

# Wpływ stałego pola magnetycznego na fermentację metanową komunalnych osadów ściekowych

## Influence of a constant magnetic field on methane fermentation of municipal sewage sludge

Marcin Zieliński, Marcin Dębowski, Joanna Kazimierowicz<sup>\*)</sup>

**Słowa kluczowe:** komunalne osady ściekowe, stabilizacja beztlenowa, fermentacja metanowa, stałe pole magnetyczne, biogaz, metan

### Streszczenie

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu zastosowania stałego pola magnetycznego na efektywność fermentacji metanowej komunalnych osadów ściekowych. Stwierdzono istotny wpływ tego czynnika fizycznego na skład jakościowy biogazu. Największą wydajność produkcji metanu na poziomie  $431 \pm 22 \text{ dm}^3 \text{CH}_4/\text{kg s.m.o.}$  oraz jego procentową zawartość wynoszącą  $66,1 \pm 1,9\%$  stwierdzono w wariancie, w którym czas zatrzymania w obszarze oddziaływania pola magnetycznego wynosił 144 min/doba. Najniższe efekty zanotowano, gdy czas zatrzymania w polu magnetycznym wynosił 432 min/doba. W wariancie tym uzyskano  $54,8 \pm 1,9\%$  zawartość  $\text{CH}_4$  w biogazie.

**Keywords:** municipal sewage sludge, anaerobic stabilization, methane fermentation, constant magnetic field, biogas, methane

### Abstract

The aim of the study was to determine the effect of the application of a constant magnetic field on the efficiency of methane fermentation of municipal sewage sludge. A significant influence of this physical factor on the qualitative composition of biogas was found. The highest methane production efficiency at the level of  $431 \pm 22 \text{ dm}^3 \text{CH}_4/\text{kg o.d.m.}$  and its percentage content of  $66.1 \pm 1.9\%$  was found in the variant where the retention time in the area of the magnetic field impact was 144 min/ day. The lowest effects were observed when the retention time in the magnetic field was 432 min/ day. In this variant, the  $54.8 \pm 1.9\%$   $\text{CH}_4$  in the biogas was obtained.

## 1. Wstęp

Eksploatacja oczyszczalni ścieków związana jest ściśle z koniecznością prowadzenia odpowiedniej gospodarki osadowej. Powstające w procesie oczyszczania ścieków komunalne osady ściekowe muszą być poddawane procesom przeróbki, a następnie właściwie unieszkodliwione lub zagospodarowane [5]. Mimo, iż obserwuje się rozwój technik i metod postępowania z osadami, to opracowanie uniwersalnej, ekonomicznie uzasadnionej technologii ich skutecznej neutralizacji pozostaje ciągle sprawą otwartą. Istniejący problem jest coraz trudniejszy do rozwiązania, gdyż ilość osadów systematycznie wzrasta, a ich jakość rzadko odpowiada wymogom ochrony środowiska [11]. Progres ten związany jest zarówno z budową coraz większej liczby nowych oczyszczalni, jak i zaostreniem wymagań dotyczących jakości ścieków odprowadzanych do odbiorników [2].

Powszechnie uznawaną za najprostszą i najtańszą formę zagospodarowania osadów ściekowych jest ich przyrodnicze wykorzystanie. Sposób ten jest szeroko promowany, zarówno w literaturze naukowo – technicznej, jak i w krajowych czy międzynarodowych aktach prawnych [13]. Niestety, prócz walorów glebotwórczych i nawozowych, charakteryzują się one uciążliwością zapachową, znaczną zawartością związków organicznych podatnych za zagniwanie, co często ogranicza ich bezpośrednie wykorzystanie na cele rolnicze, przyrodnicze i rekultywacyjne [3,30]. Istnieje zatem realna potrzeba modernizacji eksploatowanych obecnie technologii oraz poszukiwania nowych rozwiązań, warunkujących usunięcie z osadów ściekowych elementów, stanowiących o ich uciążliwości dla środowiska [36].

Uzasadnioną technologicznie i uważaną za przyjazną środowisku metodą przeróbki osadów komunalnych jest ich beztlenowa stabilizacja w procesie fermentacji metanowej [18]. Poprawnie przeprowadzony proces fermentacji skutkuje ograniczeniem podatności na zagniwanie, częściową higienizacją, zmniejszeniem objętości oraz odzyskiem biogazu o wysokiej zawartości  $\text{CH}_4$  [9,12,25]. Efekty te często są intensyfikowane poprzez wstępne kondycjonowanie i dezintegrację osadów [21,22]. W procesach tych następuje niszczenie struktury osadu, w tym fragmentacja kłaczków, niszczenie komórek mikroorganizmów, uwalnianie substancji organicznych oraz polimerów pozakomórkowych do fazy rozpuszczonej [23,34]. Są to jednak rozwiązania kosztowne inwestycyjnie oraz operacyjnie, skomplikowane technologicznie i często nieopłacalne dla eksploatatorów oczyszczalni ścieków [31].

Istnieje zatem uzasadniona potrzeba poszukiwania alternatywnych, perspektywicznych i konkurencyjnych metod, zmierzających do neutralizacji osadów ściekowych. Niewiele jest doniesień o możliwości zastosowania stałego pola magnetycznego w procesach poprawienia efektywności fermentacji metanowej. Istnieją jednak przesłanki do podjęcia prac badawczych, w celu weryfikacji wpływu tego czynnika fizycznego na procesy beztlenowej stabilizacji tego rodzaju odpadów. W dotychczasowych badaniach udowodniono, że pole magnetyczne ma pozytywny wpływ na wiele właściwości płynów, tj. zmienia polaryzację i ładunek elektryczny cząstek [37]. Zaobserwowano, że pole magnetyczne może wpływać na wzrost wydajności metabolizmu mikroorganizmów [24]. Efekt ten zależy od natężenia i częstotliwości pola, statycznego lub oscylacyjnego charak-

<sup>\*)</sup> **Marcin Zieliński**, prof. dr hab. inż. – Katedra Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Ochrony Środowiska, Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, 10-720 Olsztyn, marcin.zielinski@uwm.edu.pl; **Marcin Dębowski**, prof. dr hab. inż. – Katedra Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii i Ochrony Środowiska, Wydział Geoinżynierii, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Olsztyn, marcin.debowski@uwm.edu.pl; **Joanna Kazimierowicz**, dr inż. – Katedra Wodociągów i Kanalizacji, Instytut Inżynierii Środowiska i Energetyki, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku, Politechnika Białostocka, 15-351 Białystok, j.kazimierowicz@pb.edu.pl.

teru pola magnetycznego [10, 32]. Udowodniono, iż zastosowanie pole magnetycznego o indukcji 150 i 350 mT poprawia efektywność biodegradacji zanieczyszczeń w systemach biologicznych [17].

