

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 22**  
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok VIII**

**Warszawa–Opole 2015**

---

JOANNA POLUSZYŃSKA\*  
EWELINA ŚLĘZAK\*\*

## Możliwości odzysku fosforu z osadów ściekowych

**Słowa kluczowe:** komunalne osady ściekowe, fosfor, odzysk.

Fosfor należy do głównych składników odżywczych dla roślin. Jego pozyskiwanie powoduje degradację środowiska w miejscach wydobywania fosforu, głównie w krajach Afryki Północnej. Wysokie ceny tego surowca skłaniają do poszukiwania innych alternatywnych metod otrzymywania fosforu. W artykule zebrano i opisano najważniejsze techniki, które można zastosować w celu odzysku fosforu z komunalnych osadów ściekowych. Są to procesy, w których odzysk fosforu możliwy jest zarówno bezpośrednio z osadów, jak i z popiołów oraz żużli powstających podczas termicznego ich przetworzenia. W pracy przedstawiono również wyniki badań komunalnych osadów ściekowych pod kątem zawartości w nich fosforu i innych parametrów, w tym metali ciężkich. Uzyskane dane o zawartości fosforu w osadach ściekowych znajdowały się na podobnym poziomie jak wyniki przedstawiane przez innych autorów.

### 1. Wstęp

Fosfor jest niezbędnym składnikiem odżywczym dla wszystkich organizmów. Jest składnikiem strukturalnym roślin oraz wszystkich tkanek żywych [1–4]. Jednocześnie obok azotu i węgla fosfor należy do tzw. pierwiastków biogenych, których nadmiar jest problemem, między innymi jeżeli chodzi o jakość wód powierzchniowych. Związki zawierające pierwiastki biogenne, przenikając do wód, prowadzą do nadmiernego rozwoju bakterii, glonów i innych organizmów, powodujących tzw. zakwity wody. Azot i fosfor przedostające się do wód wraz ze ściekami lub wodami opadowymi wzbogacają wody w składniki odżywcze, powodując ich nadmierną eutrofizację [5]. Istotny problem stanowi więc oczyszczenie ścieków ze związków fosforu.

---

\* Dr, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, j.poluszynska@icimb.pl

\*\* Mgr, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, e.slezak@icimb.pl

W całym cyklu oczyszczania ścieków znaczne ilości fosforu pozostają w odpadzie powstałym po procesie oczyszczania, czyli w osadzie ściekowym. Komunalne osady ściekowe mogą zawierać znaczne ilości związków fosforu, również z uwagi na powszechne stosowanie związków fosforu w środkach czystości (detergentach). Przyjmuje się, że ok. 90% związków fosforu znajdujących się w ściekach jest następnie akumulowanych w osadach ściekowych [2].

Z uwagi na to, że fosfor jest jednym z podstawowych składników odżywczych dla roślin związki fosforu są wykorzystywane w dużych ilościach przez przemysł nawozowy. Kraje Unii Europejskiej nie posiadają złóż fosforytów, stąd konieczność eksportu tego minerału z Chin, Jordanii, krajów Afryki Północnej i USA. Wymienione państwa posiadają 85% globalnych rezerw tych minerałów [6–7]. Powszechne zastosowanie, a co za tym idzie masowa eksploatacja złóż fosforytu powoduje degradację środowiska naturalnego na terenach ich wydobycia. Wysokie ceny tego minerału oraz aspekty środowiskowe sprawiły, iż podjęto inicjatywę zrównoważonego jego wykorzystania. Może być ono realizowane dzięki wydajnej produkcji i racjonalnemu użytkowaniu fosforu, a także recyklingowi i minimalizacji powstawania odpadów po to, aby jego rezerwy były również dostępne dla przyszłych pokoleń. Cele takie zapisała w swoim dokumencie Komisja Parlamentu Europejskiego w 2013 r. [8].

Zawartość fosforu w suchej masie osadu ściekowego lub popiołu z osadu ściekowego kształtuje się, według różnych źródeł, w zakresie od kilku do kilkunastu procent. W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań podane przez różnych autorów. Wyższe zawartości będą obserwowane dla bardziej skoncentrowanych popiołów (tab. 1).

T a b e l a 1

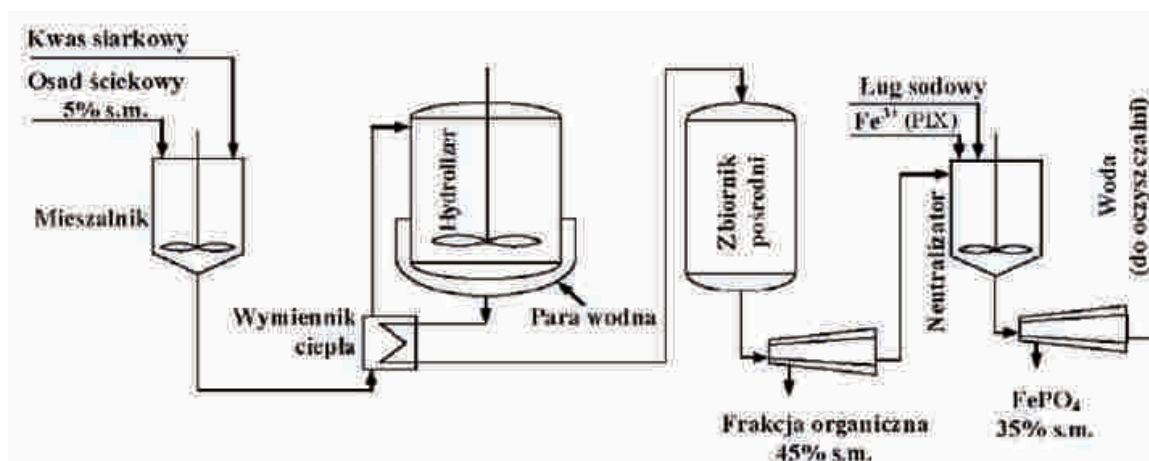
*Zawartość fosforu całkowitego w osadach ściekowych*

