

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA BIOREAKTORA STRUŻKOWEGO DO OCZYSZCZANIA LOTNYCH ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH POWSTAJĄCYCH NA TERENIE OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW PKN ORLEN S.A.

Arkadiusz Kamiński¹, Paweł Koziczyński¹

¹ Biuro Ochrony Środowiska, PKN ORLEN S.A., ul. Chemików 7, 09-411 Płock, e-mail: Arkadiusz.Kaminski@orlen.pl

STRESZCZENIE

W niniejszej pracy przedstawiono i omówiono wyniki badań prowadzonych przez firmę Ekoinwentyka sp. z o.o., dotyczących możliwości zastosowania bioreaktora strużkowego do oczyszczania lotnych związków organicznych (LZO) powstających na terenie oczyszczalni ścieków PKN ORLEN S.A. Podczas miesięcznej próby analizowano w sposób ciągły m.in. stężenia wlotowe i wylotowe LZO, H₂S i NH₃ i na ich podstawie określano wydajność procesu biooczyszczania. Otrzymane wyniki potwierdziły skuteczność zastosowanej technologii w zadanych warunkach, pokazując jednocześnie zasadność prowadzenia dalszych analiz technologicznych w celu stworzenia założeń projektowych bioreaktora w skali przemysłowej.

Słowa kluczowe: bioreaktor strużkowy, LZO, oczyszczalnia ścieków, PKN ORLEN, węglowodory ropopochodne

STUDY ON USING A TRICKLE-BED BIOREACTOR FOR REDUCING VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN WASTEWATER TREATMENT PLANT OPERATED BY PKN ORLEN S.A.

ABSTRACT

The results of studies conducted by Ekoinwentyka sp. z o.o. concerning the possibility of using a trickle-bed bioreactor for reducing of volatile organic compounds (VOCs) emitted by PKN ORLEN S.A. wastewater treatment plant were presented and discussed. During the one-month trial, inlet and outlet concentrations of VOCs, H₂S and NH₃ were analysed and the efficiency of bio-purification process was determined on their basis. The obtained results confirmed the effectiveness of the applied technology under the given conditions, simultaneously demonstrating the validity of conducting further technological analysis to derive the design assumptions of the bioreactor on the industrial scale.

Keywords: petroleum hydrocarbons, PKN ORLEN, trickle-bed bioreactor, VOC, wastewater treatment plant

WSTĘP

Centralna Oczyszczalnia Ścieków (COŚ) jest kompleksową oczyszczalnią przemysłową, której zadaniem jest obróbka ścieków i wód opadowych pochodzących z instalacji produkcyjnych położonych na terenie Zakładu Produkcyjnego w Płocku Polskiego Koncernu Naftowego ORLEN S.A. Ze względu na pochodzenie i skład napływających ścieków, sieć kanalizacji w Zakładzie Produkcyjnym podzielona jest na dwa systemy kanalizacji przemysłowej (I i II) oraz dwa systemy kanalizacji opadowej KOP i KOR. Ścieki przemysłowe oczyszczane są na drodze mechanicznej, fizykochemicznej oraz biologicznej.

Oczyszczanie mechaniczne prowadzone jest na sitach obrotowych, pre-separatorach i separatorach falisto-płytowych. Oczyszczanie fizykochemiczne prowadzone jest na flotacji indukcyjnej w I systemie oraz w uśredniaczu w II systemie, wspomagane polielektrolitami. Ścieki opadowo-drenażowe oczyszczane są na drodze mechanicznej i biologicznej. Wszystkie ścieki napływające na COŚ po wstępnym, niezależnym etapie oczyszczenia łączą się w rozdzielaczu ścieków i dopiero stąd kierowane są na oczyszczalnię biologiczną, gdzie zachodzi podstawowy proces oczyszczania. Po oczyszczeniu biologicznym ścieki poprzez zbiornik końcowy trafiają na stawy glonowo-trzciniowe, gdzie zachodzi samo-

czynny proces rozkładu zanieczyszczeń. Następnie ścieki odprowadzane są do komory ssawnej pompowni przewałowej i dalej do komory pompowni technologicznej. Stąd jej część kierowana jest do zbiorników wody gospodarczej i ppoż., zaś nadmiar ścieków przelewa się do kolektora przemysłowego i odpływa do rzeki Wisły, osiągając parametry zgodne z wydanym dla instalacji Pozwoleniem Zintegrowanym.

