

Optymalizacja procesu tlenowej stabilizacji osadów ściekowych poprzez zastosowanie dodatku tlenu o wysokiej czystości – badania przedwdrożeńowe prototypu

Optimisation of the aerobic stabilisation process of sewage sludge through the use of high-purity oxygen additives – pre-implementation testing of the prototype

DARIUSZ BORUSZKO*¹, PIOTR OFMAN¹, DAWID ŁAPIŃSKI¹, MACIEJ TAFF²

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.05.03

W ramach przeprowadzonych prac badawczych przeanalizowano przebieg procesu tlenowej stabilizacji osadów ściekowych z wykorzystaniem dodatku tlenu o wysokiej czystości. Prace badawcze prowadzono z zastosowaniem dodatku czystego tlenu na poziomie 10, 25 i 50% w stosunku do całkowitego zapotrzebowania na tlen w procesie stabilizacji. Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono eksperymenty w warunkach laboratoryjnych, analizując wpływ wielkości dodatku tlenu o wysokiej czystości w warunkach kontrolowanych. Drugi etap realizowano na oczyszczalni ścieków, w warunkach rzeczywistego prowadzenia procesu stabilizacji tlenowej. W obu etapach badań obserwowano poprawę efektywności procesu tlenowej stabilizacji osadów ściekowych po zastosowaniu dodatku tlenu o wysokiej czystości, co przejawiało się zmianami zawartości suchej masy, suchej masy organicznej oraz uwodnienia osadów ściekowych.

Słowa kluczowe: stabilizacja tlenowa, osady ściekowe, tlen o wysokiej czystości

As part of the research, the course of the aerobic stabilisation process of sewage sludge with the use of high-purity oxygen was analysed. The research was conducted using pure oxygen at levels of 10, 25 and 50% of the total oxygen demand in the stabilisation process. The study was divided into two stages. In the first stage, experiments were carried out under laboratory conditions to analyse the effect of the amount of high-purity oxygen added under controlled conditions. The second stage was carried out at a sewage treatment plant under real operating conditions of the aerobic stabilisation process. In both stages, the addition of high-purity oxygen improved the efficiency of aerobic sludge stabilisation, which was reflected in changes in dry matter content, dry organic matter content and sludge hydration.

Keywords: aerobic stabilisation, sewage sludge, high-purity oxygen

Wstęp

Osady ściekowe są produktem oczyszczania ścieków i powstają na skutek szeregu procesów fizycznych, fizyczno-chemicznych i biologicznych zachodzących w oczyszczalniach ścieków [1-3]. Według definicji zaproponowanej przez Europejski Komitet Normalizacyjny osadem ściekowym nazywamy mieszaninę wody i ciał stałych oddzielonych z różnych typów wody w rezultacie procesów naturalnych lub sztucznych.

Sposób zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce w ostatnich latach uległ głębokim zmianom. Dzięki regulacjom prawnym zdecydowanie zmalała ilość osadów

ściekowych magazynowana na składowiskach odpadów i na terenach oczyszczalni. Znormalizowane zasady w Unii Europejskiej spowodowały zmianę podejścia do tego procesu. Istniejące oczyszczalnie poddawane są modernizacji, a nowe projektowane tak, aby osady były zagospodarowywane.

Zawartość organizmów chorobotwórczych oraz proces zagniwania powodują, że nieprzerobione, surowe osady są dużym zagrożeniem dla środowiska [4-6].

Podstawowym procesem przetwarzania w gospodarce osadami ściekowymi jest stabilizacja tj. proces, w wyniku którego osady te nie zagniwają, nie wydzielają nieprzyjemnych zapachów, a także zazwy-

czają się częściowo pozbawione mikroorganizmów patogennych. Omawiany proces jest bardzo kosztowny i stanowi w przybliżeniu ok. 50 % wartości urządzeń na oczyszczalniach ścieków.

Tlenowa stabilizacja osadu to rozkład zanieczyszczeń organicznych osadów w warunkach tlenowych (w obecności tlenu). Jest to metoda wykorzystująca biologiczny rozkład zanieczyszczeń organicznych zawartych w osadach surowych. Tlenowa stabilizacja oparta jest na tlenowym rozkładzie masy organicznej w warunkach głodu substratowego [7-9].

