

POLEPSZENIE WŁASNOŚCI GRAWITACYJNYCH OSADU NADMIERNEGO PODDANEGO WSTĘPNEJ OBRÓBCE

Ewelina Nowicka¹, Klaudiusz Andrzej Grúbel¹, Alicja Machnicka¹

¹ Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, Wydział Nauk o Materiałach i Środowisku, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, e-mail: enowicka@ath.bielsko.pl; kgrubel@ath.bielsko.pl; amachnicka@ath.bielsko.pl

STRESZCZENIE

Powstawanie osadów ściekowych jest nieuniknioną konsekwencją procesów oczyszczania ścieków, a ich unieszkodliwianie i utylizacja wymaga wiedzy, rozwiązań technologicznych i technicznych. Zastosowanie procesów wstępnej obróbki/kondycjonowania pozwala na uzyskanie poprawy własności mechanicznych osadów ściekowych. W ostatniej dekadzie można odnotować wiele prac badawczych z całego świata skoncentrowanych na nowych metodach kondycjonowania osadów tj. procesach dezintegracji, wśród których stosuje się destrukcję mechaniczną, chemiczną i biologiczną. Pomimo odmiennego działania każdej z metod (wprowadzona energia, zjawiska cieplne, zachodzące reakcje chemiczne, oddziaływania mechaniczne) ich wspólnym celem jest niszczenie struktury kłaczków osadu czynnego oraz mikroorganizmów, co skutkuje zmianami własności osadów i cieczy nadosadowej. W artykule przedstawiono wpływ dezintegracji mikrofalowej i zamrażania/rozmarzania suchym lodem na wybrane własności grawitacyjne osadu czynnego nadmiernego. Określono parametry charakterystyczne dla procesu sedymentacji osadu tj. prędkość opadania i zagęszczania, indeks gęstości osadu i indeks objętości osadu oraz zmiany zachodzące w cieczy nadosadowej. Przeprowadzone badania wykazały skuteczność stosowania wybranych metod dezintegracji osadu w odniesieniu do poprawy właściwości grawitacyjnych i stały się przyczynkiem do określenia skutecznej metodyki wstępnej kondycjonowania osadów.

Słowa kluczowe: fala elektromagnetyczna, suchy lód, osad czynny nadmierny, własności grawitacyjne osadu.

IMPROVING THE GRAVITATIONAL PROPERTIES OF SEWAGE SLUDGE BY PRETREATMENTS

ABSTRACT

The formation of sludge is an inevitable consequence of wastewater treatment processes. Their disposal and utilization requires knowledge on technology and engineering. The application of pretreatment processes/conditioning allows to obtain better mechanical properties of sludge. In the last decade a lot of research from around the world focused on new methods of conditioning of sludge can be noticed, i.e. The processes of disintegration, of which the destruction of the mechanical, chemical and biological. Despite different activities of each method (introduced energy, thermal phenomena, chemical reactions, mechanical), their common goal is the destruction of activated sludge floc structure and micro-organisms, which result in changes of properties in sediment and supernatant liquid. The influence of the disintegration of the microwave and freezing/thawing dry ice on selected properties of gravitational surplus activated sludge were presented. Characteristic parameters determined sludge sedimentation processes, i.e. the rate of descent and compaction density index sediment and sludge volume index and changes in the supernatant liquid. The study showed the efficacy of selected methods of sludge disintegration with regard to improving the properties of gravity and becoming a contribution to the determination of the effective methods of deposits' preconditioning.

Keywords: electromagnetic wave, dry ice, surplus activated sludge, gravitational sludge properties.

WPROWADZENIE

W dobie rozwoju miast i polepszającej się stopy życiowej człowieka pojawia się problem z powstawaniem ogromnych ilości osadów ściekowych, a tym samym problem z ich przeróbką. Zarówno kompleksowość jak i czasochłonność procesów przeróbki osadów ściekowych sprawia, iż spełnienie wymagań związanych z ich zagospodarowaniem wymusza coraz większe nakłady finansowe, niekiedy przekraczające nawet 50% ogólnych kosztów eksploatacyjnych. Poszukuje się więc efektywnych procesów, które pozwoliłyby na zagospodarowanie osadów bezpiecznych dla środowiska oraz ograniczyć narastające koszty [20].