STAN ISTNIEJĄCY W ZAKRESIE REDUKCJI EMISJI LOTNYCH ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH – DOPALANIE KATALITYCZNE CATOX

W celu ograniczenia emisji niezorganizowanej z części mechanicznej oczyszczalni, w której z dużych powierzchni ścieków uwalniane są lotne związki organiczne (węglowodory ropopochodne, LZO), COŚ wyposażona jest w układy katalitycznego spalania węglowodorów (CATOX I i CATOX II). Węzeł odbioru węglowodorów składa się z wentylatora ssącego opary powstające w procesie oczyszczania ścieków. W pobieranej przez dmuchawę oparach zawarte są węglowodory, których poziom zawartości ulega wahaniom. Stężenie tych węglowodorów w normalnych warunkach pracy winno być poniżej 20% dolnej granicy wybuchowej. Wszystkie punkty poboru oparów na tłoczeniu wentylatorów są skolektorowane, z zapewnieniem możliwości wykrycia wysokiego stężenia węglowodorów i wyłączenie instalacji CATOX zanim gazy o zbyt wysokim stężeniu węglowodorów zostaną przetransportowane do instalacji. Urządzenia do katalitycznego dopalania węglowodorów CATOX I i CATOX II pracują w sposób ciągły 8760 godzin/rok, jednakże rzeczywisty czas pracy zależy od dolnej granicy wybuchowości w odgazach kierowanych do instalacji. Powyżej 35% dolnej granicy wybuchowości instalacja jest odstawiana do stanu „stand by”, podczas którego następuje wyrzut węglowodorów przez bypass i klapy wentylacyjne na zewnątrz układu (emisja niezorganizowana). Emisja do powietrza obejmująca instalacje CATOX I i II jest uregulowana zapisami Pozwolenia Zintegrowanego. Normowana jest suma węglowodorów alifatycznych, suma węglowodorów aromatycznych oraz indywidualne związki aromatyczne – benzen, toluen i ksylen.

TESTOWANA TECHNOLOGIA – OCZYSZCZANIE BIOLOGICZNE

Interesującą alternatywą dla katalitycznego dopalania węglowodorów pochodzących z procesów oczyszczania ścieków jest oczyszczanie biologiczne [Bartelemus et. al. 2016]. Przy ściślejszej współpracy z firmą Ekoinwentyka sp. z o.o. z siedzibą w Rudzie Śląskiej, PKN ORLEN S.A. w październiku i listopadzie 2016 roku testował tę technologię z wykorzystaniem bioreaktora trójfazowego. Jest to instalacja do oczyszczania powietrza, wykorzystująca bakterie żywiące się lotnymi związkami organicznymi. Wykorzystywane drobnoustroje do biodegradacji zanieczyszczeń pochodzą ze środowiska naturalnego lub z własnej hodowli czystych kultur bakterii. Bioreaktory stwarzają bakteriom optymalne warunki rozwoju, aby przyspieszać procesy zachodzące w środowisku w sposób naturalny i zmaksymalizować biodegradację LZO [Barbusiński 2013]. Ogólny schemat działania bioreaktora trójfazowego przedstawiono na rysunku 1.