Celem prowadzonych badań było określenie wpływu zastosowania stałego pola magnetycznego, jako czynnika wpływającego na przebieg i efektywność procesu fermentacji metanowej komunalnych osadów ściekowych oraz ilość i skład jakościowy wytwarzanego biogazu.

## Metodyka

Eksperymenty podzielono na siedem wariantów. Kryterium podziału był stosowany czas hydraulicznego zatrzymania komunalnych osadów ściekowych w obszarze oddziaływania stałego pola magnetycznego. Różnice w czasie zatrzymania uzyskano przez wielokrotne pompowanie mieszaniny osadu beztlenowego i stabilizowanych, komunalnych osadów ściekowych przez obszar narażony na oddziaływanie pola magnetycznego. Koncepcję zrealizowanych prac badawczych przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1. Organizacja eksperymentów

Table 1. Organization of experiments

Wariant	Liczba przepompowań przez obszar stałego pola magnetycznego (razy/h)	Wydajność pompy obiegowej (dm <sup>3</sup> /h)	Hydrauliczny czas zatrzymania w polu magnetycznym (min/doba)
W1	0	0	0
W2	2	8	72
W3	4	16	144
W4	6	24	216
W5	8	32	288
W6	10	40	360
W7	12	48	432

Komunalne osady ściekowe (KOŚ) i osad beztlenowy (OB), który stanowił inokulum dla reaktorów fermentacyjnych, pochodził z miejskiej oczyszczalni ścieków w Olsztynie. Oczyszczalnia pracuje w systemie osadu czynnego, z pełnym biologicznym usuwaniem związków biogennych. Powstające osady są stabilizowane w dwóch zamkniętych komorach o łącznej objętości 20000 m<sup>3</sup>. Komory pracują przy zastosowaniu obciążenia ładunkiem związków organicznych na poziomie 2,4 kg o.d.m./m<sup>3</sup>·d, hydrauliczny czas zatrzymania wynosi 20 dni, a temperatura procesu 35°C. Charakterystykę nadmiernych osadów ściekowych oraz osadu beztlenowego przedstawiono w tab. 2.

Tabela 2. Charakterystyka osadów stosowanych w eksperymentach

Table 2. Characteristics of the sludge used in the experiments

Wskaźnik	Jednostka	KOŚ	OB
pH	-	7,1±0,2	7,3±0,1
Sucha masa (s.m.)	[%]	3,5±0,6	1,8±0,2
Sucha masa organiczna (s.m.o.)	[%s.m.]	77,4±1,2	67,3±0,7
Sucha masa mineralna (s.m.m.)	[%s.m.]	22,6±1,3	31,7±1,1
Węgiel całkowity	[mg/g s.m.]	460±24	283±17
Ogólny węgiel organiczny	[mg/g s.m.]	371±19	192±11
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	45±5	24±3
Fosfor ogólny	[mg/g s.m.]	1,7±0,4	1,3±0,2
C/N	-	10±1,2	11±1,4
Białko	[%s.m.]	19,4±2,1	14,9±2,7
Tłuszcze	[%s.m.]	12,1±1,6	3,6±0,9
Cukry	[%s.m.]	17,45±3,3	1,4±0,2

W badaniach zastosowano reaktory beztlenowe z całkowitym wymieszaniem o objętości czynnej 4,0 dm<sup>3</sup>. Reaktory wyposażono w czterołopatkowe mieszadła wolnoobrotowe o osi pionowej, które pracowały z prędkością obrotową 45 obr./min. Początkowe stężenie osadu beztlenowego utrzymywano na poziomie około 4,0 g s.m./dm<sup>3</sup>. Fermentację metanową prowadzono w temperaturze 35°C, przy poziomie obciążenia komory wynoszącym 2,0 kgs.m.o./dm<sup>3</sup>·d. HRT wynosiło 20 dni. Reaktory beztlenowe zostały wyposażone w pompę cyrkulacyjną, która zapewniała dodatkowe mieszanie w reaktorach beztlenowych i wprowadzała mieszaninę osadu beztlenowego i komunalnych osadów ściekowych w obszar wystawiony na działanie stałego pola magnetycznego. W zależności od wariantu pompa pracowała z wydajnością od 8,0 do 48,0 dm<sup>3</sup>/h, aby uzyskać pożądany czas ekspozycji stałego pola magnetycznego. W każdym wariantcie równolegle prowadzono badania w reaktorze odniesienia, w którym zapewniono analogiczne warunki hydrauliczne związane z wydajnością pompowania, bez stosowania magnetycznego aktywatora płynów. Stwierdzono, iż praca pompy cyrkulacyjnej nie miała wpływu na przebieg i uzyskiwane efekty fermentacji metanowej.

Zastosowany w eksperymencie magnetyczny aktywator płynów zbudowano z dwóch części tworzących pierścieni. Urządzenie zainstalowano na plastikowej rurze o średnicy 2,5 cm, która służyła do przepompowywania zawartości reaktorów. W celu zwiększenia obszaru bezpośredniego oddziaływania stałego pola magnetycznego zastosowano zestaw składający się z dwóch pierścieni generujących stałe pole magnetyczne. W przypadku tego typu urządzenia elementami emitującymi stałe pole magnetyczne są trwale namagnesowane stosy ceramiczne. Parametry techniczne magnetycznego aktywatora płynów użytego w eksperymencie były następujące: szerokość pierścienia 65 mm; wysokość pojedynczego magnesu ceramicznego 45 mm; waga pojedynczego pierścienia 0,5 kg; zakres średnic nominalnych 15–30 mm i nominalne natężenie indukowanego stałego pola magnetycznego 0,6 T. Indukcję wewnątrz rury mierzono cyfrowym Gaussmeter LZ-641H (ENES Magnesy). Gaussmeter był zanurzony w cieczy, a odległość między punktami pomiarowymi wynosiła 0,5 cm. Indukcja magnetyczna malała wraz z odległością od źródła pola od 30 mT bezpośrednio przy źródle pola do 8 mT w środku rury. Przyjęto średnią wartość indukcji magnetycznej 17,6 mT.

