

EFEKTYWNOŚĆ UWALNIANIA ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH W WYNIKU HYDRODYNAMICZNEJ DEZINTEGRACJI OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Agnieszka Garlicka¹, Monika Żubrowska-Sudoł¹

¹ Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa, e-mail: agnieszka.garlicka@is.pw.edu.pl

STRESZCZENIE

Głównym celem eksperymentu było wyznaczenie efektywności uwalniania z kłaczków osadu czynnego związków organicznych w wyniku hydrodynamicznej dezintegracji, prowadzonej przy różnych gęstościach energii (140–700 kJ/l). Jako wskaźniki efektywności procesu wykorzystano stopień dezintegracji (DD) oraz jednostkową wydajność uwalniania do cieczy osadowej związków organicznych (W_{ChZT}). Analiza otrzymanych wyników pozwoliła stwierdzić, że zwiększanie gęstości energii skutkowało wzrostem wartości rozpuszczonego ChZT. Najbardziej intensywne uwalnianie związków organicznych do cieczy osadowej wystąpiło, gdy gęstość energii zwiększono ze 140 do 420 kJ/l. Ponadto dowiedziono, że prowadząc dezintegrację przy gęstości energii wynoszącej 420 kJ/l, uzyskuje się maksymalne wartości wydajności uwalniania związków organicznych (23,2–30,0 mg ChZT/kJ).

Słowa kluczowe: dezintegracja hydrodynamiczna, osady ściekowe, stopień dezintegracji, uwalnianie związków organicznych

THE EFFECTIVENESS OF THE ORGANIC COMPOUNDS RELEASED DUE TO THE HYDRODYNAMIC DISINTEGRATION OF SEWAGE SLUDGE

ABSTRACT

The main objective of this experiment was to determine the effectiveness of the organic compounds release from activated sludge flocs, due to the hydrodynamic disintegration conducted at different energy densities (140–700 kJ/l). Indicators of the efficiency used for the process were the disintegration degree (DD) and the unit efficiency of organic compounds released (W_{COD}). Analysis of the results revealed that increasing the energy density resulted in an increase of concentration of soluble COD. The most intense release of organic compounds occurred when the energy density was increased from 140 to 420 kJ/l. Moreover, it was proved that by conducting disintegration using an energy density of 420 kJ/l results in a maximal efficiency of organic compound release (23.2–30.0 mg ChZT/kJ).

Keywords: hydrodynamic disintegration, sewage sludge, degree of disintegration, release of organic compounds

WPROWADZENIE

Proces dezintegracji polega na zniszczeniu struktury osadu czynnego w wyniku zastosowania dodatkowej energii, co w efekcie prowadzi do uwolnienia do cieczy osadowej związków stanowiących budulec kłaczków osadu, w tym rozpuszczonych związków organicznych [Zielewicz 2008]. W praktyce zostało to wykorzystane przede wszystkim do intensyfikacji procesu fermentacji metanowej. Poddając procesowi dezintegracji część strumienia osadów nadmiernych

kierowanego do komór fermentacyjnych można uzyskać wyższą produkcję biogazu, niższe stężenie suchej masy organicznej w osadzie przefermentowanym, który równocześnie charakteryzuje się lepszą podatnością na procesy odwadniania [Lee et al. 2013, Petkovšek et al. 2015, Suschka et al. 2007]. Dezintegracja osadów wymieniana jest również jako metoda pozyskiwania alternatywnego źródła węgla organicznego do wspomaganie usuwania ze ścieków związków biogenych [Park et al. 2011, Żubrowska-Sudoł and Walczak 2014]. Istnieje wiele sposobów dezintegracji osa-

dów ściekowych różniących się pochodzeniem energii wprowadzanej do układu. Wśród stosowanych metod wyróżnia się: mechaniczne, fizyczne, chemiczne, biologiczne oraz hybrydowe. O wyborze sposobu dezintegracji osadów decyduje z jednej strony jego efektywność, z drugiej zaś związane z jego realizacją koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

