

Primena disperzione i regresione analize u cilju optimizacije efikasnosti tehnološkog postupka dehlorinacije PCB kontaminiranih izolacionih ulja

Savo Marinković¹, Draginja Mihajlović¹, Jelena Lukić¹, Ana Marinković²,
Dragana Naumović Vuković¹

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
Beograd, Srbija ² Institut za nuklearne nauke Vinča, Univerzitet u Beogradu, Mike
Petrovića Alasa 12-14, 11351 Vinča Beograd; Srbija

marinkovic.s@ieent.org

Kratak sadržaj: Savremena teorija eksperimentalnih ispitivanja obuhvata i planove statističke višefaktorne analize. Prednost ove teorije je u tome što se svi uticajni faktori menjaju istovremeno tako da se dobija minimalan broj eksperimentalnih tačaka raspoređenih u eksperimentalnom hiperprostoru što ima za posledicu višestruko niže troškove i kraće vreme eksperimentalnih ispitivanja. Proces dekontaminacije transformatorskih ulja kontaminiranih polihlorovanim bifenilima (PCB) se zasniva na reakciji dehlorinacije korišćenjem reagens smeše (KPEG) koju čine kalijum hidroksid (KOH) i polietilen glikol (PEG) pri čemu se molekul PCB-a hemijski razgrađuje. Primenom 2^3 ortogonalnog plana ispitan je uticaj masenog odnosa KPEG/ulje, molarnog odnosa KOH/PEG i temperature na reakciju dehlorinacije u cilju optimizacija ovog procesa. Uspešnost reakcije je ocenjena određivanjem efikasnosti hemijske razgradnje PCB-a (destruction and removal efficiency, DRE) u transformatorskom ulju. Vrednosti DRE za eksperimentalno dobijene podatke su bile od 81,81% do 99,81%. Primenom disperzione analize određena je značajnost i stepen interaktivnosti ispitivanih faktora na DRE a primenom regresione analize postavljen je multilinearni regresioni model.

Ključne reči: višefaktorni plan, PCB, transformatorsko ulje, dehlorinacija, disperziona analiza, regresioni model

1. Uvod

Smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu i pouzdan rad energetskih transformatora su od velikog značaja i u fokusu naučne zajednice. U skladu sa tim 2004. godine je stupila na snagu Stokholmska konvencija o postojećim organskim zagađujućim supstancama. Sve zemlje potpisnice su u obavezi da obeleže, identifikuju i uklone iz upotrebe opremu koja sadrži PCB do 2025. godine. PCB su i dalje prisutni u životnoj sredini iako su zabranjeni za upotrebu 1978. zbog toksičnosti.

Polihlorovani bifenili (PCB) su jedinjenja veštački sintetizovana, a njihova upotreba kao fluida u električnoj opremi bila je rasprostranjena zbog dobrih protivpožarnih karakteristika, visokih tački paljenja, niske električne provodljivosti i visoke toplotne provodljivosti. Na listi opasnih supstanci Agencije za registar toksičnih supstanci i bolesti (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR) zauzimaju peto mesto[1]). ATSDR lista rangira supstance na osnovu kombinacije njihove učestalosti, toksičnosti i potencijala za izlaganje ljudi.

Eksploatacija transformatora kontaminiranih PCB može biti visoko rizična jer je rizik od zagađenja životne sredine povećan. Do širenja kontaminacije PCB je uglavnom dolazilo pri popravci transformatora u remontnim radionicama i korišćenjem jedinica za filtraciju ulja. Različite tehnologije dekontaminacije su u upotrebi ali se dehlorinacija ulja pokazala kao najisplativiji postupak i tehnologija koja ispunjava zahteve najbolje raspoložive tehnologije i najbolje ekološke prakse. Po primeni ovog postupka ulje se može ponovo vratiti u upotrebu u električnoj opremi.

