



## **Analiza parametrów reologicznych wstępnie kondycjonowanych osadów ściekowych poddanych fermentacji**

*Paweł Wolski, Iwona Zawieja*  
*Politechnika Częstochowska*

### **1. Wstęp**

Osady ściekowe są naturalnym produktem oczyszczania ścieków. Ich gospodarowanie jest bardzo istotnym elementem procesu oczyszczania, wymuszającym poszukiwanie nowych technik i rozwiązań intensyfikujących proces stabilizacji czy też odwadniania [1, 5].

W Polsce zgodnie z Dyrektywą UE od 1 stycznia 2013 roku nie będzie można składować osadów ściekowych na składowisku. Wymusza to konieczność poszukiwania bardziej efektywnych metod ich końcowego zagospodarowania, nie traktując osadów ściekowych jako typowego odpadu, lecz produktu wykorzystywanego w procesie spalania, współspalania, czy też w budownictwie. Skład fizyko-chemiczny osadów ściekowych jest różny w zależności od rodzaju, miejsca powstania ścieków, a także sposobu ich oczyszczania. Głównym jednak problemem w ich zagospodarowaniu jest ich ilość oraz uwodnienie. Odwadnianie to podstawowy proces przeróbki osadów ściekowych [16]. W celu uzyskania jak najlepszych efektów tego procesu, osady poddawane są wstępnemu przygotowaniu, mającego na celu zmianę właściwości fizykochemicznych i struktury celem uzyskania optymalnych warunków do przeprowadzenia odwadniania [3, 13, 15]. Zmniejszenie objętości osadów wpływa na obniżenie kosztów transportu, przeróbki, a także utylizacji [11].

Dotychczas najczęściej stosowaną metodą kondycjonowania osadów ściekowych jest dodawanie środków chemicznych (polielektrolitów) [10]. Metoda ta skutecznie zwiększa efektywność odwadniania, powodu-

jąc tym samym możliwość dostawania się do środowiska niebezpiecznych związków chemicznych. Zastosowanie fizycznych metod kondycjonowania (termiczne, pole ultradźwiękowe) to alternatywa do chemicznych metod preparowania osadów. Ich zastosowanie przed procesem stabilizacji, wykazało pozytywny wpływ na wartości ChZT oraz LKT w cieczach nadosadowych, jak również parametry charakteryzujące stopień ich odwadniania [2, 6, 8, 14]. Zastosowanie powyższych metod wpływa tym samym na przebieg krzywych płynięcia i lepkości, co do tej pory nie zostało przedstawione w literaturze.

Każda ingerencja w strukturę osadów wpływa na ich właściwości i parametry. Wśród nich należą parametry reologiczne, których znajomość ma znaczenie przy projektowaniu rurociągów służących do transportu osadów [4, 9]. Istotą ich przeróbki jest polepszenie odwadniania, prowadząca do zmniejszania objętości, a tym samym lepkości osadów (rośnie opór tarcia). Można powiedzieć, że istnieje pewna wartość uwodnienia, która minimalizuje straty energetyczne ruchu osadów w rurociągach [7]. Właściwości reologiczne są także ważnym parametrem kontrolnym takich procesów, jak stabilizacja czy odwadnianie. Pominięcie ich może prowadzić do błędów projektowych, czego konsekwencją będą trudności w eksploatacji całego systemu. W określonych warunkach ciśnienia i temperatury lepkość osadów ściekowych nie jest wartością stałą, lecz zmienia się w zależności od innych czynników np. gradientu prędkości [12]. Płynięcie osadów należy zatem przedstawić za pomocą modeli, w których rolę lepkości spełniają parametry reologiczne.

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu wstępnego kondycjonowania polem ultradźwiękowym oraz termicznie osadów ściekowych poddanych fermentacji na ich parametry reologiczne. Badania miały charakter rozpoznawczy przebiegu krzywych płynięcia, lepkości i granic płynięcia osadów ściekowych wstępnie kondycjonowanych wyżej wymienionymi metodami, przed procesem fermentacji.

