

Lidia DĄBEK, Ewa OZIMINA, Anna PICHETA-OLEŚ

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Katedra Inżynierii i Ochrony Środowiska
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Wykorzystanie węgla aktywnego i nadtlenu wodoru w oczyszczaniu ścieków przemysłowych

Oczyszczanie ścieków przemysłowych wymaga stosowania różnych metod, w tym procesów sorpcji i utlenienia. Każdy z tych procesów ma swoje zalety i ograniczenia. Konsekwencją stosowania sorpcji (najczęściej z wykorzystaniem węgla aktywnych) jest problem zagospodarowania zużytych sorbentów, a proces utleniania wymaga wprowadzania znacznych ilości utleniaczy. Alternatywą może być połączenie obu tych procesów, realizowane jako: sorpcja, a następnie utlenienie zaadsorbowanych substancji, co skutkuje ich regeneracją i możliwością ponownego wykorzystania, lub jako sorpcja i utlenianie realizowane symultanicznie. W prezentowanej pracy prowadzono badania nad skutecznością usuwania p-chlorofenolu (jako substancji organicznej często występującej w ściekach przemysłowych) z wykorzystaniem węgla aktywnego i utleniaczy. Jako utleniacze zastosowano nadtlenek wodoru oraz odczynnik Fentona wykorzystywane w metodach pogłębianego utleniania (AOP). W tym przypadku rozkład związków organicznych zachodzi na skutek działania powstających w środowisku reakcji rodników hydroksylowych. Wykazano, że nadtlenek wodoru nie utlenia p-chlorofenolu, natomiast w reakcji Fentona następuje natychmiastowy rozkład tej substancji. Jednocześnie wykazano, że wybrany do badań węgiel aktywny WD extra charakteryzuje się dużą zdolnością sorpcyjną względem p-chlorofenolu, wynoszącą 150 mg/g. Nasycony p-chlorofenolem węgiel aktywny poddano regeneracji poprzez utlenienie zaadsorbowanej substancji nadtlenukiem wodoru i odczynnikiem Fentona. Stwierdzono, że węgiel aktywny po regeneracji wykazuje zdolności sorpcyjne zbliżone do węgla świeżego. Procesowi regeneracji towarzyszy jednak znaczny ubytek masy węgla aktywnego, szczególnie na skutek działania odczynnika Fentona (ok. 15%). Jednocześnie prowadzono badania nad usuwaniem p-chlorofenolu z roztworu wodnego w symultanicznym procesie sorpcji i utlenienia. Zaobserwowano, że w pierwszym etapie reakcji zachodzi proces utleniania, obejmujący jednak nie tylko rozkład p-chlorofenolu, ale również węgiel aktywny, na co wskazuje znaczny ubytek masy. Wraz z upływem czasu reakcji udział sorpcji wzrasta.

Słowa kluczowe: węgiel aktywny, sorpcja, regeneracja, utlenianie, nadtlenek wodoru

Wprowadzenie

Oczyszczanie ścieków przemysłowych z uwagi na ich złożony i zróżnicowany skład chemiczny wymaga stosowania różnych metod, w tym procesów sorpcji i utlenienia. Zastosowanie węgla aktywnych jako sorbentów [1] skutkuje powstawaniem odpadów, jakim są zużyte węgle. Odpady te wymagają odpowiedniego zagospodarowania ze szczególnym uwzględnieniem procesów regeneracji. Obecnie najczęściej stosowaną metodą jest regeneracja termiczna [2], ale rozważa się również możliwość regeneracji chemicznej. W tym ostatnim przypadku dużą