Cilj ovog rada je da se primenom regresione analize postavi multilinearan model zavisnosti efikasnosti hemijske razgradnje PCB-a u kontaminiranih izolacionih ulja reakcijom dehlorinacije, gde su za ulazne parametre uzeti maseni odnosi KPEG/ulje, KOH/PEG i temperatura reakcije, a primenom disperzione analize odredi značajnost ovih kontrolisanih faktora uz mogućnost dalje optimizacije. Korišćen je 2^3 ortogonalni plan eksperimenta za pomenute tri promenljive na dva nivoa. To znači da u matrici plana proizvod svih kolona vektora je jednak nuli tako da efekat jednog faktora ili interakcije može da bude procenjen nezavisno od efekta drugog faktora ili interakcije u modelu.

Opšta metodološka koncepcija savremene metode eksperimentalnih ispitivanja se sastoji od lanca sukcesivnih ciklusa grupisanih oko funkcije cilja. Svaki ciklus se sastoji od četiri uzastopne etape čiji je osnovni sadržaj: model, plan eksperimenta, operativni program eksperimenta i matematička analiza eksperimenta. Osnovna obeležja svakog ciklusa su:

- počinju sa određenim modelom,
- svi kontrolisani faktori se variraju istovremeno,
- u prethodnom ciklusu se dobijaju dovoljno precizne informacije za planiranje i realizaciju sledećeg ciklusa,

- eksperimentalni rezultati i ostala informativna građa prethodnog ciklusa koriste se u narednom ciklusu.

Da bi se dobili objektivni rezultati i zaključci potrebno je na prikupljene podatke primeniti statističke analize. Tako dobijeni zaključci će biti pouzdaniji od ličnog subjektivnog ocenjivanja pojedinaca. Za statističke analize se mogu koristiti mnogi softverski paketi koji uz pravilnu upotrebu olakšavaju rad i tumačenje, počevši od najjednostavnijih grafičkih prikaza pa do najsloženijih multivarijacionih analiza podataka. Pri ovome se koriste dve osnovne statističke metodologije, poznate kao disperziona i regresiona analiza. Osnovni zadatak disperzione analize je određivanje signifikatnosti (značajnosti) i stepena interaktivnosti datog skupa faktora na karakteristike stanja ispitivanja. Zadatak regresione analize je postavljanje stohastičkog modela objekta ispitivanja kojim se na dovoljno pouzdan način mogu objasniti stanje i ponašanje datog objekta unutar obuhvaćenog eksperimentalnog prostora.

2. Eksperimentalni deo

2.1. Materijal

Eksperimenti su izvedeni na uzorcima PCB kontaminiranog transformatorskog ulja koje je uzeto iz transformatora u pogonu.

2.2. Analitička metoda

Sadržaj PCB-a u transformatorskom ulju je određen pomoću gasnog hromatografa sa detektorom zahvata elektrona (eng. electron capture detector), Agilent GC-ECD 7890B, kvantitativnom metodom prema Standardu IEC 61619 [2].

2.3 Tretman transformatorskog ulja postupkom dehlorinacije

Dehlorinacija ulja se vršila prethodno pripremljenom reagens smešom kalijum hidroksida (KOH) i polietilen glicola (PEG) u Specijalizovanoj laboratoriji Instituta Nikola Tesla. Reagens smeša je pripremljena dan ranije rastvaranjem KOH-a u PEG-u na 120 °C mešanjem nekoliko sati, kako bi se obezbedilo dobro rastvaranje KOH-a. Reakcija dehlorinacije se izvodila u staklenoj posudi od 500 mL. PCB kontaminirano ulje je zagrevano u reakcionom sudu do reakcione temperature uz neprekidno mešanje brzinom rotacije do 300 o/min nakon čega se rastvor KOH u PEG dodaje u reakciji

sud. Sve serije eksperimenata su rađene u trajanju od 120 minuta. Svaki eksperiment je urađen u duplikatu.