Proces ten prowadzony jest w wydzielonych, otwartych lub zamkniętych zbiornikach z doprowadzeniem powietrza lub

dr hab. inż. Dariusz Boruszko, prof. PB 0000-0001-5160-8938; dr inż. Piotr Ofman 000-0002-0061-8025; mgr inż. Dawid Łapiński – ¹Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Instytut Inżynierii Środowiska i Energetyki, Katedra Technologii w Inżynierii Środowiska, 15-345 Białystok, ul. Wiejska 45E, mgr inż. Maciej Taff – ²EUROTECH Maciej Taff, 00-225 Warszawa, ul. Zakroczyńska 9/1,

*Autor korespondencyjny: d.boruszko@pb.edu.pl

łącznie z metodą osadu czynnego z przedłużonym napowietrzaniem [10-12]. Proces ten powoduje zmniejszenie masy organicznej osadu. Tlenowa stabilizacja osadu dzieje się na następujące fazy:

- I faza - charakteryzuje się wysokim stopniem zapotrzebowania tlenu, gwałtownym rozwojem masy bakteryjnej oraz obniżeniem zawartości substancji stałych w osadzie.
- II faza - zmniejszenie zapotrzebowania tlenu i zmniejszenie masy bakteryjnej.
- III faza - zapotrzebowanie tlenu ulega dalszemu zmniejszeniu, ilości masy bakteryjnej zmniejsza się tylko w niewielkim stopniu.

Po zakończeniu w 1969 r. w Batavii (N.Y.) pierwszych badań w pełnej skali nad natlenianiem ścieków, na początku lat 70. technologia czystego tlenu w biologicznym oczyszczaniu ścieków zaczęła się rozpowszechniać w USA. Pierwszą na świecie, dużą oczyszczalnię ścieków z zastosowaniem czystego tlenu uruchomiono w 1971 r. w Westgate, Fairfax County (Wirginia) [13]. Do początku 1985 r. na całym świecie wybudowano 236 tego typu oczyszczalni, z czego 227 było w eksploatacji. Około 2/3 z tych obiektów znajdowało się na terenie USA. W Europie zdecydowanym liderem były i nadal pozostają Niemcy (wówczas jeszcze Republika Federacja Niemiec) z 23 obiektami (9 komunalnych i 14 przemysłowych) na 45 znajdujących się w Europie. Od tego czasu liczba obiektów z natlenianiem na terenie Niemiec (i nie tylko) stale wzrasta [13, 14].

Pierwsze udokumentowane doniesienia o zastosowaniu czystego tlenu w procesie stabilizacji osadów ściekowych pochodzą z lat 70. Badania prowadzone w USA wykazały między innymi wysoką skuteczność w rozkładzie substancji organicznych [15, 16]. Wysokie koszty wytwarzania czystego tlenu przez długie lata nie pozwalały natomiast na wdrożenie takich instalacji w obiektach rzeczywistych w gospodarce osadowej.

Z dniem 14 stycznia 2022 ogłoszone zostało rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 31 grudnia 2021 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. 2022 Poz. 89) [17]. Zmiana dotyczy zapisów rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych z dnia 6 lutego 2015 r. (Dz.U. 2015 Poz. 257) [18]. Wymagania nowego aktu prawnego wchodzi w życie z dniem 15 stycznia 2026 r., jednak część obowiązuje już od 29 stycznia 2022 r. Nowe rozporządzenie szczegółowo określa jakie warunki muszą zostać spełnione, aby komunalne osady ściekowe mogły być stosowane na gruntach. Oprócz wymagań

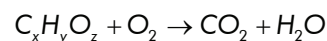
dotyczących zawartości metali ciężkich, obecności bakterii z rodzaju Salmonella oraz dopuszczalnej liczby żywych jaj pasożytów, wprowadzono zupełnie nowe zapisy dotyczące możliwych procesów higienizacji osadów ściekowych, jednocześnie obligując do zastosowania co najmniej jednego z tych procesów przed użyciem osadu na gruntach.

Oryginalność przedstawionych badań polega na połączeniu eksperymentów laboratoryjnych z badaniami przedwdrożeniowymi prowadzonymi na obiekcie rzeczywistym, co pozwoliło na ocenę wpływu dodatku tlenu o wysokiej czystości zarówno w warunkach kontrolowanych, jak i w warunkach eksploatacyjnych.

Celem przeprowadzonych prac badawczych była weryfikacja hipotezy o poprawie efektywności procesu tlenowej stabilizacji osadu poprzez wykorzystanie dodatku tlenu o wysokiej czystości.

Metodyka

W ramach prac projektowych analizie poddano stężenie suchej masy osadu, jego uwodnienie oraz zawartość suchej masy organicznej. Poszczególne parametry badano z wykorzystaniem metod grawimetrycznych. Analiza wymiennych wielkości pozwoliła na ocenę stopnia w jakim osad uległ biologicznej stabilizacji, poprzez zwiększenie ilości wody obecnej w próbce badanej. Zgodnie z przyjętymi założeniami jednym z produktów powstających w wyniku tlenowej stabilizacji osadu jest woda. Wynika to z faktu, iż w wyniku rozkładu materii organicznej przebieg reakcji rozkładu związków węgla jest zgodny z następującym równaniem:



