

DEKONTAMINACIJA PCB KONTAMINIRANIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA U PD ELEKTROVOJVODINA

J. LUKIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija
K.DRAKIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija
N.KOVAČEVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija
J.JANKOVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija
V.IVANČEVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija
S.MILOSAVLJEVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija
D.VORGIC, ODS „EPS Distribucija“ d.o.o. Beograd
D.MATIĆ, JP EPS

Abstrakt: Piralen (polihlorovani bifenili - PCB), zbog svoje toksičnosti i velike postojanosti, nemogućnosti razgradnje i dobre rastvorljivosti u masnim tkivima živih organizama, lako ulazi u lanac ishrane i predstavlja dugoročno opterećenje za životnu sredinu (dugotrajni organski zagađivači, POPS, eng. Persistent organic pollutants). Iako je izbačen iz upotrebe kao izolaciona tečnost u električnoj opremi pre više od trideset godina, PCB i dalje predstavlja značajan ekološki problem zbog prisutne kontaminacije mineralnih izolacionih ulja PCB-om.

U radu je dat kratak osvrt na zakonsku regulativu i rezultati procesa PCB dekontaminacije energetskih transformatora 20/10/0.4 kV u ODS „EPS Distribucija“, Regionalni centar Elektrovojvodina, primenom procesa dehlorinacije ulja u mobilnom postrojenju prema patentom zaštićenoj tehnologiji. Predstavljen je kratak opis procesa dekontaminacije i kontrolnih merenja korišćenih u svrhu praćenja efikasnosti procesa i verifikacije rezultata dekontaminacije. U Ograncima „Elektrodistribucija Novi Sad“, „Elektrodistribucija Subotica“, „Elektrodistribucija Sombor“, „Elektrodistribucija Ruma“ i „Elektrodistribucija Pančevo“ izvršena je dekontaminacija ukupno 96 transformatora, u opsezima koncentracije PCB u ulju od 50 do 1000 ppm. Prikazani su rezultati karakteristika ulja nakon PCB dekontaminacije i sadržaja PCB u ulju dekontaminiranih transformatora tri meseca nakon izvršene dekontaminacije.

Ključne reči: piralen, energetski transformator, dekontaminacija, dehlorinacija

UVOD

Osnovne osobine koje piralen čine nepoželjnim u okolini su što nije biorazgradiv (priroda ga „ne prepoznaje“ i ne može ga razgraditi i eliminisati) i što je bioakumulativan. Opasan karakter piralena potiče od atoma hlora. Na listi opasnih supstanci koje daje Agencija za toksične supstance i registar bolesti, eng. (ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry) datoj u tabeli 1, najbrojnija su jedinjenja koja u sebi sadrže hlor. Polihlorovani bifenili (piraleni) na ovoj listi zauzimaju visoko peto mesto, što ih stavlja u vrh toksičnih supstanci.

Donošenjem Zakona o upravljanju otpadom (2009) i Zakona o potvrđivanju Stokholmske konvencije o dugotrajnim organskim zagađujućim supstancama (2009) nastale su nove obaveze za vlasnike opreme sa piralenom ili PCB

kontaminiranim fluidima. Zakoni Republike Srbije usklađeni su sa međunarodnim propisima o PCB-u i dati su kroz Stokholmsku konvenciju, koja reguliše merenje, eliminaciju ili smanjenje oslobađanja dugotrajnih organskih zagađujućih supstanci (POPs) među kojima je i PCB. Ključne tačke navedene u zakonu su:

- Sav otpad koji sadrži više od 50 ppm PCB se tretira kao PCB,
- Sva oprema koja sadrži fluid u količini većoj od 5 dm³ (5 l) mora se ispitati na prisustvo PCB,
- Vlasnik opreme sumnjive na kontaminaciju dužan je da izvrši analizu sadržaja PCB u akreditovanoj laboratoriji,
- Vlasnik opreme sumnjive na kontaminaciju dužan je da obeleži opremu prema sadržaju PCB-a
- Uklanjanje materijala koji sadrže više od 500 ppm PCB mora da se obavi do 2015. godine,
- Oprema kontaminirana u opsegu 50 do 500 ppm može se upotrebljavati do kraja radnog veka ako je adekvatno identifikovana i obeležena, ako je ispravna i ne curi, a poželjno je da se trajno zbrine ili dekontaminira do 2025 godine.