W Zakładzie Zaopatrzenia w Wodę i Odprowadzania Ścieków Politechniki Warszawskiej od siedmiu lat prowadzone są prace badawcze nad procesem hydrodynamicznej dezintegracji osadów nadmiernych [m.in. Żubrowska-Sudoł 2013, Żubrowska-Sudoł and Walczak 2013, Żubrowska-Sudoł and Walczak 2014], wskazywanym jako znacząco tańsze rozwiązanie w porównaniu do szeroko stosowanej metody ultradźwiękowej [Biradar et al. 2010]. Przewodnym tematem tych prac była ocena możliwości wykorzystania zdeintegrowanych osadów jako alternatywnego źródła węgla organicznego dla wspomaganie usuwania ze ścieków związków biogenych [Żubrowska-Sudoł and Walczak 2014]. Dla zdefiniowania ilości energii zużytej w procesie dezintegracji wykorzystano wskaźnik jakim jest gęstość energii (\mathcal{E}_L), czyli ilość energii odniesiona do jednego litra dezintegrowanego osadu [kJ/l]. W przeprowadzonych do tej pory eksperymentach związki organiczne pozyskiwano przy \mathcal{E}_L wynoszącej 70, 140, 210, 280 i 350 kJ/l. Proces uwalniania związków organicznych dla tego zakresu gęstości energii został już dobrze rozpoznany, a wyniki badań zaprezentowano w licznych publikacjach [m.in. Żubrowska-Sudoł 2013, Żubrowska-Sudoł and Walczak 2013, Żubrowska-Sudoł and Walczak 2014]. Obecnie rozpoczęto prace badawcze nad zdefiniowaniem parametrów procesu hydrodynamicznej dezintegracji osadów nadmiernych w kontekście wykorzystania go do intensyfikacji fermentacji metanowej. W artykule przedstawiono wyniki pierwszego etapu tych prac, których celem była ocena uwalniania związków organicznych w szerokim zakresie gęstości energii 140–700 kJ/l.

MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Charakterystyka osadów

Do eksperymentów wykorzystano zagęszczone osady nadmierne pochodzące z mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków „Czajka”

w Warszawie o RLM = 2 100 000 M, zapewniającej usunięcie na drodze biologicznej związków C, N i P. Stężenie suchej masy osadów użytych do badań zawierało się w zakresie 4,79–5,53%.

Stanowisko badawcze i aparatura

W badaniach wykorzystano laboratoryjny dezintegrator hydrodynamiczny składający się z wielofunkcyjnego wirnika (patent Nr 214335), umieszczonego w zbiorniku o średnicy $\varnothing = 220$ mm, wysokości $H = 400$ mm i pojemności $V = 10$ litrów. Wirnik napędzany jest przykręcanym do pokrywy zbiornika silnikiem trójfazowym budowy kołnierkowej o mocy $P = 2,2$ kW i prędkości obrotowej $n = 2800$ min⁻¹.

Proces dezintegracji w zastosowanym urządzeniu przebiega następująco: osady ściekowe poddawane obróbce zasysane są do wnętrza wirnika poprzez usytuowaną w jego osi komorę centralną, skąd pod wpływem siły odśrodkowej przemieszczają się promieniowymi kanałami do wąskiego kanału obwodowego, zasilając komory cylindryczne, usytuowane symetrycznie wokół osi wirnika, przy jego zewnętrznej krawędzi, z których wyrzucane są na zewnątrz wirnika przez otwory wylotowe. Podczas przemieszczania się cieczy przez wąski kanał obwodowy oraz komory cylindryczne, występuje w niej zjawisko kawitacji, skutkujące zmianami fizyko-chemicznymi w dezintegrowanym medium.

Dezintegrację prowadzono zawsze dla 10 litrowej próby, dobrze wymieszanych, zagęszczonych osadów nadmiernych. Podczas eksperymentu w sposób ciągły kontrolowano zużycie energii elektrycznej i gdy odpowiadało ono gęstości energii: 140, 280, 420, 560 i 700 kJ/l z urządzenia pobierano 500ml próbki zdeintegrowanych osadów. Dla każdej z tych prób wyznaczano: wartość rozpuszczonego ChZT, stopień dezintegracji osadu (DD) oraz wskaźnik upłynnienia osadu (k_{dl}). Wartości rozpuszczonego ChZT określano także dla prób osadu surowego (nie poddanego procesowi dezintegracji).

W ramach eksperymentu wykonano 3 serie badawcze (S1, S2 i S3), każdą z wykorzystaniem innej partii osadów ściekowych.

Metodyka analityczna

Analizę stężenia suchej masy osadu wykonano metodą wagową według normy PN-EN 12880. Stopień dezintegracji osadu oraz wskaź-

nik upłynnienia osadu wyznaczono zgodnie z metodyką zaproponowaną odpowiednio przez Müllera [1996] i Zielewicz [2008]. Wartości rozpuszczonego chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT) określono zgodnie z metodyką testów kuwentowych firmy HACH. Do odczytu prób posłużył spektrofotometr firmy HACH model DR/2500. Ciecz osadową uzyskiwano poprzez 30 minutowe wirowanie w wirówce MPW-350 o współczynniku wirownia 19621, a następnie ciśnieniowe sączenie przez sączki membranowe o średnicy porów 0,45 μm .

Metodyka obliczeniowa

Stożenie dezintegracji (DD) [Müller 1996]:

$$D = \frac{ChZT_1 - ChZT_2}{ChZT_3 - ChZT_2} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: DD – stopień dezintegracji [%],
 $ChZT_1$ – wartość rozpuszczonego ChZT w próbie poddanej procesowi hydrodynamicznej dezintegracji [mgO_2/l],
 $ChZT_2$ – wartość rozpuszczonego ChZT w próbie osadu surowego (nie poddanego procesowi dezintegracji) [mgO_2/l],
 $ChZT_3$ – wartość rozpuszczonego ChZT w próbie poddanej chemicznej hydrolizie w 0,5 molowym roztworze NaOH przez 22 h w temperaturze 20°C, zapewniając ciągłe mieszanie próby (modyfikacja metodyki Müllera [1996] zaproponowana przez Nickel and Neis [2007]) [mgO_2/l].