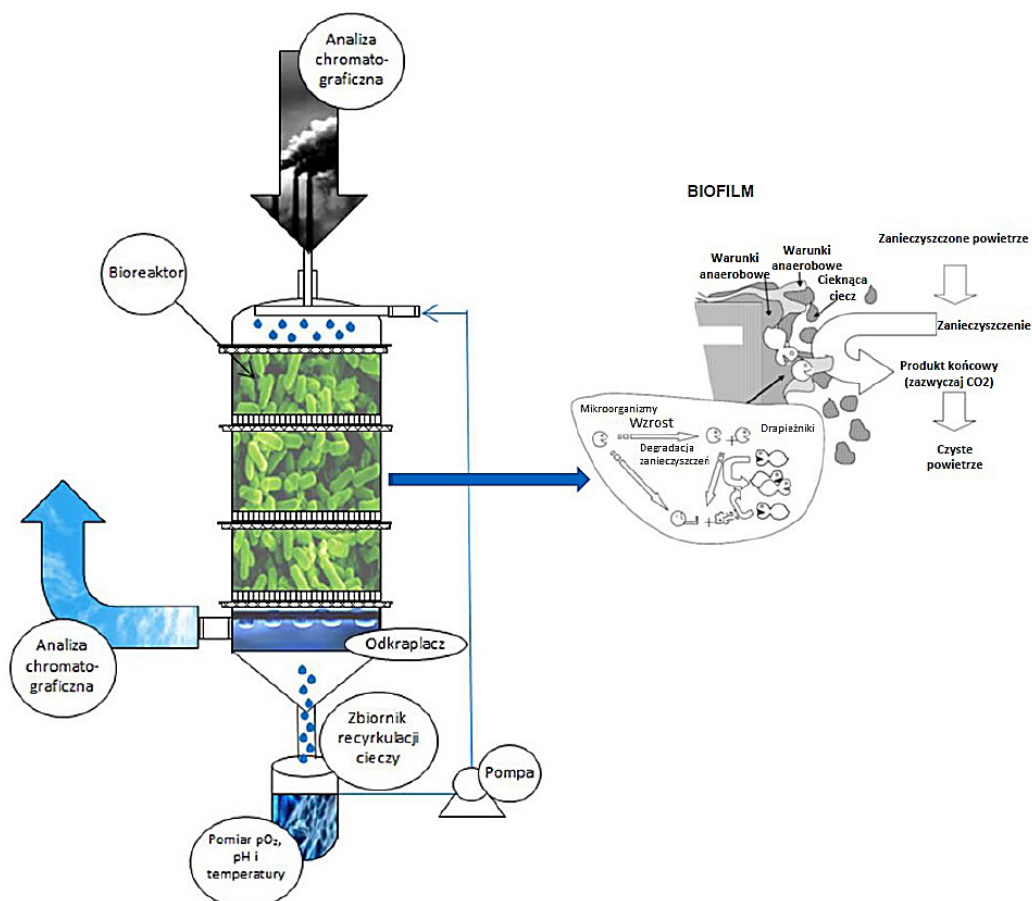
ZAŁOŻENIA OGÓLNE, WARUNKI PRACY BIOREAKTORA I METODYKA BADAŃ

Współpraca PKN ORLEN S.A. z firmą Ekoinwentyka sp. z o.o. doprowadziła do wykonania i dostarczenia przez Ekoinwentykę kompaktowego bioreaktora trójfazowego (KBT) ze stali nierdzewnej odpornej i pasywnej na związki zawarte w odgazach będących unosem do CATOX II. Wstępne uruchomienie bioreaktora nastąpiło 26 października 2016 roku. Przez pierwsze dwie doby przeprowadzono testy sprawdzające poprawność montażu instalacji oraz automatyzacji procesu wraz z oprzyrządowaniem analitycznym. Ponadto pierwsze dwa dni były przeznaczone na immobilizację mikroflory w docelowym bioreaktorze po przerwie montażowej oraz transporcie. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono rysunek poglądowy i zdjęcia pracującego reaktora na terenie PKN ORLEN S.A.

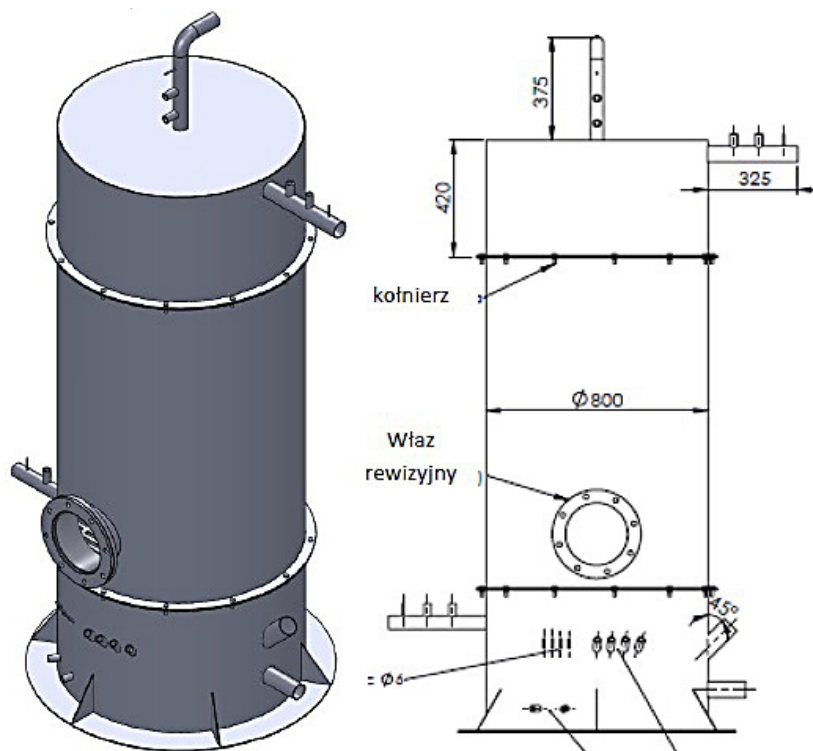
Badania właściwe, rozpoczęte 28 października 2016 roku, prowadzone były w sposób ciągły przez 30 dni w bioreaktorze KBT o wymiarach:

- średnica = 0,8 m
- wysokość = 2,75 m

dla dwóch zakresów strumieni fazy gazowej: 3-8 m³/h oraz 15-20 m³/h. Zakres ten wynikał ze zmienności pracy węzła CATOX II. Badania



Rys. 1. Schemat ogólny działania bioreaktora [Cox 2002, Kasperczyk 2015]
 Fig. 1. General diagram of the bioreactor [Cox 2002, Kasperczyk 2015]



Rys. 2. Rysunek poglądowy KBT wraz z wymiarami
 Fig. 2. Compact trickle-bed bioreactor (CTBB) overview and dimensions



Rys. 3. Zdjęcia z uruchomienia KBT w PKN ORLEN S.A.