## **2. Część doświadczalna**

### **2.1. Substrat badań**

Do badań wykorzystano osady nadmierne pochodzące z Oczyszczalni Ścieków „WARTA” S.A w Częstochowie. Osady nadmierne wymieszano z osadem przefermentowanym, który pełnił rolę zaszczeputu, a następnie poddano procesowi stabilizacji beztlenowej. Objętość doda-

wanego osadu przefermentowanego wynosiła 10% całej objętości osadu umieszczanego w bioreaktorze. Przefermentowane osady pobrano z tej samej oczyszczalni co osad nadmierny, po procesie fermentacji metanowej z zamkniętych komór fermentacyjnych (WKF<sub>z</sub>).

## **2.2. Metodyka badań**

Proces stabilizacji przeprowadzono na osadach wstępnie kondycjonowanych polem ultradźwiękowym o amplitudach 60%, 80% i 100%, jak również osadach kondycjonowanych termicznie temperaturami 60°C, 70°C, 80°C. Zarówno osady poddawane kondycjonowaniu polem UD, jak i termicznie przed poddaniem fermentacji zostały zmieszane z osadami przefermentowanymi w stosunku 10:1.

Na podstawie wcześniejszych badań w modelowych bioreaktorach dokonano doboru najkorzystniejszych parametrów kondycjonowania. Do kondycjonowania polem UD wykorzystano procesor ultradźwiękowy VCX 1500 firmy Sonics. Dezintegrator ten posiada maksymalną moc wyjściową 1500 W, częstotliwość fali 20 kHz oraz amplitudę 100% odpowiadającą długości fali 39,42  $\mu\text{m}$ . Czas ekspozycji badanych prób polem UD wynosił 5 minut. Każda z prób osadu poddana nadźwiękawianiu posiadała objętość 500  $\text{cm}^3$ . Proces sonifikacji prowadzono dla amplitud fali ultradźwiękowej: 60% odpowiadającej długości fali 23,65  $\mu\text{m}$ ; 80% odpowiadającej długości fali 31,54  $\mu\text{m}$  oraz 100% odpowiadającej długości fali 39,42  $\mu\text{m}$ .

Procesowi kondycjonowania termicznego osadów poddawano próby o objętości 500  $\text{cm}^3$  umieszczane w łaźni wodnej. W badaniach wykorzystywano trzy temperatury tj. 60°C, 70°C, 80°C, a czas działania wynosił 90 minut.

Celem porównania wartości parametrów reologicznych osadów wstępnie kondycjonowanych, z wartościami osadów wstępnie niekondycjonowanych poddanych działaniu polielektrolitów, przeprowadzono oznaczenia na osadach ustabilizowanych kondycjonowanych polielektrolitami: Praestol 610 (słabo kationowy), Praestol 853 (silnie kationowy), a także Praestol średnio kationowe 852 i 851. Wymienione polielektrolity stosowano w postaci roztworów. Dawki polielektrolitów wyznaczono na podstawie suchej masy organicznej, a dobór najkorzystniejsze dawki wyznaczono na podstawie testu czasu ssania kapilarnego (CSK). Do preparowania osadów użyto dawkę obniżoną, optymalną i podwyższoną,

które wynosiły odpowiednio 2 mg/g s.m.o (dawka obniżona), 2,5 mg/g s.m.o (dawka optymalna), 3 mg/g s.m.o (dawka podwyższona).

Proces fermentacji metanowej prowadzono w bioreaktorach modelowych o objętość 7 dm<sup>3</sup> w temperaturze 36°C przez 28 dni.

