

WPŁYW STAŁEGO POLA MAGNETYCZNEGO NA PROCES USUWANIA ZWIĄZKÓW BIOGENNYCH ZE ŚCIEKÓW MLECZARSKICH W REAKTORZE TYPU SBR

Marcin Zieliński¹, Anna Hajduk¹, Marcin Dębowski¹

¹ Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk o Środowisku, Katedra Inżynierii Środowiska; ul. Warszawska 117A, 10-720 Olsztyn, e-mail: marcin.zielinski@uwm.edu.pl, anna.hajduk@uwm.edu.pl, marcin.debowski@uwm.edu.pl

STRESZCZENIE

Modyfikacje profilu produkcji w zakładach przemysłowych wpływają bezpośrednio na zmiany w ilości oraz składzie powstających ścieków. W związku z tym istnieje konieczność ciągłego poszukiwania nowych i skutecznych metod intensyfikujących usuwanie i neutralizację zanieczyszczeń. Przeprowadzone do tej pory badania pozwalają sądzić, iż czynnikiem pozytywnie wpływającym na różnego rodzaju jednostkowe procesy oczyszczania ścieków jest stałe pole magnetyczne (SPM). Celem badań było określenie wpływu stałego pola magnetycznego (SPM) o indukcji 0,6T na efektywność usuwania związków biogenych ze ścieków mleczarskich w reaktorach typu SBR. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, w dwóch wariantach różniących się obciążeniem osadu czynnego ładunkiem zanieczyszczeń. W trakcie badań udowodniono, iż zastosowanie SPM sprzyjało procesowi usuwania związków biogenych, choć znaczenie tego czynnika w większości wariantów nie było istotne. Niezależnie od wariantu eksperymentu obserwowano bardzo wysoką skuteczność usuwania związków azotu i fosforu z testowanych ścieków mleczarskich.

Słowa kluczowe: stałe pole magnetyczne, ścieki mleczarskie, sekwencyjny reaktor biologiczny, związki biogenne

INFLUENCE OF STATIC MAGNETIC FIELD ON REMOVAL OF BIOGENIC COMPOUNDS FROM DAIRY WASTEWATER IN SEQUENCING BATCH REACTOR

ABSTRACT

Modifications to the profile of production in factories directly affect the changes in the amount and composition of the resulting wastewater. Therefore, there is a continued search for new and effective methods for to intensify the removal of pollutants and neutralization. The studies conducted so far suggest that a constant magnetic field (CMF) constitutes a positive factor for various unit processes of wastewater treatment. The objective of the study was to determine the effect of a constant magnetic field (CMF) with the induction of 0.6T on the removal efficiency of nutrients from dairy wastewater in SBRs. Tests were performed under laboratory conditions, in two variants, different load of activated sludge and impurities. During the research, it was proven that the use of CMF was conducive to the elimination of biogenic compounds, although the significance of this factor in the majority of variants was not significant. Regardless of the variant of the experiment, a very high efficiency of nitrogen and phosphorus removal from the tested dairy wastewater was observed.

Keywords: constant magnetic field, sewage dairy, sequential biological reactor, biogenic compounds

WSTĘP

W procesie usuwania zanieczyszczeń ze ścieków powszechnie stosuje się metody opierające się na wykorzystaniu osadu czynnego. Jednym z tego rodzaju rozwiązań technologicznych są sekwencyjne reaktory porcjowe (ang. sequencing

batch reactor – SBR) [Janczukowicz i in. 1998]. W odróżnieniu od konwencjonalnych, przepływowych układów osadu czynnego w reaktorach SBR stosuje się okresowe wprowadzanie ścieków. Mogą być one stosowane zarówno do oczyszczania ścieków o różnej charakterystyce i właściwościach, pochodzących z sektora komu-

nalnego, jak i zakładów przemysłowych. W układzie SBR procesy biologicznego oczyszczania, a także klarowania zachodzą w jednym zbiorniku, co wskazywane jest jako istotna zaleta tego rozwiązania [Wojnowska-Baryłai in. 1997].