Rodzaj osadu ściekowego	Zawartość fosforu % w suchej masie	Autor
Odwodnione osady ściekowe	3,42	N.Y. Acelas i in. [1]
Osad ściekowy suszony	5,1–7,6	M. Atienzae-Martinez i in. [9]
Popiół z osadu ściekowego	8,88	B.K. Biswas i in. [10]
Popiół z osadu ściekowego	12,9–13,4	P. Guedes i in. [6]
Osad ściekowy surowy	4,65	K. Guney i in. [11]
Popiół z osadu ściekowego	5,86–6,13	A. Pettersson i in. [7]
Popiół z osadu ściekowego	8,0	S. Petzet i in. [12]
	11,0	
	7,9	
	8,3	
Popiół z osadu ściekowego	3,3	H. Xu i in. [4]
	6,0	
Osad ściekowy odwodniony	2,62	W. Shi i in. [13]

## 2. Metody odzysku fosforu z osadów ściekowych

Związki fosforu z osadów ściekowych mogą być wytrącane bezpośrednio z osadów lub z popiołów oraz żużla powstających w procesach ich termicznego przetwarzania. Podstawowe procesy wytrącania związków fosforu polegają na reakcji hydrolizy z kwasem siarkowym. Wówczas związki fosforu wytrącane są głównie w postaci ortofosforanów żelaza, które wykazują się znacznie gorszymi właściwościami nawozowymi (niska rozpuszczalność w wodzie) niż fosforany wapnia. Fosforany żelaza są bardziej rozpowszechnione w przyrodzie niż rudy apatyty, z których wytwarzany jest kwas ortofosforowy [12, 14–17].

Najpopularniejszą metodą odzysku fosforu z osadów ściekowych jest termiczna hydroliza osadów ściekowych w środowisku kwasu siarkowego, opisana i zastosowana przez firmę Kemira, w procesie KREPRO, którego schemat przedstawiono na rycinie 1.



Ryc. 1. Schemat procesu KREPRO [14, 17]

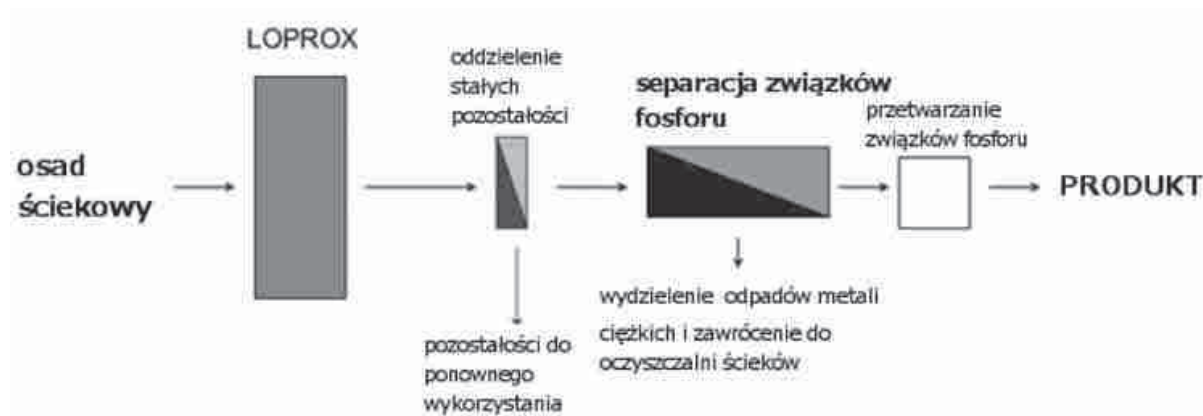
W procesie KREPRO wykorzystywane są osady ściekowe zagęszczone do ok. 5% suchej masy, które następnie mieszane są z kwasem siarkowym do uzyskania pH 1–3. Powstałą zawiesinę ogrzewa się w autoklawie do temperatury 140°C przez 30–40 minut, a następnie odwirowuje się i rozdziela. Stałą pozostałość przetwarza się termicznie, a roztwór po odwirowaniu kierowany jest do reaktora, w którym, po podniesieniu pH, wytrącane są ortofosforany w postaci  $\text{FePO}_4$  [14–15, 17–18].

