

Paweł WOLSKI¹

WPŁYW WSTĘPNEJ DEZINTEGRACJI NA PARAMETRY REOLOGICZNE OSADÓW ŚCIEKOWYCH PODDANYCH FERMENTACJI

THE IMPACT OF THE INITIAL DISINTEGRATION ON THE RHEOLOGICAL PARAMETERS OF THE FERMENTED SEWAGE SLUDGE

Abstrakt: Celem prowadzonych badań było wyznaczenie zależności naprężeń stycznych od gradientu prędkości (krzywych płynięcia) osadów ściekowych wstępnie kondycjonowanych polem ultradźwiękowym, a następnie poddanych fermentacji. W procesie sonifikacji zastosowano cztery natężenia fali ultradźwiękowej: 2,2; 2,7; 3,2; 3,8 W/cm², natomiast czas sonifikacji przyjęto 600 s. Proces fermentacji prowadzono w 10 kolbach szklanych o pojemności 0,5 dm³ stanowiących modele komór fermentacyjnych. Do opisu krzywych płynięcia zastosowano najprostszy matematyczny model reologiczny, tzw. model Ostwalda. Przedstawiono również sumaryczny ubytek suchej masy osadów poddanych stabilizacji. W wyniku przeprowadzonych badań odnotowano zwiększenie naprężeń stycznych wraz z zastosowaniem wyższych natężeń fali pola ultradźwiękowego. Zmniejszenie wartości naprężeń zaobserwowano dla osadów poddanych fermentacji z każdym dniem prowadzenia procesu.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, parametry reologiczne, pole ultradźwiękowe, fermentacja

Wprowadzenie

Granica płynięcia, lepkość, naprężenia styczne są parametrami technologicznymi przydatnymi w praktyce do kontroli pompowania osadów, płynięcia oraz innych procesów technologicznych związanych z ich przeróbką [1]. Zwiększenie efektywności odwadniania osadów powoduje spadek zdolności ich płynięcia poprzez wzrost granic płynięcia, a tym samym wartości naprężeń stycznych. Zmienność naprężeń i lepkości jest wynikiem zmiany struktury zachodzącej w osadach w trakcie płynięcia. Każda zmiana struktury osadów poprzez kondycjonowanie wpływała tym samym na ich parametry reologiczne [2].

Reologia osadów ściekowych jest istotnym zagadnieniem wykorzystywanym w pracach nad metodami ich zagospodarowania, jak również kontroli w procesach odwadniania i stabilizacji [3]. Właściwości reologiczne osadów ściekowych zależą od ich składu, stężenia, temperatury i pH [4, 5], a ich znajomość przydatna jest m.in. w procesach przepływu, mieszania i przenoszenia ciepła w osadach [6]. Przeprowadzone badania wykazują korelacje parametrów reologicznych z ich właściwościami [7]. Zastosowanie modyfikacji termicznej, chemicznej, mechanicznej oraz ich kombinacji przyczynia się do zmiany właściwości i charakterystyki osadów [8]. Kondycjonowanie powoduje uwolnienie wewnątrzkomórkowej materii, a tym samym poprawę biodegradowalności osadów (zwiększona produkcja biogazu) [9-11].

¹ Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, Politechnika Częstochowska, ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa, email: pwolski@is.pcz.czest.pl
Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'16, Zakopane, 5-8.10.2016

