

Patrycja Grad, Andrzej Żarczyński, Grzegorz Rajnert\*, Ewelina Ciołkowska

e-mail: Patrycja Grad <211229@edu.p.lodz.pl>; andrzej.zarczyński@p.lodz.pl; grzegorz.rajnert@gos.lodz.pl;  
Ewelina Ciołkowska <eweciol12@gmail.com>

*Institut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka*

*\*Grupowa Oczyszczalnia Ścieków w Łodzi Sp. z o.o.*

# Odsiarczanie biogazu z udziałem sorbentu SULPHUREX N w GOŚ ŁAM w Łodzi

## Wstęp

Biogaz jest otrzymywany w warunkach beztlenowych podczas fermentacji metanowej materii organicznej. Substratami do produkcji biogazu są biomateriały pochodzenia rolniczo-przemysłowego, osady ściekowe i odpady komunalne. W oczyszczalniach ścieków beztlenowa fermentacja osadów ściekowych w Zamkniętych Komorach Fermentacyjnych (ZKF) umożliwia ich utylizację w kierunku wytwarzania biogazu. Procesy fermentacji osadów ściekowych, a następnie oczyszczania i utylizacji energetycznej powstającego biogazu realizowane są w kilkudziesięciu oczyszczalniach ścieków w Polsce, a także w wielu za granicą [1-8]. W celu zapewnienia bezpiecznej pracy urządzeń technicznych utylizujących biogaz, konieczne jest wcześniejsze usunięcie z niego zasadniczej części zanieczyszczeń, którymi są m. in. siarkowodor, markaptany, metylosiloksany, chloropochodne i para wodna. O jakości biogazu często decyduje obecność w nim siarkowodoru – związku wysoce toksycznego, utrudniającego techniczne wykorzystanie tegoż paliwa

i mogącego prowadzić do zanieczyszczenia środowiska [4-18]. Szczególnie duże znaczenie praktyczne w oczyszczaniu biogazu mają sorbenty stałe, w tym zawierające związki żelaza [4-8, 10-18].

Najkorzystniejszym sposobem wykorzystania oczyszczonego biogazu na terenie oczyszczalni ścieków zwykle jest jego spalanie w jednostkach kogeneracyjnych wytwarzających energię elektryczną i ciepło, które zwykle zużywane jest na potrzeby technologiczne lub grzewcze obiektu [5-19]. Taka sytuacja jest także w Grupowej Oczyszczalni Ścieków Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej (GOŚ ŁAM).

## Charakterystyka technologii produkcji i oczyszczania biogazu w GOŚ ŁAM

GOŚ ŁAM zlokalizowana jest w zachodniej części Łodzi oraz częściowo na terenach gmin Pabianice i Konstantynów Łódzki. Została ona uruchomiona w 1994 r. (część mechaniczna), a od 1997 r. pracuje część biologiczna oczyszczalni ścieków. Lata 2004-2009 to okres najbardziej intensywnej

jej rozbudowy i modernizacji. Obecnie GOŚ ŁAM obsługuje mieszkańców Łodzi, Pabianic, Konstantynowa Łódzkiego, gmin Nowosolna i Ksawerów, w liczbie około 820 tysięcy, oczyszczając ponad połowę ścieków powstających w województwie łódzkim. Obiekt jest typową oczyszczalnią mechaniczno-biologiczną z podwyższonym usuwaniem związków biogenych, zaprojektowaną na obciążenie 1 026 260 RLM [4-7].