Wskaźnik upłynnienia (k_{dl}) [Zielewicz 2008]:

$$k_{dl} = \frac{ChZT_{cd}}{ChZT_{cn}} \quad (2)$$

gdzie: k_{dl} – wskaźnik upłynnienia [-],
 $ChZT_{cd}$ – wartość rozpuszczonego ChZT w próbie poddanej procesowi hydrodynamicznej dezintegracji [mgO_2/l],
 $ChZT_{cn}$ – wartość rozpuszczonego ChZT w próbie osadu surowego [mgO_2/l].

Wydajność uwalniania związków organicznych (W_{ChZT})

W_{ChZT} obrazuje ilość uwolnionych związków organicznych odniesioną do energii użytej do procesu dezintegracji [Żubrowska-Sudoł 2013]. Parametr ten wyliczono z zależności:

$$W_{ChZT} = \frac{ChZT_{\varepsilon_L} - ChZT_0}{\varepsilon_L} [\text{mgChZT/kJ}] \quad (3)$$

gdzie: $ChZT_{\varepsilon_L}$ – wartość rozpuszczonego ChZT w próbie poddanej procesowi hydrodynamicznej dezintegracji przy danej gęstości energii [mgO_2/l],
 $ChZT_0$ – wartość rozpuszczonego ChZT w próbie osadu surowego [mgO_2/l],
 ε_L – wartość gęstości energii przy jakiej prowadzono proces dezintegracji [kJ/l].

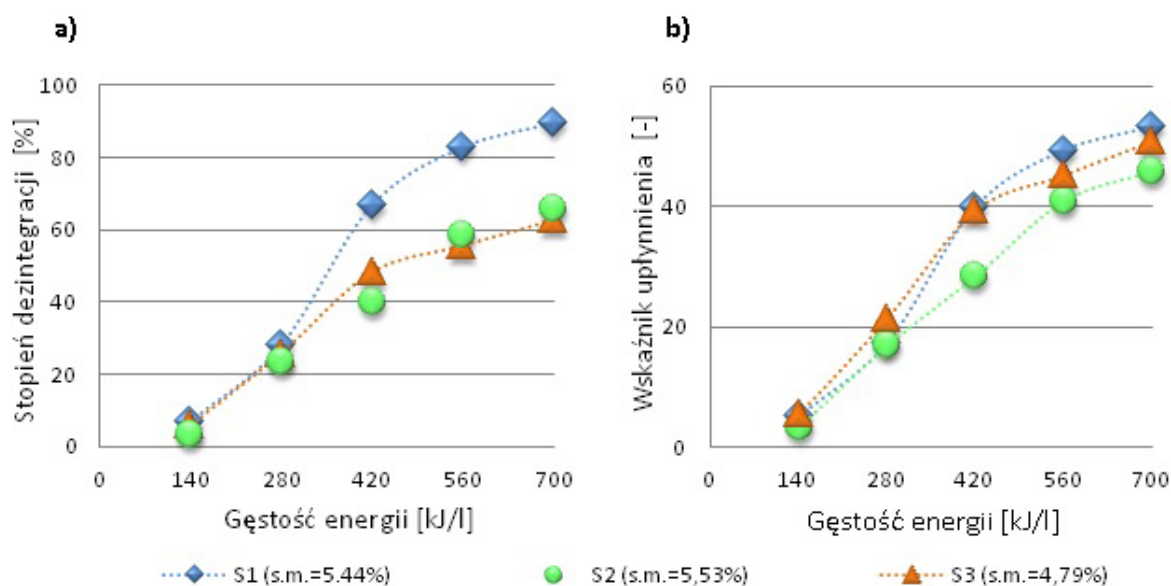
WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Analiza zmian stopnia dezintegracji osadów (DD) oraz wskaźnika upłynnienia (k_{dl})

Najczęściej stosowanym wskaźnikiem do oceny efektywności procesu dezintegracji osadów ściekowych jest stopień dezintegracji (DD). Jego wartości wyznaczone w badaniach własnych przedstawiono na rysunku 1a, a w tabeli 1 porównano je z rezultatami uzyskanymi przez inne grupy badawcze. Dodatkowo na rysunku 1b zaprezentowano wartości wskaźnika upłynnienia (k_{dl}).