Metodyka badań

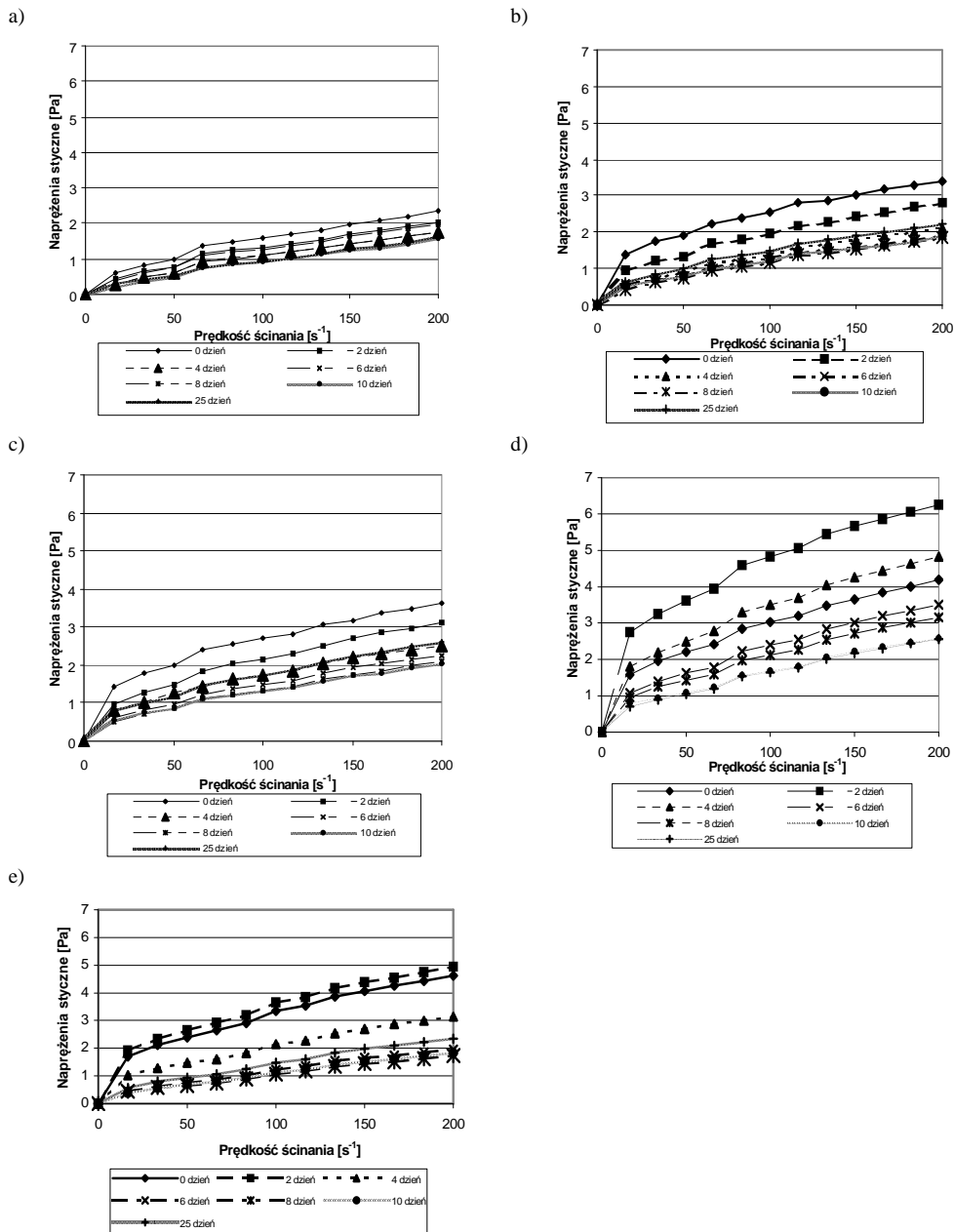
Substratem badań były osady ściekowe pochodzące z oczyszczania ścieków celulozowo-papierniczych. Uwodnienie początkowe wynoszące 98,32% oraz suchą masę równą $16,82 \text{ g/dm}^3$ obliczono na podstawie normy PN-EN-12880 [12]. Wstępne kondycjonowanie osadów przeprowadzono, wykorzystując energię pola ultradźwiękowego o natężeniu: 2,2 (40%), 2,7 (60%); 3,2 (80%); 3,8 (100%) W/cm^2 . Proces nadźwiękawiania prowadzono w warunkach statycznych przez 600 s. Moc wyjściowa zastosowanego procesora ultradźwiękowego wynosiła 1500 W, częstotliwość drgań 20 kHz, a maksymalna długość fali, przy maksymalnym natężeniu 3,8 W/cm^2 , wynosiła $39,42 \text{ }\mu\text{m}$ (100%). Procesowi nadźwiękawiania poddano próby osadów o objętości 500 cm^3 .