Podejmowanie działań w kierunku zwiększenia efektywności procesów oczyszczania ścieków jest podyktowane obserwowaną tendencją wzrostu ładunków zanieczyszczeń w nich zawartych oraz obowiązującymi wymaganiami stawianymi ściekom odprowadzanym do środowiska. Analiza dotychczas przeprowadzonych badań pozwala stwierdzić, iż czynnikiem wspierającym procesy biologicznego oczyszczania ścieków może być zastosowanie stałego pola magnetycznego (SPM) [Zieliński i in. 2014b].

SPM stosowano dotychczas w intensyfikacji procesów biologicznego usuwania zanieczyszczeń, wspomagania oczyszczania ścieków metodami pogłębionego utleniania, intensyfikacji procesów koagulacji i sedymentacji zanieczyszczeń, kondycjonowaniu i odwadnianiu osadów ściekowych czy ograniczania tworzenia się złożeń w systemach wodociągowo-kanalizacyjnych [Dębowski i in. 2014].

Przedstawione przykłady pozwalają stwierdzić, że obróbka magnetyczna stać się może alternatywną i perspektywiczną metodą pozwalającą na usprawnienie procesów oczyszczania ścieków oraz przeróbki osadów ściekowych. Ekonomiczne względy procesu w sposób bardzo przekonujący skłaniają do podjęcia prób zastosowania magnetyzerów jako urządzeń wspomagających systemy technologiczne oczyszczania wody, ścieków i przeróbki osadów ściekowych. Magnetyczne aktywatory płynów charakteryzują się nieskomplikowaną konstrukcją i nie wymagają zasilania jakąkolwiek formą energii. Kiedy są prawidłowo eksploatowane natężenie pola magnetycznego ich podstawowego elementu składowego nie ulega wyraźnemu osłabieniu w miarę upływu czasu. Dzięki temu urządzenia pracują zadowalająco przez wiele lat. Budowa magnetyzerów jest wyjątkowo prosta. W cyklu wdrożeniowym mogą być one stosowane w instalacjach już pracujących bez konieczności prowadzenia prac adaptacyjnych. Czynności związane z ich założeniem lub zdjęciem z dowolnego miejsca czynnej instalacji są proste, szybkie i nie wymagają stosowania skomplikowanych narzędzi. Celowym i uzasadnionym wydaje się więc podjęcie prób wykorzystania pozytywnych walorów tych doświadczeń w oczyszczaniu ścieków, przeróbce

osadów ściekowych i innych dziedzinach ochrony środowiska [Zieliński i in. 2014a].

Celem badań było określenie wpływu stałego pola magnetycznego (SPM) o indukcji 0,6 T na efektywność usuwania związków biogenych ze ścieków mleczarskich w reaktorach typu SBR.

METODYKA BADAŃ

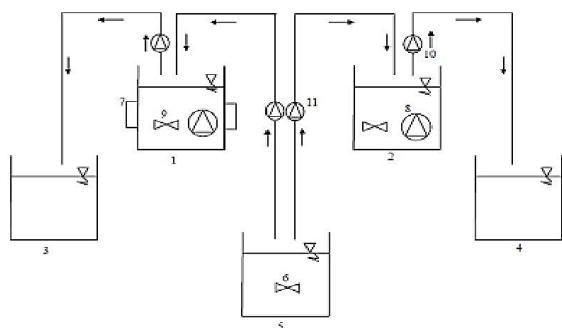
W eksperymencie wykorzystywano modelowe ścieki mleczarskie uzyskiwane poprzez rozpuszczenie odtłuszczonego mleka w proszku w wodzie wodociągowej. W zależności od wariantu eksperymentu do 1,0 dm³ wody wodociągowej wprowadzano 4,0 g lub 6,0 g mleka w proszku. Eksperyment podzielono na dwa warianty. Kryterium podziału było zastosowane obciążenie eksploatowanych reaktorów ładunkiem zanieczyszczeń, które w wariacie I wynosiło 0,15 g ChZT/g·d, a w wariacie II 0,22 g ChZT/g·d. Charakterystykę ścieków stosowanych podczas realizowanych prac badawczych zaprezentowano w tabeli 1. Inokulum mikroorganizmów wykorzystywanych do oczyszczania ścieków mleczarskich w reaktorach SBR był osad czynny pochodzący z miejskiej oczyszczalni ścieków w Olsztynie.

Badania prowadzono w skali laboratoryjnej w warunkach dynamicznych w dwóch równolegle pracujących reaktorach SBR. Stanowisko badawcze (rys. 1) zbudowane było z: komory o pojemności czynnej 4,5 dm³ z zamontowanymi magnetyzerami (1), komory o pojemności czynnej 4,5 dm³ bez magnetyzerów (2), zbiorników służących do magazynowania ścieków oczyszczonych (3,4), jednego zbiornika ze ściekami surowymi (5), mieszadła (6), czterech magnetyzerów o indukcji 0,6T każdy (7), dwóch pomp napowietrzających (8), dwóch urządzeń mieszających pracujących z prędkością 200 obr./min. (9), dwóch pomp odprowadzających ścieki oczyszczone (10), dwóch pomp doprowadzającej ścieki surowe (11). Zastosowane w badaniach magnetyzery składały się z dwóch części stanowiących pierścieni o określonej średnicy, który instalowano bezpośrednio na reaktorze. Elementem emitującym stałe pole magnetyczne w przypadku tego typu urządzenia były spieki ceramiczne trwale namagnesowane.

Reaktory pracowały w dwunastogodzinnych cyklach, których przebieg był sterowany automatycznie. Kolejność i czas trwania poszczegól-

Tabela 1. Charakterystyka syntetycznych ścieków mleczarskich użytych w badaniach**Table 1.** Characteristics of synthetic dairy wastewater used in research

Wskaźnik	Jednostka	Wariant I		Wariant II	
		wartość	odchylenie standardowe	wartość	odchylenie standardowe
ChZT	[mgO ₂ /dm ³]	4181	890	6889,5	609,5
BZT5	[mgO ₂ /dm ³]	3031,23	645,25	4994,53	441,89
Fosfor ogólny	[mg/dm ³]	147,5	28,5	245	33
Ortofosforany	[mg/dm ³]	53,25	13,15	74,3	5,8
Azot ogólny	[mg/dm ³]	134,9	24,0	233,3	65,3
Azot amonowy	[mg/dm ³]	21	2,4	35	1,7
Azot azotynowy	[mg/dm ³]	0,00015	0,00005	0,00028	0,0001
Azot azotanowy	[mg/dm ³]	0,5	0,15	0,8	0,13
Odczyn	[pH]	4,8	0,2	3,9	0,1
Temperatura	[°C]	20,2	1,2	20,25	0,85



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Schematic research stand

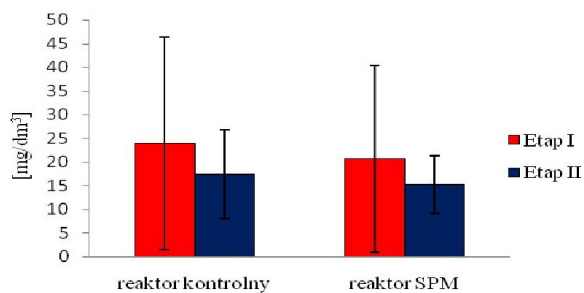
gólnych faz był następujący: napełnianie – 0,5h (dozowano 200 cm³ ścieków surowych), mieszanie – 1,5h, napowietrzanie – 9,0h, sedymentacja – 0,5h, spust – 0,5h (odbierano 200 cm³ ścieków oczyszczonych). Ścieki surowe przetrzymywane były w zbiorniku retencyjnym stale mieszanym z wykorzystaniem mieszadła magnetycznego. Celem mieszania ścieków było ich ujednoczenie i niedopuszczenie do tworzenia aglomeratów białkowych.

Efektywność pracy reaktorów określano na podstawie badań fizyko-chemicznych zawartości związków biogenych w ściekach surowych i oczyszczonych. Próby do analiz pobierano raz na dobę. Eksperymenty trwały przez okres 90 dni. Wykonywano następujące analizy: stężenia BZT5 metodą rozcieńczeń, zawartości azotu ogólny metodą HACH 338; 5 – 200 mg/l, zawartości azotu amonowego testem kuwetowym HACH 303; 2,5 – 60 mg/l, zawartości ortofosforanów metodą HACH 350; 6 – 60 PO₄, zawartości fosforu ogólnego testem kuwetowym HACH 10127; 0 – 100 mg/l.

Analizę statystyczną uzyskanych wyników wykonano w oparciu o pakiet STATISTICA 10.0 PL. Weryfikację hipotezy dotyczącej rozkładu każdej badanej zmiennej określono na podstawie testu W Shapiro-Wilka. W celu stwierdzenia istotności różnic między zmiennymi przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Sprawdzenia jednorodności wariancji w grupach dokonano z wykorzystaniem testu Levene'a. W celu określenia istotności różnic między analizowanymi zmiennymi test RIR Tukeya. W testach przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$.

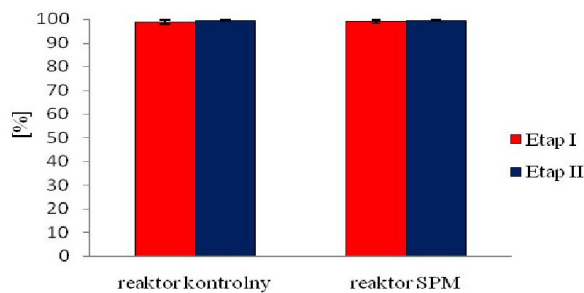
WYNIKI

Stężenie BZT5 w ściekach surowych wynosiło 3031,25±645,25 mg/dm³ w wariancie I oraz 4994,53±441,89 mg/dm³ w II. Wartość tego wskaźnika w procesie oczyszczania w układzie SPM została ograniczona w zależności od wariantu do poziomu 20,66±19,79 mg/dm³ i 15,26±6,09 mg/dm³. W układzie kontrolnym uzyskano 23,85±22,48 mg/dm³ wariantie I i 17,4±9,31 mg/dm³ w II wariantie eksperymentalnym (rys. 2). Stopień usunięcia BZT5 był bardzo wysoki i mieścił się, w zależności od stosowanego obciążenia, w zakresie od 99,1±0,8% do 99,68±0,15% w układzie SPM oraz od 98,95±0,95% do 99,6±0,23% w reaktorze kontrolnym (rys. 3). Z uzyskanych danych wynika, iż zastosowany wariant nie miał wpływ na efektywność usuwania BZT5 ze ścieków. Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, iż nie istnieją istotne statystycznie różnice usuwania BZT5 ze ścieków w zależności od zastosowanego wariantu.



Rys. 2. Stężenie BZT5 w ściekach oczyszczonych w pierwszym i drugim etapie badań

Fig. 2. The concentration of BOD in wastewater treated of the first and second stage of research

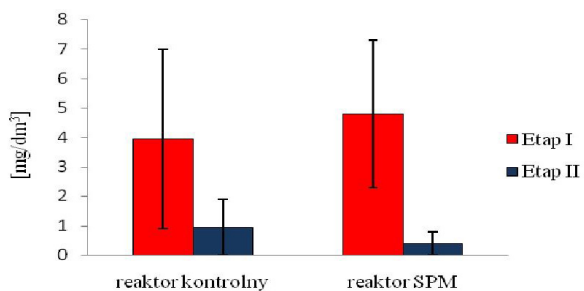


Rys. 3. Efektywność usuwania BZT5 w pierwszym i drugim etapie badań

Fig. 3. The efficiency of BOD removal of the first and second stage of research

Stężenie fosforu ogólnego w ściekach surowych w I wariantcie badań wyniosło $147,5 \pm 28,5$ mg/dm^3 , a w wariantcie II 245 ± 33 mg/dm^3 . Wartość tego wskaźnika w ściekach oczyszczonych pochodzących z układu SPM w wariantcie I wyniosła $4,8 \pm 2,5$ mg/dm^3 , a w wariantcie II $0,4 \pm 0,4$ mg/dm^3 . W układzie kontrolnym stwierdzono $3,95 \pm 3,05$ mg/dm^3 w wariantcie I oraz $0,95 \pm 0,95$ mg/dm^3 w wariantcie II (rys. 4). Stopień usunięcia fosforu ogólnego w układzie SPM wynosił $96,3 \pm 2,4\%$ w wariantcie I, $99,8 \pm 0,2\%$ w wariantcie II, natomiast w układzie kontrolnym kolejno $96,8 \pm 2,7\%$ oraz $99,55 \pm 0,45\%$ w wariantcie II (rys. 5). Analiza otrzymanych wyników stężeń fosforu ogólnego w ściekach oczyszczonych pozwala stwierdzić, iż nie wystąpiły istotne statystycznie różnice w stężeniu azotu w ściekach oczyszczonych w zależności od zastosowanego wariantu eksperymentu.

Stężenie ortofosforanów w ściekach surowych wynosiło $53,25 \pm 13,15$ mg/dm^3 w wariantcie I oraz $74,3 \pm 5,8$ mg/dm^3 w II. Wartość tego wskaźnika w procesie oczyszczania w układzie SPM została ograniczona w zależności od wariantu do po-

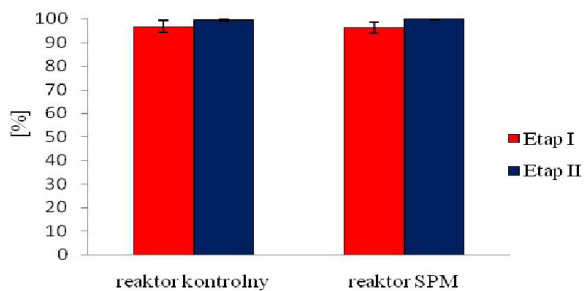


Rys. 4. Stężenie fosforu ogólnego w ściekach oczyszczonych w pierwszym i drugim etapie badań

Fig. 4. The concentration of total phosphorus in wastewater treated of the first and second stage of research

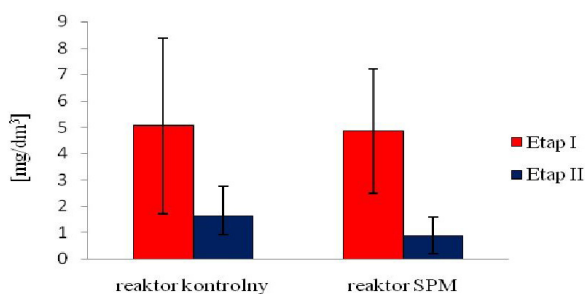
ziomu $4,85 \pm 2,35$ mg/dm^3 i $0,875 \pm 0,685$ mg/dm^3 . W układzie kontrolnym uzyskano $5,05 \pm 3,35$ mg/dm^3 w wariantcie I i $1,61 \pm 1,14$ mg/dm^3 w wariantcie II w układzie kontrolnym (rys. 6). Stopień usunięcia ortofosforanów był bardzo wysoki i mieścił się, w zależności od stosowanego obciążenia, w zakresie od $89,1 \pm 7,1\%$ do $98,75 \pm 1,05\%$ w układzie SPM oraz od $88,25 \pm 9,15\%$ do $97,7 \pm 1,7\%$ w reaktorze kontrolnym (rys. 7). Z uzyskanych danych wynika, iż zastosowany wariant nie miała wpływ na efektywność usuwania ortofosforanów ze ścieków. Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, iż nie istnieją istotne statystycznie różnice usuwania ortofosforanów ze ścieków w zależności od zastosowanego wariantu.

Ścieki surowe zawierały $147,55 \pm 35,45$ mg/dm^3 w wariantcie I oraz $233,3 \pm 65,3$ mg/dm^3 w wariantcie II azotu ogólnego. Na odpływie stężenie azotu ogólnego notowano na poziomie $6,24 \pm 3,59$ mg/dm^3 w układzie SPM i $4,73 \pm 3,63$ mg/dm^3 w SBR kontrolnym w wariantcie I oraz kolejno $2,6 \pm 1,54$ mg/dm^3 i $1,38 \pm 0,78$ mg/dm^3 w wariantcie II (rys. 8). Sprawność usuwania tego wskaźnika zanieczyszczeń niezależnie od



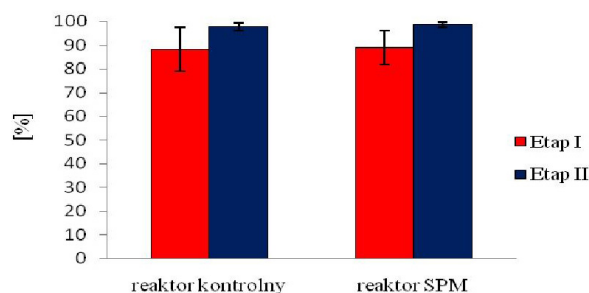
Rys. 5. Efektywność usuwania fosforu ogólnego w pierwszym i drugim etapie badań

Fig. 5. The efficiency of phosphorus removal of the first and second stage of research



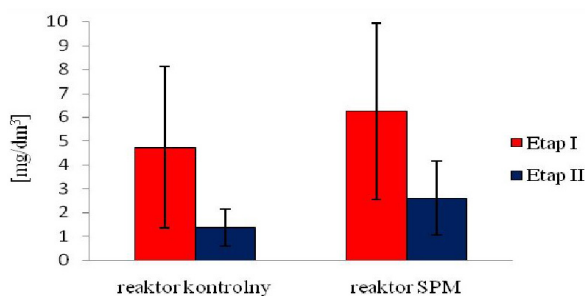
Rys. 6. Stężenie ortofosforanów w ściekach oczyszczonych w pierwszym i drugim etapie badań

Fig. 6. The concentration of orthophosphate in wastewater treated of the first and second stage of research



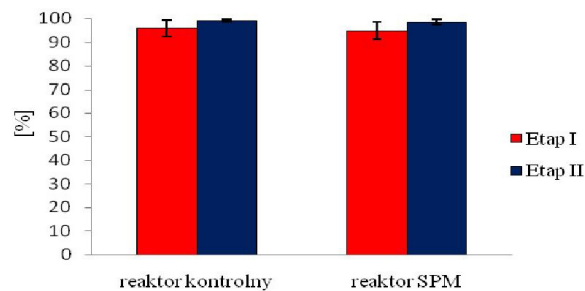
Rys. 7. Efektywność usuwania ortofosforanów w pierwszym i drugim etapie badań

Fig. 7. The efficiency of orthophosphate removal of the first and second stage of research



Rys. 8. Stężenie azotu ogólnego w ściekach oczyszczonych w pierwszym i drugim etapie badań

Fig. 8. The concentration of total nitrogen in wastewater treated of the first and second stage of research



Rys. 9. Efektywność usuwania azotu ogólnego w pierwszym i drugim etapie badań

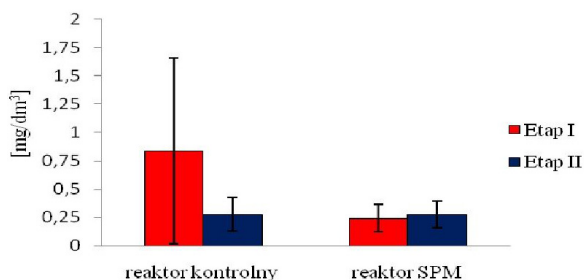
Fig. 9. The efficiency of total nitrogen removal of the first and second stage of research

wariantu technologicznego kształtowała się na poziomie powyżej 95% (rys. 9) Zawartość azotu amonowego w ściekach oczyszczonych wynosiła w zależności od wariantu badań $0,835 \pm 0,82$ i $0,275 \pm 0,145$ w układzie kontrolnym oraz $0,24 \pm 0,12$ i $0,275 \pm 0,115$ w układzie z polem magnetycznym (rys. 10). Usuwanie było bardzo efektywne i kształtowało się na poziomie powyżej 97% (rys. 11). Z uzyskanych wyników usuwania ze ścieków azotu ogólnego oraz azotu amonowego można wnioskować, iż zastosowany wariant nie ma wpływu na efektywność usuwania tych związków ze ścieków oraz że nie istnieją istotne statystycznie różnice usuwania ich ze ścieków pomiędzy wariantami.

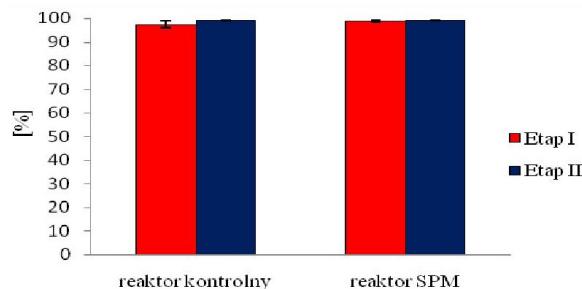
Wielu badaczy wykazuje, że SPM intensyfikuje biodegradację związków organicznych. Rutkowska-Naroźniak (1997) obserwowała, że procesy nityfikacyjne zachodziły intensywniej w układzie poddanym działaniu PM o indukcji 7 mT. Autorka stwierdziła 10-krotnie wyższy przyrost azotanów w próbie eksponowanej na działanie czynnika fizycznego w porównaniu do

próby kontrolnej (przy działaniu w sposób ciągły na mikroorganizmy osadu czynnego). Urządzenie magnetostatyczne zainstalowane było bezpośrednio na komorze osadu czynnego [Rutkowska-Naroźniak 1997]. Wyższą wydajność procesu nityfikacji w układach eksponowanych w PM potwierdziły też badania Janosz-Rajczyk i Tomskiej (2006). Najintensywniej proces zachodził przy indukcji pola magnetycznego równej 40 mT (na mikroorganizmy osadu czynnego okresowo oddziaływano; magnetyzer zainstalowany był na przewodzie recykulacyjnym osadu czynnego) [Janosz-Rajczyk i in. 2006].

Przemiany związków azotowych w procesie oczyszczania ścieków w reaktorze SBR przy udziale SPM analizowały Janosz-Rajczyk i Tomaska (2002). Przy obciążeniu osadu czynnego od ok. 0,4 do 0,7 g ChZT·g_{sm}⁻¹·d⁻¹ nie obserwowano azotu amonowego w odpływie z reaktorów. Stwierdzono, że stężenie azotu organicznego utrzymywało się na wyrównanym poziomie niezależnie od wariantu technologicznego. Natomiast zwiększając obciążenie osadu czynnego od



Rys. 10. Stężenie azotu amonowego w ściekach oczyszczonych w pierwszym i drugim etapie badań
Fig. 10. The concentration of ammonium nitrogen in wastewater treated of the first and second stage of research



Rys. 11. Efektywność usuwania azotu amonowego w pierwszym i drugim etapie badań
Fig. 11. The efficiency of ammonium nitrogen removal of the first and second stage of research

0,8 do 0,9 g ChZT·g_{sm}⁻¹·d⁻¹ spowodowało zwiększenie wydajności przemian związków azotu w układzie, w którym na osad recykulowany oddziaływało PM o indukcji 40 mT. W innym doświadczeniu odnotowano natomiast wyższy stopień usunięcia azotu ze ścieków na które oddziaływało stałym polem magnetycznym w odniesieniu do kontroli, przy obciążeniu substratowym osadu czynnego równym 0,24 i 0,42 g ChZT·g_{sm}⁻¹·d⁻¹ [Janosz-Rajczyk i in. 2002].

W doświadczeniu badającym wpływ SPM o indukcji w zakresie 8,9–46,6 mT na aktywność osadu czynnego w procesie oczyszczania ścieków Yavauz i Celabi stwierdzili wyższe o 44% efekty usunięcia zanieczyszczeń i przyrostu mikroorganizmów w porównaniu do modelu kontrolnego. Maksymalna aktywność mikroorganizmów została zanotowana na poziomie indukcji magnetycznej 17,8 mT, wraz ze wzrostem indukcji SPM spadała. Badacze wykazali, że SPM wywiera korzystny wpływ na aktywność metaboliczną mikroorganizmów, co w rezultacie przyczynia się do podwyższenia sprawności oczyszczania ścieków [Yavauz i in. 2000].

WNIOSKI

Zrealizowane prace badawcze udowodniły, iż wprowadzenie do układu oczyszczania ścieków mleczarskich w systemie SBR stałego pola magnetycznego o indukcji 0,6 T nie wpłynęło istotnie na poprawę efektywności usuwania związków biogenych. Czynnikiem, który miał decydujący wpływ na obserwowaną efektywność procesu usuwania związków azotu i fosforu był obciążenie komór biologicznych ładunkiem związków organicznych.

LITERATURA

1. Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M., Brudniak A., 2014, Effect of magneto-active filling on the effectiveness of methane fermentation of dairy wastewaters, *International Journal of Green Energy*, (DOI: 10.1080/15435075.2014.909362).
2. Janczukowicz W., Krzemieniewski M., Pesta J., 1998, Zastosowanie komór osadu czynnego typu SBR do oczyszczania ścieków mleczarskich, *Przegląd mleczarski*, 10, 372–374, 1998.
3. Janosz-Rajczyk M., Tomska A., 2002, Wpływ pola magnetycznego na proces oczyszczania ścieków (część I) pt.: Przemiany związków organicznych i azotu w polu magnetycznym o indukcji 180mT, *Archiwum Ochrony Środowiska*. 28 (3): 51 - 61.
4. Janosz-Rajczyk M., Tomska A., 2006, Wpływ pola magnetycznego na proces oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego, *Gas, Woda i Technika Sanitarna* 2: 28-31.
5. Rutkowska – Narożoniak A., 1997, Zastosowanie stałego pola magnetycznego do intensyfikacji biodegradacji zanieczyszczeń w ściekach, *Praca doktorska*, Warszawa.
6. Wojnowska-Baryła I., Stachowiak D., 1997, Systemy oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego. Wydawnictwo ART, Olsztyn.
7. Yavauz H., Celebi S.S., 2000, Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment, *Enzyme and Microbial Technology* 26 (1): 22–27.
8. Zieliński M., Dębowski M., Krzemieniewski M., Dudek M., Grala A., 2014a Effect of constant magnetic field with various values of magnetic induction on effectiveness of dairy wastewaters treatment under anaerobic conditions, *Pol. J. Environ. Stud.* 23 (1), 255 – 261.
9. Zieliński M., Dębowski M., Krzemieniewski M., Brudniak A., 2014b, Effectiveness of dairy wastewater treatment in anaerobic reactors with magnetoactive filling. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. (DOI: 10.1002/ep.12007).