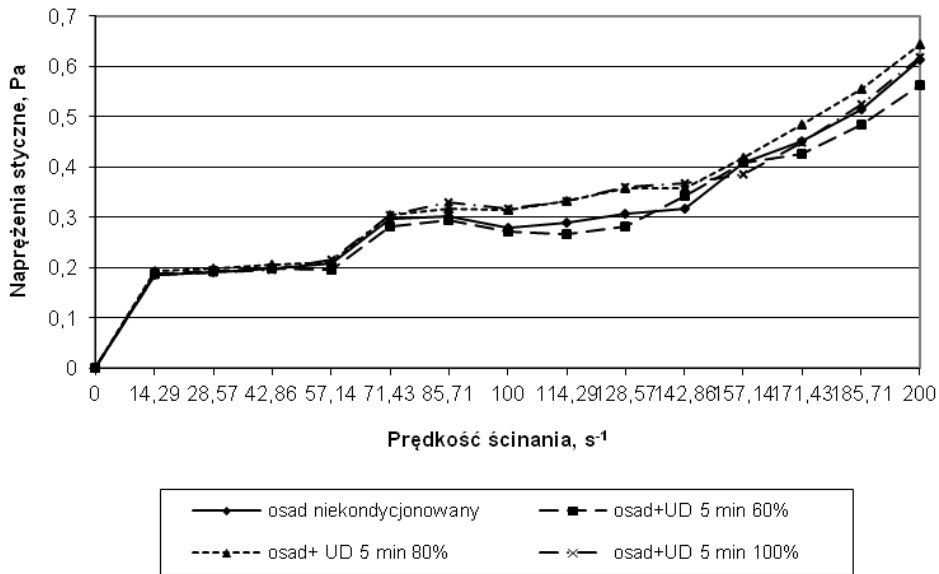
Badania reologiczne przeprowadzono z użyciem Reometru RC 20. Reometr składał się z cylindrów współosiowych, w tym z cylindrów zakończonych konstrukcją stożek płyta. Badaną próbkę umieszczono w szczelinie pierścieniowej pomiędzy wewnętrznym i zewnętrznym cylindrem. Urządzenie to może pracować z komputerem wyposażonym w program RHEO 2000, lub samodzielnie. Reometr pozwala na pomiar naprężeń stycznych i lepkości przy różnych gradientach prędkościach. Błąd pomiarowy wynosi  $\pm 1\%$  maksymalnej wartości pomiaru. Badania prowadzono dla prędkości ścinania wynoszącej 0–200 s<sup>-1</sup>, przy czasie pomiaru 120 s. Wykorzystując ultratermostat, oznaczenia przeprowadzono w stałej temperaturze 20°C.

### 3. Wyniki badań

Wpływ kondycjonowania osadów ściekowych na parametry reologiczne określono w oparciu o krzywe płynięcia, a także zależności lepkości od gradientu prędkości wyznaczone doświadczalnie za pomocą Reometru RC 20.

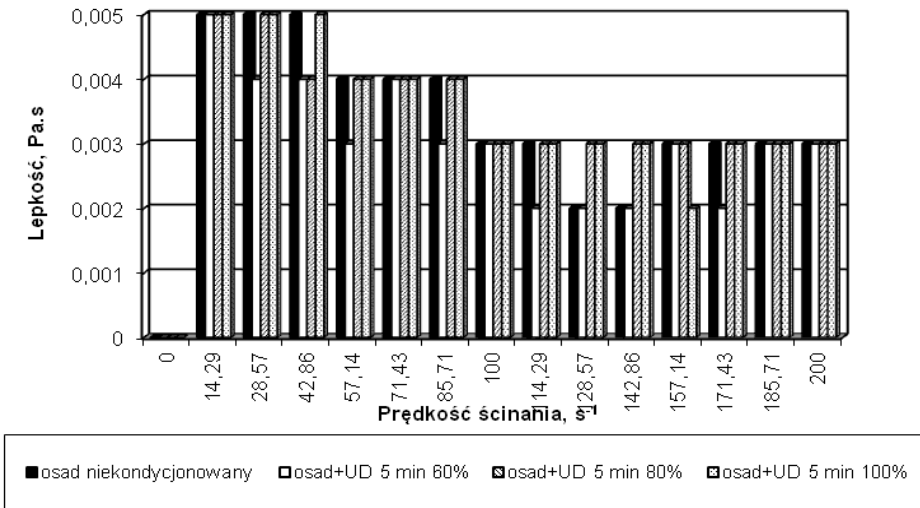
Analiza krzywych płynięcia wykazała, że wzrost gradientu prędkości powodował zwiększenie wartości naprężeń stycznych. Zaobserwowano, że największe wartości otrzymano przy najwyższych prędkościach deformacji tj. 200 s<sup>-1</sup>. Naprężenia styczne wzrastały proporcjonalnie wraz ze wzrostem gradientu prędkości. Zastosowanie pola ultradźwiękowego jako wstępnej metody kondycjonowania, nie wpłynęło na zmianę wartości omawianego parametru w odniesieniu do osadu niekondycjonowanego (rys. 1).