Proces fermentacji osadów ściekowych prowadzono w kolbach szklanych stanowiących modele komór fermentacyjnych oraz bioreaktorze. Kolby laboratoryjne stanowiące modele komór fermentacyjnych umieszczano w celu utrzymania warunków mezofilowych w ciepłarni laboratoryjnej. W każdym dniu procesu fermentacji po wyciągnięciu jednej z kolb z ciepłarki wyznaczano parametry oraz wartości modeli reologicznych. Objętość kolb wynosiła $V = 0,5 \text{ dm}^3$. Proces 25-dniowej stabilizacji prowadzono w bioreaktorze o pojemności 5 dm^3 . W celu wyznaczenia parametrów reologicznych zastosowano reometr RC20, przy prędkości ścinania $0\text{-}200 \text{ s}^{-1}$, przez okres 120 s.

Wyniki badań

Najwyższymi wartościami naprężeń dla osadów wstępnie niekondycjonowanych polem ultradźwiękowym charakteryzowały się osady nieustabilizowane (rys. 1a). Wraz ze wzrostem prędkości ścinania odnotowano zwiększenie naprężeń stycznych, uzyskując wartość najwyższą $2,328 \text{ Pa}$ przy prędkości ścinania 200 s^{-1} . Poddanie osadów niekondycjonowanych fermentacji spowodowało obniżenie naprężeń. W kolejnych dniach fermentacji były one niższe w odniesieniu do osadów nieprzefermentowanych. Najniższymi wartościami naprężeń stycznych wykazywały się osady po 10 dniu fermentacji, dla których wartości naprężeń przy prędkości ścinania 200 s^{-1} wynosiły $1,565 \text{ Pa}$. Zbliżone wartości naprężeń posiadały osady po 25 dniach fermentacji w bioreaktorze.

Zastosowanie wstępnego kondycjonowania energią pola ultradźwiękowego spowodowało wzrost naprężeń stycznych osadów ściekowych w każdym dniu prowadzenia procesu fermentacji (rys. 1b). Dla osadów nieprzefermentowanych poddanych wstępnej modyfikacji polem UD o natężeniu $2,2 \text{ W/cm}^2$ wartości naprężeń wyniosły $3,419 \text{ Pa}$. W przypadku osadów poddanych fermentacji wartości były niższe, odnotowując wartość najniższą dla osadów w 10 dniu stabilizacji ($1,888 \text{ Pa}$ przy prędkości ścinania 200 s^{-1}). Wydłużając natężenie zastosowanego pola ultradźwiękowego, stwierdzono kolejny wzrost wartości naprężeń stycznych (rys. 1c). Analogicznie jak w przypadku zastosowania pola UD o natężeniu $2,2 \text{ W/cm}^2$, odnotowano zwiększenie naprężeń do wartości $3,604 \text{ Pa}$ (osady nieprzefermentowane) oraz $2,031 \text{ Pa}$ (osady w 10 dniu fermentacji i prędkości ścinania 200 s^{-1}).



Rys. 1. Krzywe płynięcia kondycjonowanych osadów ściekowych poddanych fermentacji: a) osady niekondycjonowane, b) osady+UD 40%, c) osady+UD 60%, d) osady+UD 80%, e) osady+UD 100%

Fig. 1. The flow curves of conditioned sewage sludge fermented: a) not conditioning sludges, b) sludges+UD 40%, c) sludges+UD 60%, d) sludges+UD 80%, e) sludges+UD 100%

Kondycjonując osady ściekowe polem ultradźwiękowym o natężeniu 3,2 oraz 3,8 W/cm², zaobserwowano pewne zmiany w wartościach naprężeń (rys. 1d,e). Najwyższe wartości naprężeń odnotowano dla osadów ściekowych w 2 dniu fermentacji, dla których wartość przy prędkości ścinania 200 s⁻¹ wyniosła 6,252 Pa. Analogiczną zależność zaobserwowano przy najwyższym zastosowanym polu UD (3,8 W/cm²), gdzie naprężenia przy prędkości ścinania 200 s⁻¹ były na poziomie 4,937 Pa.