Produkcja biogazu jest efektem ubocznym stosowanej technologii, pozwalającym na stabilizację osadów [4, 7]. Usunięcie siarkowodoru z biogazu jest konieczne ze względu na ochronę przed korozją elementów instalacji (zbiornika biogazu, pochodni, urządzeń spalających biogaz) oraz zapobieganie zanieczyszczeniu środowiska [5]. Przykładowo w 2019 r. wyprodukowano średnio 23 100 m<sup>3</sup>/d (8 431 500 m<sup>3</sup>/rok) biogazu o zawartości około 62% objętościowych metanu i stężeniu siarkowodoru w biogazie nieoczyszczonym średnio około 360 ppm, przy okresowym stosowaniu koagulantu żelazowego do strącania fosforanów w procesie oczyszczania ścieków. Spalanie biogazu w 2019 r. pozwoliło na wytworzenie energii elektrycznej w jednostkowej ilości 2,43 kWh/m<sup>3</sup> spalonego biogazu, przy zapotrzebowaniu oczyszczalni na energię elektryczną na poziomie 71,7 MWh/d (0,42 kWh/m<sup>3</sup> oczyszczonych ścieków) [19].

Biogaz z czterech ZKF, każda o pojemności 10 000 m<sup>3</sup> osadu, zanim zostanie przesłany do instalacji odsiarczającej, przepływa przez łapacze piany i filtry żwirowe w celu wstępnego oczyszczenia. Za łapaczami zamontowano przepływomierze termiczne masowe w wykonaniu przeciwwybuchowym do pomiarów natężenia przepływającego biogazu [4, 6, 7, 20, 21]. Otrzymywane paliwo do lipca 2015 r. odsiarczano w dwóch automatycznych stacjach oczyszczania, z których każda składała się z:

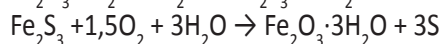
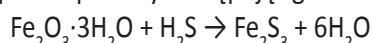
- żelbetowej podziemnej komory z filtrem żwirowym przed odsiarczalnikiem;
- reaktora, tj. kolumny odsiarczającej (odsiarczalnika);
- węzła operacyjnego, w formie kontenera sprężarki i systemu sterowania [25].

W 2016 r. jeden z odsiarczalników o numerze technicznym 13.A został początkowo dostosowany do technologii biologicznej biokonwersji siarkowodoru w obecności tlenowych form azotu, ale wobec niespełnienia oczekiwań zastosowano w nim metodę mokrą odsiarczania biogazu z udziałem związków sodu.

Drugi odsiarczalniki o numerze technicznym 13.B w postaci kolumny wykonanej ze stali kwasoodpornej (Fot. 1) składa się m. in. z części roboczej zawierającej masę odsiarczającą Sulphurex N, wlotu gazu surowego, wylotu

gazu odsiarczonego, śluzy zasypowej w części górnej i śluzy spustowej w części dolnej, drutu oporowego do ogrzewania dolnej części stożka, zbiornika masy odsiarczającej z zamknięciem obrotowym, żurawia obrotowego w wersji przeciwwybuchowej, izolacji cieplnej i płyty fundamentowej [4, 20, 21].

Biogaz przepływa przez kolumnę w kierunku od dołu do góry, a znajdujący się w nim siarkowódz wiązany jest w masie wypełnienia kolumny. Równocześnie z biogazem za pomocą sprężarki do kolumny wprowadzane jest powietrze procesowe, dzięki któremu następuje regeneracja wypełnienia odsiarczającego. Stosowana modyfikowana masa odsiarczająca (Sulphurex N) o uziarnieniu 8-20 mm, jako składnik aktywny zawiera uwodniony tlenek żelaza(III) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O (Fot. 2). Złoże posiada zdolność do niewielkiego swobodnego przemieszczania się w zbiorniku odsiarczalnika, a jego ruch odbywa się z góry do dołu, w przeciwnym kierunku do oczyszczanego biogazu. Siarkowódz zawarty w biogazie przechodząc przez złoże ulega reakcji, w wyniku której powstaje siarczek żelaza(III) oraz woda. Regeneracja masy zachodzi dzięki utlenianiu się siarczku do siarki elementarnej, co możliwe jest przy równoczesnym dodawaniu do surowego biogazu powietrza atmosferycznego [4, 20, 21]. Opisane procesy następują zgodnie z równaniami [4]:



