

Marta HUCULAK-MAĆZKA¹, Dominik NIEWEŚ¹, Maciej KANIEWSKI¹
Józef HOFFMANN¹ i Krystyna HOFFMANN¹

OPIS MATEMATYCZNY OCZYSZCZANIA EKSTRAKCYJNEGO KWASU FOSFOROWEGO Z UŻYCIEM ETERU DIIZOPROPYLOWEGO

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PURIFICATION OF WET PHOSPHORIC ACID WITH THE USE OF DIISOPROPYL ETHER

Abstrakt: Ze względu na szerokie zastosowanie, głównie w przemyśle nawozowym, kwas fosforowy jest jednym z ważniejszych produktów wielkiej chemii. Jego produkcja jest od wielu lat przedmiotem badań nieorganicznej technologii chemicznej. Głównym problemem w tzw. metodzie mokrej, ekstrakcyjnej, która stanowi podstawę przemysłowego otrzymywania H_3PO_4 , jest kwestia jego oczyszczania z jonów metali przemieszczających się w procesie rozkładu surowca kwasem siarkowym(V) do kwasu fosforowego. Zanieczyszczenia te pochodzą głównie ze złóż minerałów fosforonośnych, będących surowcem w procesie. Prowadzi się liczne badania, mające na celu określenie przydatności wybranych rozpuszczalników organicznych w procesie oczyszczania ekstrakcyjnego kwasu fosforowego metodą ekstrakcji H_3PO_4 do fazy organicznej, a następnie reekstrakcji produktu wodą. Ze względu na występowanie surowców o coraz większej zawartości zanieczyszczeń poszukuje się nowych sposobów oceny przydatności poszczególnych ekstrahentów w zmieniających się warunkach technologicznych. Celem pracy było wykonanie symulacji komputerowej, w której modelowano proces ekstrakcyjnego oczyszczania kwasu fosforowego z zastosowaniem eteru diizopropylowego (DiPE). Otrzymane wyniki porównano z rezultatami eksperymentów laboratoryjnych, co umożliwiło zweryfikowanie zaproponowanego modelu matematycznego opisującego proces oczyszczania kwasu. W przyszłości możliwe będzie ocenienie zastosowania otrzymanego modelu matematycznego do opisu innych ekstrahentów.

Słowa kluczowe: kwas fosforowy, oczyszczanie, eter diizopropylowy

Wprowadzenie

Dla rolnictwa dużym, nierozwiązanym w pełni, problemem jest zagospodarowanie i utylizacja odpadów, zarówno po produkcji roślinnej, jak i zwierzęcej. Szczególnie szkodliwa dla środowiska jest nadmierna emisja metali kumulujących się w ekosystemach. Są to m.in. kadm, chrom, ołów, nikiel czy nawet w dużych ilościach lub niebezpiecznych związkach chemicznych żelazo. Pierwiastki te w formie czystej, ze względu na brak rozpuszczalności w wodzie, nie są szkodliwe dla organizmów żywych, natomiast problem stanowią ich rozpuszczalne związki. Można je podzielić na dwie grupy. Są to związki metali, które są w większym stopniu szkodliwe dla zwierząt, oraz te, których negatywne działanie skupia się na organizmach roślinnych [1].

Stosowanie nawozów fosforowych jest jedną z głównych przyczyn emisji kadmu, przy czym związki tego metalu znajdują się zarówno w produktach rolnych, jak i odpadach poprodukcyjnych. Pierwiastek ten ma tendencję do wbudowywania się w układ kostny człowieka, co przyczynia się do wzrostu zachorowań na choroby nowotworowe [2]. W przypadku organizmów roślinnych nadmierne stężenie związków kadmu prowadzi

¹ Zakład Technologii i Procesów Chemicznych, Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, ul. M. Smoluchowskiego 25, 50-372 Wrocław, tel. 71 320 62 93, fax 71 328 04 25, email: krystyna.hoffmann@pwr.edu.pl

Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole' 17, Polanica Zdrój, 4-7.10.2017

do chlorozy oraz zaburzeń w pobieraniu związków magnezu, potasu czy fosforu, które są kluczowe dla ich prawidłowego wzrostu i rozwoju [3, 4].

