



Effect of ultrasonic field to increase the biodegradability of coke processing wastewater

Anna KWARCIAK-KOZŁOWSKA¹, Aleksandra KRZYWICKA¹

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii, Instytut Inżynierii Środowiska, 42-200 Częstochowa, ul. Brzeźnicka 60a, tel.: +48 34 3250917, e-mail: a.krzywicka@is.pcz.pl, akwarciak@is.pcz.czyst.pl

Abstract

Coking wastewater due to the presence of large amounts of chemical have a high toxicity to organisms especially microorganisms from activated sludge used in biological treatment of industrial wastewater. This is the reason for searching the ways that may reduce the toxicity of wastewater and increase the their biodegradability. Advanced oxidation processes involving ultrasound are an appropriate way to reduce the toxicity and improve the biodegradability. Ultrasound field affect the organic substances by the sonochemical reactions. The most important reaction is oxidation to biodegradable substances. The aim of this study was to determine the influence of amplitude and time of sonification to improving the biodegradability of coking wastewater.

Keywords: coke wastewater, ultrasonic field, biodegradability

Streszczenie

Wpływ pola ultradźwiękowego na zwiększenie biodegradowalności ścieków koksowniczych

Ścieki koksownicze ze względu na obecność znacznej ilości związków chemicznych wykazują wysoką toksyczność wobec organizmów żywych, w tym organizmów osadu czynnego wykorzystywanego w biologicznym oczyszczaniu ścieków przemysłowych. Fakt ten jest powodem poszukiwania sposobów mogących zmniejszyć toksyczność ścieków oraz zwiększyć ich podatność na biologiczną degradację. Obiecującymi metodami przyczyniającymi się do tego są procesy wykorzystujące zaawansowane utlenianie zanieczyszczeń. Zalicza się do nich oddziaływanie pola ultradźwiękowego na substancje zawarte w ściekach. Ma ono różnorodny charakter, a największe znaczenie odgrywają inicjowane reakcje sonochemiczne. Do najważniejszych należą reakcje utleniania zanieczyszczeń do związków prostszych, wykazujących większą podatność na biologiczną degradację. Celem omówionych badań było ustalenie wpływu amplitudy drgań oraz czasu sonifikacji na wspomaganie stopnia biodegradacji ścieków koksowniczych.

Słowa kluczowe: ścieki koksownicze, pole ultradźwiękowe, biodegradowalność

1. Wstęp

Koksownictwo w Polsce stanowi bardzo ważne ogniwo w segmencie przemysłu surowcowego oraz ciężkiego. Polska dysponuje pokaźnymi ilościami węgla stąd bezpieczeństwo energetyczne kraju związane jest głównie z tym strategicznym paliwem. Technologicznie produkcja koksu polega na wysokotemperaturowej pirolizie węgla, która odbywa się w specjalnych komorach koksowniczych, w wyniku której powstaje koks [1,2]. W trakcie procesu odgazowania węgla powstają szkodliwe dla środowiska odpady poprodukcyjne, m.in. gazy, opary, pyły, stałe i półstałe odpady jak również zanieczyszczone wody ściekowe. Ze względu na powstawanie małych ilości stałych oraz półstałych odpadów, które zazwyczaj i tak zwracane są do obiegu technologicznego nie stanowią większego problemu dla zakładu koksowniczego. Problem stanowi natomiast oczyszczanie zafenolowanych ścieków koksowniczych, które pochodzą z zawilgocenia węgla jak również i wody pirogeniczne [1-3]. Ten rodzaj ścieków przemysłowych należy do grupy najbardziej toksycznych ścieków przemysłowych i wymaga dużego stopnia oczyszczenia przed ich odprowadzeniem do odbiornika naturalnego lub wykorzystaniem jako