Zarówno odsiarczanie jak i regeneracja są procesami egzotermicznymi, co powoduje wzrost temperatury w złożu, zwłaszcza latem. Zimą dla lepszego przebiegu reakcji dolna część odsiarczalnika jest podgrzewana przy użyciu systemu drutów grzewczych, a całość odsiarczalnika jest izolowana termicznie wełną mineralną (80 mm) z płaszczem aluminiowym (1 mm). Za zużytą uważa się masę Sulphurex N zawierającą około 40% wolnej siarki, która w przypadku GOŚ ŁAM jest odbierana odpłatnie przez firmę zewnętrzną w celu poddania jej utylizacji. Wyprodukowany biogaz wykorzystywany jest do produkcji energii cieplnej i elektrycznej w automatycznych agregatach energii skojarzonej oraz jako paliwo dodatkowe dla potrzeb Instalacji Termicznego Przekształcania Odpadów (ITPO) pracującej na terenie GOŚ ŁAM. Możliwe jest także awaryjne spalanie nadmiaru biogazu w pochodni [4, 20, 21].

**Celem niniejszej pracy** była analiza efektywności użytkowania masy odsiarczającej Sulphurex N w okresie od stycznia 2016 r. do końca października 2019 r., aktualnie stosowanej w odsiarczalniku 13.B do oczyszczania biogazu z siarkowodoru w łódzkiej GOŚ ŁAM, zarządzanej przez Grupę Oczyszczalnię Ścieków w Łodzi Sp. z o.o. [4, 20]. W poprzedniej pracy [4] rozpatrywano aspekty technologiczne



oczyszczania biogazu z okresu od maja 2014 do lutego 2016 r. Producentem masy Sulphurex N jest przedsiębiorstwo Additive GmbH (Werk Herten, Niemcy) [22].

Złoże w odsiarczalniku 13.B wymieniane jest stopniowo w sytuacji, gdy stężenie siarkowodoru w oczyszczonym biogazie przekraczało 50 ppm, poprzez regularne odsypywanie określonej masy sorbentu zużytego i dodawanie analogicznej masy sorbentu świeżego, najczęściej 200 kg na tydzień. Taka metoda użytkowania złoża została opracowana przez pierwsze lata jego stosowania jako pozwalająca na najefektywniejsze jego wykorzystanie [4, 21, 22].

### Wyniki pomiarów składu biogazu przed i po jego odsiarczeniu i ich dyskusja

Analizy składu biogazu w GOŚ ŁAM wykonywano z wykorzystaniem miernika Dräger X-am 7000 [4-6, 20]. Wybrane wyniki pomiarów składu biogazu surowego i oczyszczonego, a także temperatury złoża odsiarczającego przedstawiono w tabelach 1-4 [23]. Z kolei skuteczność odsiarczania  $S$  [%] biogazu przedstawiono w tabelach 1-5, uwzględniając w obliczeniach stężenia siarkowodoru przed  $C_o$  [ppm] i po

procesie jego usuwania  $C_k$  [ppm], korzystając z poniższego wzoru:

$$S = \frac{(C_o - C_k)}{C_o} \cdot 100\%$$

W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów zawartości głównych składników biogazu w marcu 2017 r. przed i po jego odsiarczeniu. Miesiąc ten wybrano do publikacji, gdyż w tym okresie wymieniono w odsiarczalniku całą użytą masę Sulphurex N na świeżą. Zawartość metanu w biogazie utrzymywała się w granicach 64-68%, natomiast zawartość siarkowodoru w biogazie surowym w całym okresie pomiarów mieściła się w przedziale 137-232 ppm, będąc relatywnie niską, co wynikało z dozowania koagulantu żelazowego do ścieków w procesie ich oczyszczania i jednocześnie prowadziło do wiązania znacznej części siarki. Mimo niskiego obciążenia złoża siarkowodorem skuteczność odsiarczania masy tylko nieco przekraczała 55 %. Dopiero wymiana masy odsiarczającej na świeżą zapewniła 100% skuteczność odsiarczania biogazu przez jeszcze wiele tygodni. Temperatura złoża sorbentu w odsiarczalniku nie spadała w tym czasie poniżej 21°C.