Na osnovu eksperimentalnih podataka određivana je efikasnost hemijske razgradnje PCB-a (DRE). Vrednost DRE je izražena u procentima i izračunata je prema sledećoj jednačini:

$$DRE = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \cdot 100 \quad (2)$$

gde je:

C_1 – koncentracija PCB-a pre tretmana dehlorinacije (ppm)

C_2 – koncentracija PCB-a posle tretmana dehlorinacije (ppm)

2.4 Plan eksperimenta

Na osnovu literature i prethodnih iskustava saradnika Instuta Nikola Tesla na poslovima dekontaminacije ulja realnih transformatora na terenu [3,4] ispitivan je uticaj tri faktora na efikasnost hemijske razgradnje PCB-a u transformatorskom ulju metodom dehlorinacije sa KPEG-om: maseni odnos KPEG/ulje, molski odnos KOH/PEG i temperatura. Postoje podaci u literaturi gde je određivano DRE procesa dehlorinacije, a kao ulazni parametri su uzeti molski odnosi KOH/PEG, maseni odnos KPEG/ulje, različite molske mase PEG-a kao i uticaj ultrazvuka [5,6,7]. Svaki od izabranih faktora ispitivan je na dva nivoa. Ostali faktori (vreme reakcije, brzina mešanja) su održavani na konstantnom nivou, i nisu predstavljali predmet ovog istraživanja. U Tabeli 1 su prikazani izabrani faktori i nivoi za svaki od njih.

Tabela 1. Ulazni faktori i nivoi koji se koriste u planu eksperimenta

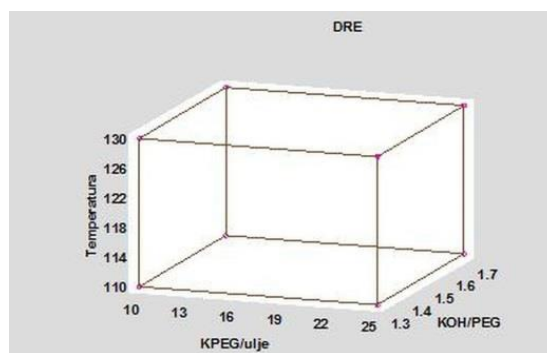
Faktori	Nivo 1 (-)	Nivo 2 (+)
KPEG/ulje (maseni odnos)	10	25
KOH/PEG (molski odnos)	1,3	1,7
Temperatura (°C)	110	130

Primenjen je 2^3 ortogonalni plan eksperimenta i to je ukupno 8 eksperimenata. U Tabeli 2 prikazana je matrica plana osam eksperimenata gde plus i minus označavaju nivo 2 odnosno nivo 1 svakog faktora.

Tabela 2. Matrica ortogonalnog plana 2^3 eksperimenta

Broj eksperimenta	KPEG/ulje (maseni odnos)	KOH/PEG (molski odnos)	Temperatura (°C)
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	-	+	+
5	+	-	-
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Plan može da se predstavi i grafički kao kvadar čije svako teme predstavlja po jedan eksperiment, koji formiraju uglove kvadra. Pomoću programskog paketa Statgraphics prikazan je grafički plan eksperimenta (Slika 1).