źródła wody przemysłowej. Poprocesowe wody koksownicze są w znacznym stopniu zanieczyszczone głównie związkami organicznymi, do których należą oleje i smoły ($100\text{--}240\text{ g/m}^3$), zawiesiny ($200\text{--}330\text{ g/m}^3$), amoniak wolny i związany ($980\text{--}6500\text{ g/m}^3$), fenole lotne i nielotne ($260\text{--}3000\text{ g/m}^3$), tiosiarczany, siarkowodor, w tym również substancje silnie toksyczne, jak cyjanki (około 50 g/m^3) i rodanki (około 200 g/m^3) [3-5]. Konwencjonalne metody ich oczyszczania oparte na technologii osadu czynnego nie zawsze są skuteczne i efektywne, szczególnie w przypadku usuwania z nich substancji trudno biodegradowalnych. Do substancji tych należą, m.in. fenole i ich pochodne, związki chlorowcoorganiczne oraz węglowodory alifatyczne i aromatyczne. Wymienione związki, a także pochodne ich niepełnego utleniania, już w niskich stężeniach w odprowadzanych ściekach oczyszczonych, mogą negatywnie wpływać na barwę, smak, zapach wody odbiornika jak również stanowią zagrożenie dla organizmów żywych [6]. W związku z tym bardzo ważne jest stosowanie oprócz biologicznej metody osadu czynnego także wspomagających i uzupełniających procesów fizykochemicznych odpowiedzialnych za wstępne rozłożenie tych toksycznych i trudno biodegradowalnych związków organicznych.

Pomimo, że minęło wiele lat od czasu pierwszego zastosowania ultradźwięków do przyspieszania reakcji chemicznych przez Richardsa i Loomisa (1927 r.), sonochemia nadal znajduje coraz to nowsze zastosowania w inżynierii chemicznej i procesowej oraz inżynierii środowiska. Ultradźwięki z powodzeniem wykorzystuje się w procesach krystalizacji, odgazowania czy polimeryzacji [6-8]. Pod pojęciem ultradźwięki rozumiemy fale mechaniczne rozchodzące się w ośrodkach gazowych, ciekłych i stałych mające charakter fal dźwiękowych o częstotliwościach większych od górnej granicy słyszalności dla ucha ludzkiego, czyli 20 kHz. Obszar, w którym się one rozchodzą nazywa się polem ultradźwiękowym charakteryzowanym częstotliwością i długością fali. W zależności od częstotliwości, ultradźwięki można podzielić na trzy kategorie, a mianowicie na ultradźwięki o średniej częstotliwości (20-100 kHz), wysokiej częstotliwości (100 kHz- 1MHz) oraz ultradźwięki diagnostyczne (1-500 MHz) [9,10]. W inżynierii środowiska najczęściej wykorzystuje się ultradźwięki w zakresie od 20 do 100 kHz a ich chemiczne działanie zależy od zjawiska kawitacji akustycznej. Pod pojęciem kawitacji rozumie się zjawisko wywołane zmiennym polem ciśnień w cieczy. Polega ono na powstawaniu, wzroście i zanikaniu pęcherzyków lub innych obszarów zamkniętych (kawern) zawierających parę danej cieczy, gaz lub mieszaninę parowo-gazową. Pęcherzyki te zwiększają swoją objętość na obszarach niskiego ciśnienia, poniżej jego krytycznej wartości i zmniejszają objętość w obszarach podwyższonego ciśnienia, powyżej wartości krytycznej. Wartość ciśnienia krytycznego zależy od rodzaju, stanu cieczy, obecności ośrodków kawitacji i jest zbliżona do wartości ciśnienia pary nasyconej. Poprzez pęcherzyki kawitacyjne w fazie kompresji zachodzi termiczna dysocjacja cząstek wody, która prowadzi do powstawania w kolejnych reakcjach wolnych rodników, tj. H° , HO° , HOO° , ozonu, a także nadtlenu wodoru [9-12]. Wygenerowane wolne rodniki stają się głównym źródłem, tzw. reakcji sonochemicznych. Rodniki hydroksylowe reagując z molekułami różnych substancji organicznych (rozpuszczonych czy zawieszonych) prowadząc do ich chemicznego rozpadu (utleniania lub destabilizacji) jak również do wytworzenia nowych związków. Utlenienie trudno rozkładalnych związków organicznych przyczynia się często do wzrostu ich biodegradowalności co w konsekwencji wiąże się z przyspieszeniem i łatwiejszym ich rozkładem przez bakterie osadu czynnego. Unieszkodliwianie i oczyszczanie ścieków przemysłowych jest jednym z najbardziej złożonych problemów środowiskowych stojących przed inżynierami, jak i naukowcami w tej dziedzinie [11-12].

Wykorzystanie zjawiska sonifikacji wydaje się ciekawą alternatywą w porównaniu do procesów fizykochemicznych (m.in. koagulacji czy strącania chemicznego). Zastosowanie pola ultradźwiękowego w technologii ścieków nie wymaga dodawania utleniaczy lub katalizatorów oraz nie generuje dodatkowych strumieni odpadów. Ultradźwięki mogą być traktowane jako "zielone" techniki ze względu na swoją wysoką wydajność, niskie wymagania instrumentalne jak również pozwalają znacznie skrócić czas trwania procesów jednostkowych w porównaniu z innymi znanymi technikami.