Aproksymację krzywych płynięcia umożliwiają modele reologiczne. Wyznaczenie modeli reologicznych osadów ściekowych przyczynia się do dokładniejszego ich opisu oraz poznania wpływu metod i sposobów kondycjonowania na końcowe parametry. Najprostszym matematycznym modelem reologicznym stosowanym do opisu krzywej płynięcia tych cieczy jest tzw. model potęgowy Ostwalda-de Waele'a [13]:

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

gdzie: k - stała zwana współczynnikiem konsystencji [Pa·s], n - wykładnik potęgi, zwany wykładnikiem płynięcia.

Tabela 1

Wartości parametrów reologicznych dla modelu Ostwalda-de Waele'a osadów ściekowych poddanych kondycjonowaniu i fermentacji; k - współczynnik konsystencji, n - wykładnik potęgi, B - współczynnik korelacji, S - odchylenie standardowe

Table 1

Values of rheological parameters for the model Ostwald-de Waele sludge subjected to conditioning and fermentation; k - factor of consistency, n - exponent, B - correlation coefficient, S - standard deviation

		Dzień fermentacji [d]						
		0	2	4	6	8	10	25
Osady niekondycjonowane	k	0,143	0,094	0,047	0,087	0,049	0,028	0,053
	n	0,521	0,575	0,683	0,584	0,671	0,754	0,629
	B	0,996	0,995	0,994	0,996	0,995	0,992	0,988
	S	0,0331	0,032	0,0352	0,0305	0,0315	0,0366	0,0449
Osady+UD 40%	k	0,53	0,293	0,143	0,162	0,1	0,124	0,172
	n	0,344	0,416	0,498	0,452	0,539	0,501	0,474
	B	0,990	0,983	0,988	0,978	0,990	0,984	0,986
	S	0,0631	0,0758	0,0543	0,0627	0,043	0,0557	0,06
Osady+UD 60%	k	0,541	0,293	0,248	0,15	0,128	0,146	0,238
	n	0,351	0,437	0,428	0,503	0,514	0,484	0,44
	B	0,991	0,990	0,989	0,987	0,985	0,981	0,981
	S	0,0648	0,0646	0,0548	0,059	0,0605	0,0643	0,0788
Osady+UD 80%	k	0,561	1,118	0,616	0,303	0,266	0,198	0,165
	n	0,37	0,32	0,381	0,453	0,457	0,473	0,507
	B	0,988	0,992	0,990	0,959	0,986	0,977	0,985
	S	0,0902	0,0959	0,0941	0,0792	0,083	0,0902	0,0734
Osady+UD 100%	k	0,585	0,693	0,3	0,089	0,098	0,076	0,128
	n	0,382	0,364	0,432	0,574	0,528	0,59	0,539
	B	0,991	0,992	0,983	0,994	0,979	0,993	0,988
	S	0,0882	0,0837	0,0885	0,0378	0,0607	0,0359	0,0609

Stała k , zwana współczynnikiem konsystencji, i n , zwana wykładnikiem płynięcia, są parametrami reologicznymi wyznaczonymi doświadczalnie w określonej temperaturze. Współczynnik k jest miarą opisującą, lepkość badanego substratu. Współczynnik płynięcia n przyjmuje różne wartości. W przypadku $n < 1$ mamy do czynienia z procesem

