

Przydatność testów zlewkowych do doboru polimerów stosowanych w odwadnianiu osadów ściekowych

The suitability of jar tests for the selection of polymers used in sewage sludge dewatering

Martyna Michalik¹, Justyna Górka^{1*} 

¹ Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska

* Kontakt / Correspondence: justyna.gorka@pk.edu.pl

Streszczenie:

Wydajność procesu odwadniania osadów ściekowych zależy głównie od właściwego doboru rodzaju i dawki polimeru stosowanego podczas kondycjonowania chemicznego. W warunkach eksploatacyjnych do wstępnego doboru rodzaju i dawki polielektrolitów stosuje się testy zlewkowe, których wyniki mają charakter jakościowy. Metodę tę porównano z wartościami czasu ssania kapilarnego (CSK) i oporu właściwego filtracji (OWF) podczas doboru rodzaju i dawki polielektrolitów. Uzyskane wyniki wykazały, że testy zlewkowe stanowią użyteczne narzędzie do wstępnej selekcji polimerów, jednak ostateczny dobór rodzaju i dawki preparatu powinien być potwierdzony metodami ilościowymi, takimi jak CSK i OWF.

Słowa kluczowe: odwadnianie osadów ściekowych, kondycjonowanie osadów ściekowych, testy zlewkowe, CSK, OWF

Abstract:

The efficiency of sewage sludge dewatering depends primarily on the appropriate selection of the type and dose of polymer used for chemical conditioning. Under operating conditions, jar tests are commonly used for the preliminary selection of polyelectrolyte type and dose; however, their results are primarily qualitative. The aim of this study was to compare the results of jar tests with capillary suction time (CSK) and specific resistance to filtration (OWF) measurements in the selection of the type and dose of polyelectrolyte. The results demonstrated that jar tests are a useful tool for the preliminary screening of polymers. However, the final selection of the polymer type and dose should be supported by quantitative methods, such as CSK and OWF measurements.

Keywords: dewaterability, sludge conditioning, beaker tests, CSK, OWF

1. Wstęp

Gospodarka osadowa stanowi jeden z kluczowych elementów funkcjonowania oczyszczalni ścieków. Wraz z rosnącymi wymaganiami środowiskowymi oraz wzrostem kosztów zagospodarowania osadów coraz większego znaczenia nabiera optymalizacja procesów ich przetwarzania, w tym przede wszystkim efektywnego odwadniania [15]. Według danych Eurostatu w krajach Unii Europejskiej rocznie wytwarza się około 15 mln ton suchej masy osadów ściekowych, z czego w Polsce około 568,86 tys. Mg suchej masy [4]. Tak znaczna ilość generowanych osadów powoduje, że zwiększenie efektywności ich przetwarzania oraz ograniczenie kosztów zagospodarowania należą do najważniejszych wyzwań eksploatacyjnych współczesnych oczyszczalni ścieków [11].

Jednym z najistotniejszych etapów gospodarki osadowej jest

proces odwadniania, którego celem jest zmniejszenie zawartości wody w osadzie, a tym samym ograniczenie jego objętości i masy [6]. Skuteczne odwadnianie przekłada się bezpośrednio na obniżenie kosztów transportu, magazynowania oraz końcowego zagospodarowania osadów, a także wpływa na efektywność kolejnych procesów technologicznych, takich jak suszenie czy termiczne przekształcanie. Proces odwadniania poprzedzony jest zazwyczaj stabilizacją osadów i obejmuje kolejne etapy zagęszczania, mechanicznego odwadniania oraz – w zależności od przyjętej technologii – suszenia. W wyniku tych procesów uzyskuje się osad o znacznie mniejszej zawartości wody, co ułatwia jego dalsze przetwarzanie i ogranicza koszty eksploatacyjne [3].

Osad ściekowy jest układem wielofazowym złożonym z fazy stałej oraz ciekłej. Faza stała obejmuje substancje nierozpuszczalne pochodzenia organicznego i mineralnego, natomiast fazę ciekłą

stanowi woda wraz z rozpuszczonymi związkami chemicznymi [7, 14]. Woda obecna w osadach występuje w kilku postaciach różniących się stopniem związania z cząstkami osadu, co ma zasadniczy wpływ na skuteczność procesu odwadniania. Wyróżnia się wodę wolną, wodę związaną w strukturach koloidalnych, wodę kapilarną oraz wodę biologicznie związaną. Spośród nich jedynie woda wolna może być stosunkowo łatwo usunięta metodami mechanicznymi, natomiast usunięcie pozostałych frakcji wymaga odpowiedniego kondycjonowania osadu oraz zastosowania właściwie dobranej technologii odwadniania [9].