Proces CAMBI/KREPRO jest rozwinięciem procesu KREPRO, dzięki któremu można hydrolizować osady o zawartości suchej masy rzędu 20%, a nadmiar żelaza (III), wykorzystywany w procesie wytrącania ortofosforanów, zagospodarowany jest jeszcze jako koagulat w procesie oczyszczania ścieków [14, 18].

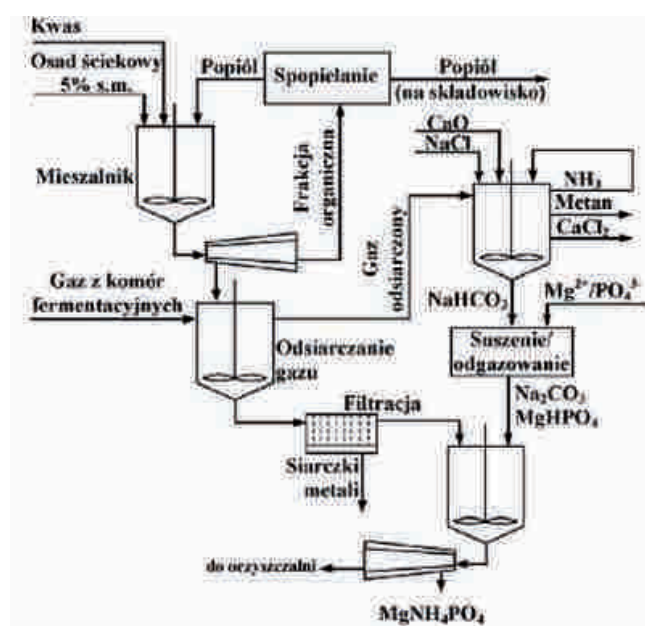
W technologii Kemicond proces hydrolizy przeprowadza się przy wartościach pH 3–4 w temperaturze 20°C. W procesie stosuje się dodatek wody utlenionej

w celu zapobiegnięcia redukcji jonów żelaza (III), które wykorzystywane są w procesie strącania ortofosforanów.

Technologia PHOXNAN w kombinacji z mokrym utlenianiem w niskim ciśnieniu (LOPROX) składa się z dwóch etapów. Przy temperaturze 160–220°C i ciśnieniu 12–28 bar przy kwaśnym pH, poprzez dodanie kwasu siarkowego do wartości  $\text{pH} < 1,5$ , podawane są osady ściekowe, które następnie utleniane są w czystym tlenie [2]. Po tym procesie zawartość związków organicznych zmniejsza się w dużym stopniu. Dodatkowo takie związki, jak wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), farmaceutyki i mikrozanieczyszczenia organiczne ulegają degradacji. Z uwagi na niskie wartości pH fosforany w roztworze występują głównie w postaci  $\text{H}_3\text{PO}_4$  i  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  [2]. Schemat procesu PHOXNAN przedstawia rycina 2.



Ryc. 2. Schemat procesu PHOXNAN [2]



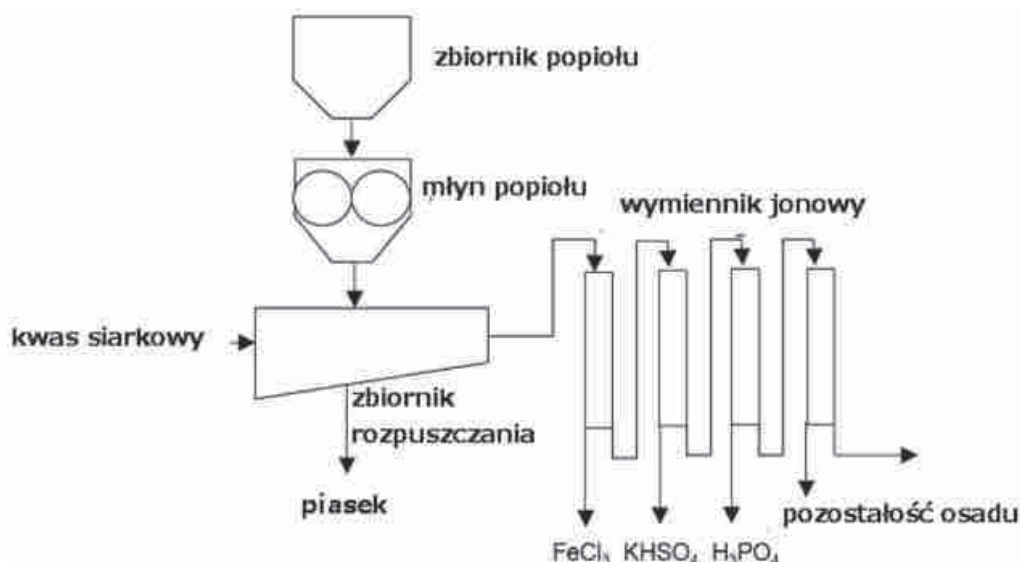
Ryc. 3. Schemat procesu SEABORNE [14]

Proces SEABORNE (ryc. 3), opracowany przez Seaborne Environmental Research Laboratory GmbH polega na hydrolizie kwasem siarkowym mieszaniny osadów ściekowych i popiołów z termicznego przekształcania osadów ściekowych. Tak jak w przypadku poprzednich technologii, frakcja organiczna poddawana jest termicznemu przetworzeniu, a roztwór kierowany jest do reaktora, w którym następuje zarówno usunięcie jonów metali, jak i odsiarczanie biogazu pochodzącego z komór fermentacyjnych [14].