rozrzedzania ścinaniem, gdy $n > 1$, zagęszczania ścinaniem, natomiast dla $n = 1$ mamy do czynienia z płynami newtonowskimi. W przypadku prowadzonych badań odnotowano dla wszystkich zastosowanych metod kondycjonowania oraz czasów fermentacji wartości współczynnika n poniżej jedności, co oznacza, że badane osady były rozrzedzane ścinaniem. Zaobserwowano również niższe wartości współczynnika n dla osadów modyfikowanych polem ultradźwiękowym w odniesieniu do osadów niekondycjonowanych. Poddanie osadów ekspozycji polem UD spowodowało zwiększenie wartości współczynnika konsystencji k , co świadczy o zwiększeniu ich lepkości. W przypadku osadów modyfikowanych polem o najwyższym zastosowanym natężeniu ($3,8 \text{ W/cm}^2$) wartość współczynnika k była 4-krotnie wyższa w porównaniu do osadów niemodyfikowanych. Poddanie osadów fermentacji niezależnie od sposobu kondycjonowania wpłynęło na obniżenie lepkości osadów w każdym dniu prowadzenia procesu.

Zmiana lepkości, jak również naprężeń wywołana procesem fermentacji wiąże się z ubytkiem suchej masy w osadach. W wyniku zastosowania czynnika kondycjonującego przed stabilizacją osadów stwierdzono zwiększenie suchej masy w każdym dniu procesu. Sumaryczny ubytek suchej masy był najwyższy w przypadku osadów poddanych działaniu polem ultradźwiękowym o natężeniu $3,8 \text{ W/cm}^2$ ($7,68 \text{ g/dm}^3$). Dyspersja kłaczków osadowych wywołana polem ultradźwiękowym powoduje uwolnienie związków organicznych, a w wyniku stabilizacji ich mineralizację, co przekłada się na zwiększoną ilość suchej masy.

Tabela 2
Sumaryczny ubytek suchej masy osadów ściekowych poddanych kondycjonowaniu i fermentacji

Table 2
Total loss of dry mass of sludge undergoing conditioning and fermentation

	Dzień fermentacji [d]						
	0	2	4	6	8	10	25
Osady niekondycjonowane	0	0,48	0,81	0,89	0,94	1,12	1,62
Osady+UD 40%	0	0,35	1,14	1,31	1,51	2,03	2,58
Osady+UD 60%	0	0,76	0,96	1,59	1,89	2,06	2,28
Osady+UD 80%	0	0,19	0,50	1,04	1,68	2,05	4,31
Osady+UD 100%	0	1,41	1,73	2,50	2,75	2,98	7,68

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzonych badań postawiono następujące wnioski końcowe:

- zastosowanie energii ultradźwiękowej w preparowaniu osadów ściekowych powoduje zwiększenie wartości naprężeń stycznych wraz ze wzrostem natężenia pola UD;
- stabilizacja wstępnie kondycjonowanych osadów ściekowych powoduje obniżenie wartości naprężeń stycznych. Najniższe wartości odnotowano w 10 (kolby) oraz 25 (bioreaktor) dobie prowadzenia fermentacji;
- analiza modelu Ostwalda wykazała zwiększenie lepkości (wyrażona współczynnikiem konsystencji) w wyniku zastosowania procesu sonifikacji. Stabilizacja wywołała obniżenie wartości omawianego parametru;

- największy sumaryczny ubytek suchej masy osadów ściekowych poddanych kondycjonowaniu i fermentacji odnotowano przy największym zastosowanym natężeniu pola UD ($3,8 \text{ W/cm}^2$) oraz stabilizacji prowadzonej w bioreaktorze.

Podziękowania

Badania zostały sfinansowane z BS-PB-401/303/12.

