

KONDYCJONOWANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY CHEMICZNEJ I POLA MAGNETYCZNEGO

Kamila Hrut¹

¹ Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. Brzeźnicka 60A, 42-201 Częstochowa, e-mail: kamila.hrut@is.pcz.pl

STRESZCZENIE

Celem pracy było określenie możliwości zastosowania pola magnetycznego do kondycjonowania osadów ściekowych preparowanych uprzednio dualną metodą chemiczną. Osady kondycjonowane były koagulantem żelazowym PIX 113, oraz słabokationowym polielektrolitem Superfloc C – 494. Aby określić wpływ pola magnetycznego na końcowe parametry osadów, badania prowadzono w kilku kombinacjach, różniących się sposobem kondycjonowania, kierunkiem i prędkością przepływu próbek przez solenoid. Dokonano oceny podatności na odwadnianie, której miarą był test czasu ssania kapilarnego i opór właściwy filtracji. Następnie przeanalizowano właściwości reologiczne: krzywe płynięcia i model Ostwalda. Ostatnim elementem prowadzonych badań było określenie jakości cieczy osadowych. W tym celu posłużono się zawartością azotu amonowego i ogólnego węgla organicznego. Na podstawie badań stwierdzono, że wpływ pola magnetycznego na podatność osadów na odwadnianie i ich parametry reologiczne jest zmienny, uzależniony od czynników takich jak kierunek i prędkość przepływu przez cewkę. Najniższymi wartościami oporu właściwego filtracji i czasu ssania kapilarnego charakteryzowały się osady poddane ekspozycji na pole magnetyczne w kierunku N – S, z prędkością 1,0 dm³/min. Analiza właściwości reologicznych wykazała, że próbki kondycjonowane w ten sposób charakteryzują się najmniejszymi wartościami naprężeń stycznych i najwyższą lepkością. Ekspozycja osadów na działanie pola magnetycznego wpłynęła na obniżenie zawartości zanieczyszczeń w odciekach.

Słowa kluczowe: komunalne osady ściekowe, pole magnetyczne, kondycjonowanie, koagulant żelazowy

CONDITIONING OF THE SEWAGE SLUDGE WITH USING THE CHEMICAL METHOD AND THE MAGNETIC FIELD

ABSTRACT

The purpose of the work was to determine the possibility of applying a magnetic field for the conditioning of sewage sludge previously prepared by a dual chemical method. The sludge were conditioning with using PIX 113 iron coagulant and Superfloc C - 494 weak cationic polyelectrolyte. To determine the effect of the magnetic field on the parameters of sediments, the tests were carried out in several combinations, differing in the way of conditioning, flow direction and rate of sample flow through the solenoid. To determine the changes of susceptibility to dewatering, the capillary suction time test and specific resistance to filtration were used. Then rheological properties were analyzed: flow curves and the Ostwald model. The last element of the research was to determine the quality of lechates. For this purpose, the content of ammonium nitrogen and total organic carbon was used. The results shows, that the influence of the magnetic field on sludge susceptibility to dewatering and their rheological parameters is variable, depending on factors such as the direction and speed of the flow through the coil. The sludge subjected to exposure to the magnetic field in the N-S direction, at the flow rate of 1.0 dm³/min were characterized by lowest values of the specific resistance to filtration and the capillary suction time. Analysis of rheological properties has shown that the samples conditioned in this way are characterized by the smallest values of tangential stresses and the highest viscosity. The sludge exposure to the magnetic field influenced the reduction of impurities in the lechates.