2. Materiały badawczy

Materiał badawczy wykorzystany w badaniach stanowiły surowe ścieki koksownicze, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 2.1.

Ścieki na terenie zakładu koksowniczego zostały wstępnie mechanicznie oczyszczone w skutek czego usunięto z nich zanieczyszczenia stałe, oleje oraz substancje smołowe. Zastosowana na terenie zakładu desorpcja gazowa umożliwiła usunięcie amoniaku z przedmiotowych ścieków.

Tabela 2.1. Charakterystyka ścieków koksowniczych poddawanych nadźwiękawianiu

Wskaźnik zanieczyszczeń	Jednostka	Wartość	Dopuszczalne wartości zanieczyszczeń w ściekach odprowadzanych do odbiornika*
pH	-	9,1	6,5÷9
ChZT	mgO ₂ /dm ³	8030	250
BZT ₅	mgO ₂ /dm ³	11,5	25
OWO	mgC/dm ³	2590	30
OW	mgC/dm ³	218,4	-
Azot całkowity	mgN/dm ³	1600	30
Azot amonowy	mgNH ₄ ⁺ /dm ³	1064	10
Chlorki	mgCl ⁻ /dm ³	3552	1000

* Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014r., w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzeniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego.

3. Metodyka badań

Do nadźwiękawiania ścieków koksowniczych użyto dezintegratora ultradźwiękowego typu Sonisc vibro cell o częstotliwości 40 kHz. (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Dezintegrator Sonisc vibro cel

Energię ultradźwiękową (E_s) wytworzoną w przetworniku ceramicznym typu „sandwich” wprowadzano do badanego ośrodka (surowych ścieków koksowniczych) przez koncentrator (sonotrodę). Zakres amplitudy drgań zmieniano od 31 μm do 123 μm , natomiast czas ekspozycji (czas sonifikacji) od 2 min do 16 min. Podczas badań monitorowano wielkość wniesionej energii do próbki oraz obliczono pochodne wielkości energetyczne pola ultradźwiękowego, tj. wartość mocy akustycznej (N), gęstości energii (W_e), natężenie fali ultradźwiękowej (I) oraz gęstości mocy (W_m). Wzory i objaśnienia zaprezentowano w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Wielkości energetyczne pola ultradźwiękowego [13]

Parametr	Wzór	Jednostka	Objaśnienia
Gęstość energii (W_e)	$W_e = E_s/V$	J/dm ³	E_s - energia sonifikacji [J] S - pole powierzchni, przez którą przechodzi fala [cm ²] t_s - czas sonifikacji [s] V -objętość próbki [dm ³]
Gęstość mocy (W_m)	$W_m = N/V$	W/dm ³	
Natężenie fali akustycznej (N)	$I = N/S$	W/cm ²	
Moc akustyczna (N)	$N = E_s/t_s$	W	

Zmiany zachodzące w ściekach koksowniczych pod wpływem działania pola ultradźwiękowego analizowano pod kątem zmian wartości $ChZT$ i BZT_5 . $ChZT$ oznaczano metodą dwuchromianową przy użyciu spektrometru firmy HACH Dr/4000 według PN-ISO 15705:2005, z kolei BZT_5 określano metodą respirometryczną wykorzystując zestaw pomiarowy OXI Top WTW.