uwagę zwraca się na procesy utleniania zaadsorbowanych związków organicznych, stosując metody tzw. pogłębionego utleniania AOPs (Advanced Oxidation Process), których cechą charakterystyczną jest generowanie w środowisku reakcji rodników hydroksylowych, zaliczanych do najsilniejszych utleniaczy (potencjał utleniający wynosi 2,7 mV) [3, 4]. Jak wskazują dane literaturowe [3-5], utlenianie związków organicznych w warunkach pogłębionego utleniania jest niezwykle skutecznym sposobem ich usuwania z roztworów wodnych. Niestety, oczyszczanie dużych ilości niskoobciążonych ścieków wymaga znacznego zużycia utleniaczy, co rodzi koszty i zwiększa ilość ścieków. Z tego też względu zwraca się uwagę na możliwość połączenia procesu sorpcji zanieczyszczeń na węglu aktywnym z ich utlenianiem za pomocą utleniaczy zaliczanych do grupy AOP. Proces ten może być realizowany jako dwu- lub jednoetapowy. W pierwszym przypadku proces usuwania obejmuje sorpcję zanieczyszczeń, a następnie ich utlenienie skutkujące równoczesną regeneracją węgla aktywnego. Natomiast w drugim przypadku mówi się o symultanicznym procesie sorpcji i utlenienia związków organicznych. Pomimo licznych badań [5-10] nie jest jednoznacznie wyjaśnione, jak przebiega ten proces. Według jednych autorów [5], związki organiczne są najpierw adsorbowane na węglu aktywnym, a następnie utleniane, natomiast - zdaniem innych badaczy [10] - najistotniejsza jest katalityczna rola węgla aktywnego w reakcji tworzenia się rodników hydroksylowych w środowisku reakcji.

W prezentowanej pracy podjęto badania nad skutecznością usuwania z roztworów wodnych związków organicznych na przykładzie p-chlorofenolu (zanieczyszczenia organicznego, trudnodegradowalnego, często występującego w ściekach przemysłowych, np. koksowniczych) z wykorzystaniem węgla aktywnego w obecności i bez udziału utleniaczy, takich jak H_2O_2 i Fe^{+2}/H_2O_2 .

1. Metodyka badań

W badaniach wykorzystano handlowy węgiel aktywny WD extra produkcji Gryfskand. Doświadczenia prowadzono dla wodnego roztworu p-chlorofenolu o stężeniu 1 g/l.

1. Izoterma sorpcji

Izotermę sorpcji p-chlorofenolu na węglu aktywnym WD extra wyznaczono w układzie złożonym z naważki węgla równej 0,5 g węgla i 100 cm^3 roztworu p-chlorofenolu o określonym stężeniu w zakresie 20÷100 mg/l. Czas kontaktu niezbędny dla ustalenia równowagi adsorpcyjnej w układzie p-chlorofenol - WD extra wynosił 4 godziny. Sorpcję prowadzono w temperaturze pokojowej.

2. Usuwanie p-chlorofenolu z roztworu

a) sorpcja

W kolbach stożkowych umieszczono po 1 g węgla aktywnego WD extra i zadano 300 cm^3 wodnego roztworu p-chlorofenolu. Całość intensywnie mieszano przez 10, 30, 60 i 120 minut. Po upływie odpowiedniego czasu przerywano sorpcję i oznaczano pozostały w roztworze p-chlorofenol.

b) utlenianie

- H_2O_2

Dodając NaOH do 300 cm³ roztworu p-chlorofenolu, doprowadzono pH do 8. Następnie dodano H₂O₂ w ilości zapewniającej stechiometryczny przebieg reakcji utlenienia p-chlorofenolu. Całość intensywnie mieszano przez 120 minut. Po upływie 10, 30, 60 i 120 minut pobierano próbkę mieszaniny utleniającej i oznaczano pozostały w niej p-chlorofenol.

- w reakcji Fentona Fe^{2+}/H_2O_2

Dodając H₂SO₄ do 300 cm³ roztworu p-chlorofenolu, doprowadzono pH do ok. 4, po czym wprowadzono kolejno H₂O₂ w ilości zapewniającej stechiometryczny przebieg reakcji utlenienia p-chlorofenolu oraz siarczan(VI) żelaza(II) (FeSO₄·7H₂O) w stosunku wagowym (w przeliczeniu na Fe²⁺) Fe²⁺/ H₂O₂ jak 1 : 5. Całość intensywnie mieszano przez 120 minut. Po upływie 10, 30, 60 i 120 minut pobierano próbkę mieszaniny utleniającej i oznaczano pozostały w niej p-chlorofenol.

c) sorpcja + utlenianie

- WD extra + H_2O_2

W kolbach stożkowych umieszczono 300 cm³ roztworu p-chlorofenolu i za pomocą NaOH doprowadzono pH do 8, po czym wprowadzono 1 g węgla aktywnego WD extra oraz H₂O₂ w ilości zapewniającej stechiometryczny przebieg reakcji utlenienia p-chlorofenolu. Całość intensywnie mieszano przez 10, 30, 60 i 120 minut. Po upływie odpowiedniego czasu przerywano reakcję utlenienia i oznaczano pozostały w mieszaninie reakcyjnej p-chlorofenol.