Problem u eksploataciji PCB kontaminiranih transformatora postaje posebno ozbiljan ukoliko je transformator neispravan, ima loše karakteristike izolacionog sistema i curi, jer tada je povećan rizik od zagađenja okolnih medijuma (zemljišta, vode, živog sveta), havarije transformatora i ekološkog akcidenta. Značajan je broj transformatora u elektroenergetskom sistemu koji ima neki od nabrojanih problema. Često su izraženi problemi pregrevanja izolacije (termički kvarovi u bakarnim namotajima, na kontaktima regulatora napona, u magnetnom kolu...), gubitka izolacionih svojstava papirno-uljnog dielektrika usled povišene ovlaženosti ili prisustva elektroprovodnih kontaminanta koji nastaju degradacijom sumpornih jedinjenja u izolacionom ulju, te je za neke transformatore primena postupka dekontaminacije hitna, u cilju smanjenja rizika eksploatacije.

Jedan od načina za rešavanje problema kontaminacije transformatora PCB-om je primena postupaka dekontaminacije.

U zavisnosti od tipa i nivoa kontaminacije, kao i od stanja opreme i izolacionog fluida postoji više mogućnosti za uništavanje ili uklanjanje PCB. Tehnologije dekontaminacije se grubo mogu podeliti u dve grupe: destruktivne i nedestruktivne tehnike uklanjanja PCB-a. Izbor najbolje moguće tehnologije uklanjanja (BAT, eng. Best Available Technology) na prvom mestu zavisi od količine i stanja otpada i koncentracionog nivoa PCB.

Nedestruktivne tehnologije podrazumevaju vraćanje transformatora u dalju eksploataciju i one su optimalno rešenje u tehno-ekonomskom pogledu kada je nivo PCB kontaminacije do 2000 ppm. U nedestruktivne tehnologije ubrajaju se one kojima se dekontaminacija uređaja vrši preko izolacionog ulja i tu spadaju postupci dehlorinacije ulja i zamena ulja. Proces dehlorinacije ulja je ekonomski znatno povoljniji od zamene ulja. Za primenu bilo kojeg postupka dekontaminacije operater mora pribaviti dozvolu resornog ministarstva.

Proces PCB dekontaminacije u osnovi mora da bude tehnološki projektovan tako da se u limitiranom vremenu transformator nakon dekontaminacije vrati u pogon. To podrazumeva da data tehnologija treba da zadovolji sledeće:

- Dekontaminaciju transformatora na licu mesta u periodu kada je moguće isključenje u limitiranom vremenskom periodu, što zahteva postrojenje odgovarajućeg kapaciteta.
- Postizanje visokog stepena konverzije PCB-a radi efikasne dekontaminacije uzimajući u obzir moguć efekat „povratnog curenja PCB“ i porast koncentracije PCB u ulju tokom dalje eksploatacije transformatora, što se ispituje minimum nakon tri meseca pogona.
- Dubinsko prečišćavanje dekontaminiranog ulja i povratak izolacionih svojstava ulju, kao tečnom dielektriku radi vraćanja transformatora u eksploataciju, što zahteva postojanje terenske laboratorije za optimizaciju procesa i kontrolu kvaliteta PCB dekontaminiranog ulja.