## Metody analityczne

We wszystkich eksperymentach przeprowadzono analizy jakościowe komunalnych osadów ściekowych oraz osadu beztlenowego stanowiącego inokulum eksploatowanych komór fermentacyjnych. Zawartość suchej masy (s.m.), suchej masy organicznej (s.m.o.) i suchej masy mineralnej (s.m.m.) oznaczono metodą grawimetryczną. Węgiel całkowity i organiczny oznaczono wykorzystując wysokotemperaturowy rozkład z detekcją podczerwieni za pomocą analizatora Analytik Jena TOC multi NC 3100. Azot całkowity i fosfor ogólny oznaczono metodą spektrofotometryczną po wcześniejszej mineralizacji na spektrometrze Hach DR6000. Zawartość białka oszacowano wykorzystując współczynnik przeliczeniowy 6,25·Ncałk. Cukry mierzono przy zastosowaniu chromatografii gazowej na aparacie GC/MS/MS firmy Agilent Technologies 7890B, a tłuszcze (ekstrakt eterowy) metodą grawimetryczną rozpuszczalnikiem według normy PN-86/C-04573/01. pH oznaczono metodą potencjometryczną.

Chwilowy i całkowity przepływ biogazu w reaktorach mierzono za pomocą przepływomierza gazu (Aalborg Instruments & Controls, Inc.). Skład i zawartość procentową poszczególnych składników biogazu analizowano za pomocą chromatografu gazowego (7890A Agilent) wyposażonego w detektor termokonduktometryczny. Ponadto przeprowadzono analizę jakości powstałego biogazu za pomocą analizatora GFM 430 (Gas Data).

## Metody obliczeniowe

Stopień przefermentowania, czyli wyrażony w procentach stosunek ładunku suchej masy organicznej usuniętej w reaktorze do ładunku suchej masy organicznej wprowadzonej do reaktora (1) oraz stopień usuwania (sprawność) suchej masy organicznej (2) wyznaczano z równań:

$$\eta_F KOS = \frac{VS_{in} \cdot \rho_{in} \cdot Q_{in} - VS_{out} \cdot \rho_{out} \cdot Q_{out}}{VS_{in} \cdot \rho_{in} \cdot Q_{in}} \quad (1)$$

$$\eta_{s.m.o.} = \frac{VS_{in} \cdot Q_{in} - VS_{out} \cdot Q_{out}}{VS_{in} \cdot Q_{in}} \quad (2)$$

gdzie:

$\eta_F KOS$  – stopień przefermentowania [%],  $\eta_{s.m.o.}$  – stopień usuwania suchej masy organicznej [%],

$VS_{in}$  – stężenie suchej masy organicznej we wsadzie do reaktora [g/kg],

$VS_{out}$  – stężenie suchej masy organicznej w osadach pofermentacyjnych [g/kg],

$\rho_{in}$  – gęstość wsadu [kg/dm<sup>3</sup>],

$\rho_{out}$  – gęstość osadów pofermentacyjnych [kg/dm<sup>3</sup>],

$Q_{in}$  – dobowa objętość wsadu zasilającego reaktor [dm<sup>3</sup>/d],

$Q_{out}$  – dobowa objętość osadu odprowadzanego z reaktora [dm<sup>3</sup>/d].

Wydajność produkcji biogazu/CH<sub>4</sub>, w odniesieniu do ładunku usuniętej suchej masy organicznej (3) oraz wydajność produkcji biogazu/CH<sub>4</sub>, w odniesieniu do ładunku suchej masy organicznej wprowadzanej ze wsadem do reaktora (4) obliczono jako:

$$Y_{b/CH_4}^{s.m.o.us} = \frac{V_{b/CH_4}}{(s_{in}^{VS} \cdot \rho_{in} \cdot Q_{in} - s_{out}^{VS} \cdot \rho_{out} \cdot Q_{out})/1000} \quad (3)$$

$$Y_{b/CH_4}^{s.m.o.in} = \frac{V_{b/CH_4}}{(s_{in}^{VS} \cdot \rho_{in} \cdot Q_{in})/1000} \quad (4)$$

$Y_{b/CH_4}^{s.m.o.us}$  – wydajność produkcji biogazu w odniesieniu do usuniętej suchej masy organicznej [dm<sup>3</sup>/kgVSus],

$Y_{b/CH_4}^{s.m.o.in}$  – wydajność produkcji biogazu w odniesieniu do suchej masy organicznej we wsadzie [dm<sup>3</sup>/kgVSin],

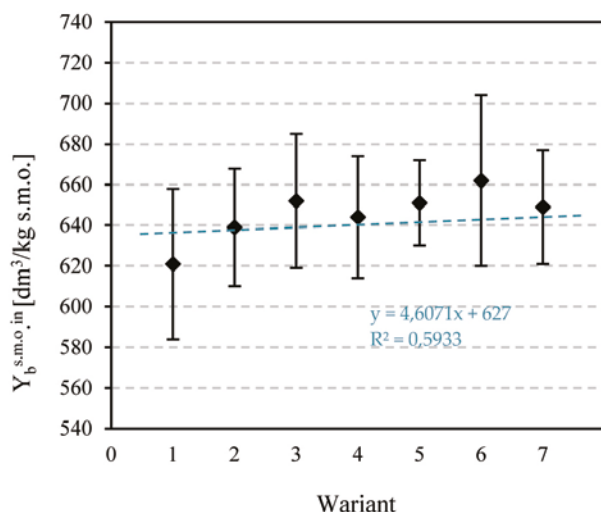
$V_{b/CH_4}$  – objętość biogazu/CH<sub>4</sub> wytworzonego z porcji wsadu [dm<sup>3</sup>],

$s_{in}^{VS}$  – stężenie suchej masy organicznej we wsadzie [g/kg],

$s_{out}^{VS}$  – stężenie suchej masy organicznej w osadach pofermentacyjnych [g/kg],

$Q_{in}$  – objętość wsadu wprowadzona jednorazowo do reaktora [dm<sup>3</sup>],

$Q_{out}$  – objętość osadów pofermentacyjnych odprowadzona jednorazowo z reaktora po fermentacji metanowej [dm<sup>3</sup>].