Drugim badanym parametrem reologicznym była lepkość (rys. 2). Na podstawie otrzymanych wyników odnotowano, że lepkość osadów niepreparowanych malała wraz ze wzrostem prędkości. Z analizy parametrów reologicznych wynika, że im cząstki osadów ściekowych były większe i bardziej zbite wartości naprężeń były wyższe, natomiast lepkość malała wraz ze wzrostem gradientu prędkości.



**Rys. 1.** Krzywe płynięcia osadów ściekowych przy różnych wartościach amplitudy pola ultradźwiękowego

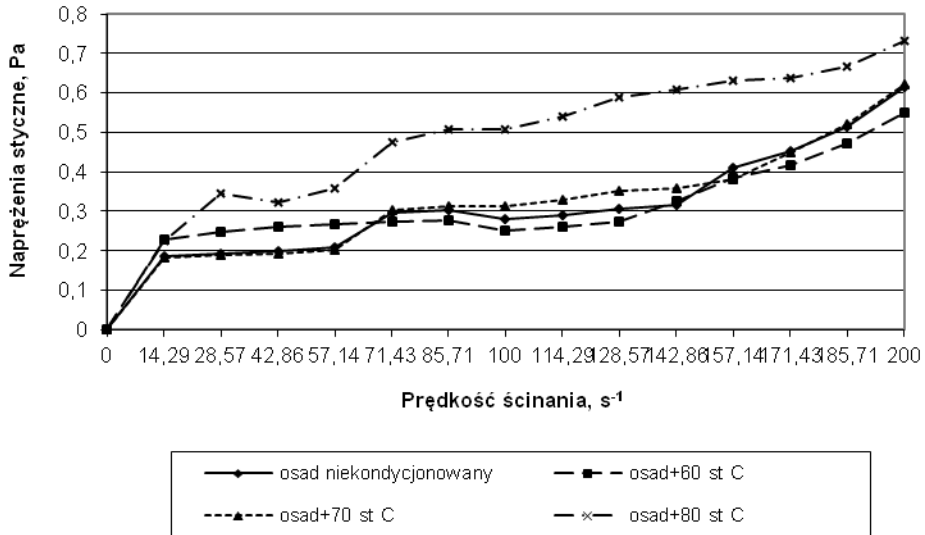
**Fig. 1.** Sludge flow curves at different amplitudes of the ultrasonic field



**Rys. 2.** Lepkość osadów ściekowych przy różnych wartościach amplitudy pola ultradźwiękowego

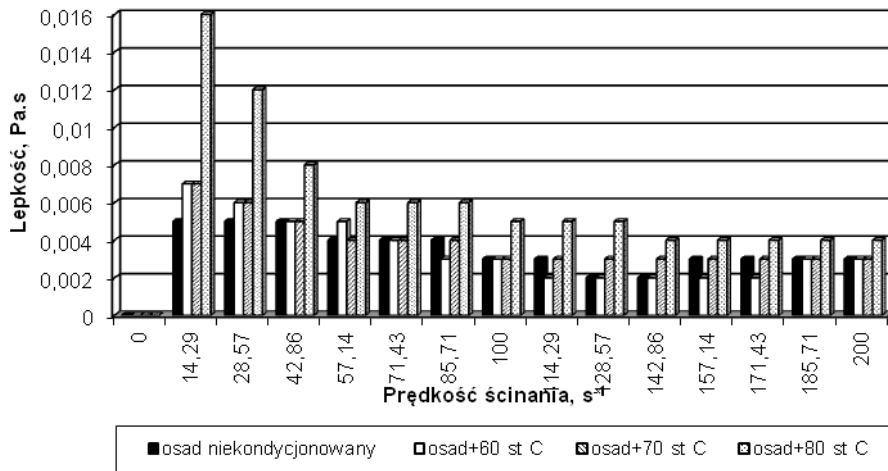
**Fig. 2.** The viscosity of sludge at different values of ultrasonic field amplitude

Analiza krzywych płynięcia osadów ściekowych kondycjonowanych termicznie wykazała wzrost wartości naprężeń stycznych już przy najniższych wartościach prędkości, utrzymując stałą tendencję wzrostową do badanej prędkości końcowej  $200 \text{ s}^{-1}$  (rys. 3).