Niewielkie stężenie związków chromu(III) w glebie wpływa korzystnie na wzrost i rozwój roślin, jednak ich rola w tym procesie nie została jeszcze do końca poznana. Znaczny nadmiar natomiast przyczynia się do zahamowania kiełkowania i wzrostu nasion, a także zaburza prawidłowe przyswajanie związków żelaza [5-7].

Dla organizmów roślinnych niekorzystne jest również narażenie ich na zbyt wysokie stężenie związków niklu w glebie. Związki te poprzez blokowanie transportu elektronów i asymilacji CO₂ stają się inhibitorami procesu fotosyntezy [8-10].

Związki żelaza w glebie stanowią średnio około 0,6% mas. [11]. Nie mają one niekorzystnego wpływu na wzrost i rozwój roślin. Problem stanowi kwestia zanieczyszczeń wody związkami żelaza. Szczególnie trudne do usunięcia są połączenia jonów żelaza z obecnymi w wodzie związkami organicznymi. Ze względu na to, że tworzą one w wodzie dość stabilne zawiesiny, ich usunięcie poprzez zastosowanie konwencjonalnych metod, takich jak sedymentacja i filtracja, jest praktycznie niemożliwe [12].

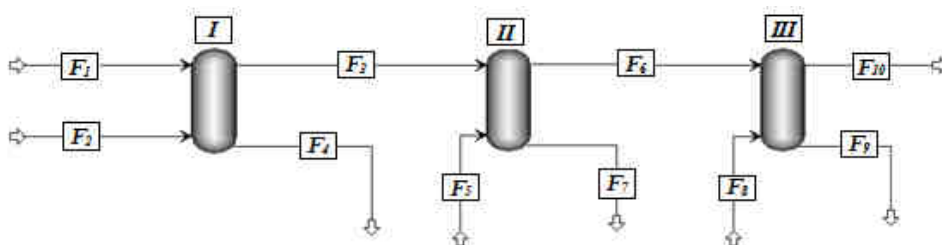
Produktami stosowanymi w rolnictwie, które w szczególny sposób mogą przyczynić się do zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi, są nawozy fosforowe powstające na bazie wytwarzanego metodą mokrą H₃PO₄. Istotą metody mokrej jest wytworzenie kwasu ortofosforowego(V) i na jego bazie nawozów oraz soli fosforowych. W większości surowce fosforowe są zanieczyszczone związkami metali ciężkich, które w toku procesu wytwarzania H₃PO₄ przedostają się do końcowego produktu. Do zanieczyszczeń obecnych w kwasie ortofosforowym(V) wytworzonym metodą mokrą należą m.in. związki kadmu, glinu, żelaza, niklu, czy chromu. Szczególnie niepożądana ze względów technologicznych jest obecność jonów żelaza, które wytrącają się pod postacią nierozpuszczalnych fosforanów żelaza, tym samym powodują mętnienie kwasu, ale przede wszystkim obniżają zawartość P₂O₅ w otrzymanym kwasie ortofosforowym(V).