Wraz ze wzrostem gęstości energii dochodziło do coraz efektywniejszej dezintegracji osadów, o czym świadczył wzrost wartości DD oraz k_{dl} . Przy najniższej z badanych ε_L (140 kJ/l) stopień dezintegracji przyjmował wartości z zakresu 3,3–7,0%, a dla 700 kJ/l osiągnął wartości kształtujące się w przedziale 62,6–89,7%. Odpowiednio wartości wskaźnika upłynnienia wynosiły 3,2–5,5 oraz 45,8–53,1. Daje się również zauważyć, że wzrost wartości DD i k_{dl} nie był proporcjonalny do zmian gęstości energii. Taką tendencję odnotowały również inne grupy badawcze zajmujące się procesem dezintegracji osadów ściekowych [m.in. Biradar 2010, Żubrowska-Sudoł et al. 2010]. Warto zwrócić uwagę, że we wszystkich seriach badawczych, najbardziej intensywny wzrost DD (8,6–12,3 krotny) wystąpił, gdy ε_L zwiększono ze 140 do 420 kJ/l .

Porównując wartości stopnia dezintegracji uzyskane w badaniach własnych z wynikami opublikowanymi w pracach [Müller 2000, Zhang et al. 2007] (tabela 1) daje się zauważyć, że hydrodynamiczna dezintegracja osadów nadmiernych prowadzona przy gęstości energii większej bądź równej 280 kJ/l pozwalała na uzyskanie dużo wyższych wartości DD niż dezintegracja ultradźwiękowa. Przykładowo Müller [2000] dla



Rys. 1. Wpływ gęstości energii na **a)** stopień dezintegracji osadu **b)** wskaźnik upłynienia
Fig. 1. The influence of energy density on **a)** the sludge disintegration degree **b)** the indicator of liquefaction

gęstości energii równej 690 kJ/l osiągnął stopień dezintegracji na poziomie 25,0%, podczas gdy w badaniach własnych dla E_L wynoszącej 700 kJ/l DD zawierał się w zakresie 62,6–89,7%. Podobne spostrzeżenia można poczynić porównując wyniki badań własnych z rezultatami uzyskanymi przez Kampasa i wsp. [2007], którzy przy $E_L = 670$ kJ/l uzyskali w rozwłókniaczu tylko 33,0% stopień dezintegracji. Dane przedstawione w tabeli 1. wskazują również, że stopień dezintegracji osiągnięty dla hydrodynamicznej dezintegracji osadów ściekowych prowadzonej przy $E_L = 420$ kJ/l był porównywalny do odnotowanego przez Zawieję i wsp. [2014], którzy analizowali dezintegrację chemiczną przy dawce 0,6 g NaOH/g s.m.org. oraz do wartości DD uzyskiwanych w pracy [Sahinkaya 2015] opisującej dezintegrację hybrydową łączącą w sobie działanie na osad kwasem H_3PO_4 oraz nadźwiękawianie (5–30 minut). Porównując zmiany stopnia dezintegracji opisywane przez Nowicką and Machnicką [2014] dla procesu zamrażania i rozmrażania przy różnym stosunku objętościowym osadu nadmiernego do suchego lodu z badaniami własnymi (tabela 1), zauważono, że aby uzyskać porównywalne wartości tego wskaźnika wystarczającym byłoby prowadzenie procesu hydrodynamicznej dezintegracji przy $E_L = 280$ kJ/l. Fang [2015] natomiast w swojej pracy przedstawił zmiany DD uzyskane podczas homogenizacji wysokociśnieniowej. Uzyskane przez naukowca wartości stopnia dezintegracji były porównywalne do wartości DD uzyskanych w badaniach własnych dla E_L mniejszej od 420 kJ/l.

Analiza uwalniania związków organicznych wyrażonych jako ChZT

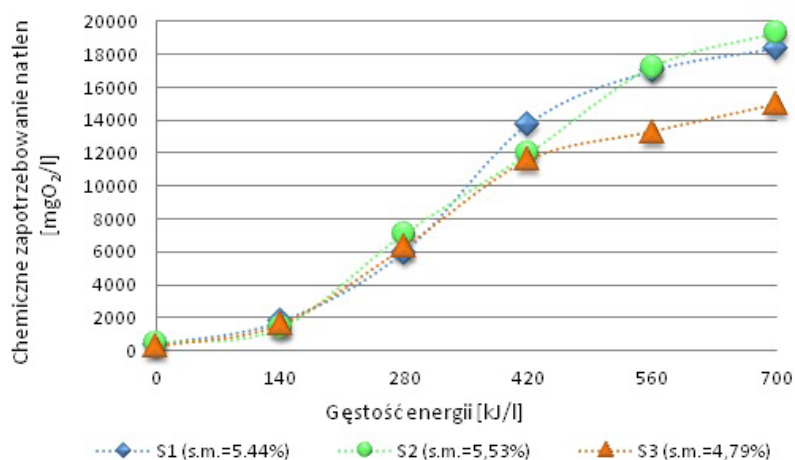
Już analiza stopnia dezintegracji wykazała, że w wyniku procesu dezintegracji osadu nadmiernego do cieczy osadowej uwalniane są związki organiczne. Dokumentuje to również rysunek 2 przedstawiający wartości rozpuszczonego ChZT w funkcji gęstości energii. Wyraźny wzrost analizowanego wskaźnika obserwowano już w próbie poddanej procesowi dezintegracji przy gęstości energii 140 kJ/l. Wartości rozpuszczonego ChZT wzrosły wówczas do 1362–1756 mgO_2/l z poziomu 294–422 mgO_2/l odnotowanego dla osadu surowego. Jednak najbardziej intensywne uwalnianie związków organicznych do cieczy osadowej wystąpiło, gdy gęstość energii zwiększono ze 140 do 280 kJ/l i z 280 do 420 kJ/l. Po czym w dwóch przeprowadzonych seriach badawczych (S1 i S3) odnotowano wyraźne spowolnienie analizowanego procesu. Podobna tendencja wystąpiła również w serii 2, jednak zmniejszenie intensywności uwalniania związków organicznych miało miejsce przy wyższej gęstości energii (560 kJ/l).