- WD extra + Fe^{2+}/H_2O_2

W kolbach stożkowych umieszczono 300 cm³ roztworu p-chlorofenolu i za pomocą H₂SO₄ doprowadzono pH do ok. 4, po czym wprowadzono kolejno: 1 g węgla aktywnego WD extra, H₂O₂ w ilości zapewniającej stechiometryczny przebieg reakcji utlenienia p-chlorofenolu oraz siarczan(VI) żelaza(II) (FeSO₄·7H₂O) w stosunku wagowym (w przeliczeniu na Fe²⁺) Fe²⁺/ H₂O₂ lub 1 : 5. Całość intensywnie mieszano przez 10, 30, 60 i 120 minut. Po upływie odpowiedniego czasu przerywano reakcję utlenienia i oznaczano pozostały w mieszaninie reakcyjnej p-chlorofenol.

3. Regeneracja węgla aktywnego nasyconego p-chlorofenolem

- H_2O_2

5 g węgla aktywnego WD extra po sorpcji, nasyconego p-chlorofenolem, zadano 500 cm³ wody i za pomocą NaOH doprowadzono pH do 8. Następnie wprowadzono H₂O₂ w ilości zapewniającej stechiometryczny przebieg reakcji utlenienia p-chlorofenolu. Całość mieszano przez 20 min w temperaturze pokojowej, po czym węgiel płukano 5 x 100 cm³ wodą destylowaną. Węgiel aktywny zregenerowany nadtlaniem wodoru oznaczono symbolem WD extra/H₂O₂.

4. Fe^{2+}/H_2O_2

5 g węgla aktywnego WD extra po sorpcji, nasyconego p-chlorofenolem, zadano 500 cm³ wody i następnie za pomocą H₂SO₄ doprowadzono pH do ok. 4, po czym do układu reakcyjnego wprowadzono H₂O₂ w ilości zapewniającej stechiometryczny przebieg reakcji utlenienia p-chlorofenolu oraz siarczan(VI) żelaza(II) (FeSO₄·7H₂O) w stosunku wagowym (w przeliczeniu na Fe²⁺) Fe²⁺/H₂O₂ lub 1 : 5. Całość intensywnie mieszano przez 20 minut, po czym węgiel płukano 5 x 100 cm³ wodą destylowaną. Węgiel aktywny zregenerowany w reakcji Fentona oznaczono symbolem WD extra/Fe²⁺/H₂O₂.

5. Oznaczanie stężenia p-chlorofenolu i jonów chlorkowych

Oznaczenie stężenia p-chlorofenolu prowadzono metodą chromatograficzną z wykorzystaniem chromatografu gazowego Focus GC Thermoscientific po wcześniejszym wydzieleniu analitu poprzez ekstrakcję ciecz:ciecz ksylenem wg procedury własnej w celu wyekstrahowania zarówno p-chlorofenolu, jak i powstających ewentualnych produktów pośrednich utlenienia obecnych w roztworze. Oszacowany odzysk analitu z roztworu wodnego wynosił 92%.

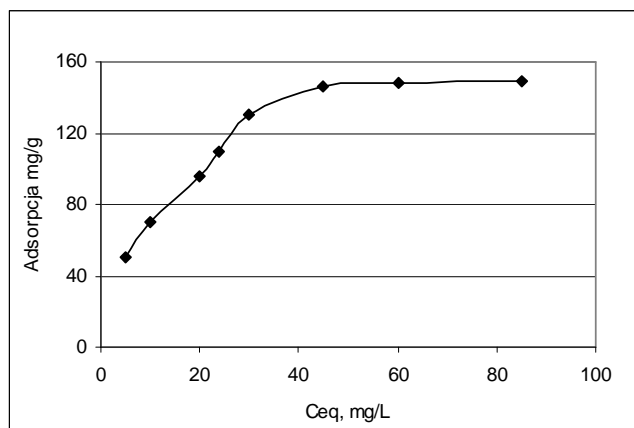
Jony chlorkowe Cl⁻ oznaczano metodą miareczkowania kulometrycznego z wykorzystaniem kulometru przy analizatorze AOX Behr CL10 [11, 12].