Z uwagi na to, że w Polsce H₃PO₄ produkowany jest głównie metodą mokrą, dużym wyzwaniem dla tej gałęzi przemysłu jest konieczność oczyszczania kwasu z zanieczyszczających go substancji, w tym z metali ciężkich [13]. Ciągłe poszukuje się nowych technologii pozwalających na maksymalne oczyszczenie ekstrakcyjnego H₃PO₄ przy jednoczesnym minimalnym zaangażowaniu środków finansowych. W ostatnich latach przeprowadzono wiele badań odnoszących się do zastosowania sorpcji, odwróconej osmozy czy nanofiltracji jako metod oczyszczania ekstrakcyjnego H₃PO₄. Jednak ze względu na zbyt wysokie koszty związane z ich prowadzeniem metody te nie znalazły szerszego zastosowania w przemyśle [14-16]. Aktualnie dominującymi w przemyśle metodami oczyszczania H₃PO₄ są metody ekstrakcyjne. Zostały one omówione w wielu publikacjach odnoszących się do oczyszczania ekstrakcyjnego kwasu ortofosforowego(V) z zastosowaniem m.in. 2 etylo-1-heksanolu, MIBK, mieszaniny MIBK i TBP, a także cykloheksanolu jako ekstrahenta [17-21]. Prowadzone są także badania nad wykorzystaniem do tego celu materiałów ilastych [22]. Kwestia oczyszczania ekstrakcyjnego H₃PO₄ jest aktualna ze względu na stosowanie mniej wartościowych surowców zawierających większe ilości zanieczyszczeń, a także na coraz bardziej rygorystyczne wymagania ze strony ochrony środowiska [23-25]. Konieczne jest poszukiwanie nowych metod opartych na nowoczesnych rozwiązaniach, ale także

uwzględniających zasady zrównoważonego rozwoju, czyli oprócz efektów ekologicznych i społecznych również efekty finansowe.

Metodyka badań

Badanym zagadnieniem, z wykorzystaniem symulacji komputerowej z użyciem programu Aspen Plus, był proces ekstrakcyjnego oczyszczania kwasu ortofosforowego(V) z jonów żelaza(III), przy udziale jako ekstrahenta organicznego rozpuszczalnika o częściowej rozpuszczalności w wodzie - eteru diizopropylowego. Na instalację do realizacji tego procesu składają się 3 kolumny ekstrakcyjne. W pierwszej z nich dochodzi do wyekstrahowania H_3PO_4 do fazy organicznej. Dwie kolejne kolumny ekstrakcyjne wykorzystywane są do reekstrakcji wodą kwasu fosforowego z otrzymanego w kolumnie I organicznego ekstraktu. W ten sposób w kolumnie III dochodzi do otrzymania czystego H_3PO_4 . Kolumnę II, czyli I stopień reekstrakcji, można traktować jako przemywanie fazy organicznej, mającej na celu usunięcie dodatkowo wyekstrahowanych do fazy organicznej zanieczyszczeń. Jony żelaza zostały wybrane w tym procesie jako wskaźnik wszystkich zanieczyszczeń z uwagi na ich stosunkowo duże stężenie zarówno w ekstrakcyjnym kwasie fosforowym, jak i w dostępnych surowcach fosforowych. Symulację procesu w programie Aspen Plus oparto na modelu NRTL.



Rys. 1. Schemat instalacji do ekstrakcyjnego oczyszczania kwasu ortofosforowego(V) metodą ekstrakcji H_3PO_4 do fazy organicznej (eteru diizopropylowego - DiPE) i jego reekstrakcji wodą

Fig. 1. Diagram of installation to wet phosphoric acid purification by extraction H_3PO_4 to the organic phase (diisopropyl ether was used as an organic solvent) and reextraction to water

W opracowanej symulacji wykorzystano dane z wcześniej przeprowadzonych doświadczeń w skali laboratoryjnej dla założonych parametrów technologicznych. Dokonano dwóch symulacji, w każdej z nich surowcem do procesu był wodny roztwór H_3PO_4 zanieczyszczony jonami żelaza(III). W pierwszej symulacji oczyszczaniu poddano układ zawierający 11,5% mas. H_3PO_4 zanieczyszczony związkami żelaza, których stężenie wynosiło 1,02% mas. Fe. Wartość strumienia masowego oczyszczanego surowca to $27,75 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. W przypadku drugiej próby procesowi poddano wodny roztwór kwasu ortofosforowego(V) o stężeniu wynoszącym 90,1% mas. H_3PO_4 . Stężenie zanieczyszczających jonów żelaza(III) wynosiło w tym przypadku 1% mas. W drugiej próbie oczyszczaniu poddawano 40 gramów surowca na sekundę. Temperatura oraz ciśnienie prowadzonego procesu były identyczne jak w przypadku badań laboratoryjnych

i wynosiły odpowiednio 288 K i 1 atm. W obydwu symulacjach stosunek fazy wodnej do organicznej w przypadku reekstrakcji I wynosił 2:5, natomiast dla reekstrakcji II 1:1.