Fig. 3. Photos of CTBB start-up in PKN ORLEN S.A.

zdolności oczyszczania KBT były prowadzone dla dwóch źródeł unosu LZO:

- dla gazów dolotowych do CATOX II. (28.10-23.11.2016)
- unosu w kanale dopływowym do uśredniacza (23.11-30.11.2016)

Temperatura procesu biodegradacji mieściła się w zakresie 298 ± 4 K, pH prowadzonego procesu utrzymywane było w zakresie $7 \pm 0,3$ natomiast strumień przepływającej fazy ciekłej w bioreaktorze KBT mieścił się w zakresie 4-8 m^3/h . Proces prowadzono zmieniając natężenia przepływu fazy gazowej i ciekłej, natomiast stężenie zanieczyszczeń w gazie dopływającym do kolumny zmieniało się zgodnie z procesami prowadzonymi na terenie Zakładu Produkcyjnego PKN ORLEN S.A.

Analiza skuteczności pracy bioreaktora obejmowała pomiary ciągłe stężeń na wlocie i wylocie bioreaktora m.in. dla LZO, H_2S , NH_3 . Dodatkowo na wlocie analizowano stężenia CO i O_2 . LZO mierzone było za pomocą mierników MiniRAE 2000 oraz MultiRAE z wykorzystaniem detektora PID. Ponadto wykonano przez zewnętrzne firmy akredytowane dwa pomiary skuteczności pracy bioreaktora stosując, akredytowane pomiary z detektorem FID. Analiza ta pozwoliła na określenie efektywności redukcji wybranych związków aromatycznych: benzenu, toluenu, etylobenzenu i ksyłenu. Pomiary te były wykonane metodą chromatografii gazowej.

Pomiar ciągły H_2S na wlocie i wylocie bioreaktora KBT wykonano za pomocą analiza-

torów: MultiRAE oraz MX4 (detekcja elektrochemiczna). Natomiast pomiar NH_3 wykonywany był za pomocą miernika GasBadge Pro (detekcja elektrochemiczna). Analizę ilościową mikroflory wykonywano za pomocą metod spektrofotometrycznych.