2. Omówienie wyników

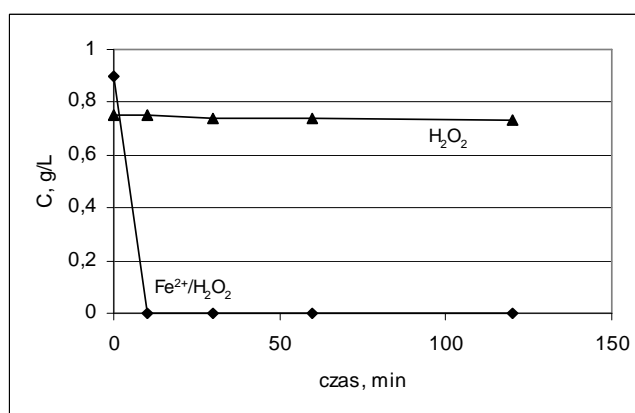
W pierwszym etapie badań oceniono zdolność sorpcyjną wybranego do badań węgla aktywnego WD extra względem p-chlorofenolu. Z przebiegu izotermii sorpcji przedstawionej na rysunku 1 wynika, że jego zdolność sorpcyjna w stosunku do p-chlorofenolu jest wysoka i wynosi 150 mg/g. To wskazuje na możliwość jego wykorzystania do usuwania p-chlorofenolu, ale pojawia się problem unieszkodliwienia zużytego węgla aktywnego. Jednym z rozwiązań może być jego regeneracja z wykorzystaniem procesu chemicznego utleniania. Jako utleniacz, jak wykazywano wcześniej, można wykorzystać rodniki OH[•] powstające w reakcji Fentona, lub w efekcie katalitycznego rozkładu H₂O₂ w obecności węgla aktywnego. Z tego też względu węgiel aktywny nasycony p-chlorofenolem poddawano działaniu wymienionych utleniaczy w ilości zapewniającej stechiometryczny przebieg reakcji utlenienia.

Krokiem poprzedzającym regenerację było sprawdzenie podatności p-chlorofenolu na utlenienie za pomocą H₂O₂ i z wykorzystaniem reakcji Fentona. Przedstawiona na rysunku 2 zmiana stężenia p-chlorofenolu w czasie wskazuje, że w efekcie reakcji Fentona w której utleniaczem jest rodnik hydroksylowy, obserwuje się natychmiastowy rozkład tej substancji. Natomiast p-chlorofenol nie ulega utlenieniu w obecności nadtlenu wodoru, pomimo że zapewniono optymalne warunki reakcji. Jak wskazują dane literaturowe [6], niekatalityczne utlenianie substancji organicznych za pomocą H₂O₂ jest najskuteczniejsze w środowisku zasadowym, co tłumaczy się tworzeniem w tych warunkach utleniającego anionu

nadtlenkowego ($\text{H}_2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HO}_2^-$, $\text{pK}_{\text{aH}_2\text{O}_2} = 11,6$). Z tego też względu reakcję utlenienia p-chlorofenol - nadtlenek wodoru prowadzono przy pH około 8. Z danych literaturowych [5-8] wynika również, że węgiel aktywny katalizuje rozkład H_2O_2 z utworzeniem rodników OH^\bullet . Wobec tego należało się spodziewać, że p-chlorofenol zaadsorbowany na węglu aktywnym powinien ulec rozkładowi, co doprowadzi do regeneracji węgla aktywnego. Skuteczność regeneracji oceniano w oparciu o zdolność sorpcyjną zregenerowanych węgli, wykorzystując je ponownie jako sorbenty p-chlorofenolu.