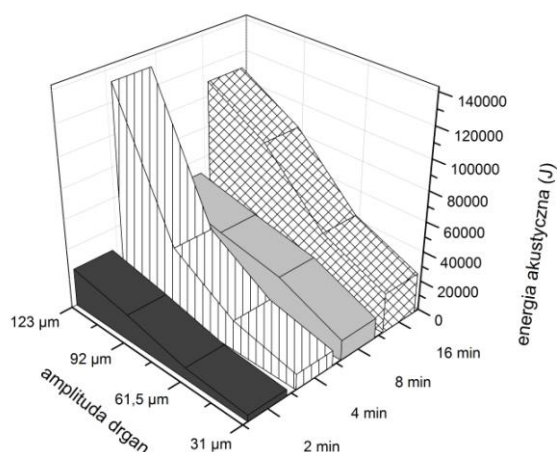
4. Otrzymane wyniki badań

4.1. Wyznaczanie parametrów operacyjnych procesu sonifikacji stosowanej w nadźwiękawianiu ścieków koksowniczych

W badaniach do nadźwiękawiania ścieków koksowniczych zastosowano cztery wielkości amplitud drgań $31\ \mu\text{m}$, $61,5\ \mu\text{m}$, $92\ \mu\text{m}$ i $123\ \mu\text{m}$. Czas nadźwiękawiania przy każdej z zadanych amplitud wynosił 2min, 4min, 8 min i 16 min. Każdorazowo nadźwiękawiano stałą objętość próby ($500\ \text{cm}^3$) w naczyniu o średnicy 8 cm.

Wielkość stosowanej amplitudy drgań oraz czas ekspozycji składają się na wartość energii akustycznej, która wprowadzana jest do próbki ścieków. Wielkość ta jest podstawą do obliczenia pozostałych operacyjnych parametrów procesu kondycjonowania ścieków w polu ultradźwiękowym, tj. moc akustyczna, natężenie fali ultradźwiękowej jak również gęstość mocy i gęstość energii (tabela 3.1).

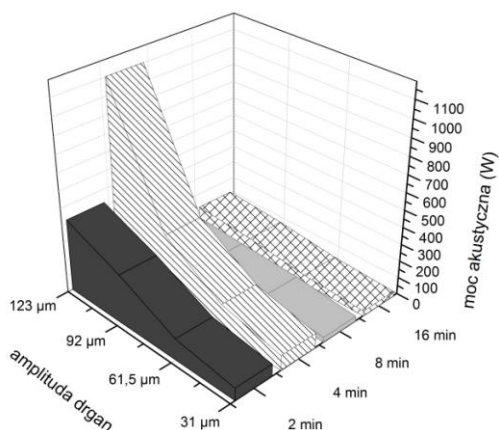
Stwierdzono, że wielkość energii akustycznej zwiększała się przy każdej zastosowanej amplitudzie wraz z wydłużaniem czasu nadźwiękawiania. Najniższą wartość energii na poziomie $4310\ \text{J}$ zanotowano podczas zastosowania amplitudy $31\ \mu\text{m}$ i czasie 2 min a najwyższą wynoszącą $132290\ \text{J}$ przy czasie 4 min i amplitudzie $123\ \mu\text{m}$ (rys. 4.1.1).



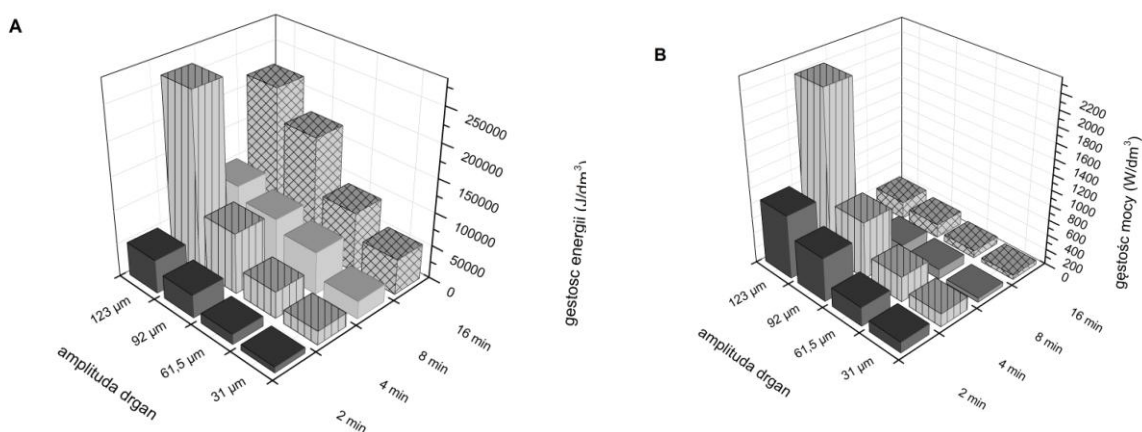
Rys. 4.1.1. Zmiana energii wprowadzanej do próbki w zależności od stosowanej amplitudy i czasu nadźwiękawiania

Moc akustyczna w przeprowadzonych badaniach w zależności od czasu nadźwiękawiania i wielkości stosowanej amplitudy zmieniała się w zakresie od $27,8\ \text{W}$ ($31\ \mu\text{m}$ i 16 min) do $1101,4$ ($123\ \mu\text{m}$, i 4 min). Zmiany moc akustycznej w funkcji amplitudy zaprezentowano na rys. 4.1.2.