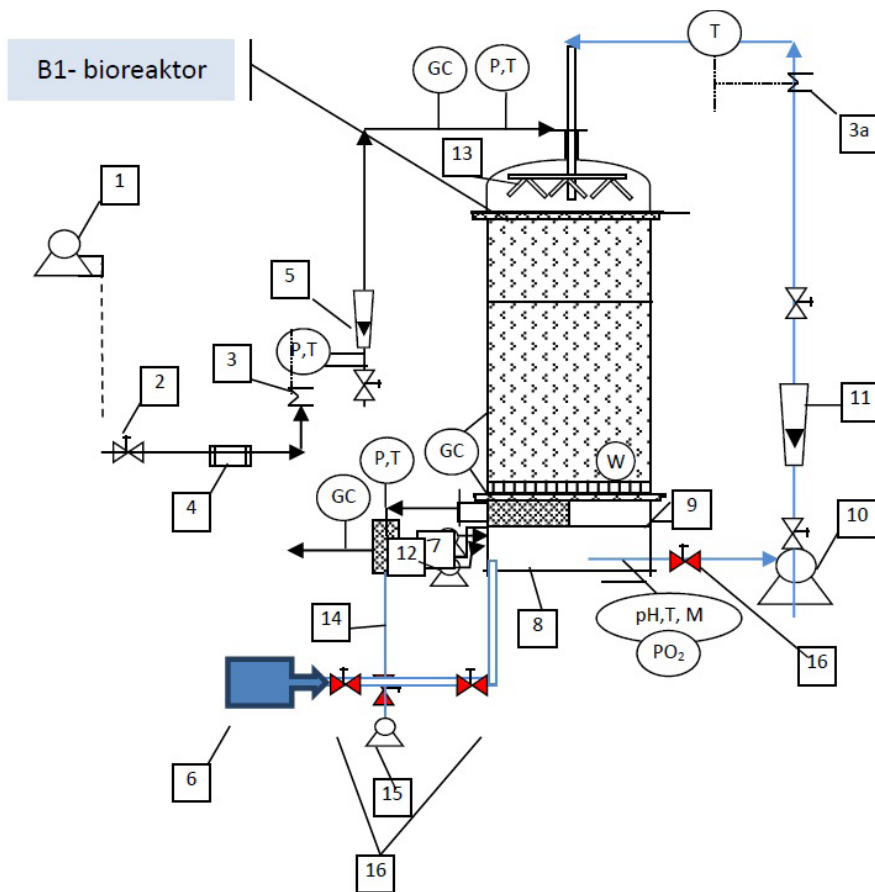
WYNIKI BADAŃ

Proces oczyszczania powietrza prowadzony był we współprądowym kompaktowym bioreaktorze trójfazowym ze stałym złożem (pierścienie polipropylenowe) na powierzchni którego unieruchomiono specjalnie dobrane i zaadaptowane mikroorganizmy. Schemat instalacji przedstawiono na rysunku 4.

Fazę gazową stanowiło zanieczyszczone lotnymi związkami organicznymi powietrze. Fazę ciekłą był recyrkulujący roztwór soli mineralnych, którego parametry (pH, temperatura, zawartość tlenu) były kontrolowane w sposób automatyczny. W zakresie godzin 0-630 źródłem emisji był unos do CATOX II, zaś w zakresie 630-860 był to kanał dopływowy do uśredniacza.

Redukcja emisji LZO

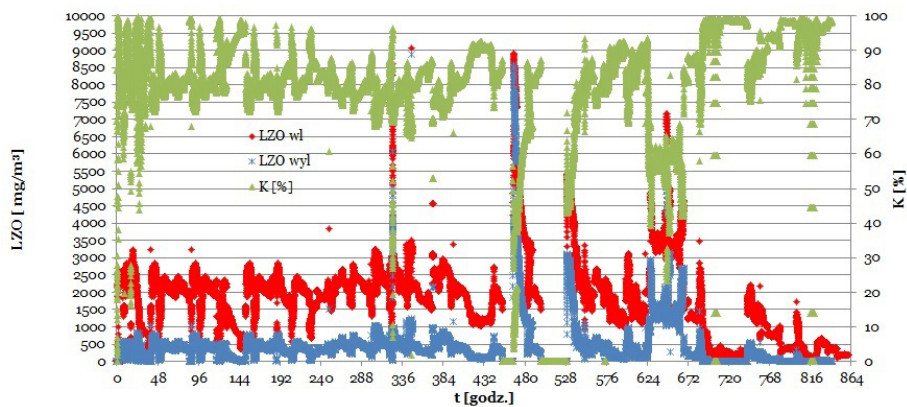
Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań efektywności oczyszczania powietrza z LZO prowadzonego w Bioreaktorze KBT w całym okresie pracy, także podczas testów sprawdzających. Pomiary stężenia LZO wykonywano co minutę.



Opis:

1) Dmuchawa/sprężarka/ naciśnienie zapewniająca przepływ 20 m³/h, 2) Zawory, 3) System grzewczo chłodzący powietrza - opcja, 3a) Nagrzewnica recykulującej fazy ciekłej 4) Pre-filtry, 5) Przepływomierz gazowy, 6) Źródło cieczy (sieć wodociągowa lub inne) uzupełniające ubytki r-rusoli mineralnych, 7) Odkraplacze, 8) Podstawa zbiornika bioreaktora 9) miernik poziomu cieczy w zbiorniku, 10) Pompa cieczy, 11) przepływomierz cieczy, 12) Pompki dozujące r-ry, buforowe 13) Zraszacz, 14) Zawór spustowy reaktora, 15) Pompa, 16) Zawory sprężone z poziomami cieczy, P- pomiar ciśnienia, T- pomiar temperatury, PH – pomiar pH, pO₂ – pomiar O₂, GC – miejsce poboru próbek do analizy, W- wziernik, ---- faza gazowa, --- faza ciekła, --- faza gazowa

Rys. 4. Uproszczony schemat technologiczno-pomiarowy bioreaktora KBT [Ekoinwentyka 2016]
Fig. 4. Simplified measuring and technological CTBB diagram [Ekoinwentyka 2016]



Rys. 5. Wyniki badań efektywności oczyszczania powietrza z LZO w okresie testu
Fig 5. Results of VOC emission reduction during the testing period

Stężenie LZO w powietrzu dolotowym do CATOX II zmieniało się w zakresie 0,2-8,7 g/m³, jednakże w przeważającym czasie badań stężenie to występowało w zakresie 1,8-2,5 g/m³. Znaczne skoki stężenia LZO z unosu do CATOX II możemy zaobserwować w 325 godz. prowadzenia testu (09.11.2016), ok. 7,5 g/m³, 467 godz. (14.11.2016) powyżej 8,2 g/m³, 536 godz. (17.11.2016) powyżej 4,18 g/m³ a następnie od 627 do 680 godz. (21-23.11.2016) gdzie w całym tym okresie stężenie LZO było znacznie podwyższone w porównaniu do poprzedniego okresu badawczego i występowało w zakresie 2,5-7,1 g/m³. Wydajność oczyszczania powietrza z LZO w bioreaktorze KBT była uzależniona od stężenia LZO w gazie wlotowym i mieściła się w zakresie:

- K = 85-99% dla zakresu stężenia LZO na wlocie do bioreaktora 0,2-1,75 g/m³
- K = 65-85% dla zakresu stężenia LZO na wlocie do bioreaktora 1,75-2,5 g/m³
- K <65% dla zakresu stężenia LZO na wlocie do bioreaktora 2,5-8,9 g/m³.