Biorąc pod uwagę wskazaną prawidłowość, badane wskaźniki pozwoliły na ocenę przebiegu procesu stabilizacji tlenowej osadów ściekowych z wykorzystaniem tlenu o wysokiej czystości, a tym samym pozwoliły na weryfikację założeń technologicznych procesu. Biorąc pod uwagę fakt, iż osad czynny jaki był wykorzystany w poszczególnych etapach prac badawczych charakteryzował się różnymi wielkościami parametrów wyjściowych (zawartość suchej masy i suchej masy organicznej), podczas interpretacji wyników prac badawczych posłużono się ujednorodnieniem prezentowanych wyników. Ujednorodnienie te polegało na wyrażeniu zawartości suchej masy oraz suchej masy organicznej w poszczególnych dniach eksperymentu jako procentu wartości wyjściowej. W tym celu posłużono się następującym równaniem:

$$G_i = \frac{M_p - M_i}{M_p} \cdot 100$$

gdzie

G_i – zawartość suchej masy lub suchej masy organicznej osadu czynnego wyrażona jako % wartości początkowej w i -tym dniu prowadzenia eksperymentu

M_p – zawartość początkowa suchej masy lub suchej masy organicznej osadu czynnego wyrażona w kg/m^3

M_i – zawartość suchej masy lub suchej masy organicznej osadu czynnego wyrażona w kg/m^3 w i -tym dniu prowadzenia eksperymentu

Badania technologiczne realizowano z wykorzystaniem osadu ściekowego z rzeczywistej oczyszczalni ścieków. Do modelowej komory tlenowej stabilizacji osadu wprowadzano taką ilość osadu ściekowego, aby jego koncentracja wynosiła około $10 kg/m^3$. Zgodnie z doświadczeniem eksploatacyjnym jest to średnia górna koncentracja osadu czynnego jaka jest obserwowana w tego typu obiektach. Stąd też założono, iż tego typu stężenie osadu czynnego będzie reprezentatywne do przeprowadzenia badań pilotażowych w skali laboratoryjnej.

W trakcie badań próbki do analiz pobierano co 2 dni. pH w komorze stabilizacji utrzymywało się na poziomie $7,0 \pm 0,15$, natomiast temperatura wynosiła $15,0 \pm 0,5^\circ C$. Stężenia tlenu rozpuszczonego nie oznaczano. Ilość wprowadzanego tlenu regulowano na podstawie cyklu pracy dmuchaw powietrza, z którym sprzężony był generator tlenu.

Na rysunku 1 przedstawiono modelowy układ komory stabilizacji tlenowej.



Rys. 1. Modelowy układ komory stabilizacji tlenowej
Fig. 1. Model system of an aerobic stabilization chamber

Etap prac laboratoryjnych składał się z 4 eksperymentów jednostkowych, w których kontroli poddano przebieg procesu tlenowej stabilizacji osadu. Pierwszy eksperyment stanowiący próbkę kontrolną realizowany był przy stosowaniu napowietrzania wyłącznie tlenem atmosferycznym.

W drugim eksperymencie zastosowano 10% dodatek czystego tlenu, w trzecim eksperymencie 25%, natomiast w czwartym eksperymencie 50%. Ilość tlenu rozpuszczonego jaka powinna zostać doprowadzona do komory, a zatem czas pracy generatora tlenu wynikał z bilansu tlenowego, jaki został wyznaczony w oparciu o przeprowadzone prace badawcze przed każdorazowym przystąpieniem do eksperymentu jednostkowego. Czas pracy dmuchawy oraz generatora tlenu kontrolowany był za pomocą sterownika automatycznego, w którym możliwa była nastawa czasu pracy i postoiu poszczególnych urządzeń. W celu zachowania odpowiedniej homogenizacji objętości komory, jej zawartość była ciągle mieszana z wykorzystaniem mieszadeł mechanicznych.

W pracach badawczych na obiekcie rzeczywistym przyjęto, że dodatek czystego tlenu będzie wynosił około 10%, czyli najmniejsza z rozpatrywanych dawek w warunkach laboratoryjnych. Dawkowanie tlenu o wysokiej czystości prowadzono przy założeniu maksymalnej wydajności urządzenia oraz czasu pracy urządzenia niezbędnego do wprowadzenia ilości tlenu o wysokiej czystości pozwalającego na pokrycie zapotrzebowania. Dzięki temu otrzymano warunki technologiczne zbliżone do rzeczywistych. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono przedwdrożeniową instalację na obiekcie rzeczywistym.

W pracach badawczych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych założono, że czas tlenowej stabilizacji osadu czynnego będzie wynosił 14 dób.

Założenie to wynikało z faktu, iż pojemność czynna komory tlenowej stabilizacji osadu pozwalała na przetrzymanie osadu przez okres wynoszący około 14 dni, a zatem czas ten odpowiada faktycznemu zatrzymaniu osadu czynnego w komorze stabilizacyjnej.