Znając wielkość energii i mocy akustycznej jak również objętości nadźwiękawianych ścieków możliwe było określenie gęstości mocy i gęstości energii. Są to parametry często stosowane podczas optymalizacji procesów sonifikacji. Zaobserwowano, że przy każdym przebadanym czasie ekspozycji wraz ze zwiększaniem wielkości amplitudy drgań dochodziło do wzrostu gęstości energii (rys. 4.1.3. A) i gęstości mocy (rys. 4.1.3. B). Największą wartość gęstości energii ($264580\ \text{J}/\text{dm}^3$) i gęstości mocy ($2204,8\ \text{W}/\text{dm}^3$) stwierdzono podczas 4 minutowego nadźwiękawiania ścieków koksowniczych przy amplitudzie $123\ \mu\text{m}$.

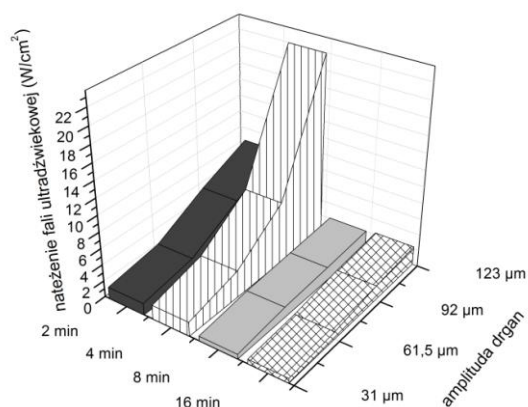


Rys. 4.1.2. Moc akustyczna w funkcji amplitudy i czasu sonifikacji



Rys. 4.1.3. Zastosowana w badaniach wartość gęstości energii (A) i gęstości mocy (B) w zależności od amplitudy drgań i czasu sonifikacji

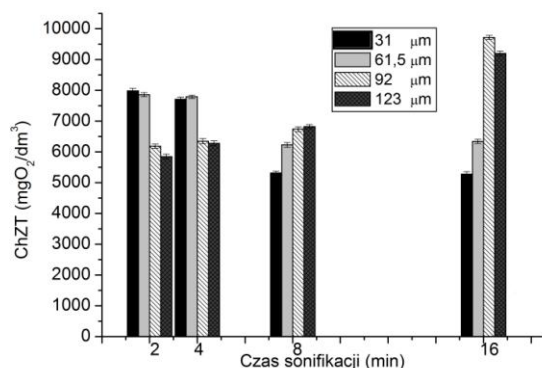
Proces nadźwiękawiania często opisuje się za pomocą natężenia. Jest to miarodajny parametr określający ilość energii przenoszonej przez falę akustyczną i docierającej do powierzchni ośrodka prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali [14]. Przyjmując się, że aby doszło do wywołania kawitacji w ciekłym ośrodku natężenie fali ultradźwiękowej musi wynosić minimum $1,0 \text{ W/cm}^2$. Stwierdzono, że tylko podczas sonifikacji ścieków przy amplitudzie $31 \mu\text{m}$ i dłuższych ekspozycji 8 min i 16 min natężenie fali ultradźwiękowej było niższe od teoretycznego progu do wywołania kawitacji i wynosiło odpowiednio $0,56 \text{ W/cm}^2$ i $0,55 \text{ W/cm}^2$. Najwyższą wielkość natężenia fali ultradźwiękowej ($21,9 \text{ W/cm}^2$) zaobserwowano podczas 4 minutowej sonifikacji przy amplitudzie $123 \mu\text{m}$ (rys. 4.1.4).



Rys. 4.1.4. Natężenie fali ultradźwiękowej w funkcji powierzchni naczynia reakcyjnego i wielkości jej amplitudy

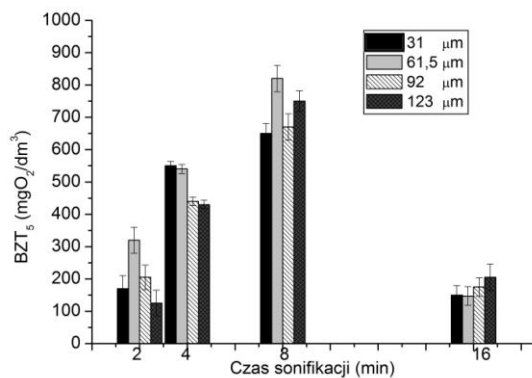
4.2. Wpływ czasu sonifikacji i wielkości amplitudy drgań na zmianę biodegradowalności ścieków koksowniczych