Jednym z zastosowanych rozwiązań są procesy dezintegracji osadów ściekowych. Dezintegracje polegają na niszczeniu struktury osadu jak również na rozerwaniu osłon komórkowych przy pomocy sił zewnętrznych i uwolnieniu substancji organicznych, nieorganicznych jak również wewnątrzkomórkowych polimerów do fazy płynnej osadu [18].

Dezintegracje osadów ściekowych wykorzystuje się do poprawy ich jakości, efektywności procesów rozkładu biologicznego oraz zwiększenia stopnia rozkładu substancji trudno biodegradowalnych. Przyczyniają się również do ograniczenia zjawiska pienienia, puchnięcia osadu w procesach oczyszczania ścieków oraz obniżenia indeksu osadu. Procesy dezintegracyjne doprowadzają do zniszczenia kłaczków i zmniejszenia objętości osadu, a tym samym do zwiększenia udziału cząstek koloidalnych.

Wśród stosowanych i badanych metod dezintegracji wykorzystuje się głównie: ozonowanie [3], alkalizowanie [10], zakwaszanie [24], użycie wysokiego ciśnienia [8], rozdrabnianie mechaniczne [16], enzymy [21], ultradźwięki [25], promieniowanie mikrofalowe [6] oraz zamrażanie/rozmarzanie [15, 19].

Promieniowanie mikrofalowe stanowi składową widma elektromagnetycznego, którego długość fali wynosi od 1 mm do 1 m, co odpowiada częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz, która najczęściej wykorzystywana jest w radarach i telewizji satelitarnej czy telefonach komórkowych [26]. Spektrum widma zawarte jest w przedziale pomiędzy promieniowaniem podczerwonym, a falami radiowymi (krótkimi) – jest to zakres odpowiadający częstotliwości od $3 \cdot 10^9$ do $3 \cdot 10^{12}$ Hz, a długości λ od 10^{-4} do 10^{-1} m [12].

Promieniowanie mikrofalowe opiera się na interakcji, jaka zachodzi pomiędzy wzajemnie przenikającymi drganiami elektrycznymi i magnetycznymi. Energia mikrofalowa indukuje ruch cząsteczkowy poprzez rotację dipoli i migrację jonów. Wchłonięte kwanty energii, wzbudzając cząsteczki powodują przejście zawartych w nich elektronów na wyższy poziom energetyczny [13]. Cechą odróżniającą mikrofałę od pozostałych składowych widma elektromagnetycznego jest to, iż wywołują ruch molekuł w zmiennym polu elektrycznym w taki sposób, że nie następuje uszkodzenie wytrzymałości (trwałości) wiązań chemicznych, które posiadają większą energię niż energia niesiona przez mikrofałę [9].

Zamrażanie/rozmarzanie z wykorzystaniem suchego lodu jest skuteczną techniką dezintegracji stosowaną w odwadnianiu osadów ściekowych na co zwrócił uwagę Vesilind i Martel [17, 23]. Odwadnianie osadów ściekowych za pomocą zamrażania/rozmarzania dokonuje się poprzez wydzielenie frakcji stałych i ciekłych, w trakcie powstawania kryształków lodu. Stwierdzono również, że mechanizm ten sprzyja przekształceniu kłaczków w postać bardziej zwartą, zbitą [4].

Suchy lód to dwutlenek węgla w stanie stałym, który powstaje przy rozprężaniu ciekłego dwutlenku węgla w warunkach normalnych (temperatura 273 K, ciśnienie 1013,25 hPa). Suchy lód sublimuje w temperaturze $-78,5^{\circ}\text{C}$ i przy ciśnieniu 1013,25 hPa. Jego ciepło sublimacji wynosi 573 kJ, co powoduje, że jest on ok. 3,3 razy efektywniejszym czynnikiem chłodniczym niż lód wodny (przy tej samej objętości). Jego ciężar właściwy mieści się w zakresie od $1,2 \text{ kg/dm}^3$ do $1,6 \text{ kg/dm}^3$, a jego twardość w skali Mohsa wynosi 2, co odpowiada twardości gipsu. Jest bezwodny, niepalny, nietoksyczny oraz nie posiada smaku ani zapachu.

W artykule przedstawiono wpływ dezintegracji mikrofalowej i zamrażania/rozmarzania suchym lodem na wybrane własności grawitacyjne osadu czynnego nadmiernego.

MATERIAŁ I METODA

Materiałem badawczym był osad czynny nadmierny (z osadnika wtórnego) o stężeniu suchej masy – średnio $-11,81 \text{ g/dm}^3$, pochodzący z oczyszczalni ścieków zlokalizowanej na terenie województwa śląskiego, stosującej zintegrowany system biologicznego usuwania związków

organicznych, fosforu i azotu (EBNR) ze ścieków. Usuwanie związków biogenych ze ścieków zachodzi z wykorzystaniem sektorów beztlenowych, anoksycznych i tlenowych. Oczyszczalnia została zaprojektowana dla przepływu ścieków 120 000 m³/d. Natężenie dopływu ścieków do tej oczyszczalni wynosi ok. 90 000 m³/d, czas zatrzymania ścieków jest ok. 14-sto dniowy, a stężenie substancji zawieszonych w bioreaktorze znajduje się w przedziale 4,32–4,64 g/dm³.

WSTĘPNA OBRÓBKA OSADU CZYNNEGO NADMIERNEGO

Dezintegracja mikrofalowa

Proces dezintegracji osadu czynnego nadmiernego (próbka o objętości 500 cm³) przeprowadzono przy użyciu fali elektromagnetycznej (mikrofal) o częstotliwości 2,45 GHz i mocy 900 W. Czas ekspozycji osadu czynnego nadmiernego na promieniowanie mikrofalowe wynosił: 120 s, 180 s, 240 s i 300 s.

Dezintegracja termiczna suchym lodem

Do dezintegracji osadu czynnego nadmiernego (próbka o objętości 500 cm³) suchym lodem zastosowano następujące stosunki objętościowe osadu do suchego lodu, tj.: 1 : 0,25; 1 : 0,5; 1 : 0,75; 1 : 1. Osad nadmierny o temperaturze pokojowej wymieszano z określoną powyżej objętością suchego lodu. Następnie próbki poddano rozmrożeniu w temperaturze pokojowej, aż do całkowitego wysublimowania suchego lodu.

Pomiar opadania oraz prędkości zagęszczania osadu

Opadanie osadów obserwowano w cylindrach o pojemności $V = 1000 \text{ cm}^3$ i powierzchni przekroju wynoszącej $F = 26,4 \text{ cm}^2$. Zakres badań obejmował określenie kinetyki sedymentacji opartej na krzywych opadania osadu i prędkości zagęszczania. Dodatkowo wykonano oznaczenia zmian mętności cieczy nadosadowej, co pozwoliło potwierdzić destrukcję kłaczków i mikroorganizmów osadu czynnego nadmiernego.

W próbkach osadu, zarówno w kontrolnych jak i tych poddanych procesowi dezintegracji, na podstawie Tchobanoglous'a i in. [22], wykonano obliczenia:

- Indeksu gęstości osadu na podstawie wzoru:

$$I. G. O = \frac{m}{V \cdot 10} [\text{g}/\text{cm}^3] \quad (1)$$

gdzie: m – masa zawiesin ogólnych w próbce [g/dm³],
 V – objętość osadu odczytana po 30 minutach sedymentacji próbki o objętości 1000 cm³ [cm³/dm³].

- Indeksu objętości osadu na podstawie wzoru:

$$I. O. O = \frac{1}{I.G.O} [\text{cm}^3/\text{g}] \quad (2)$$

- Prędkości zagęszczania na podstawie wzoru:

$$v = \frac{V_r - V_n}{t_n} [\text{mm}/\text{s}] \quad (3)$$

gdzie: V_r – wysokość słupa osadu użyta w procesie sedymentacji [400 mm],
 V_n – objętość osadu dla n czasu sedymentacji [mm],
 t_n – czas sedymentacji [s].

Przeprowadzono 5 serii badawczych, z których wyliczono średnią arytmetyczną.

WYNIKI I DYSKUSJA

Zagęszczanie osadów wykorzystywane jest do przetwarzania osadów wstępnych, nadmiernych lub ich mieszanin. Polega na sedymentacji cząstek osadu oraz ich komprymacji pod wpływem działania siły ciężkości [2], co prowadzi do zwiększenia zawartości suchej masy w osadzie, a w konsekwencji do znacznego zmniejszenia jego objętości [14].

Uzyskane wyniki badań potwierdzają korzystny wpływ analizowanych metod dezintegracji jako czynnika intensyfikującego proces zagęszczania. Wydłużanie czasu działania mikrofal oraz zwiększanie objętości suchego lodu do osadu nadmiernego skutkuje likwidacją pęcznienia (zmniejszeniem objętości) i flotacji osadów oraz zmianą własności sedymentacyjnych w stosunku do osadu niezdezintegrowanego (tab. 1).

Kondycjonowanie osadu nadmiernego energią pola elektromagnetycznego i zestalonym ditlenkiem węgla, powoduje wzrost I.G.O w stosunku do próbki osadu nie poddanego dezintegracji w zależności od zastosowanego czasu działania mikrofal i stosunku objętościowego osadu do suchego lodu (rys. 1).

I.G.O. definiuje się jako masę zawiesin ogólnych wyrażoną w gramach, jaka przypada na objętość 100 cm³ osadu poddanego 30 minutowemu procesowi sedymentacji [7].

Tabela 1. Zmiana objętości osadu (cm^3) po 30 minutach sedymentacji w wyniku wstępnego kondycjonowania
Table 1. Changes in the volume of sludge (cm^3) after 30 minutes of sedimentation as a result of preconditioning

Czas oddziaływania mikrofal [s]	Objętość osadu (cm^3) po 30 minutach sedymentacji	Dawka suchego lodu do osadu	Objętość osadu (cm^3) po 30 minutach sedymentacji
Osad czynny niedezintegrowany	910	osad czynny niedezintegrowany	910
120	808	1 : 0,25	860
180	753	1 : 0,5	690
240	748	1 : 0,75	620
300	715	1 : 1	430

Wzrost I.G.O. spowodowany był zmianą stosunków wodnych w próbkach i rozerwaniem kłaczków osadu, co przyczyniło się do ich wstępnego rozproszenia.

Destrukcja (mikrofalowa i termiczna suchym lodem) kłaczków i mikroorganizmów osadu nadmiernego powodowała uwalnianie wody związanej oraz wody związanej biologicznie, co przyczyniło się do szybszego odwadniania i lepszego zagęszczania osadu. I.G.O. wzrósł w procesie dezintegracji o 0,20 i 0,63 g/cm^3 odpowiednio dla promieniowania mikrofalowego (300 sekund) i zamrażania/rozmarzania (stosunek objętościowy osadu do suchego lodu 1 : 1) (rys. 1).

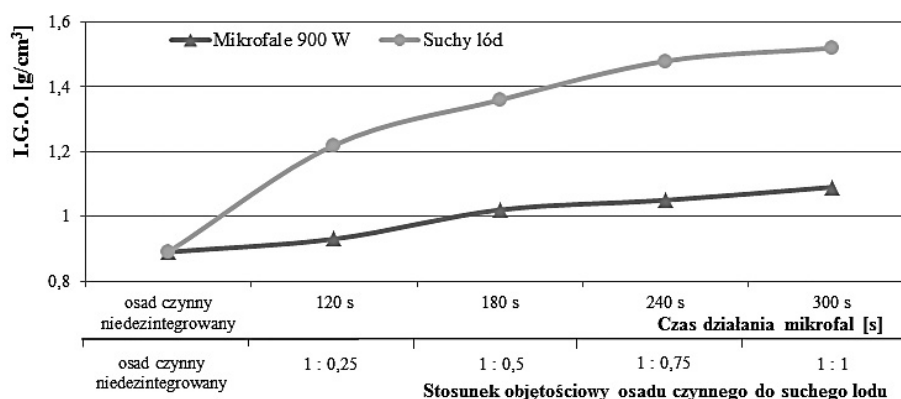
Odwrotnością indeksu Donaldsona jest tzw. indeks Mahlmana, czyli Indeks Objętości Osadu (I.O.O.), określający własności sedymentacyjne oraz uwodnienie osadu. Jest to parametr, który przedstawia objętość osadu w cm^3 po 30 minutach sedymentacji, przypadająca na 1 g zawieszin ogólnych, oznaczonych w próbce pobranej z osadu czynnego [7]. Na podstawie I.G.O. obliczono I.O.O., którego średnia wartość wyniosła 112 cm^3/g dla prób kontrolnych. Jak przedstawiono na rys. 2, dla promieniowania mikrofalowego o mocy 900 W odnotowano mniejszy spadek wartości I.O.O. w porównaniu z dezintegracją osadu czynnego przy pomocy suchego lodu. War-

tość I.O.O. osiągnęła dla czasu 300s działania promieniowania mikrofalowego 92 cm^3/g oraz 66 cm^3/g dla stosunku objętościowego osadu do suchego lodu 1 : 1 (rys. 2). Obniżenie wartości indeksu poniżej 100 cm^3/g s.m., wskazuje na wysoką zdolność osadu czynnego nadmiernego do odwadniania w wyniku zastosowanych procesów kondycjonowania.

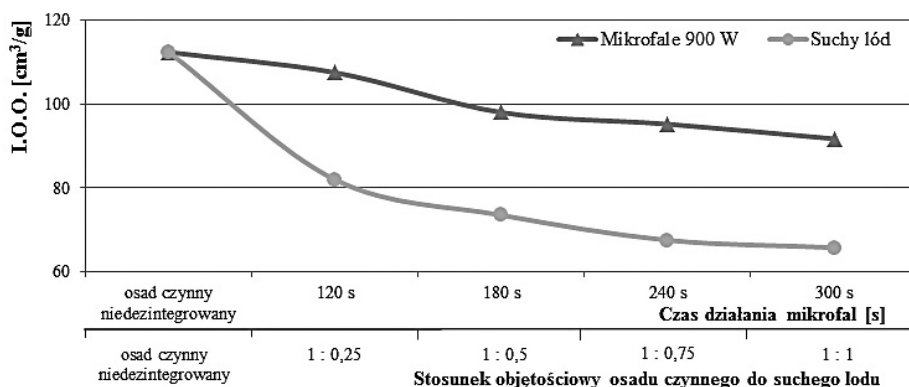
Obliczono prędkość opadania cząstek osadu czynnego w zależności od czasu ekspozycji na promieniowanie mikrofalowe i stosunek objętościowy osadu do suchego lodu.

Pole elektromagnetyczne i suchy lód wpływały początkowo na rozdrobnienie kłaczków, a następnie na ich rosnącą koncentrację oraz aglomerację. Powodowało to zmniejszenie odległości między kłaczkami osadu, zmniejszenie ich objętości, wzrost gęstości a przez to poprawę własności grawitacyjnych.

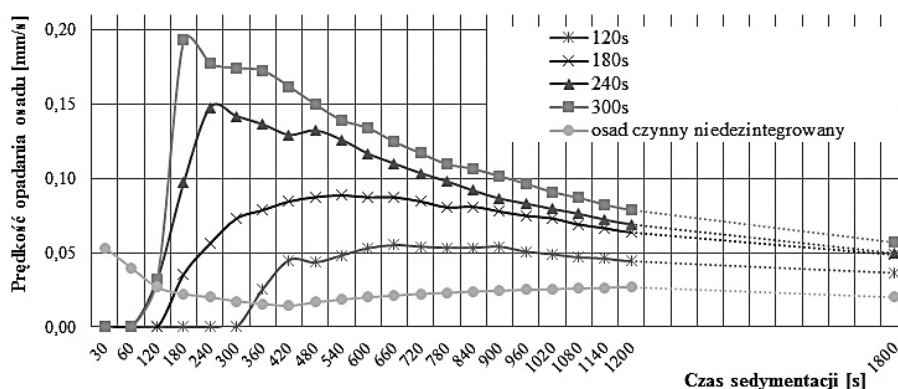
Na rysunku 3 i 4 przedstawiono zmiany prędkości opadania osadu czynnego w wyniku zwiększania czasu oddziaływania promieniowania mikrofalowego oraz dawki suchego lodu. Stwierdzono, że wydłużanie czasu dezintegracji mikrofalowej oraz zwiększenie objętości suchego lodu do osadu, wpłynęło na wzrost prędkości opadania kłaczków osadu czynnego, w pierwszych 3 minutach sedymentacji (rys. 3 i 4).



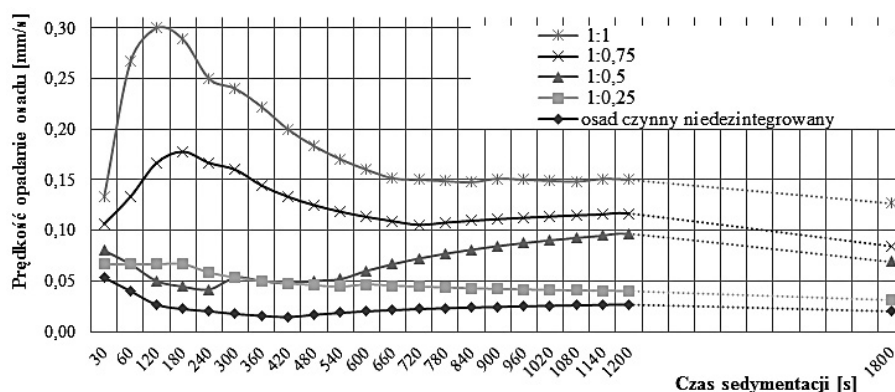
Rys. 1. Zmiana wartości I.G.O. osadu poddanego dezintegracji mikrofalowej i termicznej
Fig. 1. Sludge density index (SDI) changes after microwave and thermal sludge disintegration



Rys. 2. Zmiana wartości I.O.O. osadu poddanego dezintegracji mikrofalowej i termicznej
 Fig. 2. Sludge volume index (SVI) changes after microwave and thermal sludge



Rys. 3. Zmiana prędkości opadania osadu w wyniku dezintegracji mikrofalowej
 Fig. 3. Changes of speed of sludge sedimentation after microwave sludge disintegration

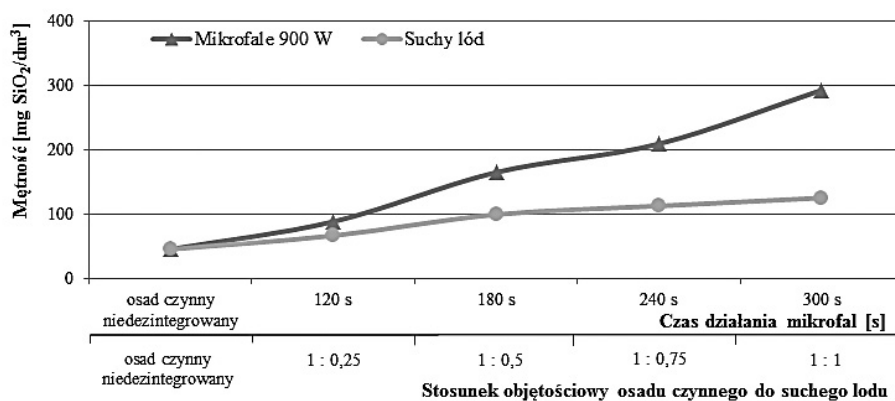


Rys. 4. Zmiana prędkości opadania osadu w wyniku dezintegracji suchym lodem
 Fig. 4. Changes of speed of sludge sedimentation after sludge disintegration by dry ice

Jednym z najważniejszych parametrów oceny procesu zagęszczania jest według teorii Kyncha prędkość opadania zawieszin. Prędkość opadania cząstek osadu jest funkcją stężenia zawieszin w najbliższym otoczeniu [5]. Wzrost prędkości opadania osadu dezintegrowanego (zwłaszcza w pierwszych minutach sedymentacji) związana była ze wcześniejszą destrukcją kłaczków, a następnie ich flokulacją, tworzeniem się agregatów o większej gęstości i mniejszej porowatości w stosunku do skupisk osadu przed dezintegracją. Podobne wy-

niki wzrostu sprawności fazy sedymentacyjnej (prędkości opadania) dla dezintegracji ultradźwiękowej uzyskał Bień i in. [1].

Przeprowadzone badania dotyczące wpływu promieniowania mikrofalowego i zamrażania/rozmarzania na sedymentację i zagęszczanie cząstek osadu ściekowego dowiodły, iż działanie mikrofały i suchego lodu wpływa znacząco na strukturę badanego materiału poprawiając właściwości sedymentacyjne osadu oraz zwiększając jego zdolność do odwadniania.



Rys. 5. Wpływ działania mikrofał i suchego lodu na mętność fazy płynnej osadu
 Fig. 5. Effect of sludge disintegrationaly microwave and dry ice on the turbidity of the liquid phase

Warunkiem bezpośredniego działania jakiegokolwiek rodzaju promieniowania na żywą komórkę jest jego pochłonięcie, przy czym składniki komórek adsorbują fale o określonej długości. Promieniowanie mikrofalowe adsorbowane najskuteczniej jest w zakresie fali o długości 10^{-3} m [11]. Dlatego też efektywność stosowania energii mikrofalowej zależy przede wszystkim od czasu jej działania (dawki promieniowania).

Proces zamrażania suchym lodem/rozmarzania był również przyczyną niszczenia struktury kłaczków osadu i „zimnej” śmierci drobnoustrojów, spowodowanych zespołem czynników takich jak: szybkość zamrażania i odmrażania, skład chemiczny środowiska bytowania, gatunek bakterii, czas zamrożenia, temperatura. Jednakże na pierwszym miejscu stawia się mechaniczne niszczenie komórek kryształami lodu, rozrywającymi je od środka lub uszkodzającymi z zewnątrz. Mikroorganizmy zabite zamrażaniem/rozmarzaniem tracą do podłoża (środowiska) składniki komórkowe. Największą wrażliwość na zimny szok wykazują głównie bakterie Gramujemne oraz te, które są w logarytmicznej fazie wzrostu. Przeżywalność ich zmniejsza się 10 000 razy [11].

Zniszczenie mikrobiologicznej struktury kłaczków promieniowaniem mikrofalowym i suchym lodem przyczyniło się do wzrostu mętności fazy płynnej osadu głównie na skutek uwolnienia substancji wewnątrzkomórkowej i zewnątrzkomórkowych polimerów. W osadzie nadmiernym nie poddanym dezintegracji mechanicznej, mętność cieczy nadosadowej wynosiła $46 \text{ mg SiO}_2/\text{dm}^3$ (rys. 5), a po procesie destrukcji mikrofalowej (300 sekund) i suchym lodem (stosunek objętościowy osadu do suchego lodu 1 : 1), mętność zwiększyła się odpowiednio o $247 \text{ mg SiO}_2/\text{dm}^3$ i $79 \text{ mg SiO}_2/\text{dm}^3$ (rys. 5).

WNIOSKI

Kondycjonowanie osadu ściekowego mikrofałami i suchym lodem powoduje zmiany jego parametrów sedymentacyjnych:

1. Indeks objętości osadu ulegał obniżeniu wraz z czasem działania energii mikrofał i wzrostem stosunku objętościowego osadu do suchego lodu.
2. Dla zastosowanych procesów dezintegracji następował wzrost indeksu gęstości osadu. Zmiany wartości I.G.O. zależały od czasu działania mikrofał i stosunku objętościowego osadu do suchego lodu.
3. Opadanie osadu kondycjonowanego dwoma analizowanymi metodami zachodziło z największą intensywnością w pierwszych minutach zagęszczania grawitacyjnego.
4. Proces dezintegracji mikrofalowej i oddziaływanie suchym lodem powodowały wzrost mętności fazy płynnej osadu. Dla działania mikrofał w czasie 300 s o $247 \text{ mg SiO}_2/\text{dm}^3$ i o $79 \text{ mg SiO}_2/\text{dm}^3$ dla stosunku objętościowego osadu do suchego lodu 1 : 1.

LITERATURA

1. Bień J., Kamizela T., Kowalczyk M. 2005. Separacja grawitacyjna osadów poddanych kondycjonowaniu polem ultradźwiękowym. W: Zintegrowane, inteligentne systemy wykorzystania energii odnawialnej. Mater. konf. Częstochowa-Podlesice, 1–10.
2. Bień J. 2002. Osady ściekowe – teoria i praktyka. Wyd. Polit. Częstochowa.
3. Campios J.L., Otero L., Franco A., Mosquera-Corral A., Roca E. 2009. Ozonation strategies to reduce sludge production of a seafood industry WWTP. *Bioresource Technology*. 100, 1069–1073.

4. Chu C.P., Feng W.C., Chang B.V., Chou C., Lee D.J. 1999. Reduction of microbial density level in wastewater activated sludge via freezing and thawing. *Water Research*. 33, 3532–3535.
5. Cywiński B., Gdula S., Kempa E., Kurbiel J., Płoszański H. 1983. *Oczyszczanie ścieków. Tom 1 – Oczyszczanie mechaniczne i chemiczne*. Wyd. Arkady. Warszawa.
6. Dębowski M., Zieliński M. 2009. Możliwość zastosowania promieniowania mikrofalowego w procesach suszenia osadów powstających podczas oczyszczania ścieków. *Woda Ścieki*. 1, 8–11.
7. Gajkowska-Stefańska L., Guberski S., Gutowski W., Mamak Z., Szperliński Z. 2007. *Laboratoryjne badania wody ścieków i osadów ściekowych. Część II*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa.
8. Grübel K., Machnicka A., Suschka J. 2009. Scum hydrodynamic disintegration for waste water treatment efficiency upgrading. *Ecol. Chem. Eng. S*. 16, 359–367.
9. Grübel K., Machnicka A. 2011. Impact of microwave disintegration on activated sludge. *Ecol. Chem. Eng. S*. 18, 75–82.
10. Grübel K., Machnicka A., Nowicka E., Waclawek S. 2014. Mesophilic-thermophilic fermentation process of waste activated sludge after hybrid disintegration. *Ecol. Chem. Eng. S*. 1, 125–136.
11. Kotelko K., Sedlaczek L., Lachowicz M.T. 1984r. *Biologia bakterii*. Państwowe Wyd. Naukowe. Warszawa.
12. Krzemieniewski M., Dębowski M., Zieliński M. 2012. Zastosowanie elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego i stałego pola magnetycznego w procesach oczyszczania ścieków i przeróbki osadów ściekowych. Wyd. Uniwersytetu Warmińskiego – Mazurskiego. Olsztyn.
13. Lague-Garcia J.L., Lague de Castro M.D. 2003. Where is microwave-based analytical equipment for solid sample pre-treatment going?. *TrAC*. 22, 90–98.
14. Miksch K., Sikora J. 2010. *Biotechnologia ścieków*. Wyd. PWN, Warszawa.
15. Montusiewicz A., Lebiocka M., Rożej A., Zacharska E., Pawłowski L. 2010. Freezing/thawing effects on anaerobic digestion of mixed sewage sludge. *Bioresource Technol.* 101, 3466–3473.
16. Müller J. 2000. Disintegration as key-stop in sewage sludge treatment. *Wat. Sci. Technol.* 41, 123–139.
17. Nowicka E., Machnicka A. 2014. Higienizacja osadu nadmiernego suchym lodem. *Proceedings of ECOpole*. 1, 239–247.
18. Nowicka E., Machnicka A. 2013. Ocena skuteczności higienizacji osadu nadmiernego suchym lodem. *Współczesne problemy ochrony środowiska. Rozdział w Monografii*. Gliwice. Str. 105–113.
19. Nowicka E., Machnicka A. 2014. Wpływ dezintegracji osadu nadmiernego suchym lodem na uwalnianie materii organicznej i nieorganicznej. *GWTS*, 8, 307–310.
20. Podedworna J., Umiejewska K. 2008. *Technologia osadów ściekowych*. Wyd. Politechniki Warszawskiej. Warszawa.
21. Roman H.J., Burgess J.E., Pletschke B.I. 2006. Enzyme treatment to decrease solids and improve digestion of primary sewage sludge. *Afr. J. Biotechnol.* 5, 963–967.
22. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. 2002. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4th edition, Mc Graw Hill. New York.
23. Vesilind P.A., Martel J. 1990. Freezing of water and wastewater sludges. *J. Envir. Eng.* 116, 854–862.
24. Woodard S.E., Wukasz R.F. 1994. A hydrolysis/thickening/filtration process for the treatment of waste activated sludge. *Water Sci. Technol.* 30, 29–38.
25. Zhang G., Zhang P., Yang J., Chena Y. 2007. Ultrasonic reduction of excess sludge from the activated sludge system. *J. Hazard. Mater.* 145, 515–519.
26. Zieliński M. 2013. Wpływ mikrofalowego promieniowania elektromagnetycznego na proces fermentacji metanowej. Wyd. Uniwersytetu Warmińskiego – Mazurskiego, Olsztyn.