

Beata FRYŻLEWICZ-KOZAK, Justyna JAMRÓZ, Małgorzata PACHOLEK

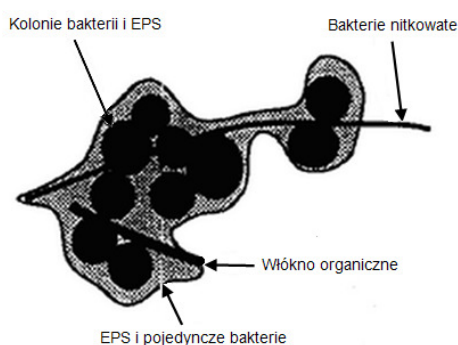
e-mail: beata@chemia.pk.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Badania właściwości reologicznych ścieków

Wstęp

Osad biologiczny z oczyszczalni ścieków jest układem o złożonej strukturze. Cząstki znajdujące się w osadzie w wodzie tworzą zawiesiny rzeczywiste, które można określić, jako układy trwałe dzięki ruchom Browna, które w nich zachodzą. Posiadają również granicę płynięcia, która z kolei jest uzależniona od kłaczkowatej struktury osadu (Rys. 1). Ważne jest określenie reologii osadu, która dostarcza informacji o jego przepływie. Cechy fizyczne, fizykochemiczne, biologiczne i skład wpływają na zachowanie osadu sprawiając, że zachowuje się on za każdym razem inaczej [Tixier i in., 2003a; 2003b; Ruiz-Hernando M. i in., 2014].



Rys. 1. Przykładowy schemat budowy kłaczkowego osadu czynnego, (EPS – pozakomórkowe substancje polimerowe) [Keiding, Nielsen, 1997]

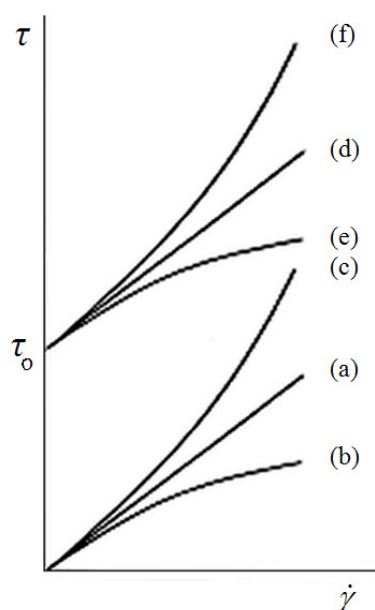
Aby określić parametry fizyczne osadu najczęściej bada się jego gęstość; kształt; skład granulometryczny cząstek w strukturze osadu; parametry struktury, takie jak objętość i powierzchnię właściwą mikroporów, mezoporów, gęstość osadów, objętość zajęta przez cząstki, ich wzajemny układ i powiązanie; temperaturę; uwodnienie osadów; zawartość wody wolnej, kapilarnej i adhezyjnej [Sozański i Jeż-Walkowiak, 1993].

Badania reologiczne w technologii ścieków wiążą się z nienewtonowskim charakterem płynięcia osadów ściekowych. Występuje zależność pomiędzy strukturą osadów biologicznych, a ich właściwościami reologicznymi. Struktura osadu ma wpływ na sposób usuwania zawartej w nich wody, w tym celu osady poddaje się kondycjonowaniu. Przy projektowaniu instalacji rurociąkowej do transportu hydraulicznego osadów należy uwzględnić ich właściwości reologiczne. W przypadku ich pominięcia mogą wystąpić znaczne błędy projektowe, a w konsekwencji trudności eksploatacyjne całego systemu unieszkodliwiania osadów. W rurociągach przepływ osadów może odbywać się w liniowej bądź nieliniowej strefie ich krzywych płynięcia. Przyczyną tego może być m.in. zmiana uwodnienia, składu i właściwości domieszek fazy stałej, rodzaju i wielkości dawek stosowanych flokulantów.