Efektywność procesu odwadniania w oczyszczalni ścieków zależy od rodzaju zastosowanego urządzenia (prasy lub wirówki) oraz właściwości fizyczno-chemicznych osadów. W praktyce, w celu poprawy podatności na odwadnianie stosuje się kondycjonowanie osadów, którego celem jest poprawa właściwości filtracyjnych osadów poprzez destabilizację układu koloidalnego oraz tworzenie trwałych agregatów cząstek. Najczęściej stosowanymi środkami kondycjonującymi są polielektrolity kationowe [5]. Ich działanie polega na neutralizacji ładunków powierzchniowych cząstek osadów oraz tworzeniu mostków polimerowych pomiędzy nimi, co prowadzi do powstawania większych i bardziej zwartych floków [1, 2]. Odpowiedni dobór rodzaju oraz dawki polimeru ma bezpośredni wpływ na skuteczność odwadniania, jakość odcieku oraz zawartość suchej masy w odwodnionym osadzie. Dobór ich rodzaju i dawki w oczyszczalni ścieków najczęściej jest prowadzony z wykorzystaniem testów zlewowych. Testy zlewkowe umożliwiają ocenę przebiegu flokulacji, wielkości i stabilności powstałych kłaczków oraz klarowności odcieku. Ze względu na to, że do tego typu testów nie trzeba specjalistycznej aparatury, testy zlewkowe stanowią podstawowe narzędzie wykorzystywane podczas optymalizacji procesu kondycjonowania. Wyniki testów zlewkowych mają charakter jakościowy i opierają się na ocenie wizualnej, co w praktyce nie zawsze się przekłada na rzeczywistą poprawę podatności osadów na odwadnianie. Wobec tego, w badaniach laboratoryjnych wykorzystuje się inne ilościowe wskaźniki oceny właściwości filtracyjnych osadów, takie jak czas ssania kapilarnego (CSK) i opór właściwy filtracji (OWF) [13]. Parametr CSK określa szybkość oddawania wody przez osad pod wpływem sił kapilarnych i jest uznawany za szybki wskaźnik skuteczności kondycjonowania [8]. Z kolei, OWF opisuje opór stawiany przez warstwę osadu podczas filtracji i stanowi jeden z najbardziej rozpowszechnionych parametrów wykorzystywanych do oceny właściwości filtracyjnych osadów [10]. W licznych badaniach wskazuje się jednak, że CSK i OWF opisują odmienne zjawiska fizyczne zachodzące podczas procesu odwadniania, dlatego nie zawsze wykazują pełną zgodność z wynikami uzyskiwanymi w skali technicznej.

W literaturze dostępnych jest wiele opracowań poświęconych wpływowi rodzaju polimeru na wartości CSK i OWF oraz efektywność mechanicznego odwadniania [6, 12]. Znacznie rzadziej analizowana jest natomiast zależność pomiędzy prostą oceną wizualną uzyskaną podczas testów zlewkowych a ilościowymi wskaźnikami odwadnialności. Tymczasem odpowiedź na pytanie, czy test zlewkowy może stanowić wiarygodne narzędzie doboru polielektrolitu, ma istotne znaczenie praktyczne dla eksploatacji oczyszczalni ścieków, gdyż pozwala ograniczyć liczbę kosztownych i czasochłonnych analiz laboratoryjnych [16]. Wobec tego, celem pracy była ocena przydatności testów zlewkowych do dobo-

ru polimerów stosowanych w procesie kondycjonowania osadów ściekowych oraz porównanie uzyskanych wyników z wartościami wskaźników CSK i OWF na podstawie badań przeprowadzonych dla osadów pochodzących z komunalnej oczyszczalni ścieków.