Slika 1. Grafički prikaz 2^3 ortogonalnog plana

3. Rezultati i diskusija

4. Zaključak

Cilj ovog rada je bio da se odredi zavisnost efikasnosti hemijske razgradnje PCB-a (DRE) pri tehnološkom postupku dehlorinacije kontaminiranih izolacionih ulja uzimajući u obzir uticaj sledećih faktora: maseni odnos KPEG/ulje, molski odnos KOH/PEG i temperatura reakcije. Primenjen je 2³ ortogonalni plan eksperimenta i urađeno je 8 eksperimenata. Primenom regresione analize na dobijene vrednosti, postavljena je multilnearna jednačina zavisnosti DRE od ova tri faktora kao i njihovih međusobnih uticaja sa kvadratnim koeficijentom regresije 98,392. Analiza varijanse je pokazala da sva tri faktora temperatura reakcije, maseni odnos KPEG/ulje i KOH/PEG kao i međusobna interakcija temperature i masenog odnosa KPEG/ulje imaju statistički značajan efekat na zavisnu promenljivu. Koristeći odnos signal/šum dobijen je rang faktora i optimalana kombinacija nivoa za ova tri faktora. Prema vrednostima F odnosa i S/N odnosa, temperatura je faktor koji ima najveći uticaj na efikasnost hemijske razgradnje PCB-a. Na osnovu rezultata dobijenih iz ovih uvodnih eksperimenata moguće je uraditi dalju optimizaciju procesa dehlorinacije u cilju dobijanja optimalnijih vrednosti za svaki od ova tri faktora. U novom planu eksperimenta svaki faktor bi imao tri nivoa a vrednost koja je dobijena kao optimalna u uvodnom eksperimentu bi bila vrednost drugog (srednjeg) nivoa. Da bi optimizacija bila uspešnija trebalo bi uraditi više ponavljanja svakog eksperimenata.

3.1 Efikasnost hemijske razgradnje PCB-a

U ispitivanom uzorku transformatorskog ulja kvantitativnom metodom je određena početna koncentracija PCB-a (517 ppm) kao i koncentracije PCB-a nakon primenjenog postupka. U Tabeli 3 prikazane su izmerene koncentracije PCB-a na kraju primenjenog postupka dehlorinacije, efikasnost hemijske razgradnje PCB-a (DRE) kao i statistički podaci standardna devijacija (Std) i relativna standardna devijacija (RSD) za svaki eksperiment.

Tabela 3. Eksperimentalni uslovi i dobijeni rezultati

Broj eksp.	KPEG/ulje (maseni odnos)	KOH/PEG (molski odnos)	T [°C]	PCB [ppm]	DRE [%]	DRE _{srednja} [%]	Std	RSD
1	25	1,7	130	1	99,81	99,61	0,28	0,3
				3	99,42			
2	25	1,7	110	32	93,81	93,04	1,10	1,2
				40	92,26			
3	25	1,3	130	5	99,03	98,26	1,09	1,1
				13	97,49			
4	10	1,7	130	32	93,81	94,78	1,37	1,4
				22	95,75			
5	25	1,3	110	46	91,10	91,68	0,82	0,9
				40	92,26			
6	10	1,7	110	88	82,98	83,94	1,36	1,6
				78	84,91			
7	10	1,3	130	38	92,65	92,26	0,54	0,6
				42	91,88			
8	10	1,3	110	93	81,81	82,59	1,10	1,3
				86	83,37			

Statistički podaci svih merenja prikazani su u Tabeli 4.

Tabela 4. Statistički parametri dobijeni iz eksperimentalnih rezultata

Statički parametri	
Minimalna vrednost DRE, %	81,81
Maksimalna vrednost DRE, %	99,81
Srednja vrednost DRE, %	92,02
Standardna devijacija merenja, %	5,93

Na osnovu izračunatih vrednosti DRE može se zaključiti da je efikasnost postupka najmanja pri temperaturi 110 °C i KPEG/ulje masenom odnosu 10 % (eksperimenti 6 i 8), dok je u ostalim eksperimentima preko 91%. Najveća efikasnost procesa je dobijena kod eksperimenta 1 (25 mas%, KPEG/ulje, 1,7 molski odnos KOH /PEG i 130 ° C temperatura).