Tabela 1. Przykładowe, miesięczne wyniki analizy biogazu przed i po odsiarczeniu w odsiarczalniku 13.B – marzec 2017 r. [6, 23]

Dzień	Skład biogazu przed odsiarczalnikiem 13.B – gaz nieodsiarczony			Skład biogazu za odsiarczalnikiem 13.B – gaz odsiarczony			Skuteczność odsiarczania (S) [%]	T złoża [°C]
	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>o</sub> )	O <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>s</sub> )	O <sub>2</sub> [%]		
2	66	208	0,5	66	80	0,6	61,5	21,2
5	64	232	0,5	64	93	0,5	59,9	23,4
7	66	182	0,5	66	66	0,7	63,7	22,4
9	68	174	0,5	66	74	0,5	57,5	20,7
12	68	137	0,7	68	50	0,8	63,5	22,1
14	68	169	0,5	68	71	0,7	58,0	28,9
16	67	162	0,5	67	76	0,6	58,6	23,2
19	66	139	0,5	65	62	0,7	55,4	24,1
21-25	Przerwa w pracy odsiarczalnika 13B spowodowana wymianą zużytego złoża Sulphurex N na świeże							
26	64	145	0,4	66	0	1	100	24,8
28	61	138	0,4	66	0	0,5	100	26,0
30	68	127	0,5	68	0	0,6	100	25,9
Średnia	66	164,8	0,5	66,4	52,0	0,7	68,5	23,9

Tabela 2. Przykładowe miesięczne wyniki analizy biogazu przed i po jego odsiarczaniu w odsiarczalniku 13.B – październik 2019 r.

Dzień miesiąca	Skład biogazu przed odsiarczalnikiem 13.B – gaz nieodsiarczony			Skład biogazu za odsiarczalnikiem 13.B – gaz odsiarczony			S [%]	T złoza [°C]
	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>o</sub> )	O <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>s</sub> )	O <sub>2</sub> [%]		
3	59	607	0,2	59	23	0,3	96,2	28,3
6	59	673	0,3	59	34	0,4	94,9	28,1
10	59	686	0,1	59	53	0,3	92,7	27,9
13	59	727	0,1	59	67	0,2	90,8	31,9
17	60	534	0,2	59	74	0,4	86,1	31,1
20	60	647	0,2	60	90	0,3	86,1	32,4
24	61	769	0,1	60	128	0,2	83,4	31,4
27	55	861	0,1	55	160	0,2	81,4	31,5
30	54	895	0,2	54	119	0,4	86,7	25,9
Średnio	58	711	1,5	58	83	0,3	88,7	28,3

Tabela 3. Przykładowe, średniomiesięczne wyniki analizy biogazu przed i po jego odsiarczaniu w odsiarczalniku 13.B w okresie 2018 r.

Miesiąc	Skład biogazu przed odsiarczalnikiem 13.B – gaz nieodsiarczony			Skład biogazu za odsiarczalnikiem 13.B – gaz odsiarczony			S [%]	T złoza [°C]
	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>o</sub> )	O <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>s</sub> )	O <sub>2</sub> [%]		
styczeń	64	348	0,3	64	4	0,3	98,85	24
luty	64	334	0,2	64	5	0,3	98,50	24
marzec	64	297	0,3	65	13	0,3	95,62	24
kwiecień	64	207	0,2	63	10	0,2	95,17	29
maj	64	414	0,1	63	19	0,2	95,41	32
czerwiec	63	706	0,1	62	140	0,2	91,22	34
lipiec	61	343	0,2	61	78	0,2	77,26	34
sierpień	62	175	0,1	62	36	0,3	79,43	24
wrzesień	63	438	0,2	63	115	0,3	73,74	31
październik	66	631	0,4	62	0	0,5	100,00	28
listopad	62	1573	0,2	62	0	0,3	100,00	23
grudzień	62	865	0,2	62	21	0,2	97,57	23