2. Materiał i metody

2.1. Osad ściekowy

Wykorzystano osad ściekowy z miejskiej mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków o przepustowości 150 000 m³/d. Stanowił on mieszaninę osadów wstępnego i wtórnego po procesie stabilizacji beztlenowej (osad przefermentowany). Podstawową charakterystykę fizyczno-chemiczną osadu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka fizyko-chemiczna osadu ściekowego (Opracowanie własne)
Table 1. Physicochemical characteristics of sewage sludge (Own elaboration)

Parametr	Wartość
pH	6,9 ± 0,4
Sucha masa, g·dm ⁻³	39 ± 3,1
Sucha masa organiczna, g·dm ⁻³	21 ± 4,2
Chemiczne zapotrzebowanie na tlen, mg O ₂ ·dm ⁻³	26 820 ± 1 500

2.2. Metodyka oznaczania podatności na odwadnianie osadu

Testy zlewkowe oraz pomiary czasu ssania kapilarnego wykorzystano do wstępnej selekcji polielektrolitów. Następnie dla wybranego preparatu określono optymalną dawkę, uwzględniając wyniki testów zlewkowych, czasu ssania kapilarnego oraz oporu właściwego filtracji.

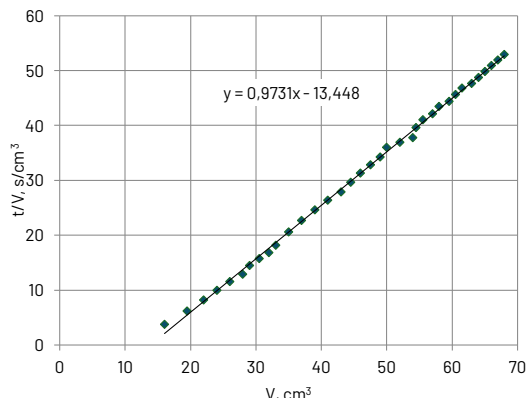
2.3. Oznaczanie czasu ssania kapilarnego

Pomiar czasu ssania kapilarnego osadów prowadzono z użyciem urządzenia do pomiaru czasu ssania kapilarnego Envolab, zgodnie z normą PN-EN 14701-1:2007P. Urządzenie składa się z prostokątnej płytki, w której umieszcza się bibułę (Whatman 17 Chr). Następnie bibułę nakrywa się górną płytką ze stykami (umieszczone na okręgach o średnicy 4,5 i 3,2 cm). Górna płytka zakończona jest otworem, do którego przyczepia się cylinder ze stali nierdzewnej wypełniony osadem. Pomiar czasu ssania kapilarnego odbywa się w momencie, gdy plama cieczy na bibule pokona drogę pomiędzy dwoma stykami. Do cylindra wprowadzono 3 cm³ osadu. Każdy wariant badawczy oznaczano w trzech powtórzeniach.

2.4. Oznaczanie oporu właściwego filtracji

Urządzenie do pomiaru oporu właściwego filtracji zostało skonstruowane przez Autorów pracy w oparciu o normę PN-EN 14701-2:2013-07. Metoda pomiaru polega na sączeniu próbki osadu w warunkach podciśnienia i rejestrowaniu otrzymywanej objętości w czasie. Do badań użyto szklany lejek Buchnera (średnica 80 mm) połączony złączem z cylindrem mia-

rowym (objętość 100 cm³). Do lejka podłączona była również pompa próżniowa z manometrem. W lejku została umieszczona bibuła filtracyjna (Whatman 41) o średnicy 80 mm, na której wprowadzano osad (objętość 100 cm³). Po wytworzeniu w aparacie podciśnienia (50 kPa) rozpoczynano pomiar. Pomiar prowadzono do momentu pojawienia się pęknięcia w placku osadowym lub spadku ciśnienia w aparacie.



Rys. 1. Przykładowy wykres zależności t/V od V (Opracowanie własne)

Fig. 1. Example graph of t/V versus V (Own elaboration)

Każdorazowo po zakończeniu pomiaru wykonywano wykres zależności t/V od V, aby wyznaczyć współczynnik kierunkowy prostej b (stała filtracji). Przykładowy wykres zależności t/V od V przedstawiono na rysunku 1. Wartość oporu wyznaczano zgodnie z równaniem:

$$OWF = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot A^2 \cdot b}{\mu \cdot m} \quad (1)$$

gdzie:

Δp – ciśnienie filtracji, Pa

A – powierzchnia filtracji, m²

b – stała filtracji wyznaczona z wykresu zależności t/V od V, s·m⁻⁶

μ – współczynnik lepkości filtratu, Pa·s

m – ilość suchej masy przypadająca na jednostkę objętości filtratu, kg·m⁻³

2.5. Testy zlewkowe

W celu porównania skuteczności badanych polielektrolitów zastosowano zlewkową metodę oceny właściwości flokulacyjnych osadu. Ocenie podlegały: szybkość tworzenia floków, ich wielkość i struktura, odporność na oddziaływania mechaniczne oraz zdolność do ponownej flokulacji po częściowym zniszczeniu agregatów.