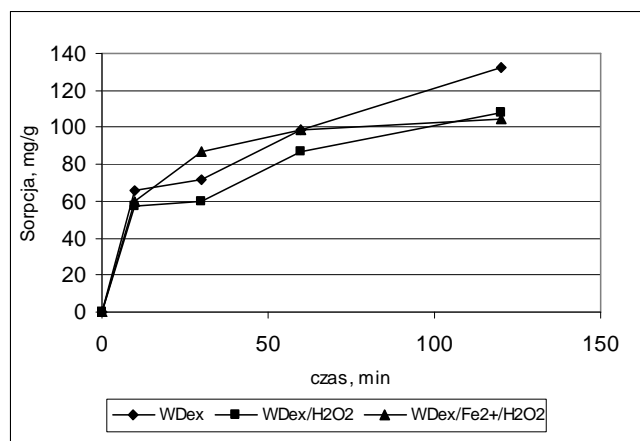
Rys. 1. Izoterma sorpcji p-chlorofenolu z roztworu wodnego na węglu WD extra



Rys. 2. Zmiany stężenia p-chlorofenolu w zależności od zastosowanego utleniacza w funkcji czasu utleniania

Przedstawione na rysunku 3 wyniki badań wskazują, że zdolność sorpcyjna zregenerowanych węgli WD extra/ H_2O_2 i WD extra/ $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ jest porównywalna do zdolności sorpcyjnych węgla świeżego. Zarówno dla węgla po regeneracji H_2O_2 , jak i odczynnikiem Fentona sorpcja po dwóch godzinach wynosiła ok.

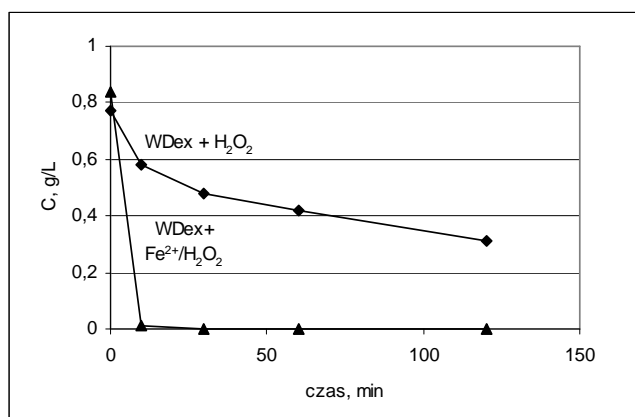
105 mg/g, podczas gdy dla węgla świeżego WD extra wynosiła 132 mg/g. To wskazuje, że w zadanych warunkach nastąpiło utlenienie zaadsorbowanego p-chlorofenolu. Należy też zwrócić uwagę, że porównywalne wyniki regeneracji świadczą, że w układzie WD extra/p-chlorofenol/H₂O₂ generowany jest analogicznie jak w reakcji Fentona, rodnik OH[•] odpowiedzialny za utlenienie p-chlorofenolu. Nieco mniejsza sorpcja na węglach po regeneracji może być z jednej strony wynikiem niecałkowitego utlenienia zaadsorbowanego związku organicznego, a z drugiej zmiany charakteru chemicznego powierzchni węgla.



Rys. 3. Skuteczność usuwania p-chlorofenolu z roztworu w obecności węgla świeżego WD extra i węgla zregenerowanych WD extra/H₂O₂ i WD extra/Fe²⁺/H₂O₂

Dane literaturowe [7] wskazują, że na skutek działania H₂O₂ i odczynnika Fentona następuje utlenienie powierzchni węgla, któremu towarzyszy wzrost stężenia kwasowych grup tlenowych. Wzrost kwasowości powierzchni zmniejsza zdolność sorpcyjną węgla aktywnego względem p-chlorofenolu. W ramach pracy nie analizowano zmian charakteru chemicznego, ale zaobserwowano znaczący ubytek masy węgla (ok. 15%), co świadczy o utlenieniu matrycy węglowej, a tym samym jego powierzchni.

W kolejnym etapie badań analizowano efektywność usuwania p-chlorofenolu z roztworu, wprowadzając jednocześnie do układu reakcyjnego węgiel aktywny oraz utleniacz. W układzie reakcyjnym obserwowano zarówno zmiany stężenia p-chlorofenolu w czasie, jak i jonów chlorkowych, których obecność wskazuje na utlenienie p-chlorofenolu. Z danych przedstawionych na rysunku 4 wynika, że w zadanych warunkach reakcji w obecności H₂O₂ i węgla WD extra po 10 min reakcji obserwuje się 24% ubytek p-chlorofenolu, przy czym obecność w roztworze jonów chlorkowych na poziomie 43,6 mg/l wskazuje, że w układzie reakcyjnym ma miejsce zarówno proces sorpcji p-chlorofenolu, jak i jego utlenianie (tab. 1). Wartość stężenia jonów chlorkowych nie odpowiada stechiometrycznej ilości usuniętego z roztworu p-chlorofenolu.