Proces AQUA RECI polega na utlenieniu frakcji organicznej osadów ściekowych do produktów gazowych w obecności czystego tlenu w warunkach nadkrytycznych wody (*Supercritical Water Oxidation*). Fosfor wylugowywany jest z frakcji nieorganicznej wodorotlenkiem sodu. Następnie fosfor wytrącany jest przy użyciu tlenku wapnia w postaci wodorofosforanu wapnia. Dzięki wysokiemu pH metale ciężkie pozostają w formie nierozpuszczalnej. Istnieją także podobne metody, w których zamiast kwasów wykorzystywane są wodorotlenki, a do głównych produktów reakcji zaliczamy amfoteryczne związki glinu i fosforu ( $\text{pH} > 13$ ) [5, 12].

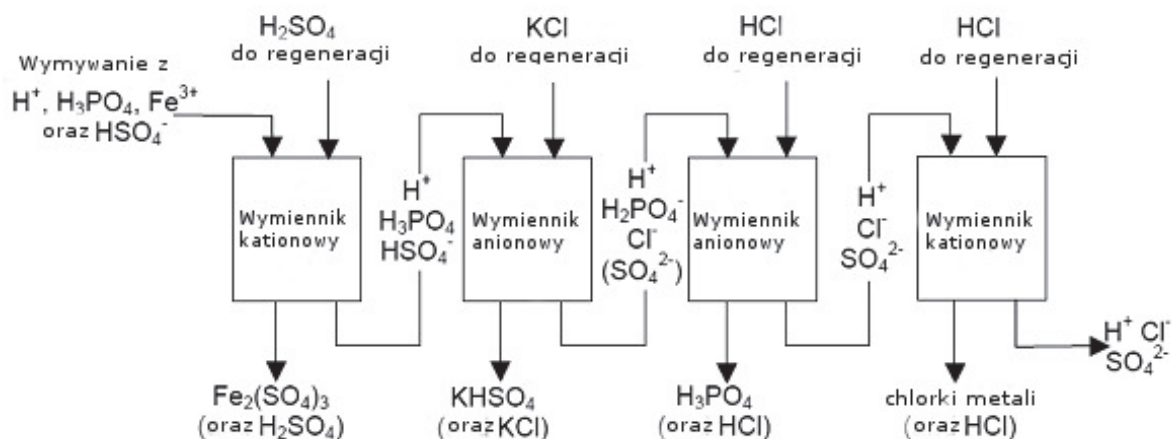
Kolejną metodą moką, w której wykorzystuje się środowisko alkaliczne, jest wytrącanie struwitu –  $(\text{NH}_4)\text{Mg}[\text{PO}_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , najkorzystniejszej formy fosforu biodostępnej dla roślin. Do strącania struwitu stosuje się sześciowodny chlorek magnezu oraz chlorek amonu. W celu utrzymania odpowiedniego pH dodawany jest wodorotlenek sodu i na zakończenie podawany jest azot w celu wytrącenia struwitu. Następnie mieszanina jest odwirowywana i filtrowana w celu wyizolowania struwitu [4].

Proces BIOCON (ryc. 4) polega na odzysku związków fosforu z popiołu powstałego ze spalania osadów ściekowych w temperaturze  $850^\circ\text{C}$ . Popiół, tak jak w przypadku osadów ściekowych, mieszany jest z kwasem siarkowym do wartości pH ok. 1.



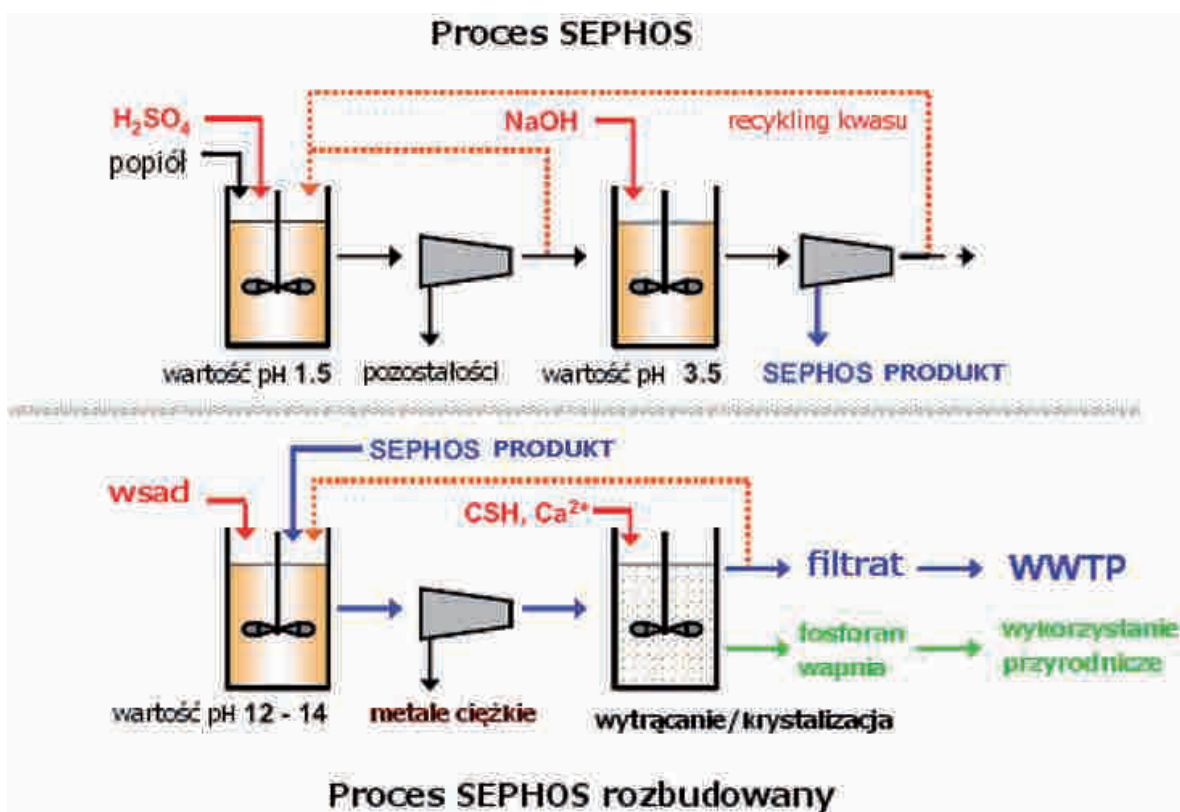
Ryc. 4. Schemat procesu BIOCON [15]