Objaśnienia symboli wykorzystanych na rysunku 1

Tabela 1

Table 1

Explanation of symbols used in Figure 1

Symbol	Opis
<i>I</i>	Kolumna ekstrakcyjna I
<i>II</i>	Kolumna ekstrakcyjna II
<i>III</i>	Kolumna ekstrakcyjna III
F_1	Strumień surowca
F_2	Strumień eteru diizopropylowego (DiPE), będącego ekstrahentem w ekstrakcji I
F_3	Strumień ekstraktu po ekstrakcji I
F_4	Strumień rafinatu po ekstrakcji I
F_5	Strumień wody, będącej ekstrahentem w ekstrakcji II (reekstrakcji I)
F_6	Strumień ekstraktu po ekstrakcji II (reekstrakcji I)
F_7	Strumień rafinatu po ekstrakcji II (po reekstrakcji I)
F_8	Strumień wody, będącej ekstrahentem w ekstrakcji III (reekstrakcji II)
F_9	Strumień rafinatu po ekstrakcji III (reekstrakcji II)
F_{10}	Strumień ekstraktu po ekstrakcji III (reekstrakcji II) będący produktem końcowym całego procesu

Wyniki

W tabelach 2 oraz 3 podano wartości przepływów masowych dla poszczególnych strumieni, a także udział masowy poszczególnych związków chemicznych w danych strumieniach. Tabela 2 przedstawia wyniki symulacji nr 1, natomiast tabela 3 odnosi się do symulacji nr 2.

Tabela 2

Zestawienie wyników symulacji komputerowej procesu ekstrakcyjnego oczyszczania kwasu fosforowego w pierwszej symulacji (według objaśnień z tabeli 1)

Table 2

Results set for wet phosphoric acid purification process simulation in Aspen Plus for first simulation (according to explain from Table 1)

Strumień	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}
Całkowity strumień masowy [g·s ⁻¹]	27,75	50,00	51,40	26,35	20,00	21,51	49,89	50,00	35,26	36,25
Udział masowy poszczególnych związków chemicznych [% mas.]										
DiPE	0	100	96,74	1,55	0	1,42	98,93	0	0,29	0,56
H ₂ O	87,48	0	0,77	90,11	100	93,62	0,65	100	99,24	96,95
H ₃ PO ₄	11,50	0	2,40	7,44	0	4,82	0,39	0	0,43	2,44
FePO ₄ · 2H ₂ O	1,02	0	0,09	0,90	0	0,14	0,03	0	0,04	0,05

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że pomimo przemywania fazy organicznej małą ilością wody (reekstrakcja I prowadzona w kolumnie II) pozostaje w niej zdecydowana większość H₃PO₄.

W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej otrzymano także rozkłady masy H_3PO_4 oraz Fe^{3+} w poszczególnych fazach po procesie ekstrakcji I, reekstrakcji I oraz reekstrakcji II. Otrzymane dane porównano z wynikami uzyskanymi po przeprowadzeniu eksperymentu laboratoryjnego, którego zakres był taki sam jak przeprowadzonej symulacji.