Układ badawczy zainstalowany na obiekcie rzeczywistym składał się z generatora tlenu wraz ze zbiornikiem buforowym oraz istniejącej linii technologicznej napowietrzania ścieków i komory tlenowej stabilizacji osadu. Komora tlenowej stabilizacji osadu charakteryzowała się pojemnością czynną na poziomie 60 m³. Do komory stabilizacji tlenowej doprowadzone było powietrze poprzez 4 dyfuzory. Charakterystyka generatora tlenu wykorzystanego do prac badawczych była następująca:

- 1 szt. sprężarka tłokowa bezolejowa do pracy w ciężkich warunkach (zbiornik powietrza 90 l, silnik 3,0kW/400V/50Hz, wydajność 18,0 m³/h, max. nadciśnienie 8,0 bar, poziom hałasu 78 dB(A);
- 1 szt. kondensacyjny osuszacz sprężonego powietrza (t.r. + 3 C, el. 100W/230V/50Hz);
- 1 szt. filtr wstępny;
- 1 szt. mikrofiltr;
- 1 szt. filtr z węglem aktywnym;
- 1 szt. generator tlenu (wydajność tlenu 0,94 m³/h, czystość 95%, zużycie sprężonego powietrza 11,78 m³/h, ciśnienie wlotowe sprężone powietrze 6,5 bar, ciśnienie wyjściowe tlenu maks. 5,0 bar, wymiary 600x300x1200 mm, waga 115 kg, przyłącze elektryczne 230V/50Hz, poziom hałasu 45 dB(A);
- 1 szt. zbiornik do przechowywania tlenu 500 l, PN11, stojący, w komplecie okucia i paszport;
- 1 szt. reduktor ciśnienia dla tlenu (nadciśnienie 200-770 mbar).



Rys. 2. Przedwdrożeniowa instalacja na obiekcie rzeczywistym
Fig. 2. Pre-implementation installation at a full-scale facility



Rys. 3. Komora tlenowej stabilizacji osadu podczas prac badawczych
Fig. 3. Aerobic sludge stabilization chamber during experimental work

Wyniki badań i dyskusja

W ramach pierwszego etapu prac badawczych analizie poddano przebieg procesu tlenowej stabilizacji osadu ściekowego w warunkach laboratoryjnych. Czas trwania pojedynczego eksperymentu trwał 14 dni, przy czym dzień 0 poświęcony był wstępnemu przygotowaniu modelowej komory do prac eksperymentalnych.

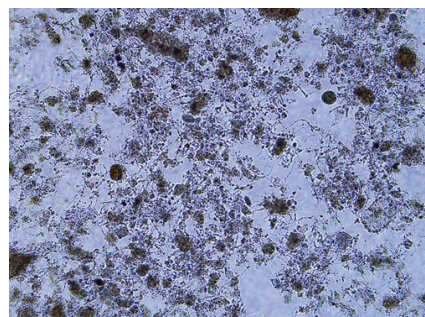
W ramach poszczególnych przeprowadzonych eksperymentów jednostkowych obserwowano stopniowy spadek zawartości suchej masy osadu czynnego (rys. 4). Zjawisko te bezpośrednio odnosi się do procesu hydrolizy i rozkładu materii organicznej obecnej w komorze stabilizacji. Przeprowadzone badania wskazywały, iż wraz ze zwiększeniem udziału dodatku

czystego tlenu obserwowany jest większy spadek zawartości suchej masy osadu czynnego. Spadek zawartości suchej masy organicznej w poszczególnych eksperymentach (rys. 5) charakteryzował się zbliżonym trendem zmian jakie obserwowano w przypadku suchej masy osadu czynnego. Obserwacja ta związana jest przede wszystkim z faktem, iż sucha masa organiczna stanowi frakcję suchej masy osadu czynnego. Niemniej uzyskana prawidłowość wskazuje, iż wraz ze zwiększeniem udziału czystego tlenu w mieszaninie powietrza atmosferycznego uzyskiwane są większe efekty redukcji suchej masy organicznej. Obserwacja ta wynika z właściwości tlenu o wysokiej czystości oraz potwierdza założenia projektu badawczego.

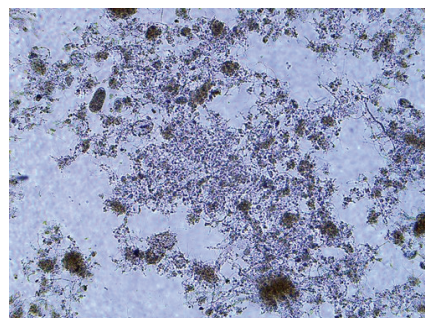
Z przeprowadzonych badań wynika, iż każdy z rozpatrywanych dodatków tlenu o wysokiej czystości przyczyniał się do poprawy efektywności usuwania materii organicznej [19-22]. Tego typu prawidłowość może wynikać z faktu częściowego wzrostu udziału procesu chemicznego utleniania materii organicznej. W wyniku tego zjawiska możliwe jest utlenienie materii

organicznej bez udziału mikroorganizmów. Dodatkowo substraty tej reakcji mogą być łatwiej biodegradowalne przez konsorcjum mikroorganizmów obecnych w komorze tlenowej stabilizacji osadu. Całość przedstawionych obserwacji przekłada się na wzrost intensywności rozkładu materii organicznej, dzięki czemu możliwe było uzyskanie lepszych efektów usuwania ogólnie rozumianej biomasy w wyniku procesu stabilizacji.