Stężenia <2,5 g/m³ występowały przez ponad 80 % badanego czasu. Wyższe stężenia LZO na wlocie do bioreaktora powodują konieczność zastosowania baterii bioreaktorów (tzw. bioreaktora wieloelementowego). Zastosowanie takiej baterii wydaje się szczególnie zasadne w przypadku oczyszczania powietrza z unosu do CATOX II, gdzie stężenia LZO występują na wyższych poziomach niż w przypadku unosu z uśredniacza.

W celach porównawczych, zlecono zewnętrznej akredytowanej jednostce analizę wydajności pracy bioreaktora w oparciu o redukcję LZO oraz osobno benzenu, toluenu, ksyleny i etylobenzenu. Analizę laboratoryjną pobranych prób przeprowadzono metodą chromatografii gazowej z detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (GC-FID) zgodnie z normą PN-EN 13649:2005. Stężenie LZO zmierzono według normy PN-EN 12619:2013 przy użyciu analizatorów LAT AWE-PW metodą ciągłej detekcji płomieniowo jonizacyjnej (FID). Wyniki wykonane przez zewnętrzne laboratorium akredytowane (czas pomiaru ok. 2 godziny, rów-

noległe wlot i wylot bioreaktora) potwierdziły, że średnie stężenie LZO w gazie wlotowym wynosi 2075,69 mg/m³ a wydajność oczyszczania powietrza dla tej wartości stężenia w gazie wlotowym wynosi ok. 75% [Ekoinwentyka 2016]. W tabeli 1. przedstawiono wyniki analizy dla poszczególnych związków aromatycznych. Warto zwrócić uwagę, że tylko ksylen odbiega efektywnością biooczyszczania w porównaniu do benzenu (95,88%). Jest to związane z słabą rozpuszczalnością izomerów ksyleny w porównaniu z innymi analizowanymi węglowodorami. Efektywność ta jest możliwa do podwyższenia poprzez zastosowanie baterii bioreaktorów.

Redukcja emisji H₂S

Wyniki efektywności oczyszczania tych związków z przedmiotowego powietrza zostały przedstawione na rysunku 6.

Z przedstawionych na rysunku 6. rezultatów wynika, że zakres stężeń H₂S w powietrzu w badanym okresie był w zakresie 0,1-137 mg/m³. W całym zakresie stężeń efektywność oczyszczania powietrza z H₂S wynosiła powyżej 99 %. Świadczy to o bardzo dobrej adaptacji mikroflory do występujących rodzajów zanieczyszczeń, a także do zakresu ich stężeń w powietrzu. Warto zwrócić uwagę, że w badanym okresie przeważający zakres stężeń H₂S wynosił 0,1-3,8 mg/m³. Gwałtowny skok stężeń został zanotowany w okresie 21-23.11.2016 i wynosił ok. 137 mg/m³ ale i w tym wypadku wydajność pracy bioreaktora KBT wynosiła powyżej 99%.

Emisja H₂S na wlocie, w porównaniu do LZO, pojawiała się sporadycznie. Wówczas na wylocie stężenie również było równe zero i obliczona wartość „K” w takim wypadku wynosiła 0.

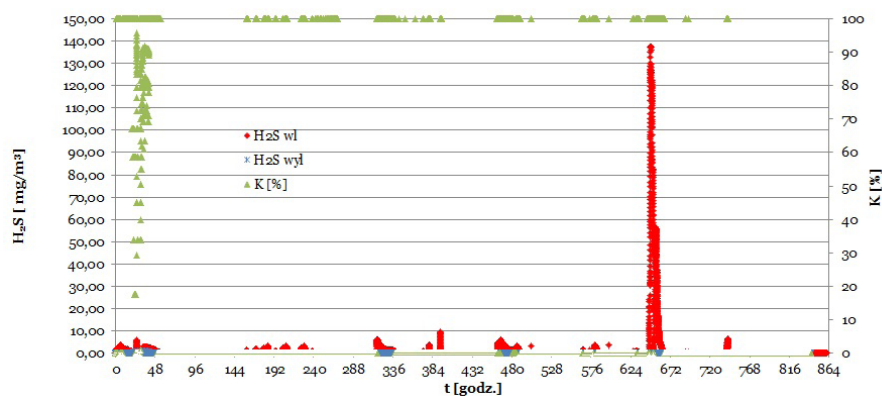
Redukcja emisji NH₃

Wyniki badań efektywności oczyszczania powietrza z NH₃ zostały przedstawione na rysunku 7.