Tabela 3
Zestawienie wyników symulacji komputerowej procesu ekstrakcyjnego oczyszczania kwasu fosforowego w drugiej symulacji (według objaśnień z tabeli 1)

Table 3
Results set for wet phosphoric acid purification process simulation in Aspen Plus for second simulation (according to explain from Table 1)

Strumień	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9	F_{10}
Całkowity strumień masowy [g·s ⁻¹]	40,00	50,00	84,29	5,71	20,00	64,78	39,51	50,00	5,42	109,36
Udział masy poszczególnych związków chemicznych [% mas.]										
DiPE	0	100	52,82	95,88	0	14,50	88,95	0	0,633	3,68
H ₂ O	8,90	0	4,20	0,37	100	35,50	1,33	100	99,11	66,70
H ₃ PO ₄	90,10	0	42,51	3,70	0	49,45	9,61	0	0,25	29,29
FePO ₄ · 2H ₂ O	1,00	0	0,47	0,05	0	0,55	0,11	0	0,01	0,33

Tabela 4
Masa H₃PO₄ w poszczególnych fazach po procesie ekstrakcji I, reekstrakcji I oraz reekstrakcji II, modelowanych w programie Aspen Plus. Obliczono także wartości stopnia ekstrakcji dla poszczególnych etapów

Table 4
H₃PO₄ mass in organic and water phase after extraction I, reextraction I and reextraction II in aspen plus model. The extraction rate values for each steps also were calculated

Numer symulacji	Masa H ₃ PO ₄ w wejściowym EKF	EKSTRAKCCJA			REEKSTRAKCCJA I			REEKSTRAKCCJA II		
		Masa H ₃ PO ₄ w fazie wodnej	Masa H ₃ PO ₄ w fazie organicznej	Stopień ekstrakcji η_E	Masa H ₃ PO ₄ w fazie wodnej	Masa H ₃ PO ₄ w fazie organicznej	Stopień η_{RI}	Masa H ₃ PO ₄ w fazie wodnej	Masa H ₃ PO ₄ w fazie organicznej	Stopień η_{RII}
	[g]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]
1	3,192	1,960	1,232	38,60	1,037	0,195	84,17	0,884	0,153	85,24
2	36,04	0,21	35,83	99,42	32,03	3,80	89,40	32,02	-	100

W tabelach 4 oraz 5 przedstawiono bilans masowy [g] zawartości kwasu ortofosforowego w wejściowym, ekstrakcyjnym kwasie fosforowym, który poddano oczyszczeniu z zastosowaniem eteru diizopropylowego (DiPE), a także masy kwasu w fazie wodnej i organicznej po ekstrakcji, reekstrakcji I oraz reekstrakcji II. Wyliczono także stopnie ekstrakcji, wyrażone w procentach dla każdego z procesów. Tabela 4 odnosi się do wyników symulacji przeprowadzonej w programie Aspen Plus. W tabeli 5

przedstawiono analogiczne dane dla procesu oczyszczania ekstrakcyjnego kwasu fosforowego z zastosowaniem eteru diizopropylowego (DiPE), który został przeprowadzony w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 5

Masa H_3PO_4 w poszczególnych fazach po procesie ekstrakcji I, reekstrakcji I oraz reekstrakcji II, przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Obliczono także wartości stopnia ekstrakcji dla poszczególnych etapów

Table 5

Laboratory results of H_3PO_4 mass in organic and water phase after extraction I, reextraction I and reextraction II. The extraction rate values for each steps also were calculated

Numer symulacji	Masa H_3PO_4 w wejściowym EKF	EKSTRAKCCJA			REEKSTRAKCCJA I			REEKSTRAKCCJA II		
		Masa H_3PO_4 w fazie wodnej	Masa H_3PO_4 w fazie organicznej	Stopień ekstrakcji η_E	Masa H_3PO_4 w fazie wodnej	Masa H_3PO_4 w fazie organicznej	Stopień η_{RI}	Masa H_3PO_4 w fazie wodnej	Masa H_3PO_4 w fazie organicznej	Stopień η_{RII}
	[g]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]
1	3,192	2,720	0,427	13,38	0,159	0,268	37,24	0,262	0,006	97,76
2	36,04	5,84	30,2	83,79	23,18	7,02	76,77	22,182	0,998	95,69