3.2 Regresiona analiza

Veza između DRE i tri nezavisne promenljive u specifičnom vremenu reakcije opisana je multilinearom regresijom. Regresiona jednačina koja fituje kroz podatke je:

$$DRE = 12,12 + 2,10 \cdot X_1 - 3,08 \cdot X_2 + 0,52 \cdot X_3 - 0,10 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,07 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3)$$

gde je:

X_1 – maseni odnos KPEG/ulje

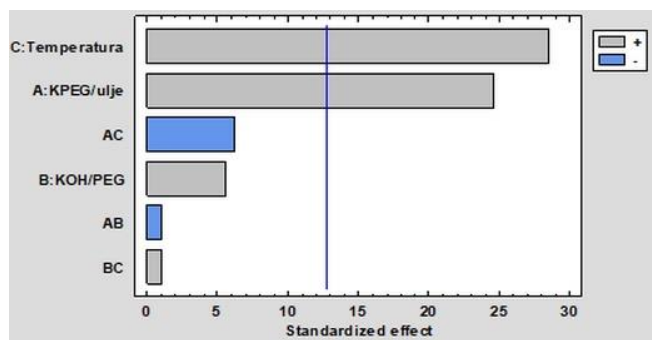
X_2 - molski odnos KOH/PEG

X_3 – temperatura

Za ovaj postavljeni multilinearne regresioni model, kvadratni koeficijent regresije (r^2) koji objašnjava koliko procenata varijanse zavisne promenljive (DRE) je uspelo da se objasni pomoću nezavisnih promenljivih iznosi 98,392 %. Prilagođeni koeficijent određivanja ($radj^2$) je 96,984 %. Ovaj koeficijent je modifikovana verzija kvadratnog koeficijenta regresije koja uzima u obzir nezavisne promenljive koji nisu značajne u regresionom modelu. Drugim rečima, pokazuje da li dodavanje dodatnih nezavisnih promenljivih poboljšava model regresije ili ne. Vrednosti ova dva koeficijenta se ne razlikuju značajno, što ukazuje na činjenicu da neznajni parametri nisu uključeni u model.

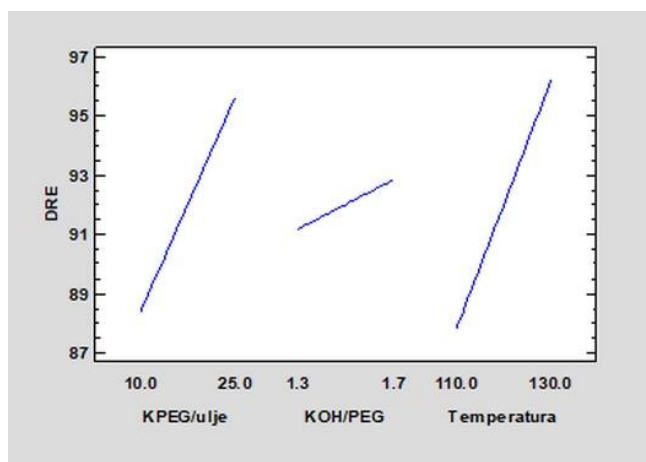
Uticao samih faktora (temperatura, maseni odnos KPEG/ulje, molski odnos KOH/PEG) kao i njihov međusobni uticaj na efikasnost dehlorinacije odnosno vrednost DRE predstavljena je i grafički standardizovanim Pareto

grafikom na Slici 2. Svi faktori su poređani po vrednosti uticaja (od najvećeg do najmanjeg). Takođe je prikazano da li pozitivno ili negativno utiču na vrednost DRE.



Slika 2. Standardizovani Pareto grafik

Grafički je predstavljeno kako svaki od ova tri izabrana faktora pojedinačno utiče na vrednost DRE. Može se zaključiti da najveći uticaj imaju temperatura i maseni odnos KPEG/ulje u primenjenim eksperimentalnim uslovima. Značajan uticaj ovih parametara je potvrđen i u literaturi [3,4] i u samoj primeni tehnologije na terenu.