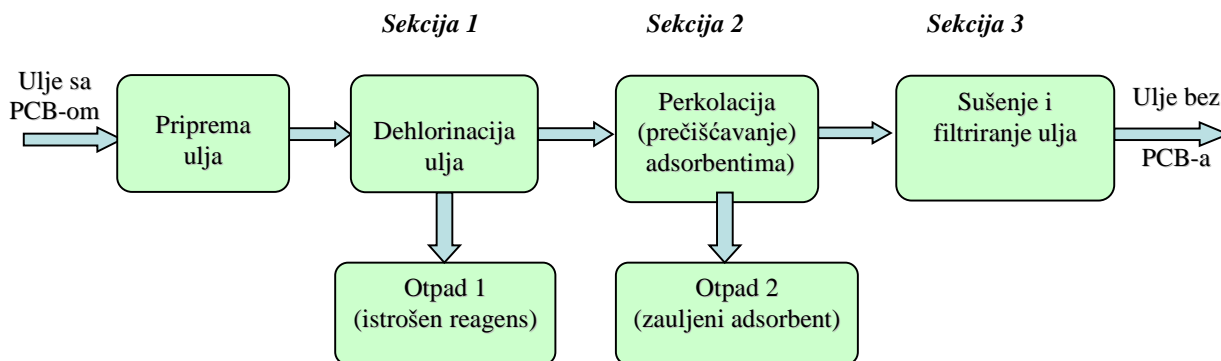
Cilj predmetnog rada je da prikaže rezultate dekontaminacije PCB kontaminiranih transformatora 20/0.4 KV u PD Elektrovojvodina mobilnim postrojenjem radi ponovne eksploatacije dekontaminiranih uređaja. Primenjena tehnologija treba da obezbedi visok stepen funkcionalnosti opreme radi ponovnog vraćanja uređaja u rad i poboljšanje karakteristika izolacionog ulja nakon dekontaminacije.

POSTUPAK UKLANJANJA PCB-a TEHNOLOGIJOM DEHLORINACIJE

Proces dekontaminacije PCB kontaminiranih mineralnih ulja dehlorinacijom razvijen je u Institutu Nikola Tesla i zaštićen patentom u Republici Srbiji (patent broj P-2012-0288, Glasnik Intelektualne Svojine, GIS 2015-1, strana 64-65). Postupak podrazumeva hemijsku dehlorinaciju, tj. razgradnju molekula PCB-a, odvajanje atoma hlora iz PCB molekula. Organski deo molekula, bifenil, ostaje u ulju, dok se hlor u vidu neogranske soli izdvaja iz ulja u istrošenom reagensu, što čini da je ova tehnologija u skladu sa principima najbolje ekološke prakse, eng. „BEP – Best Environmental Practice“.

Zbog širokog spektra u primeni i činjenice da se sa visokom efikasnošću mogu obraditi ulja sa visokim sadržajem PCB-a, transformatorska ulja sa i bez aditiva, nekorišćena i ona nakon većeg broja godina eksploatacije, razvijena tehnologija takođe ima sve elemente najbolje raspoložive tehnologije, eng. „BAT-best available technology“.

Postupak dehlorinacije ulja



Slika 1. Shema postupka PCB dekontaminacije

I Sekcija: Hemijska razgradnja PCB-a

U **sekciji 1: dehlorinacija ulja**, vrši se hemijska razgradnja molekula polihlorovanih bifenila na povišenoj temperaturi reagensom koji sadrži jaku neorgansku bazu dispergovanu u organskom rastvaraču. Osnovne reakcije su bazno katalizovana redukcija i nukleofilna supstitucija. Funkcija jake neorganske baze je da raskine vezu između atoma hlora sa ugljenikom iz bifnila i time izvrši destrukciju PCB molekula. Vreme kontakta reagens smeše zavisi od početne koncentracije PCB-a i udela pojedinih PCB kongenera u smeši PCB derivata i sadržaja inhibitora oksidacije u ulju, DBPC, a može da varira od 30 do 90 minuta. Kontinualnim monitoringom sadržaja PCB-a tokom procesa dehlorinacije optimizuje se količina reagens smeše, vreme kontakta i kontroliše se sadržaj PCB u izlaznoj šarži.

Nakon postupka dehlorinacije, tj. hemijske razgradnje PCB-a, tretirano mineralno ulje u sebi sadrži određenu količinu zaostalog reagensa koji je potrebno ukloniti. Otpad koji nastaje nakon dehlorinacije predstavlja istrošen reagens koji ne sadrži PCB, što je verifikovano izveštajima o karakterizaciji otpada.

II i III Sekcija: Prečišćavanje dekontaminiranog ulja

Uklanjanje zaostalog reagensa iz ulja i povratak izolacionih osobina ulju nakon dehlorinacije vrši se u sekciji 2 i 3:

- **sekcija 2: prečišćavanje dekontaminiranog ulja** na kolonama punjenim specifičnim, aktiviranim adsorbentima (alumosilikatima) perkolacionim postupkom
- **sekcija 3: završna obrada, sušenje, degazacija i filtriranje ulja**

Nakon uklanjanja zaostalog reagensa, sušenja i filtriranja, ulju se dodaje inhibitor oksidacije (di terc. butil para-krezol) u količini od 0.3 do 0.35%.