Tabela 6

Masa Fe^{3+} w poszczególnych fazach po procesie ekstrakcji I, reekstrakcji I oraz reekstrakcji II, modelowanych w programie Aspen Plus. Obliczono także wartości stopnia ekstrakcji dla poszczególnych etapów

Table 6

Fe^{3+} mass in organic and water phase after extraction I, reextraction I and reextraction II in aspen plus model. The extraction rate values for each steps also were calculated

Numer symulacji	Masa Fe w wejściowym EKF	EKSTRAKCCJA			REEKSTRAKCCJA I			REEKSTRAKCCJA II		
		Masa Fe w fazie wodnej	Masa Fe w fazie organicznej	Stopień ekstrakcji η_E	Masa Fe w fazie wodnej	Masa Fe w fazie organicznej	Stopień η_{RI}	Masa Fe w fazie wodnej	Masa Fe w fazie organicznej	Stopień η_{RII}
	[g]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]
1	0,283	0,237	0,046	16,25	0,031	0,015	67,40	0,018	0,013	58,06
2	0,400	0,003	0,397	99,25	0,356	0,041	89,67	0,356	0	100

W tabelach 6 i 7 zestawiono masy [g] zawartości żelaza(III) w kwasie fosforowym, który poddano procesowi oczyszczania z zastosowaniem eteru diizopropylowego (DiPE), a także masy w gramach Fe(III) w fazie wodnej i organicznej w poszczególnych etapach ekstrakcji i reekstrakcji. Dla poszczególnych etapów oczyszczania obliczono stopień ekstrakcji Fe(III) w procentach. Dane w tabeli 6 odnoszą się do procesu symulowanego z wykorzystaniem oprogramowania komputerowego Aspen Plus. Wyniki zestawione w tabeli 7 odnoszą się do procesu oczyszczania kwasu fosforowego z zastosowaniem eteru diizopropylowego (DiPE), który został przeprowadzony w warunkach laboratoryjnych.

Tabela 7
Masa Fe³⁺ w poszczególnych fazach po procesie ekstrakcji I, reekstrakcji I oraz reekstrakcji II, przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Obliczono także wartości stopnia ekstrakcji dla poszczególnych etapów

Table 7
Laboratory results of Fe³⁺ mass in organic and water phase after extraction I, reextraction I and reextraction II. The extraction rate values for each steps also were calculated

Numer symulacji	Masa Fe w wejściowym EKF	EKSTRAKCJA			REEKSTRAKCJA I			REEKSTRAKCJA II		
		Masa Fe w fazie wodnej	Masa Fe w fazie organicznej	Stopień ekstrakcji η_E	Masa Fe w fazie wodnej	Masa Fe w fazie organicznej	Stopień η_{RI}	Masa Fe w fazie wodnej	Masa Fe w fazie organicznej	Stopień η_{RII}
	[g]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]
1	0,283	0,253	0,030	10,60	0,020	0,010	66,67	0,003	0,007	30,00
2	0,400	0,202	0,198	49,50	0,165	0,033	83,33	0,155	0,010	93,39

Wnioski

Na podstawie opracowanej symulacji komputerowej procesu oczyszczania ekstrakcyjnego kwasu ortofosforowego(V) metodą ekstrakcji H₃PO₄ do fazy organicznej (eteru diizopropylowego - DIPE) i jego dwukrotnej reekstrakcji wodą można stwierdzić, że użycie eteru diizopropylowego jako ekstrahenta w procesie oczyszczania jest uzasadnione, co potwierdzają także badania laboratoryjne. Porównując wyniki symulacji, a także doświadczeń laboratoryjnych, odnoszących się do zawartości H₃PO₄ oraz jonów żelaza(III) w poszczególnych fazach i etapach procesu, można wnioskować, że symulacja komputerowa oddaje stan rzeczywisty, tzn. odpowiada ogólnym trendom, jakie można zauważyć po analizie wyników otrzymanych na podstawie eksperymentu laboratoryjnego.