Do badań stosowano próbki osadu o objętości 200 cm³ i oznaczonej zawartości suchej masy. Roztwory robocze polielektrolitów przygotowano w wodzie, zgodnie z zaleceniami producenta. Po dodaniu polimeru do próbki osadu prowadzono mieszanie poprzez przelewanie pomiędzy zlewkami (przelanie od zlewki do zlewki) i określano liczbę obrotów niezbędnych do wytworzenia stabilnych floków. Następnie oceniano ich jakość w trzystopniowej skali jakościowej (+ do +++), po czym określano odporność floków na ścinanie poprzez dalsze mieszanie próbki aż do ich częściowego rozpadu. Każdy wariant wykonywano trzech niezależnych powtórzeniach. Wyniki oceny punktowej przedstawiano jako medianę i rozstęp albo jako średnią wraz z miarą zmienności, zależnie od przyjętego sposobu traktowania skali punktowej.

W kolejnym etapie do próbki dodawano dodatkową dawkę polimeru i oceniano zdolność floków do ponownego formowania (reflokulacji). Ostateczną ocenę skuteczności polimeru stanowiła suma punktów uzyskanych w poszczególnych etapach badania. Próbki uzyskujące najwyższe wartości punktowe kwalifikowano do dalszych analiz z wykorzystaniem wskaźników CSK i OWF.

3. Wyniki badań

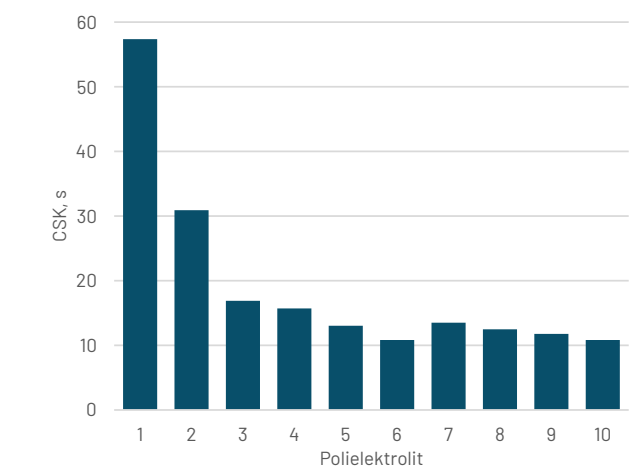
3.1. Dobór polielektrolitu

W celu wytypowania najbardziej efektywnych środków kondycjonujących przeprowadzono testy zlewkowe dla dziesięciu badanych polielektrolitów różniących się kationowością przy jednakowej dawce wynoszącej 11 ml. Wyniki zestawiono w tabeli 2. Najwyższe wartości punktowe uzyskał polimer nr 10, osiągając odpowiednio 33 punkty. Charakteryzował się on najwyższą oceną jakości floków (+++) oraz największą odpornością na oddziaływania mechaniczne.

Tabela 2. Wyniki testu zlewkowego na dobór polielektrolitu (Opracowanie własne)

Table 2. Results of the beaker test for polyelectrolyte selection (Own elaboration)

Rodzaj polielektrolitu	Ilość polielektrolitu [ml]	Ilość obrotów do wytworzenia kłaczków	Ocena	Ilość obrotów do rozbicia kłaczków	Reflokulacja	Ilość obrotów do zniszczenia kłaczków	Suma
1	11	10	-	10	-	-	18
2	11	9	+	2	5	2	19
3	11	9	+	3	4	4	21
4	11	12	+	4	4	6	27
5	11	9	++	4	4	8	27
6	11	9	++	4	3	7	25
7	11	9	+++	4	3	14	33
8	11	9	+	4	4	5	23
9	11	8	+	3	4	4	20
10	11	9	++	4	4	8	27



Rys. 2. Wyniki pomiarów czasu ssania kapilarnego w procesie doboru polielektrolitu (Opracowanie własne)
Fig. 2. Capillary time test results in the polyelectrolyte selection process (Own elaboration)

Na rys. 2 przedstawiono wartości czasu ssania kapilarnego osadu kondycjonowanego badanymi polielektrolitami. Rodzaj zastosowanego preparatu wyraźnie wpływał na podatność osadu na odwadnianie. Najwyższą wartość CSK, wynoszącą około 57 s, uzyskano po zastosowaniu polielektrolitu nr 1. W przypadku polielektrolitu nr 2 czas ssania kapilarnego wynosił około 31 s. Wyniki te wskazują na stosunkowo niewielką skuteczność obu preparatów w poprawie właściwości odwadniających osadu.