Slika 3. Grafik zavisnosti DRE od vrednosti izabranog faktora

3.3 Disperziona analiza

Analiza varijanse (ANOVA) i odnos S/N primenjuju se kao statističke analize u cilju identifikacije značajnih kontrolnih faktora i postizanje optimalnih nivoa vrednosti procesnih parametara [8]. ANOVA je postupak za poređenje više uzoraka, gde svaki uzorak predstavlja poseban osnovni skup. U ovom

eksperimentu, ANOVA identifikuje koji od faktora ima najveći uticaj na efikasnost hemijske razgradnje PCBa. U Tabeli 5 su prikazani detaljni rezultati analize varijansi za prethodni trofaktorski eksperiment.

Tabela 5. Rezultati analize varijanse u eksperimentu sa tri faktora

Izvor	Suma kvadrata	Stepeni slobode	Prosečna suma kvadrata	F odnos	P vrednost
A:					
KPEG/ulje (maseni odnos)	210,90	1	210,90	198,85	0,0001
B:					
KOH/PEG (molski odnos)	10,94	1	10,94	10,31	0,0124
C:					
T[°C]	282,83	1	282,83	266,67	0,0001
AB	0,36	1	0,36	0,34	0,5778
AC	13,38	1	13,38	12,61	0,0075
BC	0,36	1	0,36	0,34	0,5778
greška	8,48	8	1,06		

Vrednost Fisherovog testa tj. F odnos pokazuje koji faktor ima značajan uticaj na željene performanse procesa. P vrednost predstavlja doprinos svakog faktora koji pokazuje relativnu snagu faktora na smanjanje varijacija. Ovi rezultati omogućavaju da se odredi kombinacija faktora i njihovih nivoa koji daju najbolji rezultat [9]. P-vrednost predstavlja verovatnoću koja meri dokaze protiv nulte hipoteze i izračunava se za svaki faktor posebno. Niže verovatnoće pružaju jače dokaze protiv nulte hipoteze. Nivo značajnosti od 0.05 ukazuje na 5% rizik zaključivanja da udruživanje postoji kada nema stvarne asocijacije Takođe, kada je P vrednost ≤ 0.05 , ukazuje da analizirani faktor značajano utiče na karakteristike kvaliteta, kada je vrednost P za faktor > 0.05 , ukazuje na njegov minimalni značaj i može se zanemariti.

Na osnovu dobijenih rezultata značajnosti može se reći, uz prag značajnosti 0,05 da sva tri faktora A (maseni odnos KPEG/ulje), B (molski odnos KOH/PEG) i C (temperatura) kao i međusobna interakcija između faktora A (maseni odnos KPEG/ulje) i faktora C (temperatura) imaju statistički

značajan efekat na zavisnu promenljivu – vrednost DRE. Prema vrednostima F odnosa najveći je uticaj temperature.

Parametar dizajn koji je uveo dr Genichi Taguchi se zasniva na konceptu frakcionog faktorskog eksperimentalnog dizajna [10]. Dva glavna cilja ovog parametar dizajna su da se minimiziraju varijacije procesa ili proizvoda ili da se dizajnira proces ili proizvod tako da su nezavisni od uslova sredine. Ovo znači da postoje dve vrste promenljivih koje predstavljaju ulazne komponente funkcije optimizacije: kontrolisani parametri koji mogu biti podešeni na optimalnu vrednost i faktori šuma koji se teško kontrolišu. Generalno, dizajn parametar specificira nominalne vrednosti tako da se varijabilnost koja se prenosi od nekontrolisanih faktora minimizira. Dva važna alata koja se koriste u parametar dizajnu su ortogonalni nizovi i odnos signala i šuma (odnos S/N). Odnos S/N je jednostavan kvalitativan indikator koji omogućava da se oceni efekat promene pojedinog parametra dizajna na ispitivani parametar [11,12]. U Taguchi metodi, termin „signal“ predstavlja željeni efekat (srednju vrednost) za izlaznu karakteristiku, a termin „šum“ predstavlja neželjeni efekat (poremećaj signala, standardnu devijaciju) za izlaznu karakteristiku koji utiču na ishod usled spoljašnjih faktora, odnosno faktora buke. Veća vrednost S/N odnosa daje bolje karakteristike performansi. Stoga, optimalni nivo parametara procesa je nivo sa najvećim S/N odnosom. Odnos signal - šum se računa u zavisnosti od postavljenog cilja [8,9,11]. U ovom slučaju cilj je maksimizirati učinak tj što viša vrednost efikasnosti dehlorinacije odnosno vrednosti DRE.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