Wyniki, jakie wygenerowano w programie komputerowym, są korzystniejsze niż te, otrzymane w warunkach rzeczywistych w skali laboratoryjnej. Powstałe rozbieżności widać między innymi dla procesu reekstrakcji I, czyli przemywania, gdzie według symulacji komputerowej przeprowadzonej dla surowca o zawartości 1,02% mas. Fe (symulacja I) stopień reekstrakcji dla H₃PO₄ wynosi 84,17%, natomiast w warunkach rzeczywistych

udało się uzyskać 37,24%. W przypadku symulacji II uzyskany stopień reekstrakcji kwasu w procesie reekstrakcji I wyniósł 89,40%, podczas gdy w warunkach laboratoryjnych uzyskano 76,77%. Jest to korzystna tendencja z punktu widzenia technologicznego, ponieważ w procesie przemywania chcemy usunąć jak najwięcej zanieczyszczeń (żelaza) przy jak najmniejszym stopniu wyekstrahowania H_3PO_4 . Na podstawie porównania danych przedstawionych w tabelach 4-7 można stwierdzić, że poprzedzenie badań laboratoryjnych analizą komputerową w programie Aspen Plus może w istotny sposób pomóc przy ocenie przydatności danego ekstrahenta w procesie oczyszczania H_3PO_4 z wykorzystaniem metod ekstrakcji. Ponadto analiza komputerowa pozwala przewidzieć, jakie warunki technologiczne będą korzystniejsze w przypadku prowadzonego procesu.

Otrzymane wyniki w ramach symulacji omawianego procesu oczyszczania ekstrakcyjnego kwasu fosforowego będą stanowić podstawę dalszych badań uwzględniających rozbudowaną macierz eksperymentu o dodatkowe parametry technologiczne.

Podziękowania

Praca sfinansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP w ramach działalności statutowej, realizowanej na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej (nr 0401/0261/16-W3/Z14, 2016-2017).

Literatura

- [1] Szatanik-Kloc A. *Acta Agrophys.* 2004;4:177-183. http://www.old.acta-agrophysica.org/artykuly/acta_agrophysica/ActaAgr_110_2004_4_1_177.pdf.
- [2] Järup L, Åkesson A. *Toxicol Appl Pharmacol.* 2009;238:201-208. DOI: 10.1016/j.taap.2009.04.020.
- [3] Godbold DL, Hüttermann A. *Environ Pollut.* 1985;38:375-381. DOI: 10.1016/0143-1471(85)90108-4.
- [4] Singh BR, McLaughlin MJ. *Cadmium in Soils and Plants.* Dordrecht: Springer Netherlands; 1999. DOI: 10.1007/978-94-011-4473-5.
- [5] Lukina AO, Boutin C, Rowland O, Carpenter DJ. *Chemosphere.* 2016;162:355-364. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.07.055
- [6] Singh HP, Mahajan P, Kaur S, Batish DR, Kohli RK. *Environ Chem Lett.* 2013;11(3):229-254. DOI: 10.1007/s10311-013-0407-5.
- [7] Dheeba B, Sampathkumar P, Kannan K. *J Toxicol.* 2015;2015:1-9. DOI: 10.1155/2015/367217.
- [8] Veeranjanyulu K, Das VSR. *J Exp Bot.* 1982;33:1161-1165.
- [9] Krupa Z, Siedlecka A, Maksymiec W, Baszyński T. *J Plant Physiol.* 1993;142:664-668. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)80899-0.
- [10] Sheoran IS, Aggarwal N, Singh R. *Plant Soil* 1990;129:243-249. DOI: 10.1007/BF00032419.
- [11] Kabata-Pendias A, Pendias H. *Biogeochemia pierwiastków śladowych.* Warszawa, WN PWN; 1999.
- [12] Krupińska I, Świdarska-Bróz M. *Ochr Środ.* 2008;30:3-7.
- [13] Podraza Z, Krupa-Żuczek K, Wzorek Z. *Czasopismo Techniczne.* 2011;108:185-196.
- [14] El-Asmy AA, Serag HM, Mahdy MA, Amin MI. *Sep Purif Technol.* 2008;61:287-292. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.11.004.
- [15] Daifullah AAM, Awwad NS, El-Reefy SA. *Chem Eng Process.* 2004;43:193-201. DOI: 10.1016/S0255-2701(03)00014-X.
- [16] Gonzalez MP, Navarro R, Saucedo I, Avila M, Revilla J, Bouchard C. *Desalination.* 2002;147:315-320. DOI: 10.1016/S0011-9164(02)00558-1
- [17] Gómez-Siurana A, Ruiz-Bevía F, Fernández-Sempere J, Torregrosa-Fuerte E. *Ind Eng Chem Res.* 2001; 40:892-897. DOI: 10.1021/ie000065a.
- [18] Hannachi A, Habaili D, Chtara C, Ratel A. *Sep Purif Technol.* 2007;55:212-216. DOI:10.1016/j.seppur.2006.12.014