Zastosowanie pozostałych polielektrolitów spowodowało wyraźne obniżenie wartości CSK. Dla preparatów nr 3 i 4 uzyskano wartości wynoszące około 16–17 s, natomiast dla polielektrolitów nr 5–10 wartości CSK mieściły się przeważnie w przedziale od około 11 do 13 s. Najniższe wartości czasu ssania kapilarnego odnotowano dla polielektrolitów nr 6, 9 i 10, co wskazuje na najlepszą zdolność osadu do oddawania wody po zastosowaniu tych preparatów.

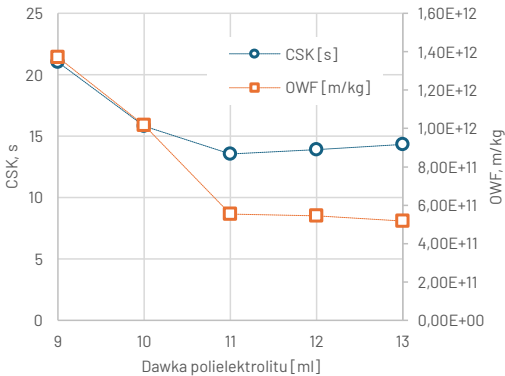
Różnice pomiędzy polielektrolitami nr 5–10 były jednak niewielkie, dlatego na podstawie samego pomiaru CSK jednoznaczny wybór najlepszego preparatu był utrudniony. W tym zakresie konieczne było uwzględnienie również wyników testów zlewkowych, w tym szybkości tworzenia floków, ich odporności na ścinanie oraz zdolności do reflokulacji.

Na szczególną uwagę zasługuje polielektrolit nr 7, który w teście zlewkowym uzyskał najwyższą sumę punktów oraz najwyższą ocenę jakości floków (+++), natomiast nie charakteryzował się najniższą wartością CSK. Wynik ten wskazuje, że najlepsza ocena wizualna i mechaniczna floków nie musi odpowiadać naj-

niższemu czasowi ssania kapilarnego. Natomiast, różnice pomiędzy CSK są tak niewielkie, że z praktycznego punktu widzenia nie miały istotnego znaczenia technologicznego.

3.2. Dobór dawki polielektrolitu

Na podstawie wyników poprzedniego etapu do dalszych badań wytypowano polimer nr 7. Przeprowadzono badania wpływu dawki na wyniki testów zlewkowych oraz wartości wskaźników czasu ssania kapilarnego i oporu właściwego filtracji. Zakres badanych dawek wynosił od 9 do 13 ml. Wyniki testów zlewkowych zestawiono w tabeli 3. Analiza wyników wykazała, że wzrost dawki polielektrolitu powodował poprawę właściwości flokulacyjnych osadu oraz zwiększenie jego podatności na odwadnianie. Najwyższą ocenę jakości floków (+++) uzyskano dla dawki 12 ml, natomiast największą sumę punktów w teście zlewkowym odnotowano dla dawki 13 ml.



Rys. 3. Wyniki czasu ssania kapilarnego i oporu właściwego filtracji w procesie doboru dawki polielektrolitu (Opracowanie własne)
Fig. 3. Results of capillary suction time and specific resistance to filtration in the process of selecting the polyelectrolyte dose (Own elaboration)

Wartości czasu ssania kapilarnego malały wraz ze wzrostem dawki polimeru do poziomu 11 ml, dla którego uzyskano najniższą wartość CSK wynoszącą około 13,5 s. Dalsze zwiększanie dawki nie powodowało dalszej poprawy właściwości odwadniających osadu. Natomiast, w przypadku oporu właściwego filtracji obserwowano stopniowy spadek wartości OWF wraz ze wzrostem dawki polimeru, przy czym najniższą wartość uzyskano dla dawki 13 ml. Różnice pomiędzy dawkami 11–13 ml były jednak niewielkie.