Na rysunku 3 zaprezentowano zmiany wartości rozpuszczonego ChZT w zależności od energii właściwej (E_w) zużytej w procesie dezintegracji. Również i w tym przypadku daje się zauważyć „progową” wartość E_w , po przekroczeniu której zdecydowanie zwiększa się intensywność uwalniania z kłaczków osadu czynnego związków organicznych. Wynosiła ona ok. 2000 kJ/kg s.m.. Na podstawie przedstawionych wyników można również stwierdzić, że we wszystkich seriach

Tabela 1. Porównanie wartości stopnia dezintegracji uzyskanego w badaniach własnych z wynikami innych grup badawczych

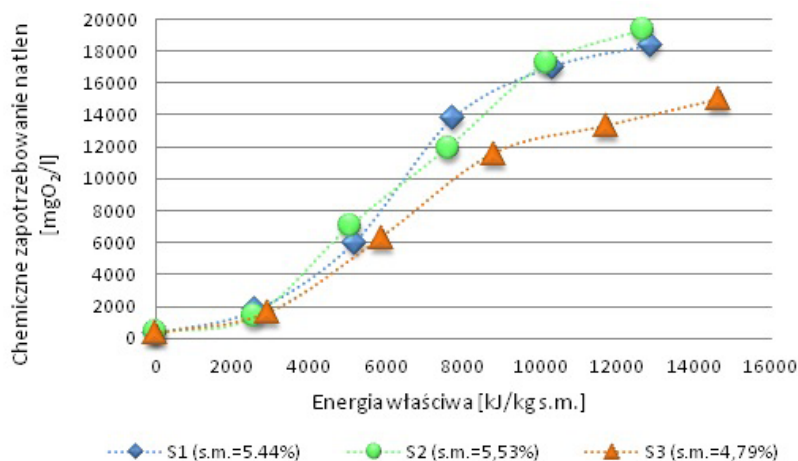
Table 1. Comparison of the sludge disintegration degree obtained in our study with the results of other research groups

Metoda dezintegracji	Parametry procesu	DD [%]	Pozycja literatury
Hydrodynamiczna	ϵ_L [kJ/l]	-	badania własne
	140	3,3 ± 7,0	
	280	23,2 ± 28,0	
	420	40,1 ± 66,8	
	560	55,6 ± 82,9	
Rozwókniacz	ϵ_L [kJ/l]	-	[Kampas et al. 2007]
	70 ¹	12,0 ²	
	150 ¹	17,0 ²	
	670 ¹	33,0 ²	
Ultradźwięki	ϵ_L [kJ/l]	-	[Müller 2000]
	170 ¹	9,0 ²	
	280 ¹	14,0 ²	
Ultradźwięki	ϵ_L [kJ/l]	-	[Zhang et al. 2007]
	150 ¹	6,0 ²	
	300 ¹	10,0 ²	
	450 ¹	22,0 ²	
	550 ¹	25,0 ²	
Homogenizacja wysokociśnieniowa	ciśnienie [MPa]	-	[Fang et al. 2015]
	20	23,0 ²	
	40	32,0 ²	
	60	38,0 ²	
Hybrydowa (zakwaszanie H ₃ PO ₄ i ultradźwięki)	zakwaszanie H ₃ PO ₄ do pH=2 + ultradźwięki [min]	-	[Sahinkaya 2015]
	5	27,0 ²	
	10	40,0 ²	
	20	48,0 ²	
	30	51,0 ²	
Chemiczna (alkalizacja NaOH)	dawka - 0,6 g NaOH/g s.m.org.	59,0	[Zawieja et al. 2014]
Zamrażanie/ rozmrażanie osadu nadmiernego suchym lodem	stosunek osadu do suchego lodu	-	[Nowicka and Machnicka 2014]
	1 : 0,25	13,0	
	1 : 0,5	22,0	
	1 : 0,75	27,0	
	1 : 1	32,0	



