/kg PCB). Pomenuti ET mogu biti izvor daljeg zagađivanja vazduha ako se ulje podvrgava procesu regeneracije ulja korišćenjem savremenih tehnologija sa reaktivirajućim adsorbentima (zbog podgrevanja adsorbenta na temperaturama od 600°C) ili mogu prouzrokovati kontaminaciju različite opreme pri remontu transformatora u remontnim radionicama.

2. Ispitivanje uticaja rada mobilnog postrojenja na ljude i životnu sredinu

INT patentirana tehnologija PCB dekontaminacije [4] se primenjuje u skladu sa dozvolom br. 19-00-00267/2014-05, izdatom od strane Ministarstva zaštite životne sredine. Prilikom rada mobilnog postrojenja, na lokacijama vlasnike opreme, preduzimaju se sve neophodne mere u cilju zaštite ljudi i okoline.

Tokom primene postupka dekontaminacije PCB kontaminiranih ET, 2020. godine na jednoj od lokacija u industriji, ispitivani su uslovi radne okoline merenjem koncentracija hemijskih štetnosti u vazduhu i zemljištu. Ispitivanja vazduha su vršena u toku samog postupka dehlorinacije ulja u mobilnom postrojenju, pri maksimalnim radnim temperaturama. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tabeli 1 [5] i zadovoljavaju sledeće kriterijume u vazduhu: PCB < 1 mg/kg, ugljovodonike 500 mg/kg (C₁-C₉), 300 mg/kg (C₁₀-C₁₁), 100 mg/kg (C₁₂-C₂₁) i policiklične aromatične ugljovodonike (PAH) < 0,02 mg/kg [6]. Izmerene vrednosti su u skladu sa dozvoljenim, odnosno primenjene su propisane mere bezbednosti i zdravlja na radu. Rezultati ispitivanja zemljišta pre i po završetku radova na istoj lokaciji u prethodno definisanim tačkama uzorkovanja, Tabela 2 [5], ukazuju da je kvalitet zemljišta održiv, funkcije

zemljišta nisu bile ugrožene odnosno nisu prekoračene remedijacione vrednosti [7].

Tabela 1. Rezultati ispitivanja definisanih parametara u vazduhu

| Datum | Tačka uzorkovanja | Parametar, mg/m ³ | | | | |
|-------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| | | PCB | C ₁ -C ₉ | C ₁₀ -C ₁₁ | C ₁₂ -C ₂₁ | PAH |
| 25.09.2020. | A1 | <0,5 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| | A2 | <0,5 | <0,01 | 0,14 | 0,56 | <0,01 |
| | A3 | <0,5 | <0,01 | 0,35 | 0,99 | <0,01 |
| 05.10.2020. | A1 | <0,5 | <0,01 | <0,01 | 0,33 | <0,01 |
| | A2 | <0,5 | <0,01 | 0,19 | 0,48 | <0,01 |
| | A3 | <0,5 | <0,01 | 0,43 | 0,87 | <0,01 |
| 23.10.2020. | A1 | <0,5 | <0,01 | <0,01 | 0,49 | <0,01 |
| | A2 | <0,5 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| | A3 | <0,5 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |

Tabela 2. Rezultati ispitivanja parametara u zemljištu

| Pre/posle PCB dekontaminacije | Tačka uzorkovanja | Parametar, mg/kg | | |
|-------------------------------|-------------------|------------------|--------|----------------------------------|
| | | PAH | PCB | C ₁₀ -C ₄₀ |
| Pre | S1 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| | S2 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| | S3 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| | S4 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| | S5 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| Posle | S1 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| | S2 | <0,02 | <0,004 | <10 |

| Pre/posle PCB dekontaminacije | Tačka uzorkovanja | Parametar, mg/kg | | |
|-------------------------------|-------------------|------------------|--------|----------------------------------|
| | | PAH | PCB | C ₁₀ -C ₄₀ |
| | S3 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| | S4 | <0,02 | <0,004 | <10 |
| | S5 | <0,02 | <0,004 | <10 |

Otpad koji se generiše u toku rada mobilnog postrojenja (istrošeni reagens i zauljeni adsorbent) je netoksičan [8] i ne sadrži PCB, zahvaljujući hemijskoj razgradnji PCB-a u neorganske hloride, što je potvrđeno kroz izveštaje o karakterizaciji otpada koji su izdati od strane laboratorije ovlašćene za ispitivanja otpada. Po završetku procesa, otpad se predaje ovlašćenom operateru na dalju koprerađu ili reciklažu solidifikacijom u preduzećima specijalizovanim za tretman otpada.