Literatura

- [1] Sozański MM, Kempa ES, Grocholski K, Bień J. The rheological experiment in sludge properties research. *Water Sci Technol.* 1997;36:69-78. DOI: 10.1016/S0273-1223(97)00671-9.
- [2] Wolny L, Wolski P, Zawieja I. Rheological parameters of dewatered sewage sludge after conditioning. *Desalination.* 2008;382-387. DOI: 10.1016/j.desal.2007.01.175.
- [3] Fryźlewicz-Kozak B, Długosz O. Właściwości tiksotropowe wybranych osadów biologicznych. *Inż Ap Chem.* 2015;54:31-32. www. http://inzynieria-aparatura-chemiczna.pl/pdf/2015/2015-2/InzApChem_2015_2_031-032.pdf.
- [4] Ruiz-Hernando M, Labanda J, Lorens J. Effect of ultrasonic waves on the rheological features of secondary sludge. *Biochem Eng J.* 2010;52:131-136. DOI: 10.1016/j.bej.2010.07.012.
- [5] Ruiz-Hernando M, Martinez-Elorza G, Labanda J, Lorens J. Dewaterability of sewage sludge by ultrasonic, thermal and chemical treatments. *Chem Eng J.* 2013;230:102-110. DOI:10.1016/j.cej.2013.06.046.
- [6] Seyssieq I, Ferasse JH, Roche N. State-of-the-art: rheological characterization of wastewater treatment sludge. *Biochem Eng J.* 2003;16:41-56. DOI: 10.1016/S1369-703 X(03)00021-4.
- [7] Markis F, Baudez J, Parthasarathy R, Slatter P, Eshtiagi N. Rheological characterisation of primary and secondary sludge: Impact of solids concentration. *Chem Eng J.* 2014;253: 526-537. DOI: 10.1016/j.cej.2014.05.085.
- [8] Wolski P, Zawieja I. Effect of ultrasound field on dewatering of sewage sludge. *Arch Environ Protect.* 2012;38:25-31. DOI: 10.2478/v10265-012-0015-7.
- [9] Ruiz-Hernando M, Labanda J, Lorens J. Effect of ultrasonic waves on the rheological features of secondary sludge. *Biochem Eng J.* 2010;52:131-136. DOI: 10.1016/j.bej.2010.07.012.
- [10] Zawieja I, Wolny L. Effect of sonicator power on the biodegradability of sewage sludge. *Annual Set Environ Protect.* 2011;13:1719-1730. www. http://ros.edu.pl/images/roczniki/archive/pp_2011_110.pdf.
- [11] Zawieja I, Wolny L, Wolski P. Wpływ procesu hydrolizy ultradźwiękowej na generowanie lotnych kwasów tłuszczowych w procesie kwaśnej fermentacji osadów nadmiernych, *Inż Ochr Środow.* 2009;3:207-217. www. <https://is.pcz.pl/static/pdf/2009/zeszyt%20nr%203/T%2012%20nr%203%20Zawieja.pdf>.
- [12] Charakterystyka osadów ściekowych. Oznaczanie suchej pozostałości i zawartości wody. PN-EN 12880.
- [13] Ferguson J, Kembłowski Z. Reologia stosowana płynów. Łódź: MARCUS; 1995.

THE IMPACT OF THE INITIAL DISINTEGRATION ON THE RHEOLOGICAL PARAMETERS OF THE FERMENTED SEWAGE SLUDGE

Institute of Environmental Engineering, Faculty of Infrastructure and Environment
Czestochowa University of Technology

Abstract: Yield point, viscosity, shear stress are technological parameters useful in practice to control the pumping of sludge, flow and other processes related to their processing. Increasing the efficiency of dewatering causes a decrease in their ability to flow through an increase in the limits of flow and thus the shear stress values. The variability of the stress and the viscosity is the result of changes in the structure occurring in the sludge during the flow. Any change in the structure of sludge by conditioning affected the same for their rheological parameters. The aim of the study was to determine the dependence of shear velocity gradient (flow curves) pre-conditioned ultrasonic field sludge, and then fermented. In the process of sonication, four of the ultrasonic wave intensity *i.e.*: 2.2; 2.7; 3.2; 3.8 W/cm^2 were applied, and the time of sonication equals 600 s. The fermentation process was carried out in 10 glass flask with a capacity of 0.5 dm^3 which were models the digester. To describe the flow

curves used the simplest mathematical rheological model so. power model Ostwald. It also presents the total loss of dry mass of sludge undergoing stabilization. The studies reported an increase in shear stress with the application of higher intensity ultrasonic wave field. Reducing stress values were observed for fermented sludge with each day of anaerobic stabilization process.

Keywords: sewage sludge, rheological parameters, ultrasonic field, fermentation