Rysunek 2. Wartości rozpuszczonego chemicznego zapotrzebowania na tlen w funkcji gęstości energii zużytej w procesie dezintegracji

Figure 2. Concentration of soluble chemical oxygen demand as a function of the energy density consumed during disintegration



Rys. 3. Wartości rozpuszczonego chemicznego zapotrzebowania na tlen w funkcji energii właściwej zużytej w procesie dezintegracji

Fig. 3. Concentration of soluble chemical oxygen demand as a function of the specific energy consumed during disintegration

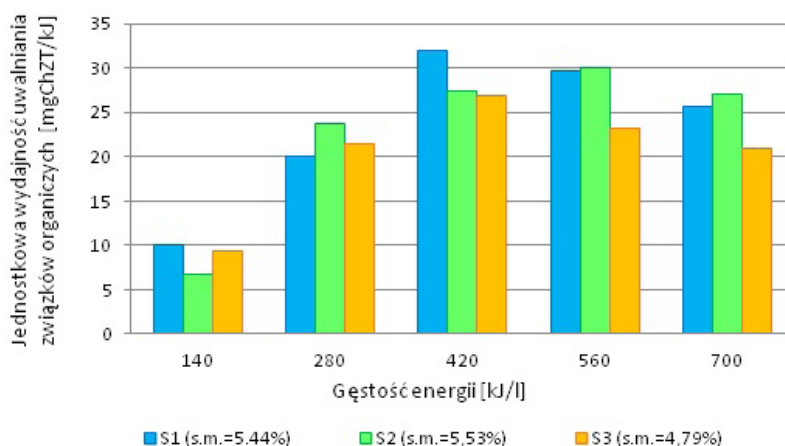
badawczych najbardziej intensywny wzrost wartości rozpuszczonego ChZT wystąpił, gdy ϵ_w zawierała się w przedziale od ok. 2000 kJ/kg s.m. do ok. 9000 kJ/kg s.m.

Zarówno przebieg zmian wartości rozpuszczonego ChZT w funkcji gęstości energii, jak i w funkcji energii właściwej wskazuje, że dla podobnego zużycia energii zawsze najmniejsze wartości analizowanego wskaźnika odnotowywano w trzeciej serii badawczej. Bazując na wynikach opublikowanych w pracy [Żubrowska-Sudoł and Walczak 2013] z dużym prawdopodobieństwem można sądzić, że miało na to wpływ niższe stężenie suchej masy w osadach poddawanych wówczas procesowi dezintegracji.

Jednostkowa wydajność uwalniania związków organicznych (W_{ChZT})

Na rysunku 4. przedstawiono jednostkową wydajność uwalniania związków organicznych, ilustrującą ilość uwolnionej materii organicznej (wyrażonej w ChZT) w przeliczeniu na ilość energii zużytej w procesie dezintegracji.

We wszystkich przeprowadzonych seriach badawczych zauważono, że zwiększenie gęstości energii ze 140 do 420 kJ/l pozwoliło na sukcesywny wzrost wydajności uwalniania związków organicznych. W seriach S1 i S3 dla ϵ_L równej 420 kJ/l odnotowano maksymalną wartość W_{ChZT} (odpowiednio 31,9 i 26,8 mg ChZT/kJ), a dalsze



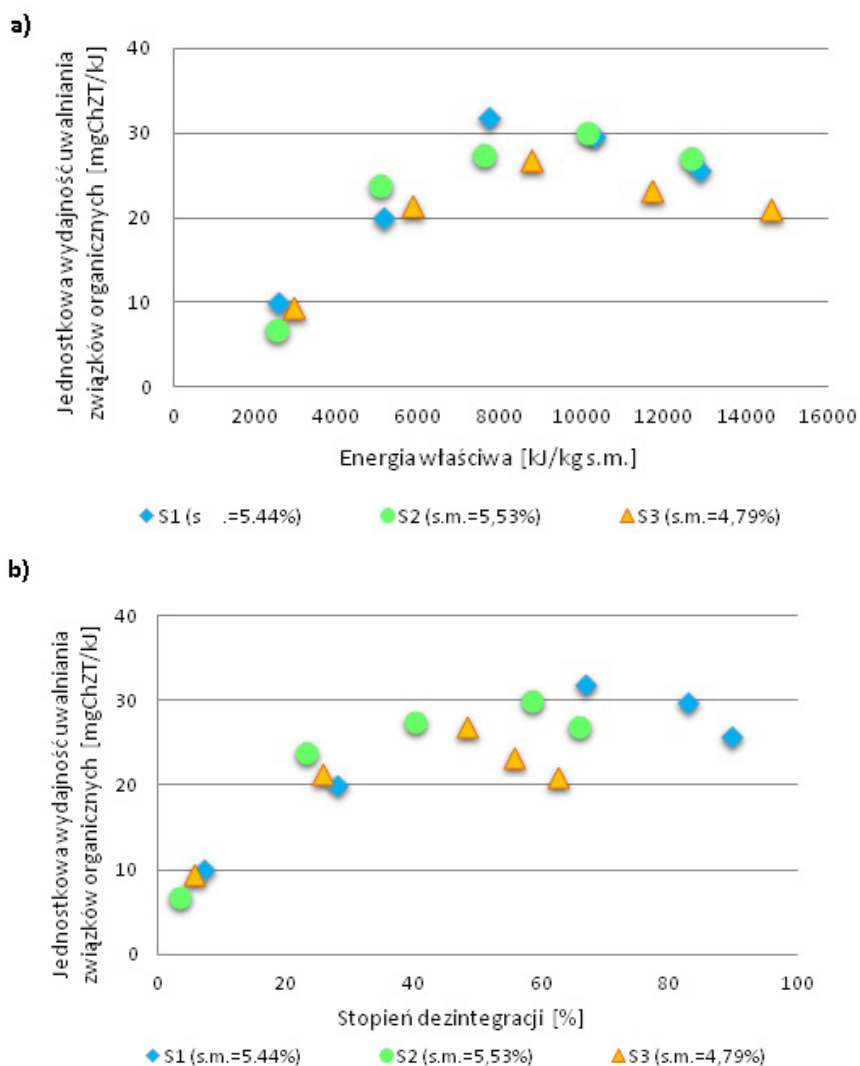
Rys. 4. Jednostkowa wydajność uwalniania związków organicznych w funkcji gęstości energii zużytej w procesie dezintegracji