gde je: r je broj ponavljanja eksperimenta, y predstavlja izlaz određenih varijabli usled uticaja određenih ulaznih parametara. U slučaju ovog eksperimenta to su vrednosti efikasnosti hemijske razgradnje PCB-a (DRE).

Izračunate vrednosti S/N za dobijene rezultate DRE prikazane su u Tabeli 6.

Tabela 6. Rezultati efikasnosti uklanjanja PCB-a (DRE) i odnos signal šum za ekspeimente 1-8

Broj eksp.	DRE, %	S/N
1	99,81; 99,42	45,9871
2	93,81; 92,26	45,3938
3	99,03; 97,49	45,8684
4	93,81; 95,75	45,5554

Broj eksp.	DRE, %	S/N
5	91,10; 92,26	45,2663
6	82,98; 84,91	44,5011
7	92,65; 91,88	45,3214
8	81,81; 83,84	44,3845

Na osnovu izračunatog odnosa signal/šum prikazanog u Tabeli 6 može da se napravi tabela odgovora („response table”) i da se proceni efekat svakog kontrolisanog faktora kako bi se dobila optimalna kombinacija nivoa faktora, Tabela 7.

Tabela 7. Tabela „odgovora” odnosa S/N za svaki nivo svakog faktora

Faktor	A: KPEG/ulje (maseni odnos)	B: KOH/PEG (molski odnos)	C:T [°C]
nivo 1	44,9406	45,2101	44,8864
nivo 2	45,6289	45,3593	45,6831
max-min	0,688	0,149	0,797
rank	1	3	2

Iz Tabele 7 se vidi na osnovu vrednosti S/N odnosa da je temperatura (rank 1) faktor koji ima najveći uticaj na efikasnost hemijske razgradnje PCB-a iz transformatorskog ulja posle toga maseni odnos KPEG/ulje (rank 2), a najmanji uticaj ima molski odnos KOH/PEG (rank 3).

Optimalna kombinacija nivoa za svaki faktor je $A_2B_2C_2$ a to su parametri kod eksperimenta 1. Rezultati dobijeni ovim uvodnim eksperimentom predstavljaju polazni korak za dalju optimizaciju procesa. Novi plan eksperimenta bi bio sa ova tri faktora na tri nivoa, gde bi ove optimalne vrednosti (maseni odnos KPEG/ulje od 25%, molski odnos KOH/PEG od 1,7 i temperatura reakcije od 130°C) bile vrednosti drugog (srednjeg) nivoa. Svaki eksperiment bi trebalo raditi u više ponavljanja da bi se našla još optimalnija vrednost svakog faktora.