Badane ścieki przemysłowe charakteryzowały się wysoką wartością wskaźnika ChZT ($8030 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$) i bardzo niską wartością BZT₅ ($11,5 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$). Iloraz BZT₅/ChZT kształtował się na bardzo niskim poziomie wynoszącym 0,001 wskazującym, że ścieki nie nadają się do biologicznego oczyszczania. Założono, że fale ultradźwiękowe wywołają takie zmiany struktury związków organicznych wchodzących w skład ścieków koksowniczych, że dojdzie do wzrostu ich biodegradowalności i dzięki czemu możliwe będzie ich dalsze oczyszczanie w procesach kojarzących proces biologiczny z fizyczno-chemicznym. W związku z tym podjęto próbę wyznaczenia najkorzystniejszych parametrów pola ultradźwiękowego czyli czasu sonifikacji i wielkość amplitudy drgań. Jako wskaźniki obrazujące zachodzące w ściekach zmiany pod wpływem pola UD wybrano ChZT i BZT₅. Okazało się, że zastosowanie krótkich czasów ekspozycji - 2 min i 4 min przy niższych amplitudach - 31 μm i 61,5 μm , nie wpłynęło znacząco na obniżenie wskaźnika ChZT. Stopień usunięcia ChZT w tych przypadkach był bardzo zbliżony i wynosił średnio 2%. Zwiększenie jednak wielkości amplitudy do 91 μm i 123 μm przy najkrótszym z przebadanych czasów ekspozycji (2 min) przyczyniło się do znacznej redukcji ChZT wynoszącej odpowiednio 20 % i 23%. Stwierdzono, że w przypadku stosowania amplitud 31 μm i 61,5 μm wraz z wydłużaniem czasu ekspozycji dochodziło do zwiększania się redukcji ChZT ze ścieków. Najwyższy stopień usunięcia ChZT wynoszący 34% odnotowano gdy czas sonifikacji ścieków wynosił 16 min a wielkość amplitudy 31 μm . Wartość ChZT z poziomu $8030 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ obniżyła się do $5280 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$. Zaobserwowano również, że stosowanie dłuższych czasów sonifikacji (8 min i 16 min) przy wyższych wielkościach amplitud (92 μm i 123 μm) przyczyniło się do wzrostu wartości ChZT. Podejrzewa się, że w trakcie procesu nadźwiękawiania przy tych jego parametrach dochodziło do powstawania związków przeszkadzających w oznaczaniu ChZT. Otrzymane wyniki zaprezentowano na rys. 4.2.1.



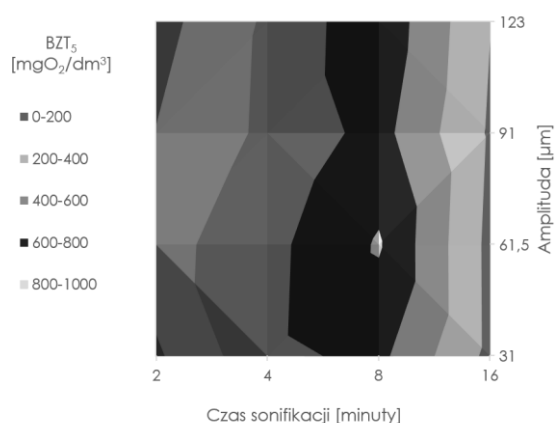
Rys. 4.2.1. Wpływ czasu sonifikacji i wielkości amplitudy drgań na wartość ChZT ścieków koksowniczych