W procesie BIOCON zastosowano wymianę jonową (ryc. 5), pozwalającą na oczyszczenie kwasu ortofosforowego z jonów metali i uzyskanie przyswajalnej formy fosforanów w postaci fosforanów wapnia [14–15].



Ryc. 5. Wymiana jonowa procesu BIOCON [15]

Proces SEPHOS (ryc. 6) polega na mieszaniu popiołu zawierającego jony glinu z kwasem siarkowym przy  $\text{pH} < 1,5$ . Następnie, po oddzieleniu zawiesiny,  $\text{pH}$  roztworu podnosi się do 3,5 poprzez dodatek wodorotlenku sodu. W reakcji tej oprócz  $\text{AlPO}_4$  wytrączanych jest również większość metali ciężkich. Po kolejnym podwyższeniu  $\text{pH}$  do poziomu z zakresu 12–14 następuje rozpuszczenie fosforanu glinu i oddzielenie pozostałych metali, a fosforany w postaci łatwo przyswajalnych fosforanów wapnia wytrącane są przez dodatek  $\text{CaO}$  [12, 14, 20].



Ryc. 6. Schemat procesu SEPHOS [20]

Metody odzysku fosforu z osadów ściekowych można podzielić na metody odzysku z wykorzystaniem wymywania – metody mokre oraz odzysku na zasadzie zastosowania bezpośrednio dogłębowego popiołu z procesów termicznych – metody suche, ze spalania osadów ściekowych, bogatych w związki fosforu (tab. 2) [19].

Tabela 2

*Podział metod odzysku fosforu [12, 19]*

Metody odzysku fosforu z osadów ściekowych (mokre)	Metody odzysku fosforu z popiołu z osadów ściekowych (termiczne)
SEABORNE	MEPHEREC, ASHDEC
KREPRO, CAMBI, AQUA RECI, LOPROX/PHOXAN	P-INDUSTRY, THERMPHOS
BIOCON, BIOLEACHING, PASCH, SEPHOS	-

### 3. Materiał i metody badań

W ramach pracy zbadano osady ściekowe pochodzące z komunalnych mechaniczno-biologicznych oczyszczalni ścieków, zlokalizowanych w województwach opolskim i śląskim. Osady ściekowe pochodziły zarówno z małych wiejskich oczyszczalni, jak i z oczyszczalni miejskich. Badano osady ściekowe stabilizowane poprzez wapnowanie, suszenie solarne oraz osady kompostowane. Analizy wykonywano w trzech równoległych powtórzeniach dla każdego z oznaczanych parametrów. W tabeli 3 przedstawiono pochodzenie oraz aktualny sposób zagospodarowania osadów ściekowych wykorzystanych w badaniach.

Tabela 3

*Pochodzenie i sposób zagospodarowania osadów ściekowych*

Nr próby	Pochodzenie osadów ściekowych
1	oczyszczalnia wiejska, osad kompostowany
2	oczyszczalnia miejska (> 200 tys. ludności), osad stabilizowany
3	oczyszczalnia miejska (> 20 tys. ludności), osad kompostowany
4	oczyszczalnia miejska (> 10 tys. ludności), osad suszony solarnie

Źródło: Badania własne.

Zakres badań osadów ściekowych obejmował: odczyn pH, zawartość suchej masy, zawartość substancji organicznej, zawartość azotu, fosforu, potasu, wapnia, magnezu oraz metali ciężkich (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg i Cr) (tab. 4).