Tabela 4. Przykładowe, średniomiesięczne wyniki analizy biogazu przed i po jego odsiarczaniu w odsiarczalniku 13.B w okresie pierwszych dziesięciu miesięcy 2019 r.

Miesiąc	Skład biogazu przed odsiarczalnikiem 13.B – gaz nieodsiarczony			Skład biogazu za odsiarczalnikiem 13.B – gaz odsiarczony			S [%]	T złoża [°C]
	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>o</sub> )	O <sub>2</sub> [%]	CH <sub>4</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm] (C <sub>s</sub> )	O <sub>2</sub> [%]		
Styczeń	62	298	0,2	61	41	0,3	86,24	20
Luty	62	382	0,1	62	121	0,3	68,32	21
Marzec	63	516	0,1	62	160	0,3	68,99	25
Kwiecień	63	308	0,2	62	0	0,3	100,00	26
Maj	63	186	0,2	63	0	0,3	100,00	30
Czerwiec	63	193	0,2	62	2	0,2	98,96	35
Lipiec	63	260	0,1	62	0	0,3	100,00	33
Sierpień	60	288	0,1	60	0	0,2	100,00	34
Wrzesień	61	471	0,1	60	2	0,2	99,58	24
Październik	58	711	0,2	58	83	0,3	88,33	30

Tabela 5. Średnia skuteczność miesięczna odsiarczania biogazu w odsiarczalniku 13B w latach 2016-2019

Miesiąc	Skuteczność odsiarczania biogazu (S) [%]			
	2016	2017	2018	2019
Styczeń	97,32	88,29	98,9	86,24
Luty	78,95	66,94	98,5	68,32
Marzec	76,54	68,48	95,6	68,99
Kwiecień	82,17	99,24	95,2	100,00
Maj	78,48	100,00	95,4	100,00
Czerwiec	59,98	99,25	91,2	98,96
Lipiec	99,25	98,49	77,3	100,00
Sierpień	99,53	97,46	79,4	100,00
Wrzesień	100,00	86,67	73,7	99,58
Październik	99,85	89,75	100,0	88,33
Listopad	99,16	75,81	100,0	–
Grudzień	95,52	75,10	97,6	–



W tabeli 2 zamieszczono wyniki odsiarczania biogazu w październiku 2019 r., tj. z okresu praktycznie nie stosowania koagulantu żelazowego w procesie oczyszczania ścieków, bowiem średnie stężenie miesięczne siarkowodoru wynosiło 711 ppm, natomiast po odsiarczaniu 83 ppm, z tendencją wzrostu w strumieniu odsiarczonym, co mogło być tylko efektem istotnego zużycia sorbentu. Proces odsiarczania biogazu wspomagano stosowaniem filtra węglowego, dedykowanego przede wszystkim do usuwania metylosiolkosanów, ale redukującego także stężenie siarkowodoru.

W tabeli 3 zamieszczono średniomiesięczne wyniki odsiarczania biogazu w odsiarczalniku 13.B w okresie całego 2018 r., natomiast w tabeli 4 od stycznia do października 2019 r. W okresie tych prawie dwóch lat wymiana masy odsiarczającej miała miejsce na przełomie września i października 2018 r. oraz marca i kwietnia 2019 r. Dzięki temu osiągnięto 100% lub bliską tej wartości skuteczność odsiarczania w miesiącach październik-grudzień 2018 r., kiedy to biogaz zawierał szczególnie duże stężenie  $H_2S$ , średnio najwięcej w listopadzie 1573 ppm, a także w okresie kwiecień-sierpień 2019 r. Z kolei w tabeli 5 zebrano wartości średnich skuteczności odsiarczania biogazu w okresie styczeń 2016-październik 2019, które przedstawiają efektywność analizowanego odsiarczalnika 13.B.