Keywords: municipal sewage sludge, magnetic field, conditioning, iron coagulant

WPROWADZENIE

Nowoczesne technologie, mające na celu poprawę efektywności procesu oczyszczania ścieków prowadzą do wzrostu ilości osadów ściekowych powstających na oczyszczalniach ścieków. Stale rosnąca ilość osadów, oraz ich wysokie uwodnienie, nierzadko przekraczające 99% powoduje znaczną objętość generowanych osadów [Wolny 2005, Bień i Wystalska 2011]. Konieczność redukcji objętości osadów wynika z bezwzględnej potrzeby zapewnienia sprawności i ekonomiczności działania oczyszczalni ścieków. Procesami mającymi na celu zmniejszenie objętości osadów są zagęszczanie i odwadnianie, jednak z uwagi na fakt, że osady charakteryzują się strukturą i właściwościami utrudniającymi oddawanie wody niezbędne staje się kondycjonowanie. Ma ono na celu zmianę struktury i właściwości osadów, co pozwala na bardziej efektywne usuwanie wody [Bień i in. 2001, Lee i Liu 2001].

Istnieje wiele metod kondycjonowania: chemicznych, fizycznych, biologicznych i ich kombinacji. Działania wszystkich z nich obejmują procesy takie jak: koagulacja i flokulacja cząstek stałych, lub rozkład pozakomórkowych substancji polimerycznych, następnie uwolnienie wody związanej lub zmniejszenie ściśliwości osadu. W celu polepszenia zdolności osadów do oddawania wody, oraz uzyskania odcieków o jak najmniejszym stężeniu zanieczyszczeń stosuje się odpowiednio dobrane rodzaje i dawki środków kondycjonujących, głównie organicznych flokulantów – polielektrolitów [Mowla i in. 2001, Podstawczyk i in. 2017]. W wielu przypadkach kondycjonowanie opiera się na zastosowaniu jonów żelaza. Pełnią one funkcję neutralizatora ładunku elektrycznego powierzchni cząstek, ułatwiając tworzenie aglomeratów [Qi i in. 2011, Niu M. i in. 2013].

W chwili obecnej duży nacisk kładzie się na kombinowane metody kondycjonowania, będące

połączeniem kilku czynników kondycjonujących. W wielu dziedzinach nauki, w tym również w inżynierii środowiska zastosowanie ma pole magnetyczne. Poprzez wpływ na parametry takie jak: intensyfikacja rozkładu wielu związków, przyspieszenie procesu utleniania i redukcji, zwiększenie adsorpcji na powierzchni rozdziału faz, intensyfikację procesów rozpuszczania i koagulacji zawieszin, czy zwiększenie spójności i trwałości cząstek stałych w osadach może być stosowane w uzdatnianiu wody i oczyszczaniu ścieków [Podsiadło i Leśniak 2009, KołECKA 2005].

Celem badań było wykazanie możliwości zastosowania pola magnetycznego, jako skutecznego czynnika wspomagającego chemiczne metody kondycjonowania komunalnych osadów ściekowych przed ich odwadnianiem.

MATERIAŁY

Do badań wykorzystywano przefermentowane osady ściekowe pochodzące z oczyszczalni ścieków komunalnych w województwie Śląskim. Przepustowość oczyszczalni wynosi 45 tys. m³/d. Podstawowe właściwości badanego substratu zestawiono w tabeli (tab. 1).

STANOWISKO BADAWCZE

W celu kondycjonowania osadów w polu magnetycznym zastosowano solenoid, który generował stałe pole magnetyczne o maksymalnej wartości indukcji pola magnetycznego wynoszącej $8 \cdot 10^{-2}$ T. Osady za pomocą pompy perystaltycznej tłoczone były ze zbiornika początkowego, przez cewkę, do zbiornika końcowego, przy dwóch natężeniach przepływu $Q_1 = 1$ dm³/min. i $Q_2 = 2$ dm³/min. Na podstawie natężenia przepływu (Q_1 i Q_2) przez cewkę i objętości osadów

Tabela 1. Właściwości badanych osadów
Table 1. The properties of the investigated sludge

Parametr	min.	max.	\bar{x}	σ
Sucha masa, g/dm ³	17,6	22,3	20,1	1,9
Sucha masa organiczna, % s.m.	39,4	59,1	48,8	10,2
Uwodnienie, %	98,03	99,71	99,06	0,82
Ph	6,93	7,51	-	-
Zasadowość, mg CaCO ₃ /dm ³	1327	2702	2031	794
min. – wartość minimalna, max. – wartość maksymalna, \bar{x} – średnia arytmetyczna, σ – odchylenie standardowe				

VSLU obliczono czas ekspozycji na oddziaływanie pola magnetycznego, $t_1 = 1,2$ s oraz $t_2 = 0,6$ s. Zastosowano dwa kierunki przepływu: zgodnie z kierunkiem linii pola magnetycznego (przepływ S-N) i przeciwnej do linii pola (przepływ N-S). Na rysunku (rys. 1) przedstawiono schemat stanowiska badawczego.