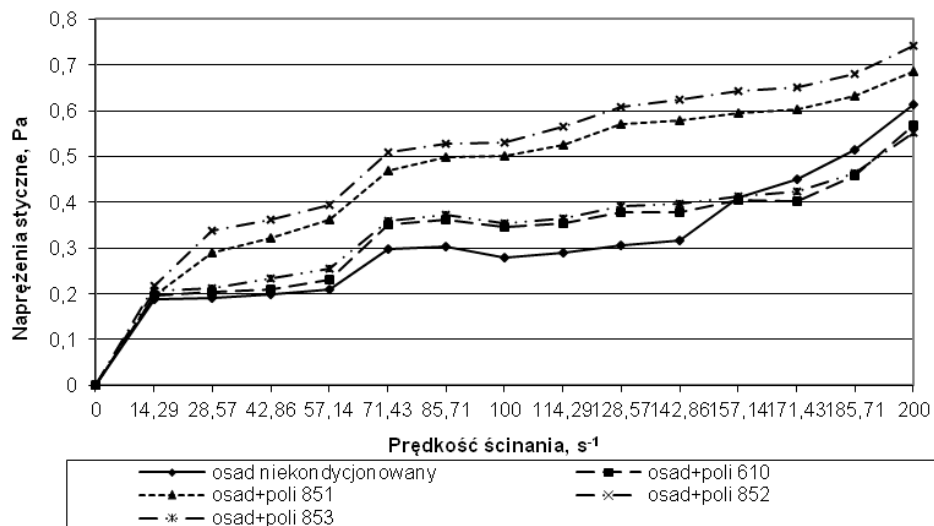
**Rys. 3.** Krzywe płynięcia osadów ściekowych kondycjonowanych termicznie  
**Fig. 3.** Flow curves of thermally conditioned sludge

Wstępne kondycjonowanie termiczne powodowało zwiększenie wartości naprężeń stycznych. Najwyższy wzrost omawianego parametru odnotowano dla osadów ściekowych wstępnie poddanych działaniu temperaturą  $80^{\circ}\text{C}$ . Również przy tej temperaturze odnotowano najwyższą lepkość, co przedstawiono na rys. 4. Naprężenia styczne posiadały zbliżone wartości dla osadów niekondycjonowanych i kondycjonowanych termicznie temperaturą  $60^{\circ}\text{C}$  i  $70^{\circ}\text{C}$ , natomiast w przypadku osadów kondycjonowanych temperaturą  $80^{\circ}\text{C}$  były one wyższe.