- [19] Feki M, Fourati M, Chaabouni MM, Ayedi HF. *Can J Chem Eng.* 1994;72:939-944. DOI: 10.1002/cjce.5450720523.
- [20] Li X, Li J, Yang J, Chen M, Feng D, Guo YJ. *Serb Chem Soc.* 2017;82:579-592. DOI: 10.2298/JSC161028019L.
- [21] Li X, Li J, Luo J, Jin Y, Zou D. *Solvent Extr Res Dev Jpn.* 2017;24:23-35. DOI: 10.15261/serdj.24.23.
- [22] Trabelsi W, Tlili AJ. *Afr Earth Sci.* 2017;129:647-658. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.02.008.
- [23] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 stycznia 2003 w sprawie maksymalnych poziomów zanieczyszczeń chemicznych i biologicznych, które mogą znajdować się w żywności, składnikach żywności, dozwolonych substancjach dodatkowych, substancjach pomagających w przetwarzaniu lub na powierzchni żywności. Dz.U. Nr 37, poz. 325 i 326. <http://isap.sejm.gov.pl/Download?id=WDU20030370326&type=2>.
- [24] Załącznik do Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (poz. 1359), wartości dopuszczalne stężeń w glebie lub ziemi. <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20021651359>.
- [25] Ustawa z dnia 10 lipca o nawozach i nawożeniu. Dz.U. 2007, Nr 147, poz. 1033. <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU20071471033>.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PURIFICATION OF WET PHOSPHORIC ACID WITH THE USE OF DIISOPROPYL ETHER

Department of Technology and Chemical Processes, Faculty of Chemistry
Wrocław University of Science and Technology, Wrocław

Abstract: In the view of a wide range of applications of phosphoric acid, mainly in fertilizer industry, H_3PO_4 is one of the most important products in the large volume inorganic chemistry. Its industrial production has been the subject of studies in inorganic chemical technology for many years. The main problem of the wet, extraction method, which is the basic method of phosphoric acid production, is the separation of metal ions from the unpurified acid. These ions come from raw phosphorous materials, which were digested by sulfuric acid in the phosphoric acid production process. There are studies about the use of organic solvents in purification of phosphoric acid by extraction method, where H_3PO_4 is extracted to the organic phase and then next to the water. Researchers are looking for new methods of assessment of other extractants due to the increasing impurity of available raw materials. The main objective of this study was to simulate the method of phosphoric acid purification by extraction. Diisopropyl ether was used as an organic solvent. Results of the simulation have been compared with laboratory results. That allowed to verify the proposed model. The mathematical model can be assessed in terms of its usability for different extractants in the future.

Keywords: phosphoric acid, purification, diisopropyl ether