METODYKA BADAŃ

Koagulanty i polielektrolity

Do chemicznego kondycjonowania osadów zastosowano następujące środki:

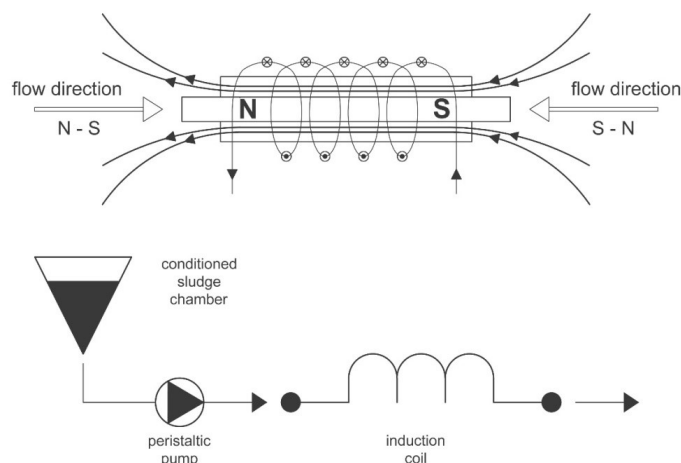
- koagulant PIX 113, którego głównym składnikiem jest siarczan żelaza (III). Dawka objętościowa była stała i wynosiła 4 ml/dm^3 osadów,

co w przeliczeniu na dawkę masową dało $0,33 \pm 0,07 \text{ kg/kg s.m.}$

- słabokationowy polielektrolit Superfloc® C – 494 dawkowany w formie wodnego roztworu o stężeniu 0,1%. Dawka optymalna ustalona na podstawie testu czasu ssania kapilarnego wynosiła $4,1 \pm 0,82 \text{ g/kg s.m.}$

W badaniach z wykorzystaniem pola magnetycznego zdecydowano się obniżyć dawkę polimeru o 20% w stosunku do optymalnej ($3,28 \text{ g/kg s.m.}$). Wynikało to z synergicznego oddziaływania koagulanta, polielektrolitu, oraz pola magnetycznego.

Analizy prowadzono w 8 kombinacjach badawczych, w zależności od sposobu preparowania próbek (rys. 2).



Rys. 1. Stanowisko badawcze
Fig. 1. Scheme of experimental apparatus

<p>Osady kondycjonowane metodą polimeryczną</p> <ul style="list-style-type: none"> • A – optymalna dawka polimeru • A1 – dawka polimeru obniżona o 20%
<p>Osady kondycjonowane dualnie</p> <ul style="list-style-type: none"> • B – PIX113 + optymalna dawka polielektrolitu • B1 – PIX 113 + obniżona dawka polielektrolitu
<p>Osady kondycjonowane dualnie poddane ekspozycji na pole magnetyczne</p> <ul style="list-style-type: none"> • Przepływ S – N <ul style="list-style-type: none"> • C 1 - Prędkość 1,0 l/min. Czas ekspozycji 1,2 s • C 2 - Prędkość 2,0 l/min. Czas ekspozycji 0,6 s. • Przepływ N – S <ul style="list-style-type: none"> • D 1 – prędkość 1,0 l/min. • D 2 – Prędkość 2,0 l/min.