T a b e l a 4

*Badane parametry osadów ściekowych oraz metody badań*

Badany parametr	Metoda badawcza
pH	metoda potencjometryczna
Zawartość suchej masy	metoda wagowa PN-EN 15934:2013-02
Zawartość substancji organicznej	metoda wagowa PN-EN 15169:2011+Ap1:2012
Azot (N)	analiza elementarna, analizator CHNS firmy Elementar, PN-EN 15104:2011
Wapń (Ca)	mineralizacja próbek w mieszaninie kwasów HCl:HNO <sub>3</sub> w stosunku objętościowym 3:1 (Okolo 0,2 g próbki wysuszonej do stałej masy w temperaturze 105°C rozdrobnionej i przesianej na sicie 0,7 mm poddano mineralizacji w 0,012 l mieszaniny HCl:HNO <sub>3</sub> (3:1) w mineralizatorze Microwave Pro firmy Anton Paar. Mineralizaty przeniesiono do kolby o objętości 50 ml i uzupełniono wodą dejonizowaną do 50 ml, do analizy roztwory rozcieńczono 10-krotnie, analiza ICP-MS firmy Agilent, PN-EN ISO 17294-2:2006
Magnez (Mg)	
Fosfor (P)	
Potas (K)	
Kadm (Cd)	
Miedź (Cu)	
Nikiel (Ni)	
Ołów (Pb)	
Cynk (Zn)	
Chrom (Cr)	
Rtęć (Hg)	ok. 100 mg próbki stałej poddano analizie bezpośredniej na analizatorze rtęci, metoda absorpcyjnej spektrometrii atomowej z generowaniem zimnych par rtęci (CVAAS), analizator AMA

Ź r ó d ł o: Badania własne.

## 4. Wyniki badań

Odczyn badanych osadów ściekowych zawierał się w przedziale od 6,5 do 8,3. Najwyższą wartością pH charakteryzowała się próbka stabilizowana CaO. Zawartość suchej masy wynosiła od 16,7% dla próbek osadu stabilizowanego do 91,1% dla osadu suszonego solarnie. Zawartość substancji organicznej w badanych osadach ściekowych mieściła się w przedziale od 42,1% (dla próby 3) do 85,5% (dla próby 1). Zawartość azotu w % mieściła się w przedziale od 1,85 do 5,10. Zawartość fosforu była na podobnym poziomie w próbach 1, 2 i 4. Próba 3 zawierała najniższą zawartość tego pierwiastka i wynosiła 1,3%. Podobnie w próbie 3 odnotowano najniższe zawartości potasu (0,104%). Najwięcej tego pierwiastka stwierdzono w próbie 1. Próba 3 zawierała najmniejsze ilości wapnia i magnezu oraz większości metali ciężkich. Najwyższe zawartości wapnia, magnezu oraz większości metali stwierdzono w próbie 2 (tab. 5).

Tabela 5

*Wartości parametrów badanych osadów ściekowych*

Badany parametr	Próba 1	Próba 2	Próba 3	Próba 4
pH	6,7	8,3	6,6	6,5
Zawartość suchej masy	21,9%	16,7%	49,1%	91,1%
Zawartość substancji organicznej	85,5% s.m.	63,7% s.m.	42,1% s.m.	72,6% s.m.
Azot (N)	2,98% s.m.	5,10% s.m.	1,85% s.m.	4,32% s.m.
Fosfor (P)	2,1% s.m.	2,9% s.m.	1,3% s.m.	2,6% s.m.
Potas (K)	2,72% s.m.	1,23% s.m.	0,104% s.m.	1,02% s.m.
Wapń (Ca)	15,8 g/kg s.m.	28,8 g/kg s.m.	12,0 g/kg s.m.	20,9 g/kg s.m.
Magnez (Mg)	4,42 g/kg s.m.	7,80 g/kg s.m.	2,79 g/kg s.m.	7,59 g/kg s.m.
Kadm (Cd)	1,66 mg/kg s.m.	4,27 mg/kg s.m.	0,761 mg/kg s.m.	0,997 mg/kg s.m.
Miedź (Cu)	107 mg/kg s.m.	351 mg/kg s.m.	83,7 mg/kg s.m.	155 mg/kg s.m.
Nikiel (Ni)	16,1 mg/kg s.m.	85,0 mg/kg s.m.	22,3 mg/kg s.m.	30,3 mg/kg s.m.
Ołów (Pb)	20,7 mg/kg s.m.	70,0 mg/kg s.m.	14,7 mg/kg s.m.	20,6 mg/kg s.m.
Cynk (Zn)	580 mg/kg s.m.	1950 mg/kg s.m.	312 mg/kg s.m.	738 mg/kg s.m.
Rtęć (Hg)	5,50 mg/kg s.m.	1,82 mg/kg s.m.	0,398 mg/kg s.m.	0,625 mg/kg s.m.
Chrom (Cr)	28,8 mg/kg s.m.	97,0 mg/kg s.m.	38,2 mg/kg s.m.	42,2 mg/kg s.m.

Źródło: Badania własne.

Uzyskane w badaniach wyniki zawartości fosforu w osadach ściekowych były na podobnym poziomie do tych przedstawianych przez innych autorów (tab. 1 i 5). W badaniach zawartość fosforu była nieco niższa z uwagi na to, że niektóre z osadów ściekowych były stabilizowane/higienizowane (osad 2), bądź kompostowane z wykorzystaniem masy roślinnej (trociny) (osad 1), co mogło wpłynąć na „rozcieńczenie” badanych próbek.