Wyniki wskazują, że poszczególne metody oceny opisują różne aspekty procesu odwadniania osadów ściekowych. Testy zlewkowe pozwalają ocenić właściwości flokulacyjne oraz odporność mechaniczną floków, podczas gdy CSK i OWF charakteryzują od-

Tabela 3. Wyniki testu zlewkowego w procesie doboru dawki polielektrolitu (Opracowanie własne)
Table 3. Beaker test results in the process of selecting the polyelectrolyte dose (Own elaboration)

Rodzaj polielektrolitu	Ilość polielektrolitu [ml]	Ilość obrotów do wytworzenia kłaczków	Ocena	Ilość obrotów do rozbicia kłaczków	Reflokulacja	Ilość obrotów do zniszczenia kłaczków	Suma
7	9	6	+	3	3	3	16
	10	6	++	4	3	5	20
	11	5	++	5	3	7	22
	12	5	+++	5	2	7	22
	13	5	++	5	2	10	24

powiednio zdolność osadu do oddawania wody pod wpływem sił kapilarnych oraz opór stawiany podczas filtracji.

Badania potwierdzają wpływ rodzaju i dawki polielektrolitu na właściwości filtracyjne osadów ściekowych. Zastosowania kondycjonowania skutecznie obniża wartości CSK i OWF, co wskazuje na poprawę zdolności osadu do oddawania wody oraz zmniejszenie oporów występujących podczas filtracji. Jednak, poszczególne metody oceny skuteczności odwadniania nie prowadzą do tych samych wniosków. Pomimo występujących różnic wszystkie trzy metody wskazywały na zbliżony zakres wyników. Te rozbieżności wynikają przede wszystkim z faktu, że CSK i OWF oraz testy zlewkowe opisują różne aspekty procesu odwadniania [8, 13, 14]. Parametr CSK określa szybkość migracji wody pod wpływem sił kapilarnych i stanowi wskaźnik łatwości oddawania wody przez osad. Z kolei OWF opisuje opór hydrauliczny stawiany przez płatek filtracyjny podczas przepływu filtratu przez warstwę osadu zgodnie z prawem Darcy'ego. Testy zlewkowe pozwalają natomiast ocenić przebieg flokulacji, wielkość oraz odporność mechaniczną powstających floców [12, 16].

Wyniki badań wskazują, że uzyskanie dużych i stabilnych floców nie zawsze prowadzi do uzyskania najniższych wartości CSK i OWF. Floki charakteryzujące się wysoką wytrzymałością mechaniczną mogą jednocześnie tworzyć bardziej zwartą strukturę płacka filtracyjnego, utrudniając przepływ filtratu. Z drugiej strony bardzo niskie wartości CSK nie muszą oznaczać odpowiedniej odporności floców na oddziaływania mechaniczne występujące podczas pracy urządzeń odwadniających, szczególnie wirówek i pras taśmowych [13, 14, 16].

Uzyskane wyniki potwierdzają zatem zasadność równoczesnego stosowania tych metod podczas doboru polimerów i ich dawek. Testy zlewkowe umożliwiają szybką ocenę właściwości flokulacyjnych oraz ograniczenie liczby preparatów kierowanych do dalszych badań, natomiast CSK i OWF pozwalają na ocenę podatności osadów na odwadnianie. Połączenie obu podejść umożliwia bardziej kompleksową ocenę skuteczności kondycjonowania niż zastosowanie pojedynczego wskaźnika. Szczególnie istotny jest fakt, że testy zlewkowe pozwoliły na wytypowanie polielektrolitu, dla którego wartości CSK i OWF należały do najniższych spośród badanych preparatów. Oznacza to, że metoda ta może stanowić szybkie i skuteczne narzędzie wstępnej preselekcji polimerów wykorzystywanych w oczyszczalniach ścieków, ograniczając liczbę czasochłonnnych i kosztownych analiz laboratoryjnych. Jednak ostateczny wybór rodzaju i dawki polimeru powinien być każdorazowo potwierdzany pomiarami CSK i OWF, zwłaszcza gdy różnice pomiędzy wynikami testów zlewkowych są niewielkie.

6. Wnioski

Polielektrolity wpływają na podatność na odwadnianie osadów ściekowych, czego potwierdzeniem były uzyskane wartości czasu ssania kapilarnego oraz oporu właściwego filtracji.

Testy zlewkowe umożliwiają wstępną selekcję polielektrolitów, co może wpływać na ograniczenie liczby próbek w badaniach laboratoryjnych.