Rys. 2. Kombinacje badawcze
Fig. 2. the research combinations

Analizy

W toku badań wykonano oznaczenia:

- oznaczanie strat przy prażeniu suchej masy osadu według PN-EN 12879:2004,
- oznaczanie suchej pozostałości i zawartości wody według PN-EN 12880:2004,
- oznaczenie pH i zasadowości PN-91/C-04540.05,
- oznaczenie czasu ssania kapilarnego (CST) PN-EN 14701-1:2007,
- oznaczanie oporu właściwego filtracji PN EN 14701-2: 2013-07.

Badania reologiczne przeprowadzono z użyciem Reometru RC 20. Reometr składał się z cylindrów współosiowych, w tym z cylindrów zakończonych konstrukcją stożek płyta. Badaną próbkę umieszczano w szczelinie pierścieniowej pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym cylindrem. Reometr ten może pracować z komputerem wyposażonym w program RHEO 2000, lub samodzielnie. Reometr pozwala na pomiar naprężeń stycznych i lepkości przy różnych gradientach prędkościach. Badania prowadzono dla prędkości ścinania wynoszącej 0 – 200 s⁻¹ przy czasie pomiaru 120 s., w stałej, regulowanej ultratermostatem temperaturze 21°C.

Do oznaczenia azotu amonowego i ogólnego węgla organicznego próbki 50 ml osadów poddano wirowaniu (15 min, 11200 rcf), następnie przesączano przez filtr membranowy. Pomiaru N-NH₄⁺ dokonano metodą spektrofotometryczną przy użyciu spektrofotometru Hach Lange DR 5000. Stężenie ogólnego węgla organicznego określono zgodnie z metodą różnicową przy użyciu analizatora TOC (Analytik Jena multi N/C 3100)

WYNIKI

W pierwszej kolejności dokonano oceny podatności osadów na odwadnianie, której miarą był test czasu ssania kapilarnego i opór właściwy filtracji. Analizy wykonano dla wszystkich kombinacji badawczych (tab. 2).

Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować, że zastosowanie dualnej chemicznej metody kondycjonowania (kombinacje B, B1) wpłynęło na poprawę podatności osadów na odwadnianie, w porównaniu z osadami preparowanymi wyłącznie polielektrolitem. Oddziaływanie pola magnetycznego na hybrydowo preparowane osady, dawało zmienne efekty, uwarunkowane parametrami technologicznymi, takimi jak kierunek i prędkość przepływu badanego medium przez instalację. Należy zauważyć, że kluczową rolę w kondycjonowaniu osadów z wykorzystaniem pola magnetycznego odgrywa kierunek przepływu, osady przepływające przez cewkę w kierunku przeciwnym do linii pola magnetycznego (N – S) charakteryzowały się niższymi wartościami oporu właściwego filtracji i czasu ssania kapilarnego, niż osady przepływające zgodnie z kierunkiem linii pola magnetycznego (S – N). Prędkość z jaką osady przepływają przez cewkę jest również istotnym parametrem procesowym. Najkorzystniejsze efekty osiągnięto poddając dualnie preparowane osady działaniu pola magnetycznego z zachowaniem następujących parametrów: kierunek przepływu: N – S, prędkość przepływu; 1,0 dm³/min (kombinacja D1). Dzięki temu, możliwe było zredukowanie optymalnej dawki polielektrolitu o 20% w stosunku do optymalnej, a jednocześnie nie tylko zachowanie porównywalnych parametrów podatności na od-

Tabela 2. Wyniki testów podatności na odwadnianie dla poszczególnych kombinacji

Table 2. The results of the dewaterability tests for the individual combinations

Kombinacja	CSK [s]	r [m/kg · 10 ¹²]
0	1734 ± 142	103 ± 32
A	96 ± 14	28 ± 7
A1	152 ± 21	75 ± 13
B	39 ± 5	3,2 ± 0,6
B1	77 ± 10	6,1 ± 1,1
C1	60 ± 12	4,6 ± 0,9
C2	71 ± 10	10,3 ± 2,3
D1	32 ± 3	2,3 ± 0,3
D2	54 ± 8	3,8 ± 0,5

CSK – czas ssania kapilarnego, r – opór właściwy filtracji

wadnianie, jak w przypadku osadów B, lecz nawet nieznaczne ich polepszenie.