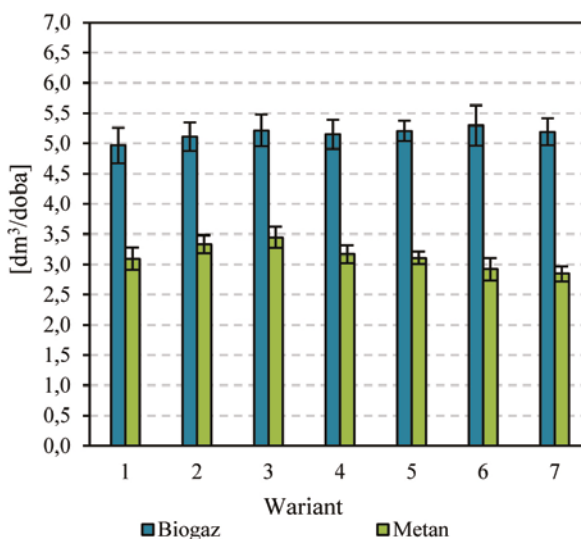
Rys. 1. Wydajność produkcji biogazu  
Fig. 1. TEfficiency of biogas production

## Analizy statystyczne

Badania w każdym wariancie technologicznym prowadzono przez okres 60 dni, co było trzykrotnością hydraulicznego czasu zatrzymania – 20 dni. Próby biogazu do analiz pobierano co 3 dni. Analizę statystyczną uzyskanych wyników wykonano w oparciu o pakiet STATISTICA 13.1 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

Wiele dotychczasowych badań wskazuje, że zastosowanie stałego pola magnetycznego wpływa na kształtowanie się biocenzu mikrobiologicznego oraz na przemiany biochemiczne prowadzone przez drobnoustroje, biorące udział w procesach biodegradacji zanieczyszczeń. Udowodniono, kilkukrotnie wyższą sprawność nityfikacji w układzie ze stałym polem magnetycznym o indukcji 7 mT [14,15]. Pozytywny wpływ stałego pola magnetycznego (5mT) na produkcję nyzyny przez *Lactococcus lactis* obserwowali Alvarez i in. (2006) [1]. Yavuz i Celabi (2000) [33] uzyskali wyższe o 44% efekty biodegradacji związków organicznych w ściekach metodą osadu czynnego przy zastosowaniu stałego pola magnetycznego o indukcji w zakresie 8,9÷46,6 mT. Istniejące w literaturze doniesienia oraz dotychczasowe prace własne autorów stały się podstawą do przeprowadzenia badań nad wykorzystaniem stałego pola magnetycznego do intensyfikacji fermentacji metanowej komunalnych osadów ściekowych. Zastosowana w badaniach własnych indukcja stałego pola magnetycznego na średnim poziomie 17,6 mT, wybrana została na podstawie dostępnych doniesień naukowych. Yavuz i Celabi (2000) [33] notowali najwyższą aktywność biochemiczną mikroorganizmów przy stałym polu magnetycznym o indukcji 17,8 mT. Wraz ze wzrostem indukcji stałego pola magnetycznego wydajność biodegradacji związków organicznych istotnie spadała. Do podobnych wniosków doszli Ji i in. (2010) [16], którzy analizowali wpływ stałego pola magnetycznego od 0 do 20 mT na proces biologicznego oczyszczania ścieków. Udowodniono,



Rys. 2. Dobowa produkcja biogazu i metanu  
Fig. 2. Daily biogas and methane production

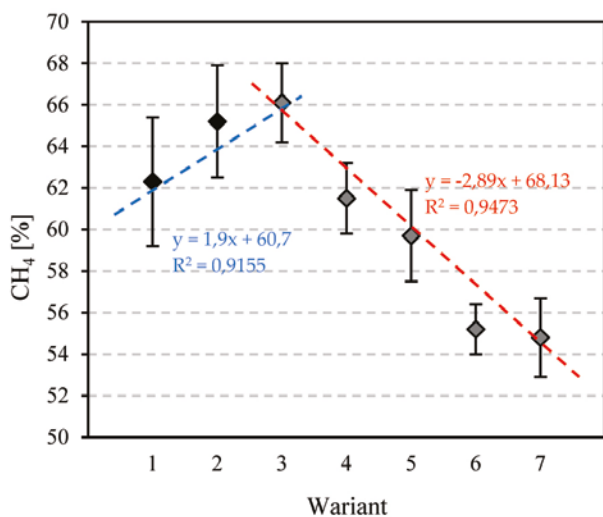
iz odpowiedni poziom indukcji stałego pola magnetycznego, który stymuluje aktywność metaboliczną mikroorganizmów i wpływa na skuteczność oczyszczania ścieków, nie powinien przekraczać 17,8 mT.

W przeprowadzonych pracach badawczych nie stwierdzono istotnego wpływu ( $p=0,05$ ) zastosowania stałego pola magnetycznego na wydajność produkcji biogazu.  $Y_{b^s.m.o.in}$  mieściła się z granicami od  $621 \pm 37$   $\text{dm}^3/\text{kgs.m.o.}$  (W1) do  $662 \pm 42$   $\text{dm}^3/\text{kgs.m.o.}$  (W3) (rys. 1). Dobowa produkcja wynosiła blisko 5  $\text{dm}^3/\text{doba}$  niezależnie od czasu ekspozycji na stałe pole magnetyczne (rys. 2). Nie stwierdzono również korelacji między stosowanym wariantem technologicznym a ilością wytwarzanego biogazu (rys. 1).

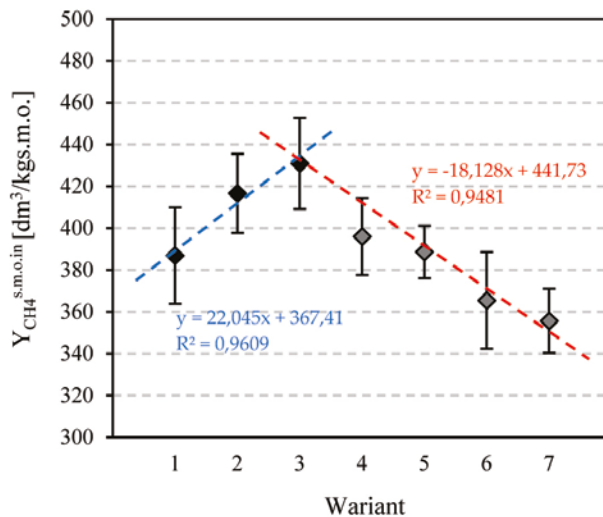
Do odmiennych wniosków doszedł Zhao et al. (2020) [35]. Badacze wykazali, iż stałe pole magnetyczne może potencjalnie zwiększyć produkcję biogazu poprzez przekształcanie odpadów rolniczych w energię. Opracowano eksperymentalny system produkcji biogazu z płaskim okrągłym magnesem trwałym, z centralnym otworem zapewniającym stałe pole magnetyczne, aby zwiększyć produkcję biogazu z substratu ze słomy kukurydzianej bez obróbki wstępnej podczas fermentacji. Stwierdzono, że optymalne natężenie stałego pola magnetycznego wynosi 11,4 mT ( $\pm 2\%$ ), co pozwoliło na wzrost produkcji biogazu o 19,5% w porównaniu do układu bez stałego pola magnetycznego. Również Dębowski i in. (2014) [7] wykazali pozy-