Rys. 4. Zmiany stężenia p-chlorofenolu w obecności utleniaczy i węgla aktywnego w funkcji czasu utleniania

Tabela 1

Zmiana stężenia jonów chlorkowych w mieszaninie reakcyjnej p-chlorofenol/WD extra/utleniacz

Lp.	Czas utleniania min	Stężenie Cl ⁻ , mg/l	
		WD extra + H ₂ O ₂	WD extra + Fe ²⁺ /H ₂ O ₂
1	10	43,56	228
2	30	60,77	228
3	60	62,62	228
4	120	63,54	228

Oszacowany udział utlenienia do sorpcji wynosi 83% : 17%. Wydłużenie czasu reakcji powoduje, że udział sorpcji w procesie usuwania substancji organicznej zwiększa się i po dwóch godzinach w stosunku do utlenienia wynosi 50% : 50%. Natomiast w przypadku reakcji Fentona w obecności węgla aktywnego obserwuje się praktycznie natychmiastową redukcję stężenia p-chlorofenolu w roztworze, której towarzyszy pojawienie się chlorków w ilości stechiometrycznej. Na uwagę zasługuje jednak to, że usuwaniu p-chlorofenolu w badanym układzie reakcyjnym towarzyszy znaczący ubytek masy węgla, który już po 10 min wynosi ok. 10%.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują, że wybrany do badań węgiel aktywny WD extra charakteryzuje się dużą zdolnością sorpcyjną względem p-chlorofenolu wynoszącą 150 mg/g. Natomiast próba rozkładu p-chlorofenolu za pomocą nadtlenu wodoru wykazała, że w zadanych warunkach nie następuje utlenienie tej substancji. Skuteczniejszym sposobem usuwania p-chlorofenolu jest zastosowa-

nie reakcji Fentona, ale konsekwencją jest wprowadzanie do układu reakcyjnego znacznych ilości związków żelaza i obniżenie pH. Jako alternatywę zastosowano połączenie obu procesów w kolejności sorpcja, a następnie utlenienie zaadsorbowanych substancji (regeneracja węgla aktywnego) oraz sorpcja i utlenienie realizowane symultanicznie. Stwierdzono, że węgiel aktywny po regeneracji zarówno H_2O_2 , jak i odczynnikiem Fentona wykazuje zdolności sorpcyjne zbliżone do węgla świeżego. Procesowi regeneracji towarzyszy jednak znaczny ubytek masy węgla aktywnego, szczególnie na skutek działania odczynnika Fentona (ok. 15%). Natomiast wyniki badań nad usuwaniem p-chlorofenolu z roztworu wodnego w symultanicznym procesie sorpcji i utleniania świadczą, że w pierwszym etapie reakcji dominuje proces utleniania, obejmujący jednak nie tylko rozkład p-chlorofenolu, ale również węgla aktywnego, na co wskazuje obecność jonów chlorkowych i znaczny ubytek masy węgla. Wraz z upływem czasu reakcji wzrasta udział procesu sorpcji w usuwaniu p-chlorofenolu z roztworu w stosunku do utleniania.

Podziękowanie

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr N N205 1993 33 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Studentka studiów III stopnia Anna Picheta-Oleś w roku akademickim 2010/2011 otrzymuje stypendium naukowe współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego - projekt „Program Rozwojowy Potencjału Dydaktycznego Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach: kształcenie na miarę sukcesu”, Umowa UDA-POKL.04.01.01-00-175/08-02, Priorytet IV, Działanie 4.1, Poddziałanie 4.1.1.