Kolejnym etapem badań była analiza właściwości reologicznych osadów (rys. 3). Badanie wykonano dla wybranych kombinacji.

Sposób kondycjonowania miał istotny wpływ na wartości naprężeń stycznych osadów ściekowych. Najwyższe wartości naprężeń odnotowano dla osadów niepreparowanych (kombinacja 0).

W przypadku kondycjonowania osadów w polu magnetycznym zaobserwowano zmiany wartości naprężeń stycznych w zależności od kierunku i prędkości przepływu osadów przez solenoid. Najniższe naprężenia odnotowano dla kombinacji D1, najwyższe z kolei dla C2. Przy prędkości ścinania wynoszącej 200 s⁻¹ wynosiły one odpowiednio: 3,46 i 4,61 Pa.

Wyznaczenie modeli reologicznych osadów ściekowych umożliwia ich dokładniejszy opis, oraz poznanie wpływu sposobów kondycjonowania na ich parametry. Model Ostwalda de Waele'a jest najprostszym modelem reologicznym stosowanym do opisu krzywych płynięcia:

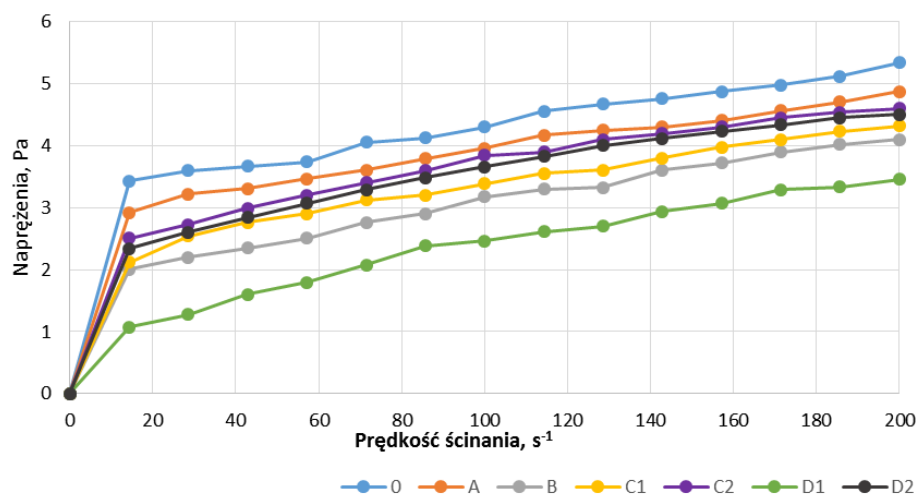
$$\tau = k \cdot (\dot{\gamma})^n$$

gdzie: k – stała zwana współczynnikiem konsystencji [Pa·s],

n – wykładnik potęgi, zwany wykładnikiem płynięcia.

W tabeli (tab. 3) zestawiono wartości parametrów reologicznych badanych osadów dla opisywanego modelu reologicznego.

Współczynnik konsystencji k jest to miara opisująca lepkość badanego medium. Zaobserwowano, że ekspozycja osadów na działanie pola magnetycznego powoduje zwiększenie współczynnika k , co świadczy o ich wyższej lepkości w porównaniu z osadami preparowanymi dualnie (kombinacja B). Najwyższą wartość k odnotowano dla osadów poddanych działaniu pola magnetycznego przy zastosowaniu kierunku przepływu N – S, przy prędkości 1,0 dm³/min (kombinacja D1). Współczynnik płynięcia n może przyjmować różne wartości. Gdy $n < 1$ mamy do czynienia z procesem rozrzedzania ścinaniem, w przeciwnym wypadku – z zagęszczaniem ścinaniem. W przypadku badanych osadów, zaobserwowano,