W badaniach innych autorów znacznie wyższe zawartości fosforu stwierdzano dla popiołów z termicznego przetwarzania osadów ściekowych. Jest to zrozumiałe z uwagi na wysoką zawartość w osadach związków organicznych, które w procesach termicznych ulegają spaleni. Popioły są zatem bardziej skoncentrowane w stosunku do osadów ściekowych.

Uzyskane wyniki badań pokazują, że komunalne osady ściekowe zawierają metale ciężkie, które mogą powodować trudności w procesach odzysku fosforu. Ma to głównie związek z rozpuszczaniem fosforu w kwasie siarkowym, w którym również rozpuszczane są metale, które następnie wbudowywane zostają w sole związków fosforu. Przedstawione technologie pozwalają na usuwanie jonów me-

tali w reakcjach wymiany jonowej. Wymaga to jednak stałej regeneracji materiałów w ciągu technologicznym.

Zgodnie z danymi literaturowymi oraz badaniami własnymi zawartość fosforu w osadach ściekowych odwodnionych nie przekracza 8%. Znacznie więcej, bo aż kilkanaście % fosforu zawierają popioły z osadów ściekowych. Wynika stąd, iż znacznie bardziej korzystne będzie zastosowanie metody odzysku fosforu z popiołów lub żużla z osadów ściekowych, z uwagi na ich wyższe koncentracje w termicznie przetworzonych osadach. Szacuje się, że odzysk fosforu, według różnych metod, kształtuje się na poziomie 80–90% [1, 4, 11].

Najkorzystniejszymi formami w jakich możemy odzyskać fosfor z uwagi na biodostępność są fosforany wapnia, a także struwit –  $(\text{NH}_4)\text{Mg}[\text{PO}_4] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – zawierający 58%  $\text{P}_2\text{O}_5$ , który nie uszkadza korzeni roślin.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analiza literaturowa wskazują, że zawartość fosforu w osadach ściekowych w przeliczeniu na % suchej masy może znacznie różnić się dla poszczególnych oczyszczalni ścieków. Maksymalna zawartość fosforu to 8% dla osadów odwodnionych i kilkanaście % dla odpadów z termicznego unieszkodliwiania osadów.

Przedstawiona analiza literaturowa dotycząca sposobów odzysku fosforu z osadów ściekowych pokazuje mnogość metod, które można wykorzystać. Są to metody mokre, nazwane tak z uwagi na to, iż mają zastosowanie do osadów ściekowych, które zawierają znaczną ilość wody (ok. 80%). Metody te z kolei możemy podzielić również z uwagi na zastosowany czynnik wymywający fosfor z osadów. Możemy zastosować zarówno kwasy nieorganiczne (głównie kwas siarkowy), jak i wodorotlenki (głównie wodorotlenek sodu). Każda z tych metod ma swoje zalety i wady; te, w których zastosujemy kwasy powodują, iż wraz z fosforem wypłukiwane są również metale ciężkie, a następnie należy je dodatkowo usunąć, np. w procesach wymiany jonowej. Można więc sądzić, iż metody te będą miały głównie zastosowanie dla osadów niezawierających dużych ilości metali, szczególnie żelaza. Metody wymywania w środowisku zasadowym ograniczają powstawanie form rozpuszczalnych metali. Są to jednak procesy trudniejsze, a co za tym idzie bardziej kosztowne.

Drugi rodzaj to metody termiczne, które bazują na odzysku fosforu z popiołów powstałych w procesach spalania osadów ściekowych. W metodach tych wykorzystywane są do izolacji związków fosforu te same czynniki co w metodach mokrych, z tą różnicą, że popioły zawierają bardzo małe ilości wody i skoncentrowane (wyższe) zawartości fosforu. Ponadto często alkaliczny charakter popiołów powoduje, że metale w nich zawarte są niemobilne. Dodatkowo popioły można bezpośrednio zastosować jako nawóz mineralny bez dodatkowych kosz-

tów związanych z odzyskiem surowców (recykling). Istniejące metody pozwalają na odzyskiwanie fosforu z osadów ściekowych, zgodnie ze strategią UE, która naciska na ponowne wykorzystanie odpadów do odzysku surowców, których złoża w naturalnych warunkach ulegają gwałtownemu wyczerpywaniu\*.