Fig. 4. The unit efficiency of organic compounds released as a function of the energy density consumed during disintegration

zwiększanie gęstości energii skutkowało zmniejszeniem wydajności uwalniania związków organicznych, było zatem nieuzasadnione ekonomicznie. W serii S2 maksymalna wartość W_{ChZT} (30,0 mg ChZT/kJ) wystąpiła dla $\epsilon_L = 560 \text{ kJ/l}$. Warto przy tym zwrócić uwagę, że była ona tylko o 8,5 % większa od wartości W_{ChZT} uzyskanej dla 420 kJ/l. Wydaje się zatem zasadne sformułowanie wniosku, że najbardziej korzystne pod względem ekonomicznym byłoby pozyskiwanie związków organicznych przy gęstości energii 420 kJ/l. Przyjmując cenę energii elektrycznej na poziomie 0,33 zł/kWh (wartość uzyskana od eksploatatora oczyszczalni ścieków wielkości RLM = 2 100 000 M), koszt pozyskania związków organicznych dla $\epsilon_L = 420 \text{ kJ/l}$ kształtowałby się w zakresie 3,06–3,93 zł/kgChZT. Dane przedstawione

na rysunku 4 wskazują również, że najmniej opłacalne byłoby prowadzenie procesu dezintegracji przy gęstości energii 140 kJ/l. Koszt pozyskiwania związków organicznych wzrasta wówczas do 9,09–13,66 zł/kgChZT.

Wartości wydajności uwalniania związków organicznych odniesiono również do energii właściwej oraz stopnia dezintegracji (Rysunek 5). Analizując dane przedstawione na rysunku 5a daje się zauważyć, że z ekonomicznego punktu widzenia najbardziej korzystne wartości W_{ChZT} uzyskano dla ϵ_w zawierającej się w przedziale 7700–10000 kJ/kg s.m.. Natomiast na podstawie rysunku 5b można określić „progowe” wartości DD po przekroczeniu których obserwuje się spadek wydajności uwalniania związków organicznych. Dla serii S1, S2 i S3 wynosiły one odpowiednio 67%, 59% oraz 48%.



Rys. 5. Jednostkowa wydajność uwalniania związków organicznych w zależności od a) energii właściwej b) stopnia dezintegracji

Fig. 5. The unit efficiency of COD released as a function of a) the specific energy b) the sludge disintegration degree

WNIOSKI

- Proces hydrodynamicznej dezintegracji zagęszczonych osadów nadmiernych, prowadzony przy zwiększanej sukcesywnie w zakresie 140–700 kJ/l gęstości energii, powodował uwolnienie z kłaczków osadu czynnego coraz większej ilości rozpuszczonych związków organicznych wyrażonych ChZT.
- Najbardziej intensywne uwalnianie związków organicznych do cieczy osadowej wystąpiło, gdy gęstość energii zwiększono ze 140 do 420 kJ/l.
- Biorąc pod uwagę wartości wydajności uwalniania związków organicznych wyznaczone dla analizowanych poziomów gęstości energii, najbardziej opłacalnym byłoby prowadzenie procesu hydrodynamicznej dezintegracji przy ϵ_L równej 420 kJ/l. Wartości W_{ChZT} dla tego poziomu gęstości energii kształtowały się w zakresie 23,2–30,0 mg ChZT/kJ, a odpowiadający im koszt pozyskania związków organicznych wyniósł 3,06–3,93 zł/kgChZT.