Modele reologiczne umożliwiają aproksymację krzywych płynięcia [Sozański i Jeż-Walkowiak, 1993]. Na rys. 2 przedstawiono krzywe płynięcia płynów z granicą płynięcia i bez tej granicy. Granica płynięcia występuje najczęściej w układach dwu- lub wielofazowych, w których co najmniej jedna faza rozproszona jest w formie cząstek lub pęcherzyków w ciągłej fazie ciekłej. Po osiągnięciu granicznego naprężenia stycznego struktura układu ulega całkowitemu i natychmiastowemu zniszczeniu i zaczyna on płynąć jak płyn lepki. Z drugiej strony, gdy naprężenie styczne staje się mniejsze od wartości granicy płynięcia, następuje całkowita i natychmiastowa odbudowa struktury [Ferguson i Kembłowski, 1995].

Na rys. 2 przedstawiono krzywe charakteryzujące płyny:

- newtonowskie,
- rozrzedzane ścinaniem (pseudoplastyczne), dla których naprężenie styczne wzrasta mniej niż proporcjonalnie do wzrostu szybkości ścinania,
- zagęszczane ścinaniem (dylatacyjne), dla których naprężenie styczne wzrasta bardziej niż proporcjonalnie do wzrostu szybkości ścinania,
- lepkoplastyczne Bingham'a,
- e) i f) lepkoplastyczne nieliniowe (niebinghamowskie).



Rys. 2. Krzywe płynięcia z granicą płynięcia i bez tej granicy [Ferguson i Kembłowski, 1995]

Model Ostwalda-de Waele'a jest najprostszym modelem reologicznym opisującym krzywe typu (a) – (c):

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (1)$$

Dla parametru:

- $n = 1$ - model opisuje krzywą płynięcia płynu newtonowskiego (a),
- $n < 1$ - krzywą płynięcia płynu rozrzedzanego ścinaniem (b),
- $n > 1$ - krzywą płynięcia płynu zagęszczanego ścinaniem (c).

Model Bingham'a opisuje krzywą typu (d), przy czym płyny wykazują płynięcie dopiero po przyłożeniu naprężenia stycznego (τ_0), a dla mniejszych naprężeń zachowują się jak ciała stałe plastyczne. W tym przypadku równanie reologiczne ma postać:

$$\tau - \tau_0 = \eta_{pl} \frac{dv}{dr} \quad (2)$$

Modele Herschela-Bulkley'a, Cassona i inne [Ferguson i Kembłowski, 1995], które opisują krzywe (e) i (f) są najczęściej trójparametrowe.

W tab. 1 zamieszczono przykładowe, stosowane w praktyce modele reologiczne [Sozański i Jeż-Walkowiak, 1993; Schramm, 1994; Seyssieq i in., 2003].

Do badań osadu czynnego i zawiesin zaleca się stosować lepkościomierze rotacyjne, w których można prowadzić badania przez dłuższy okres czasu przy stałych gradientach prędkości lub naprężenia

niach stycznych, dla dużego zakresu lepkości pozornej. Uzyskane wyniki pomiarów reologicznych aproksymuje się za pomocą odpowiednich modeli reologicznych, które następnie można wykorzystać w projektowaniu transportu, przechowywaniu ścieków, czy funkcjonowaniu oczyszczalni ścieków [Fryźlewicz-Kozak i Tal-Figiel, 2008; Yang i in., 2009].

Tab. 1. Wybrane modele reologiczne [Sozański i Jeż-Walkowiak, 1993; Schramm, 1994; Seyssiecq i in., 2003]

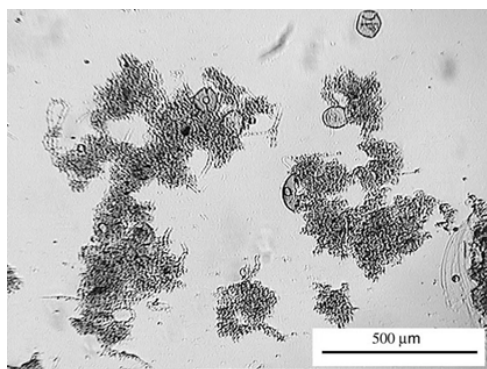
Autor	Równanie krzywej płynięcia	Wzór na lepkość
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$	$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_p$
Ostwald - de-Waele	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$	$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1}$
Casson	$\frac{1}{\tau^p} = \frac{1}{\tau_0^p} + (\eta_p \dot{\gamma})^{\frac{1}{p}}$	$\eta^{1/p} = \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}\right)^{1/p} + (\eta_p)^{1/p}$
Vočadlo	$\frac{1}{\tau^n} = \tau_0^n + (K \dot{\gamma})$	-

Celem niniejszej pracy była aproksymacja otrzymanych doświadczalnie krzywych płynięcia za pomocą modeli matematycznych oraz określenie parametrów reologicznych badanych osadów czynnych i określenie korelacji między nimi.