Rys. 4. Lepkość osadów ściekowych kondycjonowanych termicznie

Fig. 4. Viscosity of thermally conditioned sludge

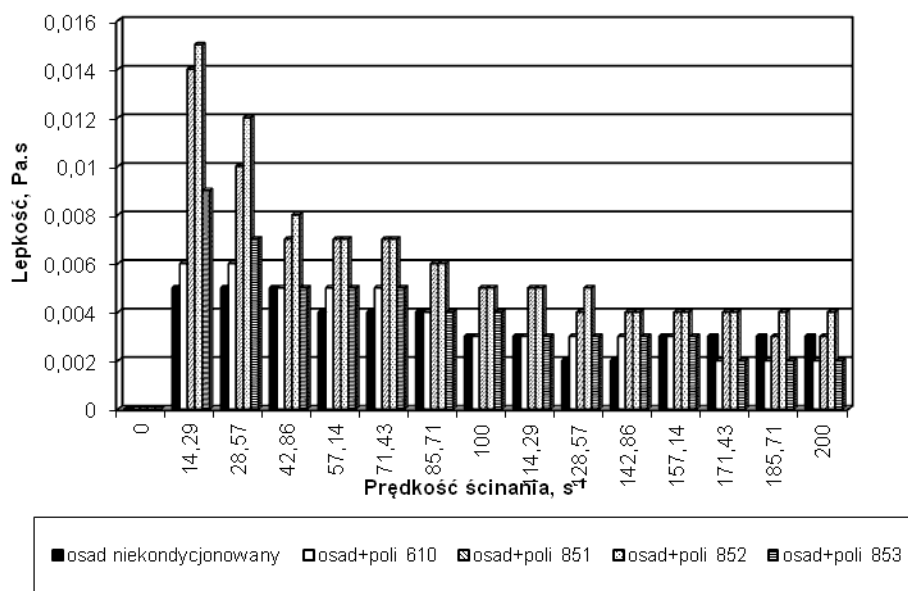


Rys. 5. Krzywe płynięcia osadów ściekowych kondycjonowanych polielektrolitami

Fig. 5. Flow curves of sewage sludge conditioned polyelectrolytes

Analogicznie jak w przypadku osadów kondycjonowanych termicznie i polem ultradźwiękowym, również dla osadów kondycjonowa-

nych polielektrolitami wartości naprężeń rosły wraz ze wzrostem wartości prędkości ścinania. Najniższe wartości naprężeń odnotowano dla osadów ściekowych poddawanych działaniu polielektrolitu Praestol 852, natomiast najwyższe dla osadu kondycjonowanego polielektrolitem Praestol 853 (rys. 5). Również i w tym przypadku krzywe lepkości osadu miały podobny przebieg do krzywych osadów kondycjonowanymi innymi sposobami. Zaobserwowano, że lepkość malała wraz z wzrostem gradientu prędkości. Najniższe wartości odnotowano dla osadu kondycjonowanego polielektrolitem 853 i 610 (0,002 Pa·s), natomiast najwyższą odnotowano dla osadów preparowanych polielektrolitem 852 (0,004 Pa·s) (rys. 6).



**Rys. 6.** Lepkość osadów ściekowych kondycjonowanych polielektrolitami  
**Fig. 6.** The viscosity of sludge conditioned polyelectrolytes

Z analizy wszystkich krzywych wynika, że niezależnie od metody kondycjonowania osadów ściekowych naprężenia styczne wzrastały wraz ze wzrostem prędkością ścinania, natomiast lepkość malała.



**Tabela 1.** Wartości parametrów wybranych modeli reologicznych badanych osadów ściekowych dla  $\gamma = 0-200 \text{ s}^{-1}$ ; k – współczynnik konsystencji, n – wykładnik potęgi,  $\tau_0$  – granica płynięcia,  $\eta$  – lepkość, R – współczynnik korelacji, S – odchylenie standardowe

**Table 1.** The parameter values of selected rheological models studied sewage sludge for  $\gamma = 0-200 \text{ s}^{-1}$ , k – coefficient of consistency, n – exponent,  $\tau_0$  – yield stress,  $\eta$  – viscosity, R – correlation coefficient, S – standard deviation

Rodzaj osadu	Model Ostwalda			Model Binghama			Model Herschela-Bulkleya			
	k	n	R	$\tau_0$ N·m <sup>-2</sup>	$\eta_{pl}$ N·s·m <sup>-2</sup>	R	$\tau_0$ N·m <sup>-2</sup>	K <sub>h</sub>	n	R
			S			S				S
Osad niekondycjonowany	0,008	0,785	0,790	0,061	0,003	0,912	0,257	0,000	4,547	0,990
			0,0601			0,0627				0,013
osad+ UD 100%	0,018	0,631	0,857	0,017	0,003	0,910	0,237	0,000	2,562	0,922
			0,0471			0,0576				0,0348
osad+80°C	0,044	0,529	0,972	0,118	0,003	0,883	0,343	0,218	0,298	0,977
			0,0252			0,0813				0,0231
osad+polielektrolit 610	0,000	1,815	0,982	0,111	0,002	0,781	0,130	0,000	3,224	0,989
			0,0145			0,0843				0,0111
osad+polielektrolit 851	0,061	0,456	0,976	0,182	0,003	0,871	0,217	0,189	0,291	0,981
			0,0229			0,0697				0,0206
osad+polielektrolit 852	0,057	0,457	0,963	0,129	0,003	0,838	1,130	0,912	0,124	0,972
			0,0235			0,0842				0,0204
osad+polielektrolit 853	0,000	1,754	0,977	0,105	0,002	0,781	0,142	0,000	3,522	0,988
			0,015			0,0801				0,0107