Otpad koji nastaje tokom perkolacionog postupka je zauljeni adsorbent, koji ne sadrži PCB, što je verifikovano izveštajima o karakterizaciji otpada. Procenjena ukupna količina otpada koji se generiše kreće se od 4-6%.

Opis postupka dekontaminacije

Nakon pripremnih aktivnosti: postavke zaštitnih folija, postrojenja, obezbeđenja napajanja od 100-120 kW i postavke terenske laboratorije pristupalo se istakanju ulja iz transformatora u rezervoare. Zatim se pristupalo zagrevanju ulja i pripremi reagens smeše. Dehlorinacija ulja je vršena sa vremenom kontakta od 30 do 60 minuta, a odvajanje reagensa od ulja u taložniku i prečišćavanje ulja na kolonama sa adsorbentima, protokom od oko 2400 l/h, ukupno tokom 3h. Finalna obrada ulja sušenjem i filtriranjem vršena je mašinom za sušenje i filtriranje, protokom 3000 lit./h.

Kapacitet postrojenja je od 1500-2000 kg/dan. Ukupno je dekontaminirano 33615 kg ulja u JP EPS PD Elektrovojvodina. Na slici 2. prikazan je izgled ulja pre i nakon primenjenog procesa.



Slika 2. Izgled ulja pre i nakon dekontaminacije

KONTROLA PROCESA PCB DEKONTAMINACIJE

Tokom procesa PCB dekontaminacije neophodno je pratiti sadržaj PCB-a u cilju određivanja optimalnog vremena reakcije i kontrole efikasnosti procesa i kvaliteta ulja nakon obrade. Izolacione osobine ulja i to: probojni napon ulja, sadržaj vode u ulju i broj i veličina čestica u ulju nakon PCB dekontaminacije moraju biti zadovoljavajuće, radi nalivanja dekontaminiranog ulja u transformator i vraćanja uređaja u rad.

Terenska laboratorija Instituta poseduje instrumente za merenja:

- *sadržaja PCB u ulju* kvalitativnom, tj. semi-kvantitativnom metodom (detekcija hlora), Dexil L2000 DX Chloride Analyzer, akreditovana metoda US EPA SW-846 metoda 9079
- *probojnog napona ulja*, Baur Oil Tester DPA 75C, akreditovana metoda IEC 60156
- *sadržaja čestica u ulju*, HIAC PODS, akreditovana metoda IEC 60970
- *sadržaja vode u ulju*, preko relativnog stepena zasićenja vode u ulju (RS, %), kapacitivnim senzorom (Domino)

Za preciznu kvantifikaciju PCB-a, vrši se merenje sadržaja PCB metodom gasne hromatografije sa detektorom zahvata elektrona GC-ECD (eng. „*electron capture detector*“), prema IEC 61619 standardu u laboratoriji Instituta „Nikola Tesla“, akreditovanoj prema ISO 17025. Odlukom Evropske komisije (Commision Decision 2001/68/EC), Evropski standard IEC 61619 se primenjuje kao referentna metoda za utvrđivanje sadržaja PCB u izolacionim tečnostima [1]. Princip analize sadržaja PCB je zasnovan na razdvajanju i identifikaciji pojedinačnih PCB kongenera i njihovim sumiranjem u ukupni sadržaj PCB u uzorku ulja. Analize se vrše na temperaturno programiranoj koloni, sa helijumom kao nosećim gasom. Visoka rezolucija gasnog hromatografa i velika osetljivost detektora na halogene elemente (brom, hlor) pružaju mogućnost ne samo identifikacije Arohlorova (najčešće komercijalne smeše PCB) ili smeše Arohlorova (A) prisutnih u uzorku, već i kvantifikacije pojedinačnih kongenera PCB, obezbeđujući niske limite detekcije (< 2 ppm) [4]. Metoda je primenljiva za nekorišćena, regenerisana ulja i za korišćena PCB kontaminirane izolacione tečnosti.

REZULTATI PCB DEKONTAMINACIJE U JP EPS PD ELEKTROVOJVODINA

U toku 2015 godine izvršena je dekontaminacija 97 energetskih transformatora u JP EPS PD Elektrovojvodina naponskog nivoa 20/10-0.4 kV na sledećim lokacijama: Ogranak Novi Sad, Ogranak Subotica, Ogranak Sombor, Ogranak Ruma, Ogranak Pančevo i Pogon Vršac.

U periodu od 21.09. do 08.10. izvršena je PCB dekontaminacija 19 transformatora iz Ogranka Novi Sad, pri čemu je obrađeno ukupno 8161 kg ulja. Početne koncentracije PCB u uljima su iznosile od 64 do 866 ppm.

U periodu od 16.10. do 26.10. izvršena je PCB dekontaminacija 29 transformatora iz Ogranka Subotica, pri čemu je ukupna količina obrađenog ulja iznosila 8735 kg. Početne koncentracije PCB u uljima su iznosile od 50 do 938 ppm.

U periodu od 28.10. do 08.11. izvršena je PCB dekontaminacija 19 transformatora iz Ogranka Sombor pri čemu je obrađeno ukupno 6838kg ulja. Početne koncentracije PCB u uljima su iznosile od 55 do 973 ppm.

U periodu od 13.11. do 23.11. izvršena je PCB dekontaminacija 12 transformatora iz Ogranka Ruma pri čemu je obrađeno ukupno 3958kg ulja i 3 transformatora iz Ogranka Novi Sad sa ukupnom količinom obrađenog ulja 1490 kg. Početne koncentracije PCB u uljima su iznosile od 53 do 1067 ppm.

U periodu od 17.12. do 24.12. izvršena je PCB dekontaminacija 14 transformatora iz Ogranka Pančevo i Pogona Vršac sa ukupnom količinom obrađenog ulja 4433 kg. Početne koncentracije PCB u uljima su iznosile od 51 do 924 ppm.

Rezultati PCB dekontaminacije

U okviru praćenja efikasnosti primenjenog procesa dekontaminacije ulja kao i kontrole kvaliteta obrađenog ulja, u laboratoriji Instituta, nakon primenjenog procesa na šaržama je izvršeno je ispitivanje sledećih karakteristika ulja (tabela 1):

- Dielektrična čvrstoća ulja,
- Neutralizacioni broj ulja,
- Faktor dielektričnih gubitaka i električna otpornosti ulja i
- Kvalitativno ispitivanje sadržaja PCB u ulju (detekcija hlora), metoda DEXIL L2000 DX

Tabela 1. Rezultati ispitivanja sadržaja PCB i karakteristika ulja nakon procesa dekontaminacije

Lokacija	Broj šarže	PCB, ppm	Up', kV/cm	Nb, mg _{KOH} /g _u	tgδ, ‰ na 90°C
Ogranak Novi Sad	2	8	276	<0,01	2,9
	3	8	260	<0,01	1,5
Ogranak Subotica	12	5	292	<0,01	0,8
	13	5	276	<0,01	0,9
Ogranak Sombor	3	7	292	<0,01	2,1
	4	10	288	<0,01	1,7
Ogranak Ruma	1	11	268	<0,01	1,7
	2+3	10	288	<0,01	1,1
Ogranak Pančevo i Pogon Vršac	1+2	3	280	<0,01	1,9
	3+4	8	296	<0,01	2,7

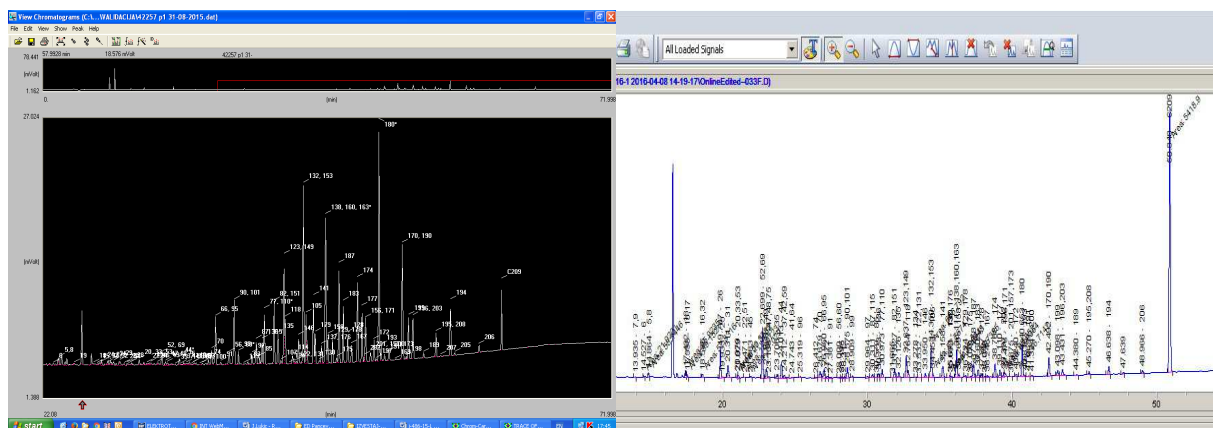
Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 1, uočava se da su obrađena ulja iz svih šarži imala nizak sadržaj kiselina i faktor dielektričnih gubitaka, što ukazuje na visok stepen rafinacije ulja, kao i da su sve šarže uspešno dekontaminirane (sadržaj PCB u ulju je ispod 50 ppm). Nakon dobijenih zadovoljavajućih rezultata pristupilo se nalivanju dekontaminiranog ulja u transformatore.

Dekontaminacija 96 PCB kontaminiranih transformatora u PD Elektrovojdina je rezultovala da su svi transformatori dekontaminirani do niskih koncentracija PCB u ulju, u opsegu od 6 do 25 ppm. Ispitivanje sadržaja PCB pre i nakon dekontaminacije izvršeno je kvantitativnom metodom na GC-ECD-u, prema metodi IEC 61619. U tabeli 2. prikazani su rezultati 10 transformatora pre i nakon dekontaminacije.

Tabela 2. Rezultati PCB merenja transformatora 20/10-0.4 kV pre i nakon procesa PCB dekontaminacije

Red.br. Transf.	PCB ppm, pre procesa dekontaminacije	PCB ppm, nakon procesa dekontaminacije, GC-ECD
1	866	13,1
2	260	12,4
3	846	17,3
4	680	6,4
5	103	16,1
6	61	17,1
7	492	11,6
8	527	20,0
9	276	22,0
10	697	14,0

Analizom uporednih rezultata merenja sadržaja PCB, pre i nakon primenjenog procesa, prikazanih u tabeli 2, uočava se visoka efikasnost procesa u uklanjanju PCB, u širokom opsegu početnih koncentracija. Na slici 4. prikazan je izgled hromatograma PCB molekula pre i nakon procesa dekontaminacije. Na hromatogramu, (slika 4. levo) u PCB kontaminiranom ulju može se uočiti prisustvo velikog broja PCB izomera, dok na hromatogramu, (slika 4. desno) nema većih pikova PCB izomera.



Slika 4. Izgled hromatograma PCB kongenera pre (levo) i nakon (desno) PCB dekontaminacije, transformatora

Nakon izvršene dekontaminacije transformatori su vraćeni u eksploataciju. Verifikacija primenjenog postupka i definisanje statusa transformatora po pitanju kontaminacije PCB-om određuje se najmanje tri meseca nakon dekontaminacije, merenjem sadržaja PCB u ulju, što je propisano standardom EN 50503 [5]. U tabeli 3. prikazani su rezultati sadržaja PCB u ulju 22 transformatora, napona 20/10-0.4 kV u ED Novi, pre i nakon dekontaminacije i 90 dana pogona nakon izvršene dekontaminacije. Nakon nalivanja PCB dekontaminiranog ulja u transformator došlo je do blagog porasta koncentracije PCB, zbog mešanja dekontaminiranog ulja sa manjom količinom PCB kontaminiranog ulja koja je zaostala u sudu i čvrstoj izolaciji transformatora (tabela 3). Ipak, svi ispitani transformatori su uspešno dekontaminirani, tj. sadrže PCB ispod granične vrednosti od 50 ppm. Porast koncentracije PCB u ulju transformatora u periodu od 90 dana nakon dekontaminacije kreće se od 20% do 40%, pri čemu za poređenje se uzima u obzir samo rezultat merenja dobijene kvantitativnom mernom tehnikom, GC-ECD. Kvalitativna metoda, Dexil u zoni niskih PCB koncentracija uglavnom daje značajno niže vrednosti od metode GC-ECD.