Zgodnie z przyjętymi założeniami, znacznym zmianom uległa wartość wskaźnika BZT₅ (11,5 mgO₂/dm³). Dla wszystkich przebadanych czasów i wielkości amplitud wskaźnik BZT₅ uległ podwyższeniu. Przy najkrótszym czasie nadźwiękawiania wynoszącym 2 minuty najwyższy jego wzrost do 320 mgO₂/dm³ stwierdzono przy wielkości amplitudy 61,5 μm. Podwojenie czasu nadźwiękawiania skutkowało dalszym wzrostem jego wielkości. Dla niższych wielkości amplitud (31 μm i 61,5 μm) średnio do poziomu 540 mgO₂/dm³ a dla wyższych amplitud (92 μm i 123 μm) do 440 mgO₂/dm³. Najlepsze efekty zaobserwowano gdy czas nadźwiękawiania wydłużono do 8 min. Dla tak ustalonego czasu i przy wielkości amplitudy 61,5 μm wskaźnik BZT₅ wzrósł do poziomu 820 mgO₂/dm³. Wydłużenie czasu do 16 min skutkowało również wzrostem wartości BZT₅ w porównaniu do BZT₅ ścieków nienadźwiękawianych ale efekty były już znacznie gorsze niż dla czasu 8 min (średnio do 150 mgO₂/dm³) i zbliżone jak w przypadku 2 minutowej sonifikacji (rys. 4.2.2 i rys. 4.2.3).



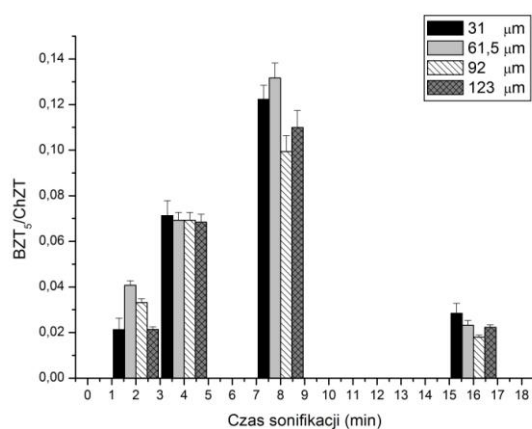
Rys. 4.2.2. Wpływ czasu sonifikacji i wielkości amplitudy drgań na wartość BZT₅ ścieków koksowniczych

Zauważono, że wartość amplitudy drgań nie miała tak znaczącego wpływu na zmianę ilości związków ulegających biologicznemu utlenieniu jak długość czasu nadźwiękawiania. Wydłużanie czasu sonifikacji od 2 do 8 minut pozwoliło zwiększyć wartość wskaźnika BZT₅ nawet kilkukrotnie.

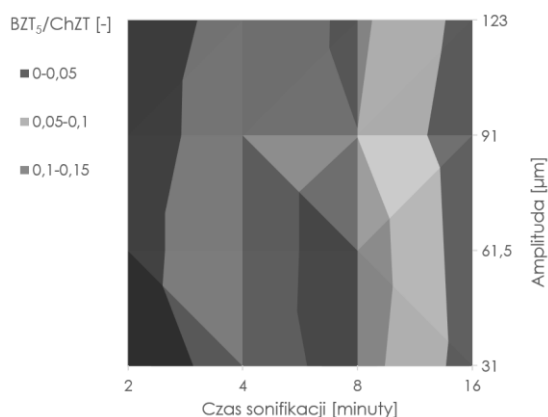


Rys. 4.2.3. Zależność wielkości BZT5 od czasu sonifikacji i wielkości amplitudy drgań

Ze względu na występujące problemy w biologicznym oczyszczaniu tego rodzaju ścieków celem badań było dążenie do zwiększenia wartości wskaźnika informującego o podatności na biodegradację. Sonifikacja ścieków koksowniczych, jak pokazują przeprowadzone badania przyczynia się do wzrostu wskaźnika BZT₅/ChZT. Podczas 2 min nadźwiękawiania ścieków koksowniczych najwyższy jego wzrost do poziomu 0,04 zaobserwowano gdy wielkość amplitudy drgań wynosiła 61,5 μm. Podczas 4 minutowego działania pola UD dla wszystkich przebadanych wielkości amplitud wskaźnik ten wzrósł do zbliżonego poziomu 0,069. Najlepsze efekty zaobserwowano gdyż czas sonifikacji wydłużono do 8 min. Przy tak dobranym czasie ekspozycji i wielkości amplitudy wynoszącej 61,5 μm wskaźnik z poziomu 0,001 (ścieki niepoddane działaniu pola UD) wzrósł do 0,13. Jednak dalsze wydłużanie czasu nadźwiękawiania (do 16 min) dla wszystkich przebadanych wielkości amplitud skutkowało znacznym obniżeniem tego wskaźnika w porównaniu do 8 min. Omawiane zmiany zaprezentowano na rys. 4.2.4. i rys. 4.2.5.