#### 4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Osady ściekowe są produktem ubocznym oczyszczania ścieków. O ich charakterystyce decyduje szereg czynników tj. zawartość substancji organicznych i mineralnych, uwodnienie, skład chemiczny oraz właściwości reologiczne. Osady są płynami nie newtonowskimi, dlatego przeprowadzając badania dąży się do wyznaczenia tzw. krzywych płynięcia. Podstawowymi parametrami są: lepkość osadu i granica płynięcia. Lepkość jest właściwością fazy stałej i ciekłej, natomiast granica płynięcia to wartość naprężeń ścinających powyżej której układ zachowuje się jak ciecz, natomiast poniżej jak ciało stałe. Ze względu na liczbę czynników wpływających na właściwości reologiczne nie ma możliwości określenia ich teoretycznie – konieczne jest przeprowadzenie odpowiednich badań.

Z dotychczas przeprowadzonych badań wiadomo, że kondycjonowanie chemiczne i fizyczne wpływa na zmianę przebiegu krzywych płynięcia i wartości granic płynięcia badanych osadów ściekowych. Różne polimery (kationowe, anionowe, niejonowe) wykazują w tym samym ośrodku zróżnicowaną skuteczność działania. Wraz ze wzrostem ich dawek, zwiększa się granica płynięcia osadów, w wyniku czego przesuwa się obszar, w którym zachowują się one bardziej jako ciało stałe niż ciecz. Wszystko to wpływa na prawidłowy przebieg procesów technologicznych, jak np. pompowalność, mieszanie czy też odwadnianie osadów.

Przedstawione w artykule wyniki badań wykazały, że najwyższe wartości naprężeń stycznych otrzymano dla osadów ściekowych wstępnie kondycjonowanych termicznie (80°C) oraz osadów kondycjonowanych polielektrolitami silnie kationowymi przy prędkości ścinania 200 s<sup>-1</sup>. Naprężenia styczne osadów kondycjonowanych polem ultradźwiękowym, niezależnie od długości fali, posiadały zbliżony przebieg. Dla osadów preparowanych polielektrolitami zaobserwowano tendencje wzrostową naprężeń w zależności od zastosowanej mocy polielektrolitu.

Dla wszystkich zastosowanych w badaniach metod kondycjonowania odnotowano spadek wartości lepkości osadów wraz ze wzrostem prędkości ścinania. Najniższe wartości lepkości posiadały osady ściekowe poddane ekspozycji polem ultradźwiękowym.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Wartości naprężeń stycznych osadów ściekowych poddanych kondycjonowaniu polem ultradźwiękowym rosną wraz z prędkością ścinania, natomiast lepkość maleje. Najwyższe wartości naprężeń odnotowano w przypadku osadów ściekowych kondycjonowanych polem UD amplitudą 80%, dla których wartość wzrosła do 0,643 Pa przy prędkości ścinania  $200 \text{ s}^{-1}$ . Wartość lepkości przy największej prędkości ścinania była w granicach 0,002–0,003 Pa·s.
2. Dla osadów ściekowych kondycjonowanych termicznie najwyższe wartości naprężeń stycznych wykazywały osady poddane działaniu temperatury  $80^\circ\text{C}$ . Przy tej temperaturze odnotowano również najwyższe wartości lepkości.
3. Wartości parametrów reologicznych osadów ściekowych zależą od rodzaju zastosowanych polielektrolitów. Najwyższe wartości naprężeń stycznych odnotowano w przypadku zastosowania polielektrolitu Praestol 852 (0,743 Pa), natomiast najniższą lepkość stwierdzono dla osadów z dodatkiem polielektrolitu Praestol 853, która wyniosła 0,002 Pa·s.