Tabela 3. Rezultati PCB dekontaminacije 22 energetska transformatora 20/10-0.4 kV u ED Novi Sad

Lokacija	Red.broj Transf.	PCB ppm, pre procesa dekontaminacije, GC ECD	PCB ppm, nakon procesa dekontaminacije GC-ECD/(PCB, Dexil)*	PCB ppm, tri meseca nakon procesa dekontaminacije, GC ECD
ED Novi Sad	1	866	13.1	21
	2	697	/(6*)	19
	3	527	20.0	26
	4	260	12.4	19
	5	78	/(4*)	6
	6	276	22.0	34
	7	189	/(7*)	19
	8	166	/(6*)	13
	9	140	/(6*)	11
	10	139	/(12*)	26
	11	138	/(6*)	16
	12	82	/(6*)	14
	13	64	/(6*)	4
	14	112	/(6*)	7
	15	95	/(8*)	20
	16	89	/(7*)	10
	17	89	/(8*)	10
	18	83	/(4*)	12
	19	72	/(8*)	7
	20	100	/(8*)	14
	21	883	/(6*)	38
	22	468	/(6*)	15

ZAKLJUČAK

Dekontaminacija PCB kontaminiranih transformatora uspešno je izvršena primenom procesa dehlorinacije ulja u JP EPS, PD Elektrovojvodina. Dekontaminirano je 97 energetskih transformatora naponskog nivoa 20/10-0.4 kV, tj. 33615 kg ulja u opsegu koncentracija od 1067 do 50 ppm. Tri meseca posle izvršene dekontaminacije izmerene koncentracije PCB u uzorcima ulja 22 transformatora iz Ogranka Novi Sad je bio ispod granične vrednosti od 50 ppm, čime je dekontaminacija predmetnih transformatora verifikovana. Otpad koji nastaje nakon procesa ne sadrži PCB i generiše se u količini do 6%. Proces dehlorinacije ulja, razvijen u Elektrotehničkom institutu Nikola Tesla je zaštićen patentom RS i potvrđen je kao efikasan u dekontaminaciji PCB kontaminiranih transformatora, odnosno sadrži sve elemente najbolje raspoložive tehnologije i najbolje ekološke prakse.

LITERATURA

- [1] „Priručnik za identifikaciju, vođenje evidencije i sigurno rukovanje PCB opremom/uređajima i otpadom”, Ministarstvo životne sredine i prostornog planiranja Republike Srbije, februar 2010.
- [2] „Destruction and Decontamination Technologies for PCBs and other POPs wastes under the Basel Convention – Volume A”, „Secretariat of the Basel Convention”, „International Environment House”, 15 chemin des Anémones, CH-1219 Châtelaine, Switzerland.

- [3] S. Teslić, B. Bošković, V. Radin, J. Janković, „Mineralna transformatorska ulja kontaminirana piralenom (PCB-om)”, EKO-JUSTUS II, Palić, 2010.
- [4] S. Teslić, J.Janković, B. Bošković, V. Radin, J. Lukić, S. Milosavljević, „Mineralna transformatorska ulja kontaminirana piralenom (PCB) - od identifikacije do rešavanja problema”, VII Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije i Crne Gore, R-1.11, Vrnjačka Banja, 2010.
- [5] BS EN 50503. „Fluids for electrotechnical applications. Standard for the inventory control, management, decontamination and/or disposal of electrical equipment and insulating liquids containing PCBs”.
- [6] J.Lukić, D.Nikolić, V.Mandić, S.Milosavljević, A.Orlović, „Dekontaminacija PCB kontaminiranih transformatora“, P A2 01, 30.savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 29.05.-03.06.2011.
- [7],IEC 61619/1997: Insulating liquids – Contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs) – Method of determination by capillary column gas chromatography”.
- [8] CENELEC Technical Report, final draft: “Guidelines for inventory control, management, decontamination, and or disposal of electrical equipment and insulating liquids containing PCBs”, CLC/Fpr TR 50503:2009 E