## Literatura

- [1] Acelas N.Y., López D.P., Brilman D.W.F. (Wim), Kersten S.R.A., Kootstra M.J., *Supercritical water gasification of sewage sludge: Gas production and phosphorus recovery*, „Bioresource Technology” 2014, Vol. 174, s. 167–175.
- [2] Blocher Ch., Niewersch C., Melin T., *Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration*, „Water Research” 2012, Vol. 46, s. 2009–2019.
- [3] Li R., Yin J., Wang W., Li Y., Zhang Z., *Transformation of phosphorus during drying and roasting of sewage sludge*, „Waste Management” 2014, Vol 34, s. 1211–1216.
- [4] Xu H., He P., Gu W., Wang G., Shao L., *Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash*, „Journal of Environmental Sciences” 2012, Vol. 24, No. 8, s. 1533–1538.
- [5] Sano A., Kanomata M., Inoue H., Sugiura N., Xu K.-O., Yuhei Inamori *Extraction of raw sewage sludge containing iron phosphate for phosphorus recovery*, „Chemosphere” 2012, Vol. 89, s. 1243–1247.
- [6] Guedes P., Couto N., Ottosen L.M., Ribeiro A.B., *Phosphorus recovery from sewage sludge ash through an electro-dialytic process*, „Waste Management” 2014, Vol. 34, s. 886–892.
- [7] Pettersson A., Amand L.-E., Steenari B.-M., *Leaching of ashes from co-combustion of sewage sludge and wood – Part 1: Recovery of phosphorus*, „Biomass and Bioenergy” 2008, Vol. 32, s. 224–235.
- [8] Consultative Communication on the Sustainable Use of Phosphorus, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, (Text with EEA relevance), Brussels, 8.7.2013 COM(2013) 517 final.
- [9] Atienzae-Martinez M., Arauzo G., Gea J., Kersten S.R.A., Kootstra M.J., *Phosphorus recovery from sewage sludge char ash*, „Biomass and Bioenergy” 2014, Vol. 65, s. 42–50.
- [10] Biswas B.K., Inoue K., Harada H., Ohto K., Kawakita H., *Leaching of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by means of acid extraction followed by adsorption on orange waste gel*, „Journal of Environmental Sciences” 2009, Vol. 21, s. 1753–1760.
- [11] Guney K., Weidener A., Krampe J., *Phosphorus recovery from digested sewage sludge as MAP by the help of metal ion separation*, „Water Research” 2008, Vol. 42, s. 4692–4698.
- [12] Petzet S., Peplinski B., Cornel P., *On wet chemical phosphorus recovery from sewage sludge ash by acidic or alkaline leaching and an optimized combination of both*, „Water Research” 2012, Vol. 46, s. 3769–3780.

---

\* Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.

- [13] Shi W., Feng Ch., Huang W., Lei Z., Zhang Z., *Study on interaction between phosphorus and cadmium in sewage sludge during hydrothermal treatment by adding hydroxyapatite*, „Bioresource Technology” 2014, Vol. 159, s. 176–181.
- [14] W z o r e k Z., *Odzysk związków fosforu z termicznie przetworzonych odpadów i ich zastosowanie jako substytutu naturalnych surowców fosforowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
- [15] L e v l i n E., Recovery of phosphate from sewage sludge and separation of metals by ion exchange, [http://rymd.lwr.kth.se/personal/personer/levlin\\_erik/Ionexchn.pdf](http://rymd.lwr.kth.se/personal/personer/levlin_erik/Ionexchn.pdf) (27.01.2015).
- [16] S c h a u m Ch., C o r n e l P., J a r d i n N., *Phosphorus Recovery from Sewage Sludge Ash – A Wet Chemical Approach*, [http://www.sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/SCHAUM%20et%20al%20ny%20Phosphorus%20Recovery%20from%20Sewage%20Sludge%20Ash.pdf](http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SCHAUM%20et%20al%20ny%20Phosphorus%20Recovery%20from%20Sewage%20Sludge%20Ash.pdf) (27.01.2015).
- [17] K a r l s s o n I., Full scale plant recovering iron phosphate from sewage at Helsingborg Sweden, Kemira Kemi AB, Kemwater, P.O.Box 902, S-251 09 Helsingborg, Sweden, [www.nhm.ac.uk/research-curation/projects/phosphate.../Karlsson.doc](http://www.nhm.ac.uk/research-curation/projects/phosphate.../Karlsson.doc) (28.01.2015).
- [18] W z o r e k Z., J o d k o M., G o r a z d a K., R z e p e c k i T., *Extraction of phosphorus compounds from ashes from thermal processing of sewage sludge*, „Journal of Loss Prevention in the Process Industries” 2006, Vol. 19, s. 39–50.
- [19] S t a u f f e r B., S p u h l e r D., Advanced Nutrient Recovery, <http://www.sswm.info/print/1865?tid=> (28.01.2015).
- [20] P e t z e t S., C o r n e l P., P-recovery from sewage sludge and sewage sludge ashes, [http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam\\_uploads/\\_koordinierend/bs\\_naehrstofftage/baltic21/15\\_Petzet.pdf](http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/_koordinierend/bs_naehrstofftage/baltic21/15_Petzet.pdf) (28.01.2015).

JOANNA POLUSZYŃSKA  
EWELINA ŚLĘZAK

## PHOSPHORUS FROM MUNICIPAL SEWAGE SLUDGE

**Keywords:** municipal sewage sludge, phosphorus, recovery.

Phosphorus is a major nutrient for plants. Mining of phosphorus causes environmental degradation, mainly in the countries of North Africa. High prices of this raw materials tend to research other alternative methods of obtaining phosphorus. In the article the main techniques that may be used for recovery of phosphorus from municipal sewage sludge have been collected and described. These are processes in which the phosphorus recovery is possible directly from the sediments, as well as from the ashes formed during thermal processing of sewage sludge. In the paper the results of testing of several samples of municipal sewage sludge for their content of phosphorus and other additional parameters, including heavy metals are presented. Obtained research results phosphorus content of the sludge were at a similar level as the results presented by other authors.