Badania doświadczalne

Materiały i aparatura

Badane osady czynne (Rys. 3) pochodziły z kolumno-przemysłowej oczyszczalni ścieków z okolic Krakowa. Stężenie suchej masy osadu (SMO) wynosiło od 5 do 60 kg/m³. Stężenie suchej masy ogólnej i organicznej w poszczególnych próbkach oznaczono metodą wagową wg normy [PN-72/C-04559.02, 1972].



Rys. 3. Przykładowe zdjęcie mikroskopowe badanego osadu

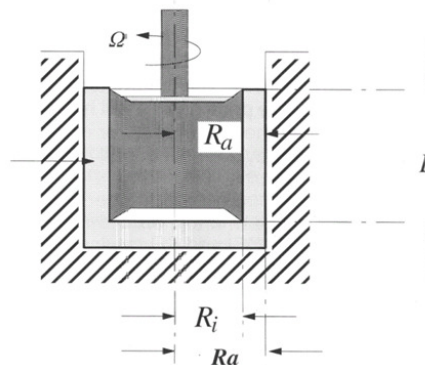
Do badań użyto reometru rotacyjnego RS75 firmy Haake, wykorzystując czujnik pomiarowy typu współosiowych cylindrów w układzie Seattle. Układ ten składa się z nieruchomego cylindra zewnętrznego oraz z cylindrów wewnętrznych, które są wirującymi wałcami (Rys. 4).

Metodyka

Badany osad umieszczano w szczelnie pierścieniowej między cylindrami. W celu zmniejszenia wpływu zjawiska tiksotropii pomiary reologiczne prowadzono zawsze w ten sam sposób [Seyssiecq i in., 2003]. Pomiary właściwości reologicznych prowadzono w trybie CS (Controlled Stress), w którym kontrolowane jest naprężenie ścinające. Błąd pomiaru wynosił ±1 % maksymalnej wartości pomiaru. Badania

wykonywano w temperaturze 293 ±0,1 K.

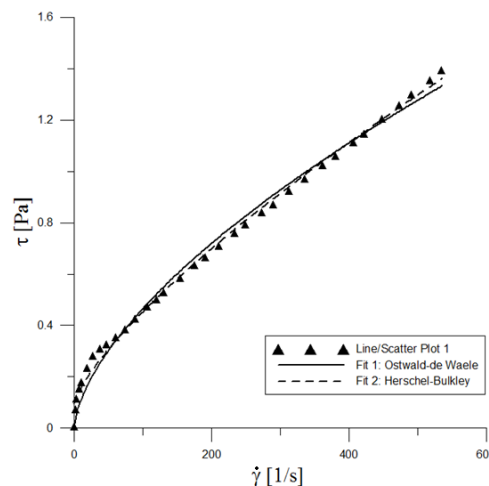
Badania reologiczne pozwalają na określenie postępowania za ściekami o różnym stężeniu suchej masy. Uzyskane wyniki aproksymuje się za pomocą modeli matematycznych w celu poznania wartości parametrów reologicznych. Wiedza na temat własności reologicznych jest niezbędna w celu poznania procesów zachodzących w osadach [Sozański i Jeż-Walkowiak, 1993; Lotito i in., 1997; Dai i in., 2014].



Rys. 4. Układ współosiowych cylindrów (R_i - promień cylindra ruchomego, R_a - promień cylindra nieruchomego, L - wysokość cylindra ruchomego)

Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie uzyskanych wyników badań sporządzono krzywe płynięcia, które opisano następującymi modelami teoretycznymi: Bingham, Ostwalda - de Wael'a, Herschela-Bulkley'a, Cassona i Vočadlo. Najlepsze dopasowanie przebiegu krzywych płynięcia i lepkości dały modele: Ostwalda - de Waele'a, Herschela-Bulkley'a, ze średnim współczynnikiem korelacji odpowiednio 0,988 i 0,993. Aproksymację przebiegu krzywej płynięcia za pomocą tych modeli dla przykładowej próbki ścieku przedstawiono na rys. 5 i 6.