### Podsumowanie

Wytwarzanie biogazu w czterech Zamkniętych Komorach Fermentacyjnych pracujących w GOŚ ŁAM jest elementem gospodarki osadami, powstającymi w tym obiekcie w procesie oczyszczania ścieków i służy częściowemu zaspokajaniu zapotrzebowania obiektu na energię elektryczną. Grupowa Oczyszczalnia Ścieków w Łodzi monitoruje biogaz wytwarzany podczas procesów fermentacji osadów ściekowych w celu uniknięcia zagrożeń ze strony siarkowodoru i siloksanów. Zawartość siarkowodoru w biogazie jest zmienna, zależna od składu osadu poddawanego fermentacji i dość zmiennej intensywności stosowania koagulantu żelazowego w procesie usuwania fosforanów ze ścieków, opartego na solach żelaza(III), obniżającego także stężenie siarkowodoru w biogazie, tym samym ułatwiającego pracę odsiarczalników, stosujących masę odsiarczającą Sulphurex N. Masa ta zależnie od zawartości siarkowodoru w biogazie jest przez kilka miesięcy wysoce efektywna, ale stopniowo zmniejsza się jej skuteczność w usuwaniu siarkowodoru. Dla uzyskania korzystnego oczyszczenia biogazu Sulphurex N musiał być okresowo wymieniony na nowy. W toku eksploatacji instalacji odsiarczającej m.in. stwierdzono, że w celu utrzymania bezpiecznego dla urządzeń energetycznych stężenia siarkowodoru w oczyszczonym biogazie na poziomie 50 ppm,



Fot. 1. Kolumna odsiarczająca 13.B wypełniona masą Sulphurex N (fot. A. Żarczyński)



Fot. 2. Masa odsiarczająca Sulphurex N (fot. A. Żarczyński)



raz w tygodniu powinno być dosypywane do odsiarczalnika około 200 kg nowego sorbentu oraz usuwane tyle samo zużytego [4, 20, 21]. W ostatnich latach z biogazu są także usuwane lotne metylosiloksany, do czego niewystarczająca okazała się masa odsiarczająca Sulphurex N. Proces eliminacji metylosiloksanów realizowany jest z udziałem węgla aktywnego, który także obniża zawartość siarkowodoru w biogazie. Jednak sorbent ten z czasem traci właściwości sorpcyjne i wówczas musi być wymieniony na świeży.