tywny wpływ stałego pola magnetycznego na efektywność produkcji biogazu w reaktorze beztlenowym, stosowanym do oczyszczania ścieków mleczarskich. W eksperymencie testowano wypełnienie magnetoaktywne wyposażone w magnesy neodymowe o indukcji 0,39 T. Elementy wypełnienia magnetoaktywnego umieszczono w strefie hydrolizy. Badania wykazały, iż oddziaływanie stałego pola magnetycznego wpływało pozytywnie na ilość wytwarzanego biogazu oraz koncentrację  $\text{CH}_4$ . Stwierdzono, iż efektywność fermentacji ścieków mleczarskich była bezpośrednio związana z ilością elementów wypełnienia magnetoaktywnego wprowadzonych do reaktora beztlenowego i rosła wraz ze wzrastającą liczbą kształtek magnetoaktywnych w reaktorze [7]. Analogiczne rezultaty uzyskano w badaniach respirometrycznych fermentacji ścieków mleczarskich, prowadzonych w warunkach statycznych [37]. Intensywność magnetyczna na poziomie 230–260 mT zwiększyła produkcję gazu z odchodów krów o 203% w średniotemperaturowym środowisku fermentacji beztlenowej [28].

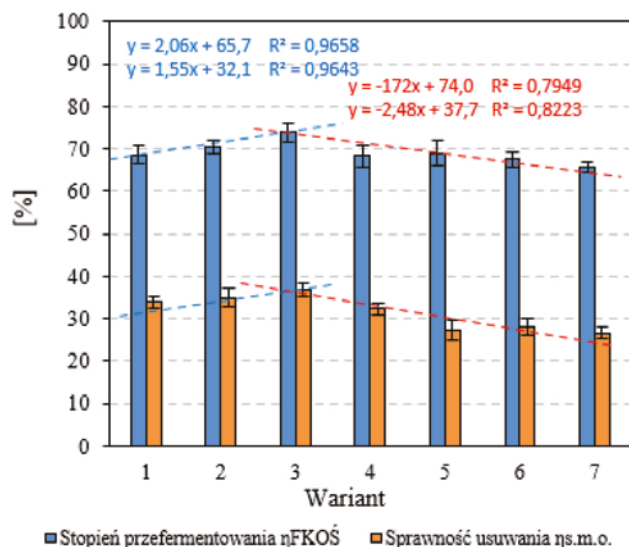
W badaniach własnych stwierdzono natomiast istotny wpływ magnetycznego aktywatora płynów na efektywność produkcji  $\text{CH}_4$ , a także  $\eta_{\text{FKOŚ}}$  i  $\eta_{\text{s.m.o.}}$ . W W1 zawartość  $\text{CH}_4$  osiągnęła średnią  $62,3 \pm 3,1\%$  (Rys. 3), a  $Y_{\text{CH}_4}^{s.m.o.in}$  wynosiła  $387 \pm 23$   $\text{dm}^3\text{CH}_4/\text{kgs.m.o.}$  (rys. 4).  $\eta_{\text{FKOŚ}}$  kształtowała się na poziomie  $68,6 \pm 2,1\%$ , a  $\eta_{\text{s.m.o.}}$  wyniósł  $33,8 \pm 1,4\%$  (rys. 5).



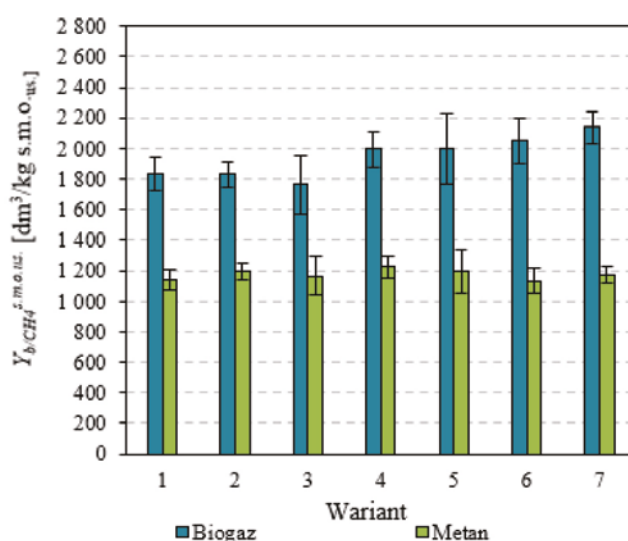
Rys. 3. Zawartość  $\text{CH}_4$   
Fig. 3.  $\text{CH}_4$  concentration



Rys. 4. Wydajność produkcji  $\text{CH}_4$   
Fig. 4.  $\text{CH}_4$  production efficiency



Rys. 5. Wskaźniki fermentacji metanowej  
Fig. 5. Methane fermentation indicators



Rys. 6. Wydajność produkcji biogazu i  $\text{CH}_4$  w odniesieniu do usuniętej s.m.o.  
Fig. 6. Efficiency of biogas and  $\text{CH}_4$  production in relation to the removed s.m.o.



W W2 oraz W3 obserwowano wyższą  $Y_{CH_4}^{s.m.o.in}$ , która wynosiła kolejno  $417 \pm 19 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kgs.m.o.}$  oraz  $431 \pm 22 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kgs.m.o.}$  (rys. 4). Zawartość  $\text{CH}_4$  w biogazie wynosiła kolejno  $65,2 \pm 2,7$  (W2) i  $66,1 \pm 1,9\%$  (W3) (rys. 3). Średnie obserwowane wartości były wyższe w stosunku do W1, jednak różnice te nie były istotne statystycznie ( $p=0,05$ ).  $\eta\text{FKOŚ}$  kształtował się na poziomie  $70,3 \pm 1,7\%$ , a  $\eta\text{s.m.o.}$  wynosił  $34,9 \pm 2,2\%$  (W2) oraz  $\eta\text{FKOŚ}$   $73,8 \pm 2,3\%$  i  $\eta\text{s.m.o.}$   $36,9 \pm 1,6\%$  (W3). Wartości tych wskaźników fermentacji metanowej w W3 były istotnie ( $p=0,05$ ) wyższe od obserwowanych w W1 (rys. 5). Stwierdzono pozytywną, liniową zależność między czasem zatrzymania w obszarze stałego pola magnetycznego a zawartością  $\text{CH}_4$  w biogazie,  $Y_b^{s.m.o.in}$ ,  $\eta\text{FKOŚ}$  i  $\eta\text{s.m.o.}$ . Dla tych wskaźników wartość współczynnika determinacji  $R^2$  wynosi powyżej 0,91.