Podziękowania

Badania zostały sfinansowane w ramach grantu dziekańskiego nr. 504/02643 nt. „Analiza wpływu hydrodynamicznej dezintegracji osadów ściekowych na ich podatność na procesy hydroлізу i acydyfikacji”.

LITERATURA

1. Biradar, P.M., Roy, S.B., D'Souza, S.F., Pandit, A.B., 2010. Excess cell mass as an internal carbon source for biological denitrification. *Bioresource Technology* (101): 1787–1791.
2. Fang, W., Zhang, P., Ye, J., Wu, Y., Zhang, H., Liu, J., Zeng, G., 2015. Physicochemical properties of sewage sludge disintegrated with high pressure homogenization. *International Biodeterioration & Biodegradation* (102): 126–130.
3. Ilgyu Lee, Jong-In Han, 2013. The effects of waste-activated sludge pretreatment using hydrodynamic cavitation for methane production. *Ultrasonics Sonochemistry* (20): 1450–1455.
4. Kampas P., Parsons S.A., Pearce P., Ledoux S., Vale P., Churchley J., Cartmell E. 2007. Mechanical sludge disintegration for the production of carbon source for biological nutrient removal, *Water Research* (41): 1734–742.
5. Müller J. 2000. Disintegration as a key-step in sewage sludge treatment. *Water Science and Technology* (41), 8: 123–130.
6. Müller J., 1996. *Mechanischer Klärschlamm-aufschluß*, Dissertation, Shaker-Verlag, Aachen.
7. Nickle K., Neis U., 2007. Ultrasonic disintegration of biosolids for improved biodegradation. *Ultrasonic Sonochemistry* (14): 450–455.
8. Nowicka, E., & Machnicka, A., 2014. Wpływ dezintegracji osadu nadmiernego suchym lodem na uwalnianie materii organicznej i nieorganicznej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (8): 307–310.
9. Park, K.Y., Lee, J.W., Song, K.G., Ahn, K.H., 2011. Ozonolysate of excess sludge as a carbon source in an enhanced biological phosphorus removal for low strength wastewater. *Bioresource Technology* (102): 2462–2467.
10. Petkovšek, M., Mlakar, M., Levstek, M., Stražar, M., Širok, B. and Dular, M., 2015. A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration. *Ultrasonics Sonochemistry* (26): 408–414.
11. Sahinkaya, S. 2015. Disintegration of municipal waste activated sludge by simultaneous combination of acid and ultrasonic pretreatment”. *Process Safety and Environmental Protection* (93): 201–205.
12. Suschka J., Grübel K., Machnicka A., 2007. Możliwości intensyfikacji procesu fermentacji beztlenowej osadów ściekowych poprzez dezintegrację osadu czynnego w procesie kawitacji mechanicznej. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (3): 26–28.
13. Zawieja I., Wolny L., 2014. Wpływ stopnia dezintegracji osadów ściekowych poddanych alkalicznej modyfikacji na wartość jednostkowej produkcji biogazu. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* t. 17, nr 3: 503–512.
14. Zhang P., Zhang G., Wang W., 2007. Ultrasonic treatment of biological sludge: Floc disintegration, cell lysis and inactivation. *Bioresource Technology*, vol. 98, 207–210.
15. Zielewicz E., 2008. Dezintegracja ultradźwiękowa i hybrydowa osadu nadmiernego; Termiczna mineralizacja osadu ściekowego. V Konferencja naukowo-techniczna, Nowogród k. Łomży, 3–5 września 2008 r. Warszawa, Wydaw. Seidel-Przywecki.
16. Zielewicz, E., 2008. Dezintegracja osadu nadmiernego. *Forum Eksploatatora* 6 (39): 56–59.
17. Żubrowska-Sudoł, M., Podedworna, J., Heidrich, Z., Krawczyk, P., Szczygieł, J., 2010. Experimental feasibility study on application of a mechanical cavitation inducer for disintegration of wastewater sludges. *Environmental Engineering III*, Taylor & Francis Group, London, pp. 257–261.
18. Żubrowska-Sudoł M., 2013. *Mechaniczna dezinte-*

- gracja osadów ściekowych jako metoda pozyskiwania związków organicznych dla intensyfikacji procesu denitryfikacji. *Prace Naukowe, Inżynieria Środowiska* (67). Oficyna Wydawnicza PW.
19. Żubrowska-Sudoł M., Walczak J. 2013. Wpływ stężenia suchej masy zagęszczonych osadów nadmiernych na efektywność pozyskiwania związków organicznych w procesie mechanicznej dezintegracji – badania wstępne. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (11): 446–449.
20. Żubrowska-Sudoł M., Walczak J., 2014. Doświadczenia w wykorzystaniu zdeintegrowanych osadów nadmiernych jako źródła węgla organicznego w procesach biologicznego usuwania ze ścieków związków biogenych. *Instal* (4): 52–56.