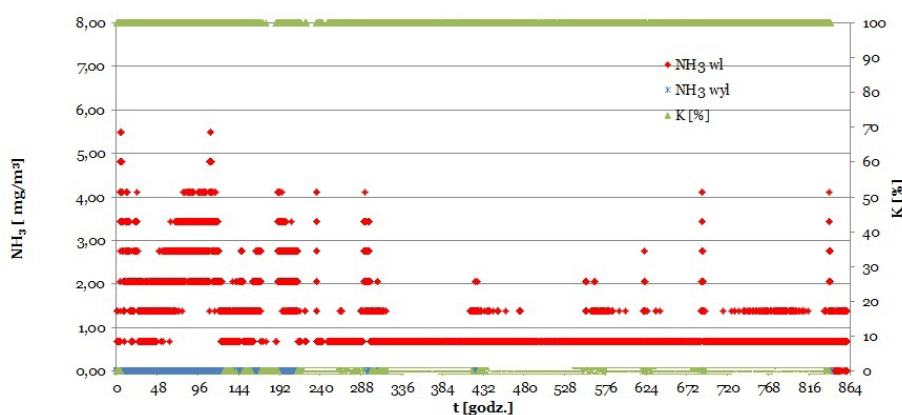
Z przedstawionych na rysunku 7 rezultatów wynika, że zakres stężeń NH₃ w powietrzu w

Tabela 1. Bioeliminacja wybranych związków aromatycznych
Table 1. Bioelimination of selected aromatic hydrocarbons

Związek	Stężenie na wlocie [mg/m ³]	Stężenie na wylocie [mg/m ³]	Efektywność oczyszczania [%]
Benzen	69,273	2,849	95,88
Toluen	14,308	0,850	94,06
Ksylen	5,533	2,853	48,44
Etylobenzen	2,414	0,407	83,14



Rys. 6. Wyniki badań efektywności oczyszczania powietrza z H_2S w okresie testu
 Fig 6. Results of H_2S emission reduction during the testing period



Rys. 7. Wyniki badań efektywności oczyszczania powietrza z NH_3 w okresie testu
 Fig 7. Results of NH_3 emission reduction during the testing period

badanym okresie był w zakresie 0,6-5,5 mg/m^3 . W całym zakresie stężeń efektywność oczyszczania powietrza z NH_3 wynosiła powyżej 99%. Świadczy to o bardzo dobrej adaptacji mikroflory do występujących rodzajów oraz zakresu stężeń zanieczyszczeń powietrza, a także prawidłowym zaprojektowaniu i wykonaniu bioreaktora KBT.

Emisja NH_3 na wlocie, w porównaniu do LZO, pojawiała się sporadycznie. Wówczas na wylocie stężenie również było równe zero i obliczona wartość „K” w takim wypadku wynosiła 0.

Pozostałe parametry

W badaniach przeprowadzono również analizę ciągłą stężeń CO i dolnej Granicy wybuchowości w badanych gazach w celu określenia zagrożeń i dostosowania instalacji docelowej do występujących zagrożeń. Zakres dolnej granicy wybuchowości mieścił się w granicach 0,1-13%. Wynik ten wymusza wyposażenie docelowej potencjalnej instalacji w osprzęt EX. W badaniach

prowadzono również ciągły pomiar stężenia O_2 . Stężenie O_2 w badanym okresie mieściło się w zakresie 20,6-21,0%. Wynik ten potwierdza możliwość zastosowania procesu biodegradacji tlenowej w badanych procesach, ponieważ tlen nie będzie stanowił czynnika inhibującego procesy biodegradacji.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza zaprezentowanych wyników badań skłania do wniosku, że zastosowanie procesu biodegradacji do oczyszczania gazów emitowanych do atmosfery po procesach oczyszczania ścieków w centralnej oczyszczalni ścieków PKN ORLEN S.A., jest bardzo obiecującą technologią pod względem technologicznym i ekologicznym. Analiza aspektów ekonomicznych nie jest przedmiotem niniejszej pracy.