Inne badania wykazały, że wydajność  $\text{CH}_4$  wzrosła o  $11,7\%$  w procesie fermentacji beztlenowej z dodatkiem biowęgla magnetycznego z wykorzystaniem odpadów komunalnych jako substratu [27]. Odkryto, że stałe pole magnetyczne zwiększa produkcję metanu, wykorzystując glony jako substrat [6]. Wysoką produkcję biogazu ( $449\text{--}457 \text{ dm}^3 / \text{ kgs.m.o.}$ ) z dużą zawartością  $\text{CH}_4$  ( $65,0\%$ ) uzyskano z biomasy alg, przy stałym polu magnetycznym wynoszącym  $0,6 \text{ T}$  [6].

Wydłużenie czasu ekspozycji na stałe pole magnetyczne wpłynęło istotnie ( $p=0,05$ ) na obniżenie wydajności wytwarzania  $\text{CH}_4$  w W4 oraz W5. Zawartość  $\text{CH}_4$  w biogazie wynosiła  $61,5 \pm 1,7\%$  (W4) i  $59,7 \pm 2,2\%$  (W5) (rys. 3), natomiast  $Y_{CH_4}^{s.m.o.in}$  została ograniczona do poziomu  $396 \pm 18 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kgs.m.o.}$  (W4) oraz  $389 \pm 18 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kgs.m.o.}$  (W5) (rys. 4). Najniższe wskaźniki fermentacji metanowej charakteryzowane efektywnością wytwarzania  $\text{CH}_4$  obserwowano w W6 i W7. Zawartość  $\text{CH}_4$  w biogazie mieściła się w wąskim zakresie od  $54,8 \pm 1,9\%$  (W7) do  $55,2 \pm 1,2\%$  (W6) (rys. 3). Zbliżona była również  $Y_{CH_4}^{s.m.o.in}$ , która w obu wariantach kształtowała się poziomie zbliżonym do  $360 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kgs.m.o.}$  (rys. 4). Niezależnie od wariantu nie stwierdzono istotnych różnic w  $Y_b^{s.m.o.in}$ . Wartości tego wskaźnika mieściły się w zakresie od  $1764 \pm 180 \text{ dm}^3 / \text{ kgs.m.o.us.}$  (W3) do  $2138 \pm 105 \text{ dm}^3 / \text{ kgs.m.o.us.}$  (W7) w przypadku biogazu oraz od  $1131 \pm 82 \text{ dm}^3 / \text{ kgs.m.o.us}$  (W6) do  $1194 \pm 83 \text{ dm}^3 / \text{ kgs.m.o.us}$  (W4) w odniesieniu do  $\text{CH}_4$  (rys. 6).

Inne badania również wykazały wpływ czasu ekspozycji stałego pola magnetycznego na uzyskiwane efekty technologiczne [29]. Ograniczenie efektywności procesu fermentacji metanowej obserwowane w W6 i W7 mogło być powodowane powstawaniem wolnych rodników w komórkach bakterii beztlenowych. Udowodniono, iż stałe pole magnetyczne może hamować wewnętrzny system krzyżujący /intersystemcrossing/, który prowadzi do utworzenia wiązania pomiędzy wolnymi rodnikami obecnymi i zmniejszenia ich ilości w układach biologicznych. Stąd pola magnetyczne uważa się za czynniki mogące generować wolne rodniki [8,20]. Negatywny wpływ wzrastającej indukcji magnetycznej na aktywność biochemiczną mikroorganizmów obserwowali również Chen i Li (2008) [4]. Wykazali, że produkcja poli-hydroksyalkanów z krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych w reaktorach SBR uzależniona jest od wartości indukcji stałego pola magnetycznego. Stwierdzono, że maksymalna synteza poli-3-hydroksymaślanu (PHB) występowała przy indukcji magnetycznej wynoszącej  $7 \text{ mT}$ , a minimalna przy  $42 \text{ mT}$ .

Dotychczasowe badania nie określają jednoznacznie miejsca umieszczenia stałego pola magnetycznego w ciągu technologicznym procesów, opartych na wykorzystaniu mikroorganizmów. Magnetyczne aktywatory płynów lokalizowane były w systemach SBR na przewodach służących do recyrkulacji osadu czynnego. Dzięki temu oddziaływały w sposób okresowy na mikroorganizmy osadu czynnego [14]. W analogiczny sposób zlokalizowane zostały MAP w badaniach własnych, dotyczących określenia możliwości wykorzystania stałego pola magnetycznego  $17,6 \text{ mT}$  w procesie poprawienia efektywności fermentacji metanowej komunalnych osadów ściekowych. W innych badaniach zastosowanie stałego

pola magnetycznego wspomagało tworzenie wolnych rodników hydroksylowych, których potencjał utleniający wykorzystywany był w procesie oczyszczania ścieków. Również w tym przypadku ścieki po wprowadzeniu odczynnika Fentona wielokrotnie przepompowywane były przez obszar poddany działaniu stałego pola magnetycznego [19].

## Wnioski

Przedstawione badania pozwalają stwierdzić, że zastosowanie stałego pola magnetycznego może być postrzegane jako perspektywiczna i obiecująca metoda intensyfikacji fermentacji metanowej komunalnych osadów ściekowych. Ekonomiczne względy procesu, w sposób bardzo przekonujący, skłaniają do podjęcia prób z zastosowaniem magnetycznych aktywatorów płynów jako urządzeń wspomagających systemy technologiczne przeróbki komunalnych osadów ściekowych. Magnetyczne aktywatory płynów charakteryzują się nieskomplikowaną konstrukcją i nie wymagają zasilania jakąkolwiek formą energii. Kiedy są prawidłowo eksploatowane natężenie nie ulega wyraźnemu osłabieniu w długim czasie. W cyklu wdrożeniowym mogą być one stosowane w instalacjach już pracujących, bez konieczności prowadzenia zabiegów adaptacyjnych i skomplikowanych prac modernizacyjnych. Czynności związane z ich założeniem lub zdjęciem z dowolnego miejsca czynnej instalacji są proste i szybkie, przy czym nie wymagają stosowania skomplikowanych narzędzi.