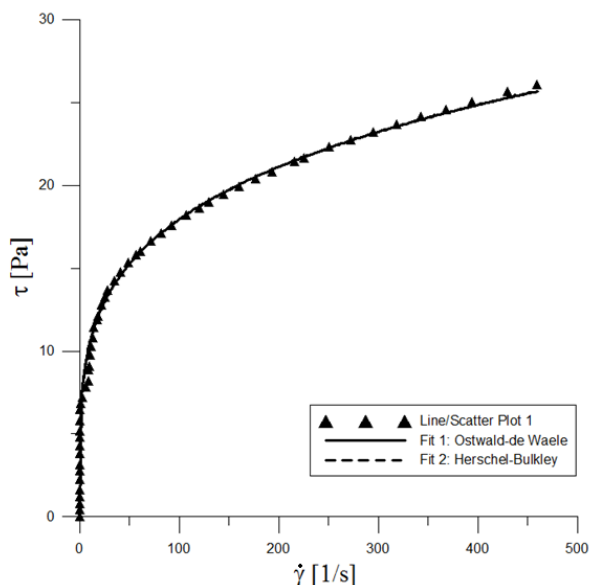


Rys. 5. Aproksymacja przebiegu krzywej płynięcia za pomocą modeli Ostwalda - de Waele'a i Herschela-Bulkley'a dla próbki ścieku o stężeniu suchej masy osadu 6 kg/m³

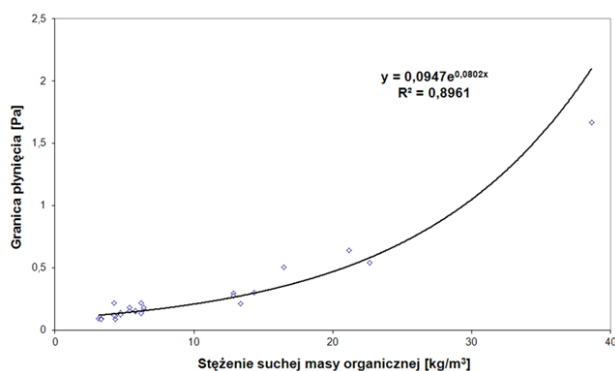
Najczęściej stosowanym modelem do opisu reologicznych właściwości ścieków jest model Herschela - Bulkleya. Natomiast model Bingham jest stosowany do osadów o niskim stężeniu [Tixier i in., 2003a; 2003b; Markis i in., 2014].

Na rys. 7 przedstawiono zależność wartości granicy płynięcia (τ₀) od stężenia suchej masy organicznej w temperaturze 293K.

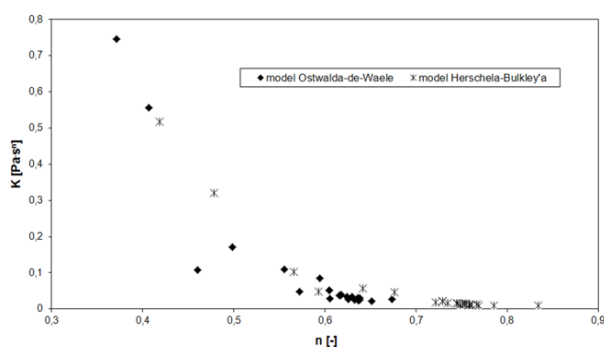
Na rys. 8 przedstawiono zależność stałej konsystencji K od wskaźnika płynięcia płynu n dla modeli Herschela-Bulkley'a i Ostwalda - de Waele'a w temperaturze 293K. Dla tych modeli zależność pomiędzy parametrami ma charakter potęgowy.



Rys. 6. Aproksymacja przebiegu krzywej płynięcia za pomocą modeli Ostwalda - de Waele'a i Herschla-Bulkleya dla próbki ścieku o stężeniu suchej masy osadu 34 kg/m³



Rys. 7. Zależność granicy płynięcia τ_0 od stężenia suchej masy organicznej w temperaturze 293K



Rys. 8. Zależność stałej konsystencji K od wskaźnika płynięcia płynu n dla modeli Herschla-Bulkleya i Ostwalda - de Waele'a w temperaturze 293K

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań osadów ściekowych, w zakresie stężenia suchej masy osadu od 5 do 60 kg/m³ w temperaturze 293 K można stwierdzić, że:

- badane osady ściekowe należały do płynów lepkoplastycznych niebinghamowskich, posiadających granicę płynięcia.