Dla badanego osadu dobrano rodzaj polielektrolitu oraz jego dawki. Optymalny zakres dawkowania wynosił od 11 do 13 ml, przy czym poszczególne metody oznaczania podatności na odwadnianie osadów ściekowych wskazywały na odmienne wartości optymalne.

Testy zlewkowe stanowią użyteczne narzędzie wspomagające dobór polimerów stosowanych do odwadniania osadów ściekowych, jednak ostateczny wybór rodzaju i dawki polimeru powinien być potwierdzony metodami, takimi jak CSK lub OWF.

7. Literatura

- [1] AbuSeif, A., AbuSeif, Y., Gan, S., Alhijawi, Y., Shima, Z., Rehman, Z. U., Ali, M., & Zheng, C. (2026). Low-dose flocculant strategies for sewage sludge dewatering: mechanistic and techno-economic assessment of cationic polyacrylamide and aluminum sulfate. *Chemical Engineering Science*, 330, 123835. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2026.123835>
- [2] Cao, X., Wang, F., & Yang, J. (2023). Using a combination of different conditioners to promote dewatering of digested sludge: Rheological characteristics. *Environmental Research*, 237(Pt 2), 116958. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116958>
- [3] Chen, Y., Chio, C., Boteju, R., Lu, G., Dang, Q., & Qin, W. (2026). Sludge dewatering: A review of conventional methods and microbial assisted approaches. *Journal of Environmental Management*, 405, 129776. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129776>
- [4] Eurostat. (2026). Sewage sludge production and disposal [Data set]. https://doi.org/10.2908/ENV_WW_SPD
- [5] Głodniok, M., & Zdebik, D. (2016). Study of the digested sludge dewatering effectiveness using polyelectrolyte gel based on organic polymers. *Journal of Ecological Engineering*, 46, 100–108. <https://doi.org/10.12912/23920629/61471>
- [6] Górka, J. (2020). Kondycjonowanie osadów ściekowych osadami z uzdatniania wody. *Przemysł Chemiczny*, 99(9), 1315–1317. <https://doi.org/10.15199/62.2020.9.9>
- [7] Górka, J., Cimochoń-Rybicka, M., & Poproch, D. (2022). Sludge Management at the Kraków-Płaszów WWTP—Case Study. *Sustainability*, 14(13), 7982. <https://doi.org/10.3390/su14137982>
- [8] Gray, N. F. (2015). Capillary suction time (CST). In S. Tarleton (Ed.), *Progress in filtration and separation* (pp. 659–670). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64471-8>
- [9] Yuan, H., Gu, L., Cao, X., & Zhu, N. (2026). EPS-Mediated Sludge Dewatering: Molecular structure and interfacial behavior. *Biotechnology*, 458, 135079. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2026.135079>
- [10] Kim, K. S., Sajjad, M., Lee, J., Park, J., & Jun, T. (2013). Variation of extracellular polymeric substances (EPS) and specific resistance to filtration in sludge granulation process to the change of influent organic loading rate. *Desalination and Water Treatment*, 52(22–24), 4376–4387. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.801795>
- [11] Lan, M., Dun, Z., Li, S., Yang, P., & Meng, W. (2026). Mechanism study on free radicals degrading extracellular polymers to enhance sludge dewatering performance. *Journal of Water Process Engineering*, 87, 110047. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110047>
- [12] Lee, C. (2000). Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning. *Water Research*, 34(18), 4430–4436. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00209-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00209-8)
- [13] To, V. H. P., Nguyen, T. V., Vigneswaran, S., & Ngo, H. H. (2016). A review on sludge dewatering indices. *Water Science & Technology*, 74(1), 1–16. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.102>
- [14] Qi, Y., Thapa, K. B., & Hoadley, A. F. (2011). Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties – A review. *Chemical Engineering Journal*, 171(2), 373–384. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.060>
- [15] Wadiak, B., Masłoń, A., & Czarnota, J. (2024). Problematyka odcieków z odwadniania osadów prefermentowanych. *Technologia Wody*, 4(86), 44–51
- [16] Zhou, K., Stüber, J., Schubert, R., Kabbe, C., & Barjenbruch, M. (2017). Full-scale performance of selected starch-based biodegradable polymers in sludge dewatering and recommendation for applications. *Water Science & Technology*, 77(1), 7–16. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.476>