Stwierdzono istotny wpływ stałego pola magnetycznego na efektywność wytwarzania  $\text{CH}_4$ , a także  $\eta\text{FKOŚ}$  i  $\eta\text{s.m.o.}$ . Zastosowanie stałego pola magnetycznego nie miało natomiast wpływu na całkowitą produkcję biogazu. Najwyższą  $Y_{CH_4}^{s.m.o.in}$ , która wynosiła  $431 \pm 22 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 / \text{ kgs.m.o.}$  oraz jego procentową zawartość w biogazie wynoszącą  $66,1 \pm 1,9\%$  stwierdzono w wariacie, w którym czas ekspozycji stałego pola magnetycznego wynosił  $144 \text{ min./doba}$ . W wariacie tym stwierdzono również najwyższe wartości  $\eta\text{FKOŚ}$   $73,8 \pm 2,3\%$  i  $\eta\text{s.m.o.}$   $36,9 \pm 1,6\%$ . Zwiększenie czasu zatrzymania osadu beztlenowego w obszarze oddziaływania stałego pola magnetycznego miało istotny wpływ na ograniczenie efektywności wytwarzania  $\text{CH}_4$ , spadek wskaźników  $\eta\text{FKOŚ}$  i  $\eta\text{s.m.o.}$ . Najniższe efekty technologiczne zanotowano, gdy czas zatrzymania w obszarze stałego pola magnetycznego wynosił  $432 \text{ min./doba}$ . W wariacie tym uzyskano zaledwie  $54,8 \pm 1,9\%$  zawartości  $\text{CH}_4$  w biogazie. Były to najniższe z wartości obserwowanych podczas prac eksperymentalnych. W trakcie prowadzonych prac eksperymentalnych stwierdzono silną korelację między czasem zatrzymania w obszarze oddziaływania stałego pola magnetycznego, a większością parametrów charakteryzujących proces fermentacji metanowej.

## LITERATURA

- [1] Alvarez David Chacón, Victor Haber Pérez, Oselys Rodríguez Justo, Ranulfo Monte Alegre. 2006. "Effect of the extremely low frequency magnetic field on nisin production by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* using cheese whey permeate" *Process Biochemistry* 41 (9), 1967–1973. DOI: 10.1016/j.procbio.2006.04.009.
- [2] Bora Akash Pratim, Dipanshu Prakash Gupta, Krishna Sandilya Durbha. 2020. "Sewage sludge to bio-fuel: A review on the sustainable approach of transforming sewage waste to alternative fuel". *Fuel* 259, DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116262.
- [3] Černe Marko, Igor Palčić, Igor Pasković, Nikola Major, Marija Romić, Vilim Filipović, Marina Diana Igrc, Aleksandra Perčin, Smiljana Goretta Ban, Benjamin Zorko, Branko Vodenik, Denis Glavič Cindro, Radmila Milačić, David John Heath, Dean Ban. 2019. "The effect of stabilization on the utilization of municipal sewage sludge as a soil amendment". *Waste Management* 94, 27–38. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.05.032.