Literatura

- [1] Bansal R.Ch., Goyal M., Activated Carbon Adsorption, Taylor & Francis Group, Boca Raton-London-New York-Singapore 2005.
- [2] San Miguel G., Lambert S.D., Graham N.J.D., The regeneration of field spent granular activated carbon, Water Research 2001, 35, 11, 2740-2748.
- [3] Barbusiński K., Oczyszczanie ścieków przemysłowych metodami katalitycznymi z wykorzystaniem nadtlenu wodoru, Chemik 2001, 54, 2, 31-36.
- [4] Alvarez P.M., Beltran F.J., Gomez-Serrano V., Jaramillo J., Rodriguez E.M., Comparison between thermal and ozone regenerations of spent activated carbon exhausted with phenol, Water Research 2004, 38, 8, 2155-2165.
- [5] Toledo L.C., Silva A.C.B., Augusti R., Lago R.M., Application of Fenton's reagent to regenerate activated carbon saturated with organochloro compounds, Chemosphere 2003, 50, 8, 1049-1054.
- [6] Alvarez P.M., Beltran F.J., Gomez-Serrano V., Jaramillo J., Rodriguez E.M., Comparison between thermal and ozone regenerations of spent activated carbon exhausted with phenol, Water Research 2004, 38, 8, 2155-2165.

- [7] Huang H.H., Lu M.C., Chen J.N., Lee C.T., Catalytic decomposition of hydrogen peroxide and 4-chlorophenol in the presence of modified activated carbons, *Chemosphere* 2003, 51, 9, 935-943.
- [8] Wąsowski J., Piotrowska A., Rozkład organicznych zanieczyszczeń wody w procesach pogłębioego utleniania, *Ochrona Środowiska* 2002, 2, 27-32.
- [9] Langley L.A., Fairbrother D.H., Effect of wet chemical treatments on the distribution of surface oxides on carbonaceous materials, *Carbon* 2007, 45, 1, 47-54.
- [10] Mourand J.T., Crittenden J.C., Hand D.W., Perram D.L., Notthakun, Sawang, Regeneration of spent adsorbents using homogeneous advanced oxidation, *Wat. Environ. Federat.* 1995, 67, 3, 355-363.
- [11] Szczepaniak W., *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*, WN PWN, Warszawa 2002.
- [12] Analizator AOX Behr CL10 - instrukcja obsługi.

The Use of Activated Carbon and Hydrogen Peroxide in Wastewater Treatment

Industrial wastewater treatment requires the application of various methods including sorption and oxidation. Each of these processes has its advantages and limitations. The main consequence of sorption (usually with the use of activated carbon) is the problem of utilizing the used sorbents while oxidation requires introducing large amounts of oxidants. Alternatively, the combination of both these processes can be used, either carried out in the following sequence: sorption and then oxidation of adsorbed compounds, which results in their regeneration and possibility of their further use or as sorption and oxidation carried out simultaneously. In this paper the study on the effectiveness of p-chlorophenol (as an organic compound usually present in wastewaters) removal with the use of activated carbon and oxidants has been carried out. Hydrogen peroxide and Fenton's agent used in the advanced oxidation processes (AOP) were applied as oxidants. In such case the decomposition of organic compounds takes place due to the effect of hydroxyl radicals formed in the reaction environment. It has been shown that the hydrogen peroxide does not oxidate p-chlorophenol, while in the Fenton reaction immediate decomposition of this compound takes place. At the same time, it has been proven that the WD extra activated carbon selected for the studies has high sorptive abilities towards p-chlorophenol amounting to 150 mg/g. Activated carbon saturated with p-chlorophenol has been regenerated by oxidation of the adsorbed compound with hydrogen peroxide and Fenton's agent. It has been observed that after the regeneration the activated carbon shows sorptive abilities similar to the fresh carbon. However, the regeneration process has been accompanied with considerable activated carbon mass loss, in particular due to the effect of Fenton's agent (approximately 15%). At the same time studies on the p-chlorophenol removal from the aqueous solution in the simultaneous process of sorption and oxidation has been carried out. It has been observed that in the first phase of the reaction oxidation process takes place, involving p-chlorophenol decomposition as well as activated carbon decomposition, which is implied by the considerable mass loss. With time, sorption process starts to dominate. It has been concluded that irrespective of the method chosen (sorption and then oxidation of adsorbed compounds or simultaneous sorption and oxidation) the p-chlorophenol removal effectiveness was comparable.

Keywords: activated carbon, sorption, regeneration, oxidation, hydrogen peroxide