Przeprowadzone próby pozwoliły na rozpoznanie cech zagrożenia zmienności środowiska

mających wpływ na neutralizację LZO, H₂S i NH₃ przy zastosowaniu technologii bioeliminacji zanieczyszczeń w kompaktowym bioreaktorze trójfazowym KBT. Przeprowadzona próba wykazała wysoką sprawność proponowanej metody. Co więcej, pozwala ona rozwiązywać jednocześnie problem zarówno emisji LZO, H₂S i NH₃. Uzyskane wyniki potwierdziły, że prowadzenie procesu w niskiej temperaturze (~30 °C) oraz ciśnieniu atmosferycznym skutkuje wieloma pozytywnymi efektami:

- brakiem konieczności stosowania katalizatorów,
- małą awaryjnością instalacji,
- niskimi kosztami obsługi ze względu na wysoki stopień automatyzacji procesu sterowania oraz monitoring on-line realizowany przez producenta,
- brakiem opłat z tytułu emisji charakterystycznych dla procesów spalania
- brakiem zagrożeń wybuchem.
- wysokim stopniem redukcji zanieczyszczeń

Pomimo wstępowania pewnej wrażliwości na zmiany stężeń wlotowych substancji redukowanych, przez cały okres pracy instalacji uzyskiwano wysoką, zadowalającą wydajność procesu.

Wyniki pomiarów prowadzonego procesu biooczyszczania pokazały, że konwersja „K” procesu biodegradacji mieściła się w zakresie 85-99% dla stężenia LZO 0,06-1,75 g/m³ oraz 65-88% dla zakresu 1,75-2,5 g/m³. Konwersja procesu wynosiła dla całego zakresu stężeń H₂S i NH₃ wynosiła około 99%. Nawet kilkudziesięciokrotne skoki stężenia nie powodują destabilizacji procesu, zagrożenia wybuchem czy jak to jest w przypadku instalacji CATOX (spalanie katalityczne), konieczności wyłączenia aparatury. W przypadku KBT skoki stężenia powodują jedynie spadek wydajności procesu biooczyszczania.

Wysokie zakresy przebieg stężeniowych LZO występujących w gazach dolotowych sięgających nawet 0,6-9,0 g/m³ skłaniają do konieczności zastosowania baterii bioreaktorów, szczególnie dla gazów z unosu do CATOX II, w celu utrzymania wysokiej wydajności oczyszczania powietrza na poziomie >98% i/lub poniżej 50 mg/m³ w powietrzu oczyszczonym.

Przeprowadzenie testu, pozwoliło na zebranie doświadczeń niezbędnych do stworzenia założeń projektowych bioreaktora w skali przemysłowej, także w warunkach, jakie panują na oczyszczalni ścieków PKN ORLEN S.A. Powiększenie skali jest uzależnione od miejsca usadowienia bioreaktora i źródła emisji. W przypadku przedmiotowej emisji warto rozpatrzyć zastosowanie baterii bioreaktorów. Dalsze prowadzenie prób dla bioreaktora (czy też baterii bioreaktorów) pozwoliłoby w przyszłości na uzyskanie szerszego spektrum danych dotyczących zmienności warunków w wybranym miejscu, a także analizy potencjalnego miejsca dla właściwej instalacji przemysłowej. Dane te umożliwiłyby oszacowanie wartości wszystkich parametrów wpływających na proces biodegradacji wybranych zanieczyszczeń w kompaktowym bioreaktorze trójfazowym szczególnie przy zmienności warunków otoczenia.

BIBLIOGRAFIA

1. Barbusiński K., Kasperczyk D., 2013.: Biooczyszczanie Powietrza Wentylacyjnego - innowacyjna technologia biooczyszczania powietrza wentylacyjnego w kopalni rud miedzi z lzo i h2s za pomocą kompaktowego bioreaktora trójfazowego. KONSULTING POLSKI 2013, 4, 55-60
2. Bartelmus G., Gąszczak A., Janecki D., 2016. Modelling of the air purification from volatile organic compounds in a trickle-bed bioreactor. PROCEEDINGS OF ECOPOLE 2016, 10, 2, 423-432
3. Cox H.H.J., Deshusses M.A., 2002. Biotrickling filters for air pollution control., THE ENCYCLOPEDIA OF ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY 2002, 2, 782-795
4. Kasperczyk D., 2015. Badanie wpływu parametrów ruchowych Kompaktowego Bioreaktora Trójfazowego (KBT) firmy Ekoinwentyka sp. z o.o. na wydajność procesu oczyszczania powietrza z mieszaniny LZO (alkohol etylowy, siarczek dimetylu, styren) oraz określenie szybkości korozji prowadzonego w KBT bioprocessu, <http://forszt.us.edu.pl/kasperczyk-damian/>, dostęp kwiecień 2017
5. Sprawozdania z badań prowadzonych przez firmę Ekoinwentyka sp. z o.o. na terenie PKN ORLEN S.A., 2016, 2017