- [4] Chen Hong, Xiaolin Li. 2008. "Effect of static magnetic field on synthesis of polyhydroxyalkanoates from different short-chain fatty acids by activated sludge". *Bioresour Technol.* 99 (13), 5538-5544.
- [5] Crutchik Dafne, Oscar Franchi, Luis Caminos, David Jeison, Marisol Belmonte, Alba Pedrouso, Angeles Val del Rio, Anuska Mosquera-Corral, and José L. Campos. 2020. "Polyhydroxyalkanoates (PHAs) Production: A Feasible Economic Option for the Treatment of Sewage Sludge in Municipal Wastewater Treatment Plants?" *Water* 12(4): 1118. DOI:10.3390/w12041118.
- [6] Dębowski Marcin, Marcin Zieliński, Marta Kisielewska, Anna Hajduk. 2016. „Effect of constant magnetic field on anaerobic digestion of algal biomass”. *Environ. Technol.* 37, 1656-63, DOI: 10.1080/09593330.2015.1126362.
- [7] Dębowski Marcin, Marcin Zieliński, Mirosław Krzemieniewski, Andrzej Brudniak. 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.
- [8] Dębowski Marcin, Mirosław Krzemieniewski, Marcin Zieliński. 2007. "Constant magnetic field influencing on the stabilization of the excess sludge with Fenton's reagent". *Pol. J. Env. Stud.* 16 (1), 43 – 50.
- [9] Di Capua Francesco, Danilo Spasiano, Andrea Giordano, Fabrizio Adani, Umberto Fratino, Francesco Pirozzi, Giovanni Esposito. 2020. "High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: challenges and opportunities". *Applied Energy* 278. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115608.
- [10] Dini Luciana, Luigi Abbro. 2005. "Bioeffects of moderate intensity static magnetic fields on cell cultures". *Micron* 36 (3), 195–217. DOI: 10.1016/j.micron.2004.12.009
- [11] Djanja Oraléou Sangué, Zhi-Cong Wang, Feng Wang, Yu-Ping Xu, Pei-Gao Duan. 2020. "Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge for Biofuel Production: A Review". *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59, 39, 16939-16956. DOI:10.1021/acs.iecr.0c01546.
12. Elalami Doha, Hélène Carrere, Florian Monlau, Karima Abdelouahdi, Abdallah Qukarroum, Abdellatif Barakat. 2019. "Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 114. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109287
- [13] EUR-Lex Access to European Union law: Directive 86/278/EEC - Council Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/EEC), Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A01986L0278-20180704>, accessed on 29.11.2020.
- [14] Janosz-Rajczyk Marta, Agnieszka Tomska. 2002a. "The influence of magnetic field on the process of wastewater treatment (part I): Transformations of organic compounds and nitrogen in the magnetic field induction 180 mT (in Polish)". *Archives of Environmental Protection.* 28 (3), 51 – 61.
- [15] Janosz-Rajczyk Marta, Agnieszka Tomska. 2002b. "The influence of magnetic field on the process of wastewater treatment (part I): Transformations of organic compounds and nitrogen in the magnetic field induction 20 mT and 40 mT (in Polish)". *Archives of environmental Protection.* 28 (3), 41 – 50.
- [16] Ji Yulan, Yanhong Wang, Jinsheng Sun, Tingyan Yan, Jing Li, Tingting Zhao, Xiaohong Yin, Changjiang Sun. 2010. "Enhancement of biological treatment of wastewater by magnetic field". *Bioresour. Technol.* 101, 8535–8540. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.05.094.
- [17] Jung Jongtai, Samir Sofer. 1997. "Enhancement of phenol biodegradation by south magnetic field exposure". *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 70, 229–303.
- [18] Kiselev Andrey, Elena Magaril, Romen Magaril, Deborah Panepinto, Marco Ravina, and Maria C. Zanetti 2019. "Towards Circular Economy: Evaluation of Sewage Sludge Biogas Solutions" *Resources* 8, no. 2: 91. DOI: 10.3390/resources8020091.
- [19] Krzemieniewski Mirosław, Marcin Dębowski, Adriana Dobrzyńska, Marcin Zieliński. 2004. "Chemical oxygen demand reduction of various wastewater types using magnetic field – assisted Fenton reaction". *Wat. Env. Res.* 76 (4), 301 – 305.
- [20] Lai Henry. 2019. "Exposure to Static and Extremely-Low Frequency Electromagnetic Fields and Cellular Free Radicals". *Electromagnetic Biology and Medicine* 38(4), 231-248, DOI: 10.1080/15368378.2019.1656645.
- [21] Liu Bowen, Ruofei Jin, Guangfei Liu, Chen Gu, Bin Dong, Jiti Zhou, Defeng Xing. 2019. "Effect on sludge disintegration by EDTA-enhanced thermal-alkaline treatment". *Water environment research* 92(1), 42-50. DOI: 10.1002/wer.1156.
- [22] Liu Xuran, Qiuxiang Xu, Dongbo Wang, Yanxin Wu, Qi Yang, Yiwen Liu, Qilin Wang, Xiaoming Li, Hailong Li, Guangming Zeng, Guojing Yang. 2019. "Unveiling the mechanisms of how cationic polyacrylamide affects short-chain fatty acids accumulation during long-term anaerobic fermentation of waste activated sludge". *Water Res* 155,142–151. DOI: 10.1016/j.WATRES.2019.02.036.
- [23] Mancuso Giuseppe, Michela Langone, Gianni Andreottola, Laura Bruni. 2019. "Effects of hydrodynamic cavitation, low-level thermal and low-level alkaline pre-treatments on sludge solubilisation". *Ultrason Sonochem.* 59, 104750. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104750.
- [24] Okuno Kazumasa, Koji Tuchiya, Takashi Ano, Makoto Shoda. 1993. "Effect of super high magnetic field on growth of Escherichia coli under various medium compositions and temperatures". *J. Ferment. Bioeng.* 75 (2), 103–106. DOI: 10.1016/0922-338X(93)90218-W.
- [25] Oladejo Jumoke, Kaiqi Shi, Xiang Luo, Gang Yang, and Tao Wu. 2019. "A Review of Sludge-to-Energy Recovery Methods" *Energies* 12, no. 1: 60. DOI: 10.3390/en12010060.
- [26] Preisner Michał, Elena Neverova-Dziopak, Zbigniew Kowalewski. "Mitigation of eutrophication caused by wastewater discharge: A simulation-based approach". *Ambio* 50: 413-424. DOI: 10.1007/s13280-020-01346-4.
- [27] Qin Yong, Haoshu Wang, Xiangru Li, Jay Jiayang Cheng, Weixiang Wu. 2017. "Improving methane yield from organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) with magnetic rice-straw biochar". *Bioresource Technology* 245, Part A, 1058-1066, DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.047.
- [28] Qu Guangfei, Pei Lv, Yingying Cai, Can Tu, Xi Ma, Ping Ning. 2020. "Enhanced anaerobic fermentation of dairy manure by microelectrolysis in electric and magnetic fields". *Renewable Energy* 146, 2758-2765, DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.050.
- [29] Sarraf Mohammad, Sunita Kataria, Houda Taimourya, Lucielen O. Santos, Renata D. Menegatti, Meeta Jain, Muhammad Ihtisham, and Shiliang Liu. 2020. "Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview" *Plants* 9, no. 9: 1139. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>.
- [30] Tytła Malwina. 2020. "Identification of the Chemical Forms of Heavy Metals in Municipal Sewage Sludge as a Critical Element of Ecological Risk Assessment in Terms of Its Agricultural or Natural Use" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17, no. 13: 4640. DOI: 10.3390/ijerph17134640.
- [31] Waclawek Stanisław, Klaudiusz Grübel, Daniele Silvestri, Vinod V.T. Padil, Maria Waclawek, Mirosław Černík, and Rajender S. Varma 2019. "Disintegration of Wastewater Activated Sludge (WAS) for Improved Biogas Production" *Energies* 12 (1): 21. DOI: 10.3390/en12010021.
- [32] Yadollahpour Ali, Samaneh Rashidi, Zohre Ghotbeddin, Mostafa Jalilifar, Zohreh Rezaee. 2014. "Electromagnetic fields for treatments of wastewater: a review of applications and future opportunities". *J. Pure Appl. Microbiol.* 8 (5), 3711–3719.
- [33] Yavuz Hülya, Serdar S. Çelebi. 2000. "Effects of magnetic field on activity of activated sludge in wastewater treatment". *Enzyme and Microbial Technology* 26, 22–27. DOI: 10.1016/S0141-0229(99)00121-0.
- [34] Zhang Guangming, Panyue Zhang, Jinmei Yang, Yanming Chen. 2007. "Ultrasonic reduction of excess sludge from the activated sludge system". *Journal of Hazardous Materials* 145, 515-519. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.133.
- [35] Zhao Bo, Hao Sha, Jinwen Li, Shengxian Cao, Gong Wang, Yuyi Yang. 2020. "Static magnetic field enhanced methane production via stimulating the growth and composition of microbial community". *J. Clean. Prod.* 271, 122664.
- [36] Zhou Guangli, Yifan Gu, Haoran Yuan, Yu Gong, Yufeng Wu. 2020. "Selecting sustainable technologies for disposal of municipal sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: A case study from China". *Resour. Conserv. Recycl.* 161, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104881.
- [37] Zieliński Marcin, Marcin Dębowski, Mirosław Krzemieniewski, Magda Dudek, Anna Grala. 2014. "Effect of constant magnetic field with various values of magnetic induction on effectiveness of dairy wastewater treatment under anaerobic conditions". *Pol. J. Environ. Stud.* 23 (1), 255 – 261. ■