Literatura

- [1] Agency for toxic substances and disease registry, 2017 ATSDR Substance Priority, list, https://www.atsdr.cdc.gov/spl/resources/2017_atsdr_substance_priority_list.html.
- [2] Insulating liquids –Contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs) – Method of determination by capillary column gas chromatography, IEC 61619:1997
- [3] D. Mihajlović, J. Janković, V. Vasović, V. Ivančević i J. Lukić, „Primena čiste tehnologije za uklanjanje PCB iz mineralnih ulja i energetskih transformatora do postizanja veoma niskih vrednosti PCB-a za potrebe remonta i reciklaže", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, br. 32, str. 1-13, 2022.
- [4] J. Janković, D. Mihajlović, N. Kovačević, V. Vasović i Lukić Jelena, „Primena patentirane tehnologije za rešavanje problema PCB kontaminacije i korozivnog sumpora u energetskim transformatorima", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, br. 28, str. 41-50, 2018.
- [5] M.Z. Velazco, P.G.V. Pedrosa, G.V., Ramos and H. Van Langehove, „Dehalogenation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) using chemical dechlorination," *Afinidad, Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, vol. 72., no 571, pp. 196-201., 2015. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/300885>.
- [6] M.Z. Velazco, P.G.V. Pedrosa, G.V., Ramos and H. Van Langehove, „Chemical dechlorination for the treatment of PCBs present in transformer oil (Sovtol-10): parameter study ", *Afinidad, Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, vol. 70., no 563, pp. 206-211., 2013. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/276265>.
- [7] M. Zorrilla, P. Velazco, G. Villanueva, L.E. Arteaga and H. Van Langenhove, „Deshalogenation of Sovtol-10 Using a No-Destructive Method: Pilot Plant Design," *Procedia Engineering*, vol. 42. no.1, pp. 346-357., 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.426>.
- [8] Aleksandar Krstić, „Razvoj i implementacija hibridnog višeeodzivnog modela u fazi okruženju za optimizaciju parametara procesa tehnološkog postupka ekstruzije“, doktorska disertacija, Tehnički fakultet u Boru, Univerzitet u Beogradu, 2023
- [9] R. Pareek and J. Bhamniya, „Optimization of Injection Moulding Process using Taguchi and ANOVA," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol.4, no.1, 2013. <https://www.ijser.org/researchpaper/Optimization-of-Injection-Moulding-Process-using-Taguchi-and-ANOVA.pdf>.

- [10] D.C. Montgomery, Response Surface Methods and Other Approaches to Process Optimization, Design and Analysis of Experiments, 4th ed., New York John Wiley & Sons, 427-510, 1997.
- [11] T.Y. Chau, C. Chao-Yo and L. Hui-Rong, „Applying Quality Engineering Technique to Improve Wasterwater Treatment“, Journal of Industrial Technology, vol. 15. no.1, p. 1-7., 1998.
- [12] P.J. Ross, Taguchi Techniques for Quality Engineering, 2nd ed., New York, McGraw-Hill Book Company, 1996.

Abstract. Modern experimental research theory includes plans for statistical multifactorial analysis. The advantage of this theory is that all factors are changed simultaneously so that a minimum number of experimental points distributed in the experimental hyperspace is obtained, which results in much lower costs and shorter time of experimental tests. The process of decontamination of polychlorinated biphenyls (PCB) from transformer oils is based on a dechlorination reaction using a reagent mixture (KPEG) consisting of potassium hydroxide (KOH) and polyethylene glycol (PEG), whereby the PCB molecule is chemically decomposed. Using 23 orthogonal plans, the influence of the mass ratio of KPEG/oil, KOH/PEG molar ratio and temperature on the dechlorination reaction were investigated to optimize this process. The success of the reaction was evaluated by determining the efficiency of chemical degradation of PCBs (DRE) from transformer oil. The DRE values were from 81.81% to 99.81%. Using dispersion analysis, the significance and degree of interactivity of the examined factors on DRE were determined, and using regression analysis, a multi-linear regression model was set up.

Keywords: Multifactorial design, PCB, transformer oil, dechlorination, dispersion analysis, regression model.

Application of Dispersion and Regression Analysis to Optimize the Efficiency of the Technological Procedure of Dechlorination of PCB-Contaminated Insulating Oils

Savo Marinković¹, Draginja Mihajlović², Jelena Lukić¹, Ana Marinković³,
Dragana Naumović Vuković⁴

Rad primljen u uredništvo: 03.12.2024. godine.
Rad prihvaćen: 22.12.2024. godine