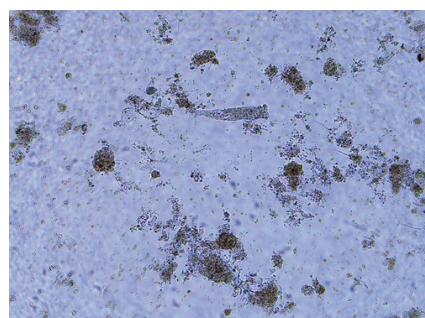
W dalszym etapie prac badawczych dokonano analizy mikroskopowej osadu czynnego. Jej celem była analiza struktur kłaczków osadu czynnego. W wyniku dodatku tlenu o wysokiej czystości obserwowano bardziej zdyspergowane struktury, co wskazuje na częściowe chemiczne utlenienie materii organicznej wchodzącej w skład kłaczków osadu czynnego [23,24]. Obraz mikroskopowy kłaczków osadu czynnego przed przystąpieniem do eksperymentu (dzień 0) przedstawiono na rysunkach 6 i 7, natomiast obraz mikroskopowy osadu czynnego po procesie stabilizacji z wykorzystaniem dodatku tlenu o wysokiej czystości przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



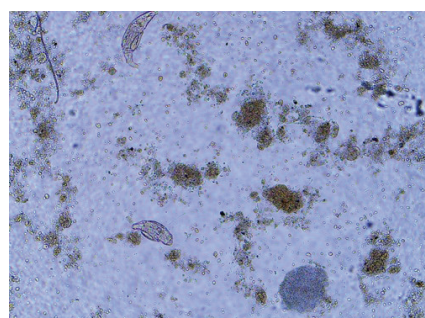
Rys. 6. Obraz mikroskopowy przed stabilizacją (1)
Fig. 6. Microscopic image before stabilization (1)



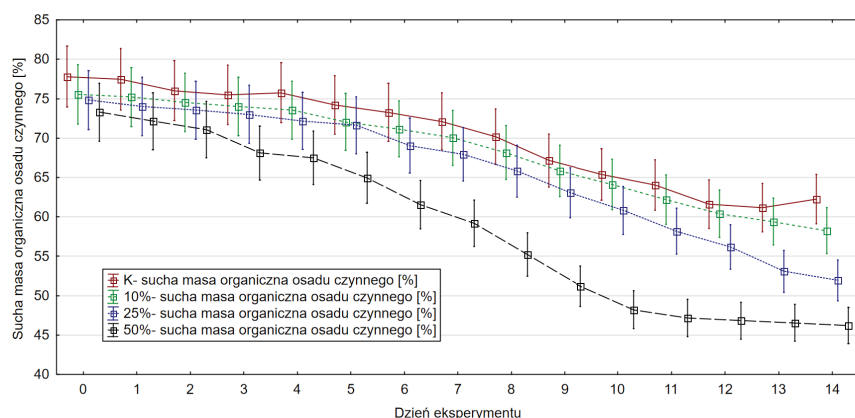
Rys. 7. Obraz mikroskopowy przed stabilizacją (2)
Fig. 7. Microscopic image before stabilization (2)



Rys. 8. Obraz mikroskopowy po stabilizacji (1)
Fig. 8. Microscopic image after stabilization (1)



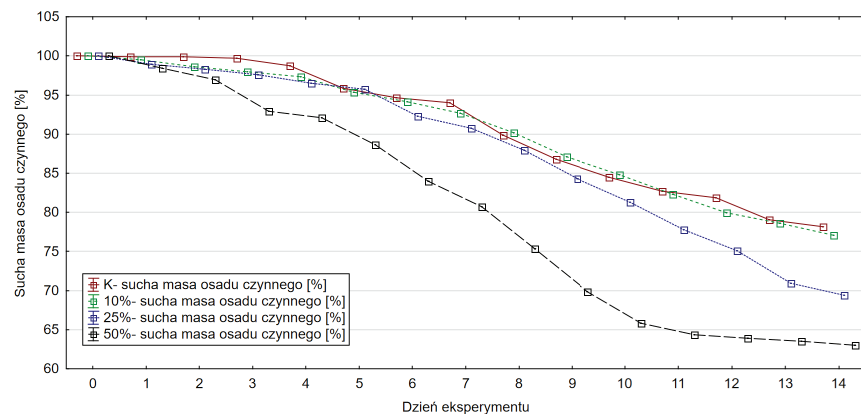
Rys. 9. Obraz mikroskopowy po stabilizacji (2)
Fig. 9. Microscopic image after stabilization (2)



Punkt – średnia arytmetyczna, ramka – błąd standardowy pomiaru, wąsy – odchylenie standardowe