Rys. 3. Krzywe płynięcia osadów
Fig. 3. The flow curves of sewage sludge

Tabela 3. Wartości parametrów reologicznych dla modelu Ostwalda-de Waele'a

Table 3. Values of rheological parameters for the model Ostwald-de Waele

Parametr	Kombinacja						
	0	A	B	C1	C2	D1	D2
k	0,288	1,349	0,878	1,867	1,198	2,605	1,088
n	0,401	0,282	0,252	0,130	0,246	0,094	0,266
B	0,99	0,06	0,98	0,68	0,97	0,74	0,98
S	0,08	0,63	0,12	0,23	0,12	0,21	0,08

k - współczynnik konsystencji, n - wykładnik potęgi, B - współczynnik korelacji, S - odchylenie standardowe

że dla wszystkich kombinacji, współczynnik n przyjmował wartości mniejsze od 0, zatem wszystkie próbki były rozrzedzane ścinaniem. Zauważono także, że wartości współczynnika n dla próbek poddanych ekspozycji na działanie pola magnetycznego (kombinacje C1 – D2) były wyższe, w porównaniu do osadów nie kondycjonowanych w polu magnetycznym (kombinacja B).

Ostatnimi analizami, jakie wykonano w toku badań, była ocena jakości cieczy osadowych dla wybranych kombinacji, na podstawie zawartości azotu amonowego i ogólnego węgla organicznego (tab. 4). Analiza cieczy osadowych jest istotna, ponieważ odcieki z odwadniania zawierane są do biologicznej części oczyszczalni ścieków. Zawarta w nich materia organiczna jest trudno rozpuszczalna, co w połączeniu z wysoką zawartością azotu może powodować problemy eksploatacyjne układu biologicznego oczyszczania ścieków.

Zastosowanie metody chemicznej (kombinacja B), zarówno dualnej, jak i konwencjonalnej polimerycznej (kombinacja A), nie wpłynęło znacząco na zawartość azotu amonowego w cieczach osadowych. W przypadku ogólnego węgla organicznego, sposób preparowania osadów oddziałuje w istotny sposób na jego ilość w odciekach. Zastosowanie hybrydowego kondycjonowania (kombinacja B) skutkowało obniżeniem zawartości OWO w odciekach o 37% w stosunku do osadów kondycjonowanych wyłącznie polimerem i 88% w porównaniu z cieczami generowanymi przez osady niepreparowane. Ekspozycja osadów na działanie pola magnetycznego (kombinacja D1) wpłynęła na obniżenie zawartości azotu amonowego i ogólnego węgla organicznego odpowiednio o 20 i 38% w porównaniu z odciekami generowanymi przez osady kondycjonowane dualnie (kombinacja B). Wynika z tego, że synergiczne działanie koagulanta żelazowego, organicznego polielektrolitu i pola magnetycznego przyczynia się do znaczącej poprawy jakości cieczy osadowych.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Osady kondycjonowane dualną metodą chemiczną charakteryzują się lepszą podatnością na odwadnianie, niż osady kondycjonowane wyłącznie polielektrolitem. Hybrydowe kondycjonowanie dało efekt w postaci obniżenia czasu ssania kapilarnego i oporu właściwego filtracji odpowiednio o 60 i 89% w porównaniu do osadów preparowanych konwencjonalną metodą polimeryczną.
2. Wpływ pola magnetycznego na zmianę podatności osadów na odwadnianie jest zmienny, uzależniony od kierunku i prędkości przepływu medium przez solenoid. Najniższe wartości CSK i r (odpowiednio: 32 s, 2,3 m/kg 10¹²) odnotowano dla osadów poddanych ekspozycji na działanie pola magnetycznego z zachowaniem następujących parametrów: kierunek przepływu N – S, prędkość przepływu 1,0 dm³/min, przy czym największe znaczenie w procesie optymalizacji parametrów technologicznych ma kierunek przepływu.
3. Analiza krzywych płynięcia badanych osadów wykazała, że sposób kondycjonowania ma wpływ na wartości naprężeń stycznych w badanych próbkach. Najmniejsze wartości naprężeń stycznych (3,46 Pa przy prędkości ścinania 200 s⁻¹) zaobserwowano dla próbki D1. Na podstawie modelu Ostwalda de Waele'a stwierdzono, że zastosowanie pola magnetycznego powoduje wzrost lepkości osadów (wyrażony współczynnikiem konsystencji k) w porównaniu z osadami kondycjonowanymi dualnie, bez ekspozycji na pole magnetyczne (kombinacja B). Najwyższą wartość współczynnika konsystencji, a co za tym idzie największą lepkość odnotowano dla osadów poddanych działaniu pola magnetycznego w kierunku N – S, przy prędkości przepływu 1,0 dm³/min.