*Badania finansowane z projektu badawczego BS-PB-401/303/12*

## Literatura

1. **Bień J.:** *Osady ściekowe – teoria i praktyka*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2007.
2. **Bień J., Wolny L., Zawieja I., Barański M., Worwąg M.:** *Wpływ termicznej dezintegracji osadów nadmiernych na generowanie lotnych kwasów tłuszczowych. Oczyszczanie ścieków i przeróbka osadów ściekowych*. Monografia pod red. Z. Sadeckiej, Zielona Góra, 63–69 (2010).
3. **Dieudé-Fauvel, E., Dentel, S.K.:** *Sludge conditioning: Impact of Polymers on Floc structure*. Journal of Residuals Science and Technology 8 (3), 101–108 (2011).
4. **Dong, Y., Wang, Y.:** *Steady rheological characteristics of the concentrated water treatment residuals (CWTR)*. Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae 32 (3), 678–682 (2012).
5. **Li, Z., Li, W.:** *Technological parameters of exceed sludge anaerobic digestion in industrial wastewater treatment plant*. Electronic Journal of Geotechnical Engineering 14 K, 1–11 (2009).

6. **Li, T., Wang, Y.-L., Feng, J., Xu, M.:** *Relationship between physicochemical characteristics of activated sludge and polymer conditioning dosage.* Huanjing Kexue/Environmental Science 33 (3), 889–895 (2012).
7. **Malmur R.:** *Analiza hydraulicznego działania zbiornika retencyjno-przerzutowego.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 13, 2001–2013 (2011).
8. **Malkowski M., Wolski P.:** *Wpływ termicznego kondycjonowania na efektywność odwadniania osadów ściekowych poddanych stabilizacji beztlenowej.* Inżynieria i Ochrona Środowiska, 13, nr 2, 103–109 (2010).
9. **Sozański M.M., Kempa E.S., Grocholski K., Bień J.:** *The rheological experiment in sludge properties research.* Wat. Sci. Tech., Vol. 36, No. 11, 69–78 (1997).
10. **Tuan P.-A., Sillanpää M.:** *Effect of freeze/thaw conditions, polyelectrolyte addition, and sludge loading on sludge electro-dewatering process.* Chemical Engineering Journal 164 (1), 85–91 (2010).
11. **Wielgórka D.:** *New Financial Instruments in Managing Ecogrowth in the Aspect of Globalisation's Processes.* [w] *Ekonomika: problemi teorii ta praktiki.* Zbirnik naukovich prac'. Vip.235 T. 2, Wyd. DNU, Dniepropietrowsk, 449–457 (2008).
12. **Wolny L., Wolski P., Zawieja I.:** *Rheological Parameters of Dewatered Sewage Sludge After Conditioning.* Desalination 222, 382–387 (2008).
13. **Wolski P., Zawieja I.:** *Effect of Ultrasound Field on Dewatering of Sewage Sludge.* Arch. Environ. Prot., Vol. 38, nr 2, 25–31.
14. **Zawieja I., Wolny L.:** *Effect of sonicator power on the biodegradability of sewage sludge.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 13, 1719–1730 (2011).
15. **Zhou C., Chu Q., Tang S., Zhang C.:** *Experiment of dehydration capability of municipal sludge.* 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2010, art. no. 5517451, 2010.
16. **Zhou C., Kong H., Chen J., Chang J.:** *Study on sludge dewatering ability by ultrasound pretreatment.* 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, iCBBE 2011, art. no. 5781483, 2011.

## **Analysis of the Rheological Parameters of the Preconditioned Sewage Sludge Submitted to Fermentation**

### **Abstract**

Deposits of water and wastewater treatment are dispersed systems of a very complex structure. The properties of this structure are mainly dependent of the phenomena occurring in the processes of the formation of deposits, under the influence of several factors. The use of rheology in water and wastewater treatment technologies associated with the nonnewtonian nature of the flow of sewage produced mainly in the processes of coagulation and sedimentation. A large number of physical, chemical and biological theory excludes the possibility of determining the rheological parameters, and therefore knowledge of the rheological characteristics of sludge from water and wastewater treatment must be based on experimental studies using appropriate viscometers. This paper presents a study to determine the rheological parameters undergone initial sludge conditioning and fermentation. The study was conducted on excess sludge undergone initial ultrasonic field conditioning, heat, and polyelectrolytes. Conditioned sludge is subjected to the stabilization process in the bioreactor, and determines the rheological parameters (shear stress, viscosity, yield point).

The use of pre-conditioning resulted in an increase of shear stress tested sewage sludge. This dependence has been in particular for sludge conditioned polyelectrolytes. Experimentally determined values correlated with the values set out in the rheological models.