Rys. 4. Zawartość procentowa suchej masy osadu czynnego podczas prac badawczych

Fig. 4. Percentage content of activated sludge dry matter during experimental work

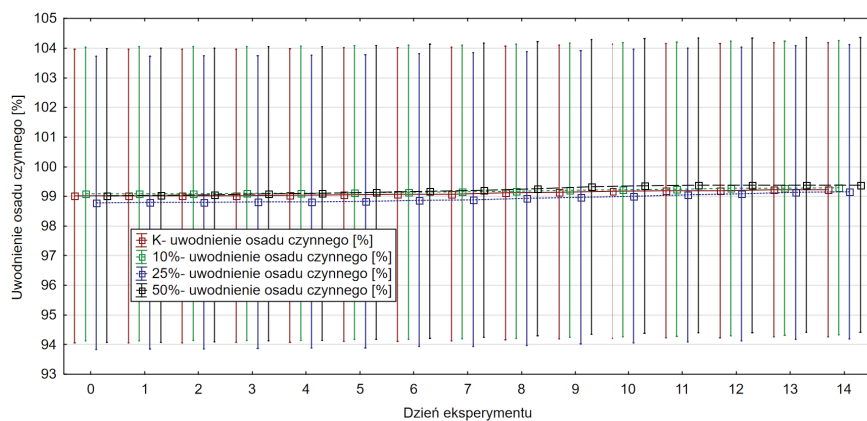


Punkt – średnia arytmetyczna, ramka – błąd standardowy pomiaru, wąsy – odchylenie standardowe

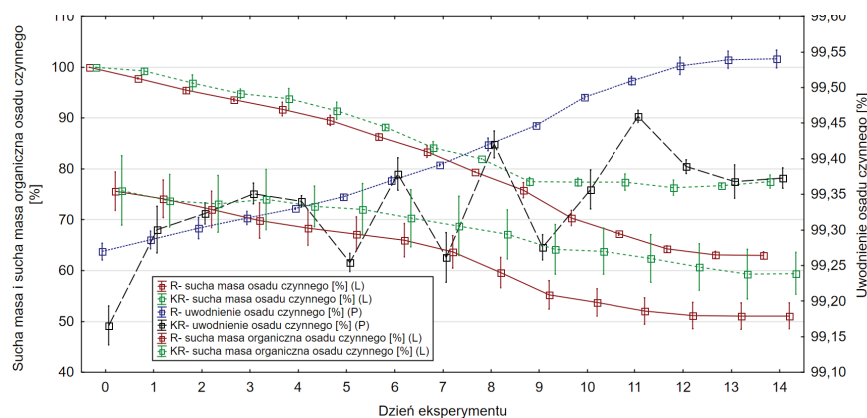
Rys. 5. Zawartość procentowa suchej masy organicznej osadu czynnego podczas prac badawczych

Fig. 5. Percentage content of activated sludge organic dry matter during experimental work

Zgodnie z założeniami projektu badawczego w trakcie realizacji poszczególnych eksperymentów jednostkowych obserwowano stopniowy wzrost uwodnienia zawartości komory tlenowej stabilizacji osadu (rys. 10). Obserwacja ta jest bezpośrednim odzwierciedleniem rozkładu materii organicznej, jaka zachodziła przy poszczególnych wariantach prowadzenia procesu



Punkt – średnia arytmetyczna, ramka – błąd standardowy pomiaru, wąsy – odchylenie standardowe
Rys. 10. Zmiany uwodnienia w trakcie eksperymentu – próbka kontrolna
Fig. 10. Changes in moisture content during the experiment – control sample



Rys. 11. Zmiany poszczególnych parametrów osadu w komorze tlenowej stabilizacji podczas prac badawczych prowadzonych na obiekcie rzeczywistym
Fig. 11. Changes in selected sludge parameters in the aerobic stabilization chamber during experimental work conducted at a full-scale facility

tlenowej stabilizacji osadu. Wzrost uwodnienia osadu jest szczególnie istotnym parametrem w przypadku, gdy osad poddawany jest dalszej przeróbce po procesie tlenowej stabilizacji. Jest to szczególnie istotne z punktu zmniejszenia kosztów inwestycyjnych związanych z budową oczyszczalni ścieków lub też modernizacji systemu gospodarki osadowej na danym obiekcie. W przeprowadzonych badaniach wzrost uwodnienia był wprost proporcjonalny do zwiększenia udziału tlenu o wysokiej czystości w całym układzie badawczym.

Prace badawcze przeprowadzone na obiekcie rzeczywistym wskazują, iż dodatek tlenu o wysokiej czystości przyczynił się do większego ubytku suchej masy osadu czynnego w porównaniu z próbką kontrolną (rys. 11). Przeprowadzone badania wskazują, iż proces stabilizacji z dodatkiem tlenu o wysokiej czystości trwał dłużej i pozwolił na osiągnięcie większego ubytku. Za tego typu przebieg stabilizacji osadu czynnego mogły być odpowiedzialne, oprócz zjawisk biologicznych i biochemicznych, procesy utleniania chemicznego powodujące częściowy rozkład materii mineralno-organicznej tworzącej strukturę kłaczków osadu czynnego [25].