### Literatura

- [1] Mousa H., Al-Muhtaseb A., Abu Qdais H., Abd Alaa I.R., 2015, Experimental investigation of biogas production from wastewater sludge, *Austin Chemical Engineering*, 2(1), 1014-1019.
- [2] Wilk J., 2011, Wykorzystanie osadów ściekowych do produkcji biogazu, *Aura*, 5, 18-20.
- [3] Prusek A., Tytko R., 2018, Biogaz z oczyszczalni ścieków, *Aura*, 7, 16-17.
- [4] Klemba K., Żarczyński A., Rajnert G., 2017, Analiza procesu odsiarczania biogazu w GOŚ ŁAM za pomocą masy Sulphurex N, *Aura*, nr 11, 3-6.
- [5] Umiejewska K., Białach A., Rajnert G., 2015, Gospodarka Osadowa Grupowej Oczyszczalni Ścieków Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej. Cz. I. Charakterystyka układu technologicznego oraz ilość powstających osadów, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 11, 411-416.
- [6] Ciołkowska E., 2019, Analiza przyczyn i skali występowania siarkowodoru w oczyszczonym biogazie otrzymywanym w GOŚ ŁAM, praca inżynierska, IChOIE PŁ.
- [7] Grad P., 2020, Analiza skuteczności odsiarczania biogazu w instalacji pracującej w Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi, praca inżynierska, IChOIE PŁ.
- [8] Kociołek-Balawejder E., Wilk Ł., 2011, Przegląd metod usuwania siarkowodoru z biogaz, *Przemysł Chemiczny*, 90(3), 389-397.
- [9] Klemba K., 2015, Biogazownia jako potencjalne źródło zagrożeń emisjami odorowymi oraz działania prewencyjne, *Eliksir*, 2, 22-27.
- [10] Żarczyński A., Rosiak K., Anielak P., Wolf W., 2014, Practical methods of cleaning biogas from hydrogen sulphide. Part 1. Application of solid sorbents, *Acta Innovations*, 12, 24-35, [http://www.proakademia.eu/gfx/baza\\_wiedzy/255/nr\\_12\\_24-34\\_2\\_2.pdf](http://www.proakademia.eu/gfx/baza_wiedzy/255/nr_12_24-34_2_2.pdf), 22.12.2020.
- [11] Kwaśny J., Balcerzak W., 2016, Sorbents Used for Biogas Desulfurization in the Adsorption Process, *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(1), 37-43.
- [12] Aleszczyk Ł., 2015, Adsorpcyjne metody usuwania siarkowodoru z biogazu, *Przemysł Chemiczny* 12, 2199-2202.
- [13] Okoro O.V., Sun Z., 2019, Desulphurisation of Biogas: A Systematic Qualitative and Economic-Based Quantitative Review of Alternative Strategies. *ChemEngineering*, 3(3), 1-29.
- [14] Schweigkofler M., Niessner R., 2001, Removal of siloxanes in biogases, *Journal of Hazardous Materials*, 83(3), 183-196.
- [15] Gaj K., Ciołek J., Pakuluk A., Steininger M., 2014, Siloksany w biogazie – geneza, zagrożenia, problemy analityczne, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 10, 394-397.
- [16] Mrosso R., Machunda R., Pogrebnaya T., 2020, Removal of Hydrogen Sulfide from Biogas Using a Red Rock, *Hindawi Journal of Energy*, Article ID 2309378, 1-10.
- [17] Bobowiec A., Tabak M., 2018, The effect of waste sulfur obtained during biogas desulfurization on the availability of selected trace elements in soil, *Geology, Geophysics & Environment*, 44(4), 345-355.
- [18] Szymczak M., Płacheta K., Żarczyński A., Zaborowski M., Sorbenty do odsiarczania biogazu na podstawie związków żelaza. Cz. 2. Granulaty i masy odsiarczające, *Aura*, 11, 14-17, 2019.
- [19] Dane eksploatacyjno-technologiczne GOŚ ŁAM – rok 2019, [http://www.gos.lodz.pl/wp-content/uploads/2020/02/Dane\\_GOS\\_LAM\\_2019.pdf](http://www.gos.lodz.pl/wp-content/uploads/2020/02/Dane_GOS_LAM_2019.pdf), 30.12.2020.
- [20] Rajnert G., 2013, Opis techniczno-technologiczny Grupowej Oczyszczalni Ścieków Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej, Grupowa Oczyszczalnia Ścieków w Łodzi Sp. z o.o., Łódź.
- [21] Piński J., Instrukcja obsługi i eksploatacji stacji odsiarczania biogazu, Grupowa Oczyszczalnia Ścieków Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej, Łódź.
- [22] Karta charakterystyki produktu Sulphurex N (tritylenek diżelaza), nr CAS 1309-37-1, CS Additive GmbH, Werk Herten, Niemcy 2014.
- [23] Dane eksploatacyjno-technologiczne GOŚ ŁAM za zgodą Zarządu GOŚ w Łodzi.