3. Primena postupka obrade ulja i ispiranja transformatora do postizanja niskih vrednosti PCB

U ovom poglavlju opisana je primena postupka, na pet ET naponskog nivoa 20/04 kV i snage od 0,63 do 1 MVA, u industriji. Koncentracije PCB u mineralnim uljima su bile u opsegu od 33 do 191 mg/kg. Ugovorom je definisana granična vrednost od 10 mg/kg PCB u uljima iz ET posle primenjenog tretmana. U postrojenju su dnevno obrađivane tri šarže, od po 500 kg ulja, dok celokupna količina od oko 6000 kg ulja nije obrađena.

Celokupan postupak je obuhvatao sledeće aktivnosti:

1. Dopremanje postrojenja na lokaciju.
2. Postavljanje zaštitnih folija radi zaštite terena na kojem se vrši proces dekontaminacije.
3. Istovar hemikalija, potrebne opreme i sudova.
4. Montaža i postavljanje postrojenja.
5. Povezivanje postrojenja na električnu mrežu.
6. Priprema transformatorskog ulja za proces dehlorinacije (istakanje ulja iz transformatora, priprema šarže za tretman).
7. Proces dekontaminacije transformatorskog ulja u mobilnom postrojenju.
8. Završna obrada, sušenje i filtriranje ulja pod vakuumom radi pripreme ulja za nalivanje u transformator.
9. Ispitivanje obrađenog ulja u terenskoj laboratoriji.
10. Nalivanje obrađenog ulja u transformator.
11. Predaja generisanog otpada ovlašćenom operateru.
12. Odlazak sa lokacije.

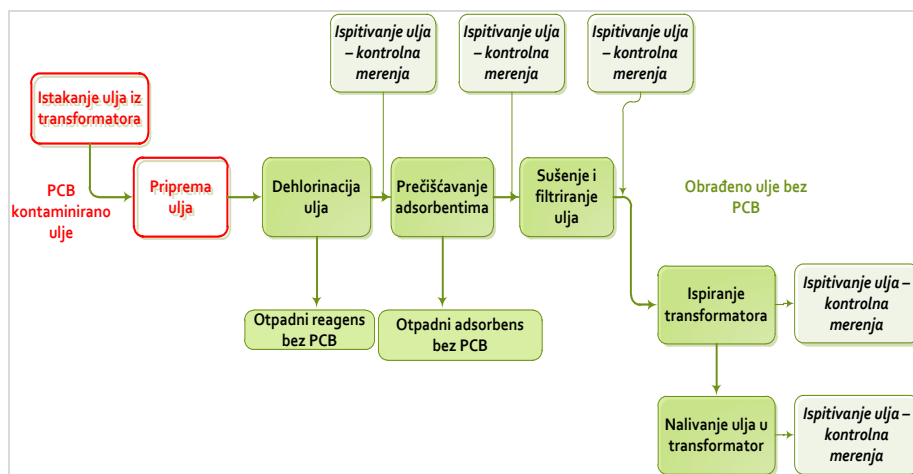
Operaciju montaže i postavljanja postrojenja obavljala je posada koja je radila na postrojenju i koja je obučena za taj posao. Na odgovarajućoj mikrolokaciji odabrana je odgovarajuća čvrsta površina koja je bila zadovoljavajuće nivelisana za postavku mobilnog postrojenja. Prostor na kojem se nalazila mobilna jedinica i gde se vršila dehlorinacija ulja je bio obeležen trakama koje su vidno ograđivale radni prostor, radi zaštite od pristupa trećih lica. Na lokaciji u krugu fabrike na kojoj se nalazilo mobilno postrojenje postavljena je i prateća oprema (predgrejač, mašina za sušenje ulja, prihvatni sudovi za neobrađeno ulje, prihvatni sudovi za obrađeno ulje, tankvane, bačve za otpad). Na Slici 1. prikazana je postavka INT mobilnog postrojenja i prateće opreme na lokaciji.



Slika 1. INT mobilno postrojenje i prateća oprema

3.1 Tehnološki proces

Tehnološka koncepcija procesa je prikazana na blok šemi (Slika 2).



Slika 2. Blok šema procesa PCB dekontaminacije ulja i transformatora

3.2 Istakanje ulja iz transformatora

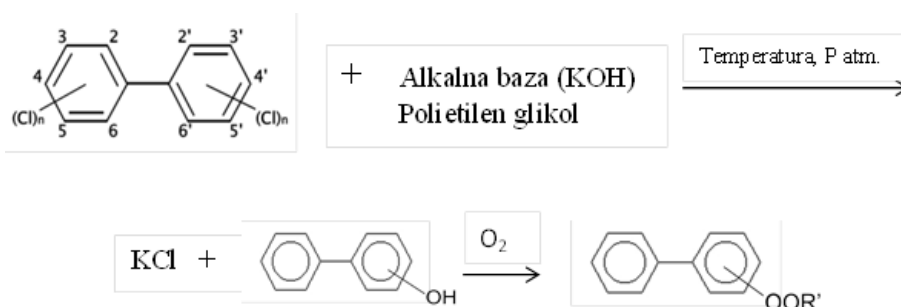
Ulje iz transformatora je istakano u prihvatne sudove (IBC kontejner od 1000 m³). Na izlazni ventil transformatora priključeno je fleksibilno uljno otporno crevo, uz prethodno postavljanje zaštitnih folija ispod IBC kontejnera, tako da se zaštiti prostor oko kontejnera i transformatora od nekontrolisanog curenja ulja. Nakon što je transformator ispražnjen istočeno je zaostalo kontaminirano ulje iz konzervatora i regulatora napona i tako ispražnjen transformator je ostavljen kako bi se ulje dodatno ocedilo. Prilikom pretakanja, uz folije na licu mesta su se nalazili adsorbenti i krpe za sakupljanje u slučaju da dođe do izlivanja ulja. Prostor gde se vrši pretakanje ulja zaštićen je od pristupa trećih lica trakama koje vidno obeležavaju i ograđuju radni prostor. Nakon pretakanja, IBC kontejneri sa neobrađenim uljem su prevezeni viljuškarom na lokaciju mobilnog postrojenja i obezbeđeni tankvanama, a zatim je ulje podvrgnuto procesu hemijske razgradnje u šaržama od oko 500 kg ulja.

3.3 Obrada ulja

Obrada ulja podrazumeva sledeće tehnološke faze: reakciona hemijska razgradnja PCB-a (dehlorinacija ulja), adsorptivno prečišćavanje i sušenje i filtriranje ulja koje ne sadrži PCB.

Neobrađeno ulje je pumpom iz prihvatnog suda uvođeno u predgrejač u kome se ulje zagrevalo do 90 °C, a potom u reaktor gde se dalje zagrevalo do reakcione temperature (do 130 °C). Dehlorinacija ulja se vršila prethodno pripremljenom reagens smešom kalijum hidroksida (KOH) i polietilen glikola (PEG). Reagens smeša je pripremljena dan ranije mešanjem na 120 °C nekoliko sati, kako bi se obezbedilo dobro rastvaranje KOH.

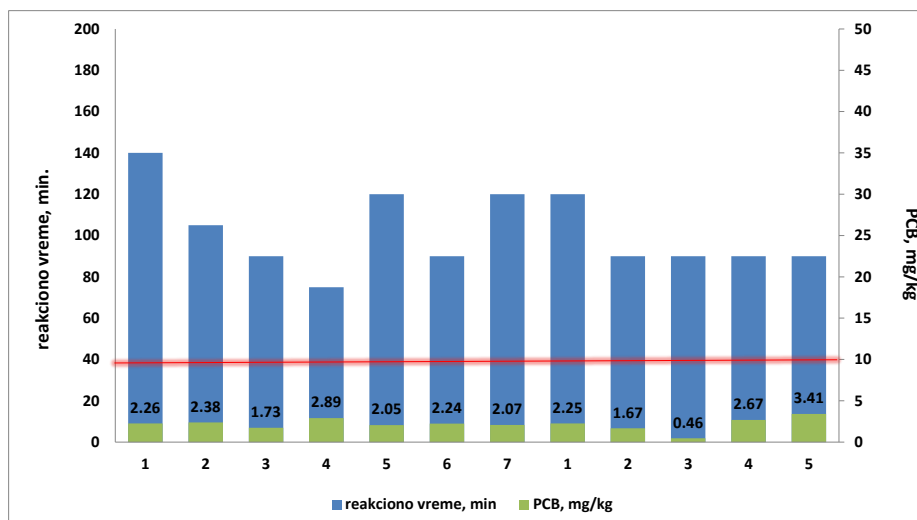
Postupak dekontaminacije je zasnovan na hemijskoj reakciji kojom se molekuli PCB razgrađuju i prevode u organske molekule koji ne sadrže hlor (Slika 3).



Slika 3. Hemijska reakcija dehlorinacije

Procesni parametri (vreme trajanja reakcije i temperatura) se definišu u zavisnosti od početne koncentracije PCB u ulju i raspodele kongenera. PCB predstavlja mešavinu pojedinačnih PCB kongenera, najčešće pod imenom Arohlor. Mešavina PCB kongenera Arohlor proizvodila se od 1930 do 1979. godine. Postoje različite Arohlor mešavine u zavisnosti od masenog udela hlora (u nazivu Arohlor 1242, 42 predstavlja maseni udeo hlora u smeši). PCB kontaminirana ulja u Srbiji najčešće sadrže mešavine kongenera Arohlor 1254 i 1260, dok su transformatorska ulja koja su kontaminirana mešavinom Arohlor 1242 manje zastupljena. Takva ulja su teža za obradu zbog postojanja kongenera sa malim brojem atoma hlora kod kojih teže dolazi do raskidanje veze između ugljenika i hlora. Ukoliko su u ulju pretežno prisutni kongeneri 1242 neophodno je da reakciona temperatura bude viša, do 138 °C, što je takođe slučaj ukoliko ulazna šarža ima visok sadržaj PCB, preko 1000 mg/kg.

Optimizacija vremena reakcije i kontrola dehlorinacije je vršena uzimanjem uzorka ulja posle očekivanog vremena reakcije. Koncentracija PCB je određena kvalitativnim ispitivanjem PCB-a u ulju pomoću uređaja Dexsil u terenskoj laboratoriji [9], pri čemu je interno dogovorena granična vrednost PCB bila 5 mg/kg. Reakciono vreme dehlorinacije je u proseku iznosilo oko 100 minuta, koliko je bilo potrebno za dostizanje niskih vrednosti sadržaja PCB (po šaržama izmerene vrednosti PCB u ulju su iznosile od 0,46 do 3,41 mg/kg, mereno uređajem Dexsil). Na Slici 4 prikazana je promena koncentracije PCB u zavisnosti od reakcionog vremena za celokupno obrađenu količinu ulja, odnosno svih 12 šarži. U cilju optimizacije procesa i smanjenja generisanog otpada jedna reagens smeša se koristi više puta, pa je tako na ovoj lokaciji pripremljena dva puta, pri čemu je prva reagens smeša korišćena za tretman prvih 7 šarži, a druga za sledećih 5 šarži.



Slika 4. Promena koncentracije PCB u ulju u odnosu na reakciono vreme po šaržama

Nakon razgradnje hemijskom reakcijom i taloženja, u ulju zaostaju tragovi polarnih komponenti (zaostali tragovi reagensa i ostali polarni produkti starenja ulja) koje je neophodno izdvojiti iz obrađenog ulja za ponovno korišćenje u električnim uređajima. Tragovi polarnih komponenti su uklonjeni procesom adsorpcije na aktivnim adsorbensima na temperaturi od 65 °C do 85 °C. Korišćena je mešavina čvrstih adsorbentata koji su specifičnog sastava i visoke poroznosti, jedan na bazi alumosilikata a drugi dominantno silicijum dioksid. Silicijum dioksid ima bolje mehaničke osobine i stavlja se na dno kolone, dok alumosilikat ima bolji kapacitet adsorpcije i stavlja se iznad silicijum dioksida. Odnos prečnika kolone i dužine sloja adsorbenta je iznosio od 0,20 do 0,30. Kolone sa adsorbentom su vakuumirane pre uvođenja ulja, kako bi se omogućilo ravnomerno i efikasno iskorišćenje sloja poroznog adsorbensa. Vreme prolaska šarže kroz sloj adsorbensa protokom od oko 3 dm³/min je iznosilo 2,5 - 3 h, odnosno 8 - 10 prolaza. Završetak ove faze procesa je određivan za svaku šaržu pojedinačno, ispitivanjem ulja do postizanja definisanih graničnih vrednosti međupovršinskog napona i faktora dielektričnih gubitaka ulja. Tokom rada mobilnog postrojenja konstatno se vršila optimizacija procesa, u cilju smanjenja količine generisanog otpada, a da se pritom ne ugrozi kvalitet izlaznog proizvoda. Udeo reagensa prema masi kontaminiranog ulja je iznosio oko 6%, dok je udeo adsorbensa je iznosio 2 % u odnosu na masu obrađenog ulja.

Okavko pripremljeno ulje bez PCB-a je istočeno u prihvatne sudove (IBC kontejnere). Nakon izlaska sa adsorpcionih kolona, ulje je inhibirano sa 0,40% 2,6-ditercijarnog-butil-para-krezola u odnosu na masu ulja, u cilju produženja budućeg radnog veka obrađenog ulja.

Nakon adsorptivnog prečišćavanja, inhibiranja i postizanja zadovoljavajućih rezultata određenih karakteristika, ulje je podvrgnuto vakuum sušenju u postrojenju za sušenje i filtriranje, u cilju dostizanja

zahtevanih električnih karakteristika izolacionih ulja za nalivanje u transformator. Obrađeno ulje je oslobođeno prisutne vlage i čestica kroz 1 μm filtere. Sušenje ulja se odvijalo na temperaturi od 70 °C protokom od 3000 l/h pri pritisku do 1 bara tokom 2 h. Tokom sušenja je vršen monitoring sadržaja vode rastvorene u ulju pomoću uređaja Domino. Ovakvim načinom sušenja ulja postignuta su dobra izolaciona svojstva čime je omogućena njihova ponovna primena u električnoj opremi.

Efikasnost procesa kao i završetak svake pojedinačne faze je praćen i određivan ispitivanjem karakteristika ulja u terenskoj laboratoriji i laboratoriji Instituta. Kriterijumi su definisani internom procedurom i u skladu sa graničnim vrednostima propisanim IEC Standardom [10].

3.4 Ispiranje i nalivanje transformatora obrađenim uljem bez PCB-a

Pre finalnog nalivanja obrađenog ulja u transformator, vršeno je ispiranje transformatora prethodno pripremljenim uljem iz procesa (obrađenim i osušenim sa dielektričnom čvrstoćom od minimalno 240 kV/cm i sadržajem PCB manjim od 5 mg/kg). ET su ispirani obrađenim uljem 2 do 3 puta. Prvo ispiranje je vršeno sa 100 l obrađenog ulja, pomoću pumpe (protokom od 1000 l/h) postavljanjem creva na gornji otvor kako bi se isprali svi delovi transformatora u kojima može zaostati kontaminirano ulje. Drugo ispiranje, sa oko 400 l obrađenog ulja, vršeno je odozdo i ulje je ostavljeno da stoji 24 h u transformatoru, zbog nepostojanja mogućnosti da se transformatori nagnu i na taj način dobro ocede (Slika 5).



Slika 5. Ispiranje i nalivanje transformatora obrađenim uljem

Na ulju od drugog ispiranja meren je sadržaj PCB uređajem Dexsil u terenskoj laboratoriji. Granična vrednost PCB (< 7 mg/kg) na uzorku ulja iz transformatora, koja je definisana internom procedurom rada je postignuta

kod tri transformatora, dok je kod dva transformatora posle drugog ispiranja izmerena vrednost PCB bila povišena (> 7 mg/kg), što je zahtevalo treće ispiranje sa dodatnih 100 l ulja. Po završetku ispiranja izvršeno je finalno nalivanje transformatora obrađenim uljem bez PCB.

3.5 Ispitivanje ulja pre i posle primenjenog postupka

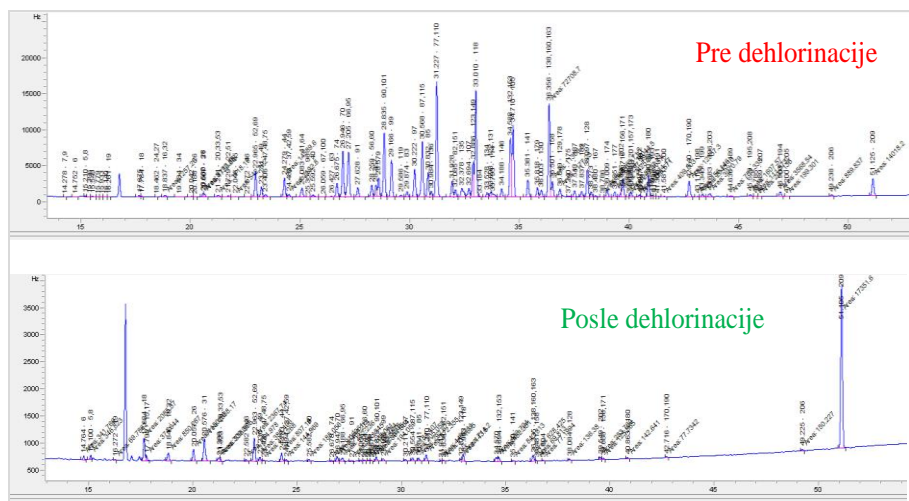
Nakon nalivanja suda transformatora, konzervatora i suda regulatora napona, a pre uključenja pod napon, transformatori su mirovali 24 h. Rezultati ispitivanja karakteristika ulja, pre obrade (PCB), posle obrade ulja a pre nalivanja u ET (dielektrična čvrstoća, broj i veličina čestica), 12 h posle nalivanja u ET (PCB) i 90 dana od izvršenog postupka (PCB), prikazani su u Tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati ispitivanja obrađenog ulja nakon nalivanja u transformatore

| Oznaka ET | Pre obrade | Pre nalivanja u ET na obrađenom ulju | | Posle nalivanja 12 h | Posle 90 dana |
|-----------|------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------|
| | PCB, mg/kg | Deielektrična čvrstoća, kV/cm | Broj i veličina čestica, ISO kod* | PCB, mg/kg | PCB, mg/kg |
| T1 | 47 | 296 | 14/13/10 | 2 | 2 |
| T2 | 33 | 288 | 12/12/9 | 3 | 3 |
| T3 | 49 | 296 | 14/13/10 | 2 | 2 |
| T4 | 191 | 296 | 16/14/12 | 5 | 8 |
| T5 | 71 | 296 | 16/14/12 | 3 | 3 |

* Prvi broj u ISO 4406 kod označava broj čestica $\geq 4 \mu\text{m}$; Drugi broj u kodu označava broj čestica $\geq 6 \mu\text{m}$; Treći broj u kodu označava broj čestica $\geq 14 \mu\text{m}$

Izgled hromatograma za uzorak ulja pre i posle primenjenog postupka na ET oznake T4 (Tabela 3), prikazan je na Slici 6. Sadržaj PCB u ulju određen je kvantitativnom metodom prema Standardu IEC 61619 [11], pomoću gasnog hromatografa sa detektorom zahvata elektrona, Agilent GC-ECD 7890B. Reakcijom dehlorinacije izvršena je razgradnja PCB kongenera prisutnih u početnom uzorku ulja (Slika 6. Pre dehlorinacije) i postignuta je veoma niska koncentracija PCB u ulju (Slika 6. Posle dehlorinacije).



Slika 6. Izgled hromatograma PCB na uzorku ulja pre i posle primenjenog postupka

Sušenjem i filtriranjem ulja postignute su zadovoljavajuće vrednosti dielektrične čvrstoće i broja i veličine čestica u ulju [10].

Zbog moguće pojave povratnog curenja iz izolacije ET, izvršena je verifikacija postupka merenjem koncentracije PCB u ulju posle 90 dana. Na osnovu dobijenih rezultata (PCB < 10 mg/kg, Tabela 3), potvrđeno je da celokupan tehnološki postupak (obrada ulja i ispiranje transformatora) uspešno izvršen.

4. Zaključak

Prikazani tehnološki proces dehlorinacije ulja razvijen je u Institutu Nikola Tesla i zaštićen patentom u Republici Srbiji je u skladu sa najboljom raspoloživom tehnologijom (eng. Best Available Technology – BAT) i najboljom ekološkom praksom (eng. Best Environmental Practice – BEP). Postupak je uspešno primenjen na 5 energetskih transformatora u industriji, čime su postignute niske vrednosti PCB u ulju (< 10 mg/kg). Primena INT tehnologije u uklanjanju PCB-a omogućuje konačno odlaganje ET bez ikakvih dodatnih tretmana po završetku radnog veka, ispunjavajući definisanu granicu za PCB otpad ispod 10 mg/kg. Takođe, u skladu sa poštrenim kriterijumima u pogledu PCB, a u slučaju neophodne popravke, omogućen je prijem ET u remonte radionice.

Literatura

- [1] Zakon o upravljanju otpadom (Sl. glasnik RS, br. 36/2009, 88/2010, 14/2016 i 95/2018 - dr. zakon)
- [2] Projekat IPA 2008 „Podrška zaštiti životne sredine u energetskom sektoru - Rešavanje problema električnih uređaja punjenih PCB uljima u EPS-u“, JP EPS, 2015 – 2018.
- [3] Priručnik za identifikaciju, vođenje evidencije i sigurno rukovanje PCB opremom/uređajima i otpadom”, Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja Republike Srbije, februar 2010.
- [4] Jelena M. Lukić, „Proces za simultano uklanjanje tragova polihlorovanih bifenila, antikorozivnu desulfurizaciju i regeneraciju mineralnih izolacionih ulja”, RS patent broj 53510 B1, Feb. 27, 2015.
- [5] Jelena Lukić, Draginja Mihajlović, Jelena Janković, Valentina Vasović, Dejan Kolarski, Vladimir Ivančević, Neda Kovačević „Dekontaminacija PCB kontaminirane električne opreme primenom patentirane tehnologije Instituta Nikola Tesla “, 2. Savetovanje bezbedno upravljanje hemikalijama, Srbija, 2021.
- [6] *Maksimalno dozvoljene koncentracije škodljivih gasova, para i aerosola u atmosferi radnih prostorija i radilišta*, SRPS Z.B0.001:1991 i Z.B0.001/1:2007.
- [7] Uredba o graničnim vrednostima zagađujućih, štetnih i opasnih materija u zemljištu, "Sl. glasnik RS", br. 30/2018 i 64/2019
- [8] Pravilnik o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada ("Sl. glasnik RS", br. 56/2010, 93/2019 i 39/2021)
- [9] US EPA SW - 846 metoda 9079:1996: Screening Test Method for Polychlorinated Biphenyls in Transformer Oil
- [10] *Mineralna izolaciona ulja u električnoj opremi — Smernice za nadzor i održavanje*, SRPS EN 60422, 2013.
- [11] *Izolacione tečnosti – Kontaminacija polihlorovanim bifenilima (PCB) - Metoda određivanja gasnom hromatografijom na kapilarnoj koloni*, SRPS EN 61619, 2010.

Abstract. The Republic of Serbia signed and ratified the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Law on ratification of the Stockholm Convention was adopted and actions were defined through the National Implementation Plan and the Action Plan. On their basis Project Proper Management and Final Disposal of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) was created. Institute Nikola Tesla (INT) participated in the realization of the project. In the period from 2015 to 2022, 601 tons of PCB oil was successfully decontaminated by the INT mobile plant, i.e. the PCB content was below 50 mg/kg, which classified the power transformers (PT) as non-contaminated [1,2]. If PT becomes waste or in case of necessary repair or oil regeneration, the required limit value is 10 mg/kg. According to data from INT database there are

still 2637 PTs containing PCBs in the concentration range of 2 to 50 mg/kg. In this paper application of the environmentally closed INT decontamination technology for achieving low values of PCB in the oil is shown.

Keywords: power transformer, polychlorinated biphenyls (PCB), environmentally closed, transformer repair, recycling

Application of the Environmentally Friendly Technology for the Removal of PCBs from Mineral Oils and Power Transformers to Achieve Very Low Values of PCBs for Repair and Materials Recycling

Draginja Mihajlović, Jelena Janković, Valentina Vasović, Vladimir Ivančević, Jelena Lukić

Rad primljen u uredništvo: 29.11.2022. godine.

Rad prihvaćen: 05.12.2022. godine.