Rys. 4.2.4. Wpływ czasu sonifikacji i wielkości amplitudy drgań na wskaźnik BZT5/ChZT



Rys. 4.2.5. Wartość wskaźnika BZT₅/ChZT w zależności od dwóch zmiennych (czasu i amplitudy)

Największy wzrost podatności na biologiczną degradację uzyskano dla amplitudy 61,5 µm oraz czasu 8 minut i wynosił on 0,13. Dalsze wydłużanie czasu nadźwiękawiania spowodowało spadek biodegradowalności. Jest to wynik mający odzwierciedlenie we wzroście wartości ChZT dla takich samych warunków prowadzenia procesu. Jak wspomniano podczas omawiania wartości ChZT, przypuszcza się, iż spadek wartości BZT₅ w tym przypadku może być spowodowany obecnością związków chemicznych powstałych podczas sonifikacji i wykazujących działanie toksyczne wobec mikroorganizmów biorących udział w biologicznym utlenianiu zanieczyszczeń w ściekach.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że korzystna zmiana biodegradowalności ścieków koksowniczych poddanych działaniu fali ultradźwiękowej zależy od wielu czynników, tj. czasu nadźwiękawiania, amplitudy oraz częstotliwości drgań. Wykazano, że na zmianę podatności na biodegradację ścieków silnie toksycznych jakimi są ścieki koksownicze wpływ mają zarówno czas sonifikacji i amplituda drgań fali jak również ilość wprowadzanej do układu energii. Najkorzystniejsza z punktu widzenia poprawy stopnia biodegradacji ścieków koksowniczych jest amplituda na poziomie 61,5 µm przy czasie reakcji wynoszącym 8 minut. Z kolei dalsze wydłużanie czasu i zwiększanie amplitudy drgań powoduje w przyjętym układzie zjawiska niekorzystne wywoływane przez reakcje sonochemiczne.

Badania zrealizowano w ramach BS/MN-401-303/14

Autorka Aleksandra Krzywicka jest stypendystką w ramach projektu „DoktoRIS – Program stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

1. Klejnowski K., Ściążko M., Najlepsze Dostępne Techniki (BAT), Branża koksownicza, Ministerstwo Środowiska, 20005, Warszawa
2. Machowska H., Przemysł koksowniczy w aspekcie ochrony środowiska, Proceedings of ECOpole, 2011, vol.5, no.1, 269-274
3. Bartkiewicz B., Oczyszczanie ścieków przemysłowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2006
4. Olczak Cz., Ligus G., Miodoński J., Contemporary methods for treatment of phenolic coke wastewater, Chemik, 2013, 67, 10, 979–984

5. Sindera P., Felis E., Wiszniowski J., Ocena genotoksyczności ścieków koksowniczych Genotoxicity of coke wastewaters *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 53, 2011, 217–225
 6. Ning P., Hans-Jorg B., Yijiao J., A. de Haand, C. Tien, Treatment of organic pollutants in coke plant wastewater by the method of ultrasonic irradiation, catalytic oxidation and activated sludge, *Separation and Purification Technology* 41, 2005, 133–139
 7. Richards W.T., Loomis A.L., *J. Am. Chem. Soc.* 49 (1927) 3086– 3091
 8. Ingole N.W., Khedkar S.V., The ultrasound reactor technology-a technology for future, *IJAERS/Vol. II/ Issue I*, 2012, 72-75
 9. Kootenaei F. G., Mehrdadi N., Rezazadeh M., Seyedmahalleh E.S., Application of ultrasound waves for biodegradation of pollutants in wastewater and sludge dewatering, *Interciencia*, vol.39, nr.4, 2014
 10. Upadhyay, K. and Khandate G., Ultrasound Assisted Oxidation Process for the Removal of Aromatic Contamination from Effluents: A Review, *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 2012, Volume 2, Issue 6: 458-464
 11. Kusiak M., Stępnia L., Metody sonochemiczne usuwania zanieczyszczeń organicznych z wody, *Proceedings of ECOpole*, vol 4, no 2, 2010, 439-445
 12. Stępnia L., Olesiak P. , Stańczyk- Mazanek E., Comparison of ultrasound-assisted sorption under different conditions of the proces, *Chemical Engineering Transactions*, vol 32, 2013, 493-498
 13. Kamizela T., Wykorzystanie sonifikacji do rozdziału faz w zagęszczaniu zawiesin osadu czynnego, *Monografia Politechniki Częstochowskiej* nr 243, Częstochowa, 2012
 14. Śliwiński A., *Ultradźwięki i ich zastosowanie*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1993
-