Dodatkowo w warunkach rzeczywistych obserwowane są w mieszaninie ścieków i osadu czynnego również inne zanieczyszczenia, które mogły zostać częściowo utlenione na skutek kontaktu z tlenem o wysokiej czystości.

W przypadku suchej masy organicznej osadu czynnego (rys. 11) obserwowano, iż dodatek tlenu o wysokiej czystości przyczynił się do uzyskania mniejszej zawartości tego parametru po zakończeniu cyklu badawczego. Obserwowane rezultaty prac badawczych w warunkach rzeczywistych pozwoliły na obserwację oczekiwanego trendu zmian zawartości substancji organicznej w porównaniu z warunkami laboratoryjnymi. Podobnie w przypadku uwodnienia zawartości komory tlenowej stabilizacji osadu, obserwowano większy wzrost uwodnienia przy eksperymencie z dodatkiem tlenu o wysokiej czystości w porównaniu z próbką kontrolną.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i przedwdrożeniowych stwierdzono, że zastosowanie tlenu o wysokiej czystości może sprzyjać zwiększeniu efektywności procesu tlenowej stabilizacji osadów ściekowych. W badanych warunkach obserwowano korzystny kierunek zmian zawartości suchej masy, suchej masy organicznej oraz uwodnienia osadu. Z praktycznego punktu widzenia rozwiązanie to może być stosowane okresowo lub łącznie z istniejącym systemem klasycznego napowietrzania, jednak ocena zasadności takiego wdrożenia wymaga każdorazowo analizy warunków technicznych i eksploatacyjnych danego obiektu.

Badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych wskazują, że zastosowanie dodatku tlenu o wysokiej czystości sprzyja poprawie efektywności procesu stabilizacji tlenowej w porównaniu z wariantem kontrolnym prowadzonym wyłącznie z wykorzystaniem tlenu obecnego w powietrzu atmosferycznym.

Analiza mikroskopowa wskazywała na większe rozdrobnienie struktury kłaczkowatej osadu czynnego po zastosowaniu dodatku tlenu o wysokiej czystości.

Badania prowadzone na obiekcie rzeczywistym wskazują, że dodatek czystego tlenu może zwiększać efektywność procesu tlenowej stabilizacji osadu w porównaniu z wariantem kontrolnym.

W trakcie dawkowania tlenu o wysokiej czystości w obrębie komory stabilizacyjnej nie obserwowano uciążliwości zapachowej.

Ocena opłacalności wdrożenia rozwiązania powinna być prowadzona indywidualnie dla danego obiektu, z uwzględnieniem kosztów energii, kosztu wytwarzania lub zakupu tlenu, czasu pracy generatora oraz skali instalacji.

Z punktu widzenia eksploatacyjnego generator tlenu powinien pracować na odrębnej linii tlenowej, ze względu na możliwość występowania zanieczyszczeń w linii napowietrzania. Może to zwiększyć niezawodność pracy urządzenia i poprawić stabilność warunków prowadzenia procesu.

Źródło finansowania

Działanie badawcze zostało zrealizowane w ramach projektu „Inkubator Innowacyjności 4.0” realizowanego w konsorcjum w składzie: Instytut Innowacji i Technologii Politechniki Białostockiej, Uniwersytet Medyczny w Białymstoku oraz Uniwersytet w Białymstoku w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020.

Literatura

- [1] Anjum, M., Al-Makishah, N. H., & Barakat, M. A. (2016). Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 615-632.