Tabela 4. Zawartość azotu amonowego i ogólnego węgla organicznego w cieczach osadowych
Table 4. The content of ammonium nitrogen and total organic carbon in lechates

Parametr	Kombinacja			
	0	A	B	D1
N-NH ₄ ⁺ , mg/dm ³	405±8,9%	393±7,2%	375±10,1%	302±9,4%
OWO, mg/dm ³	3529±0,92%	1033±0,57%	651±0,78%	403±0,23%
N-NH ₄ ⁺ - azot amonowy, OWO – ogólny węgiel organiczny				

4. Kondycjonowanie osadów w polu magnetycznym (kombinacja D1) wpłynęło na poprawę jakości odcieków, wyrażoną zawartością azotu amonowego i ogólnego węgla organicznego, w stosunku do osadów nie poddanych ekspozycji na działanie pola magnetycznego (kombinacja B). Jest to istotne, ponieważ w związku z zawracaniem cieczy osadowej do biologicznej części oczyszczalni ścieków, mniej zanieczyszczone odcieki stwarzają mniejsze ryzyko problemów eksploatacyjnych.
5. Pole magnetyczne może być skutecznym środkiem wspomagającym dualną chemiczną metodę kondycjonowania, wpisującym się w obecnie panujący trend łączenia kilku czynników kondycjonujących.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na badania statutowe BS/MN – 401 – 303//17

BIBLIOGRAFIA

1. Bień J, Wystalska K. 2011 Osady ściekowe – teoria i praktyka, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa
2. Bień J.B., Matysiak B., Bień J.D 2001., Charakterystyki reologiczne osadów ściekowych kondycjonowanych polielektrolitami, Mat. Konf. nt. Osady ściekowe - problem aktualny, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa-Ustroń, 30-39.
3. KołECKA K. 2005. Wpływ magnetyzerów na właściwości wody oraz możliwości ich zastosowania. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2, 17–20.
4. Lee C.H., Liu J.C. 2001, Sludge dewaterability and floc structure in dual polymer conditioning, *Advances in Environmental Research*, 5, 129-136.
5. Mowla D., Tran H.N., Allen G.D. 2013, A review of the properties of biosludge and its relevance to enhanced dewatering processes, *Biomass and Bioenergy*, 58, 365-378.
6. Niu M., Zhang W., Wang D., Chen Y., Chen R. 2013, Correlation of physicochemical properties and sludge dewaterability under chemical conditioning using inorganic coagulants, *Bioresource Technology* 144, 337-343.
7. Podsiadło C., Leśniak E. 2009. Wpływ wody uzdatnionej magnetycznie na kiełkowanie i początkowy wzrost wybranych gatunków roślin, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, 3, 213-221.
8. Podstawczyk D., Witek-Krowiak A., Dawiec-Liśniewska A., Chrobot P., Skrzypczak D. 2017. Removal of ammonium and orthophosphates from reject water generated during dewatering of digested sewage sludge in municipal wastewater treatment plant using adsorption and membranę contactor system, *Journal of Cleaner Production* 161, 277-287.
9. Qi Y., Thapa K.B., Hoadley A.F.A. 2011, Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties – A review, *Chemical Engineering Journal* 171, 373-384.
10. Wolny L. 2005. Ultradźwiękowe wspomaganie procesu przygotowania osadów ściekowych do odwadniania, Seria Monografie nr 104, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2005.