Wielkość granicy płynięcia osadów rośnie wraz ze wzrostem zawartości związków organicznych,

- do opisu właściwości reologicznych najlepszy okazał się model *Herschla-Bulkleya*, a średnia wartość współczynnika korelacji wyniosła 0,993,
- stała konsystencji malała potęgowo ze wzrostem wartości wskaźnika płynięcia płynu.

OZNACZENIA

- K – stała konsystencji, [Pa·sⁿ]
- n – wskaźnik płynięcia płynu
- p – parametr reologiczny
- $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania, [s⁻¹]
- η – lepkość, [Pa·s]
- η_p – lepkość plastyczna, [Pa·s]
- τ – naprężenie ścinające, [Pa]
- τ_0 – granica płynięcia, [Pa]

LITERATURA

- Ferguson J., Kembłowski Z., 1995. *Reologia stosowana płynów*, MARCUS, Łódź
- Fryźlewicz-Kozak B., Tal-Figiel B., 2008. Theoretical and experimental analysis of floc structure of an activated sludge under sonication. *Chem. Proc. Eng.* **29**, 87-98.
- Keiding K., Nielsen H., 1997. Desorption of organic macromolecules from activated sludge: Effect of ionic composition. *Water Research*, **31**, 1665-1672. DOI:10.1016/S0043-1354(97)00011-0.
- Ruiz-Hernando M., Simón F.-X., Labanda J., Llorens J., 2014. Effect of ultrasound, thermal and alkali treatments on the rheological profile and water distribution of waste activated sludge. *Chem. Eng. J.*, **255**, 14–22. DOI: 10.1016/j.cej.2014.06.036
- Lotito V., Spinosa L., Mininni G., Antonacci R., 1997. The rheology of sewage sludge at different steps of treatment. *Water Sci. Tech.*, **36**, 11, 79-85.
- Markis F., Baudez J., Parthasarathy R., Slatter P., Eshtiagh N. 2014. Rheological characterisation of primary and secondary sludge: Impact of solids concentration. *Chem. Eng. J.*, **253**, 526–537. DOI: 10.1016/j.cej.2014.05.085
- PN-72/C-04559.02, 1972. *Zawiesiny ogólne, mineralne i organiczne*
- Schramm G., 1994. *A practical approach to rheology and rheometry*, Gebroeder HAAKE GmbH, Karlsruhe
- Seyssecq, I., Ferasse, J.H. and Roche, N., 2003. State-of-the-art: rheological characterization of wastewater treatment sludge. *Biochem. Eng. J* **16**, 41 – 56. DOI:10.1016/S1369-703X(03)00021-4
- Sozański M., Jeż-Walkowiak 1993. *Charakterystyki reologiczne osadów i ich znaczenie w rozwiązywaniu problemów projektowych i eksploatacyjnych* [w:] *Bień J.,(red.). Materiały Konf. Naukowo-Technicznej, Częstochowa*, 153-173.
- Tixier N., Guibaud G., Baudu M., 2003a. Determination of some rheological parameters for the characterization of activated sludge. *Bioresource Technol.*, **90**, 215-220, DOI: 10.1016/S0960-8524(03)00109-3
- Tixier N., Guibaud G., Baudu M, 2003b. Towards a rheological parameter for activated sludge bulking characterization. *Enzyme and Microbial Technol.*, **33**, 292-298. DOI: 10.1016/S0141-0229(03)00124-8
- Dai X., Gai X., Dong B., 2014. Rheology evolution of sludge through high-solid anaerobic digestion. *Bioresource Technol.*, **174**, 6–10. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.09.122
- Yang F., Bick A., Shandalov S., Brenner A., Oron G., 2009. Yield stress and rheological characteristics of activated sludge in an airlift membrane bioreactor. *J. Membrane Sci.*, **334**, 83–90. DOI:10.1016/j.memsci.2009.02.022