- [2] Samaras, P., Papadimitriou, C. A., Haritou, I., & Zouboulis, A. I. (2008). Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime. *Journal of hazardous materials*, 154(1-3), 1052-1059.
- [3] Mei, X., Tang, J., & Zhang, Y. (2020). Sludge stabilization: Characteristics of the end-products and an alternative evaluative methodology. *Waste Management*, 105, 355-363.
- [4] Lloret, E., Pascual, J. A., Brodie, E. L., Bouskill, N. J., Insam, H., Juárez, M. F. D., & Goberna, M. (2016). Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. *Applied Soil Ecology*, 101, 37-46.
- [5] Suthar, S. (2010). Pilot-scale vermireactors for sewage sludge stabilization and metal remediation process: comparison with small-scale vermireactors. *Ecological engineering*, 36(5), 703-712.
- [6] Yoshida, H., Nielsen, M. P., Scheutz, C., Jensen, L. S., Christensen, T. H., Nielsen, S., & Bruun, S. (2015). Effects of sewage sludge stabilization on fertilizer value and greenhouse gas emissions after soil application. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 65(6), 506-516.
- [7] Czajkowska, J., & Kazimierzczak, M. (2016). Wpływ dezintegracji mikrofalowej na proces tlenowej stabilizacji osadu nadmiernego. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 25(4).
- [8] Kazimierzczak, M. (2014). Modelowanie tlenowej stabilizacji osadów ściekowych z wykorzystaniem równań różnych rządów. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 23(1) [63].
- [9] Popenda, A., Kozak, J., & Włodarczyk-Makuta, M. (2019). Stabilizacja tlenowa osadów komunalnych i przemysłowych. *Proceedings of ECOpole*, 13(1-2), 145-154.
- [10] Ratajczak, P. (2012). Stabilizacja tlenowa – przegląd sposobów obliczeniowych. In *Forum Eksploatacja* (No. 6 (63), pp. 50-54).
- [11] Gawdzik, J., & Latońska, J. (2012). Analiza mobilności metali ciężkich w wybranych osadach ściekowych z oczyszczalni ścieków o różnej przepustowości. *Proceedings of ECO-pole*, 6(1), 319-324.
- [12] Malej, J. (2000). Właściwości osadów ściekowych oraz wybrane sposoby ich unieszkodliwiania i utylizacji. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2, 69-101.
- [13] Sengewein H. (1989) „Das Sauerstoff-Belebungsverfahren. Abwasserreinigung mit reinem Sauerstoff“, *Academia Verlag* Richarz, Sankt Augustin, Niemcy.
- [14] „BASF-Kläranlage reduziert Ammoniumfracht. Umrüstung von Belebungsbecken“, *Wasser-Spiegel* 2/1999, Messer Griesheim, Krefeld, Niemcy.
- [15] Gujer W., Jenkins D. (1975). The contact stabilization activated sludge process – oxygen utilization, sludge production and efficiency. *Water Research* 9(5-6), 553-560.
- [16] Brummer J.H. (1979) Use of Oxygen in Sludge Stabilization. *Symposium of the transfer and Utilization of Particulate Control Technology*: vol. 3 *Scrubbers, Advanced Technology and HTP Applications*, USA. EPA-600/7-79-044c. 544-558.
- [17] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 31 grudnia 2021 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. 2022 Poz. 89).
- [18] Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych z dnia 6 lutego 2015 r. (Dz.U. 2015 Poz. 257)
- [19] Sobczyk, M. (2001). Zastosowanie czystego tlenu do uzdatniania wód podziemnych. *Ochrona Środowiska*, 83, 37-39.
- [20] Ledakowicz, S., & Solecka, M. (2002). 9. Integracja metod biologicznego i chemicznego utleniania ścieków przemysłowych. In Zarzycki R. (red.), *Zaawansowane techniki utleniania w ochronie środowiska*, Polska Akademia Nauk. Oddział w Łodzi. Komisja Ochrony Środowiska, Łódź 2002, ISBN 83-86492-13-9. Polska Akademia Nauk. Oddział w Łodzi. Komisja Ochrony Środowiska.
- [21] Biń, A. K. (2000). Chemiczna degradacja zanieczyszczeń w ściekach przemysłowych. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2, 383-405.
- [22] Piotrowski, R. (2011). Napowietrzanie w oczyszczalni ścieków - od modelu do sterowania. *Napędy i Sterowanie*, 13(2), 73-78.
- [23] Daniłowicz, A., Drożdżik, B., Jacalska, A., Karlo, A., & Surmacz-Górska, J. (2016). Podczyszczanie wód osadowych pochodzących z odwadniania przefermentowanych osadów ściekowych w fotobioreaktorach glonowych. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, 18(2), 45-54.
- [24] Wodołański, A. (2021). Wybrane algorytmy uczenia maszynowego w segmentacji obrazu kłaczek osadów ściekowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 97, 134-136.
- [25] Wolski, P., Wolny, L., & Zawieja, I. (2010). Kondycjonowanie osadów nadmiernych poddanych stabilizacji a ich odwadnialność. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 13(1), 67-77.



16–19 czerwca 2026
Artus Resort
ul. Wilcza 9
58-540 Karpacz

airandheat.pl

Konferencja
Air, Heat and Energy

XVII edycja międzynarodowej konferencji z cyklu **Air, Heat and Energy**

pamięci prof. dr. inż. Gerarda Jana Beslera

Organizatorzy



Politechnika Wroclawska

Wydział Inżynierii Środowiska

Partner wydarzenia



Patronat honorowy



Patronat medialny
i czasopisma



Chłodnictwo & Klimatyzacja

CIEPŁOWNICTWO

OGRZEWNICTWO

WENTYLACJA

INSTAL

Ri Rynek instalacyjny

OGRZEWNICTWO | WENTYLACJA | CIEPŁOWNICTWO | KLIMATYZACJA | MIKROKLIMAT | MAGAZYNY ENERGII
SIECI I INSTALACJE SANITARNE I GAZOWE | EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA | JAKOŚĆ POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO