

## ZASTOSOWANIE ADSORPCJI NA WĘGLU AKTYWNYM W RÓŻNYCH UKŁADACH TECHNOLOGICZNYCH OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW

### APPLICATION OF ADSORPTION ON ACTIVATED CARBON IN VARIOUS TECHNOLOGICAL SYSTEMS IN SEWAGE PLANTS

**Agata Kobyłka**

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
Wydział Agrobiotechnologii  
Katedra Turystyki i Rekreacji  
ul. Akademicka 15  
20-950 Lublin  
e-mail: agata.kobylka@gmail.com

**Abstract:** The effectiveness of activated carbon in the removal of water pollutants, especially those in trace amounts, with which other methods cannot handle is being increasingly highlighted. The aim of the paper was to describe how to apply the process of adsorption on activated carbons for the removal of water pollutants in different technological systems of the sewage farm. They are used in the third stage of mechanical-biological treatment, as a final purification process of physico-chemical treatment of industrial waste or municipal waste water with high concentrations of toxic substances which prevent biological treatment and a supporting process of biological waste by the addition of powdery carbon to a chamber comprising activated sludge where adsorption occurs simultaneously with the process of biochemical decomposition of organic impurities.

**Keywords:** adsorption, activated carbon, environmental protection, wastewater, sewage treatment plants, technological systems, columns.

#### Wprowadzenie

Obecnie dostępnych jest wiele rodzajów materiałów węglowych (m.in. węgle aktywne, sadze grafityzowane, węglowe sita molekularne). Różnią się one od siebie właściwościami fizyko-chemicznymi, takimi jak: rozwinięcie powierzchni, kształt, wielkość i objętość porów, obecność grup funkcyjnych, chemiczna obojętność [1]. Już Paprowicz [2], Jankowska i Nefie [3] zwrócili uwagę na to, że efektywne usuwanie substancji organicznych ze ścieków można osiągnąć dzięki zastosowaniu adsorpcji na węglu aktywnym.

Celem artykułu było opisanie sposobów zastosowania procesu adsorpcji na węglach aktywnych do usuwania zanieczyszczeń ścieków w różnych układach technologicznych oczyszczalni. Scharakteryzowano także węgle aktywne i przedstawiono ich różnorodne zastosowanie w wielu branżach. Autor zwrócił uwagę na opisane metody głównie z uwagi na ich ogromne możliwości i sukcesywnie pojawiające się doniesienia o nowych surowcach, które mogą posłużyć do wytwarzania węgla aktywnych.

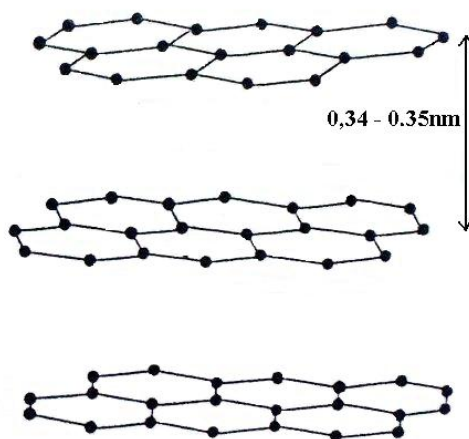
#### Węgiel aktywny (Activated carbon)

Węgla aktywne wytwarzane są na bazie różnorodnych surowców, m.in. drewna, [4], skorup orzechów, pestek

owoców [5, 6, 7], koksu, torfu, węgla brunatnego, kamiennego, odpadów przemysłowych [8, 9]. Ich preparatyka obejmuje dwa procesy. Pierwszy etap to karbonizacja, czyli piroliza materiału wyjściowego w atmosferze obojętnej [8, 10] (bez dostępu powietrza lub w atmosferze obojętnej gazu: azotu bądź gazu szlachetnego – zwykle argonu [11]) w temperaturze poniżej 800°C [8, 10]. Podczas procesu wydzielają się części lotne i powstaje pierwotna struktura porowata [9]. Pory wypełnione są produktami rozkładu i substancją smolistą [10]. Drugim etapem jest aktywacja. Podstawową metodą jest obróbka gazami utleniającymi (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, parą wodną) [8, 9] w temperaturze 800-900°C [10]. W konsekwencji otrzymuje się amorficzny (bezporeczny) materiał węglowy [12]. Podstawowym jego składnikiem jest węgiel pierwiastkowy (ok. 85-95%), jak również azot, siarka, tlen i wodór [10]. Węgla aktywne posiadają bardzo złożoną strukturę powierzchniową, zawierającą szeroki zakres grup funkcyjnych [1, 8, 10]. Grupy funkcyjne mogą pochodzić z surowca wyjściowego, stając się częścią struktury chemicznej na etapie karbonizacji lub zostają chemicznie związane z powierzchnią podczas późniejszych działań [8-10]. Zdecydowanie najważniejszymi kompleksami powierzchniowymi są grupy węgiel-tlen [10], np. gr. karboksylowe, laktozowe, hydroksylowe, karbonylowe, chromenowe [11].

Powierzchnia tychże materiałów węglowych posiada dużą pojemność sorpcyjną [1]. Powierzchnia węgla aktywnych może być modyfikowana w zależności od pożądanej zmiany właściwości. Jednym ze sposobów jest tworzenie różnych typów grup funkcyjnych np. poprzez utlenianie powierzchni gazami bądź roztworami utleniającymi, obróbkę amoniakiem albo traktowanie elementarną siarką [10].

Węgłe aktywne zbudowany są z mikrokrystalitów grafitopodobnych [13], które różnią się od uporządkowanej struktury czystego grafitu. Odległości międzywarstwowe wynoszą 0,34-0,35 nm. Warstwy nie są ułożone równoległe i tworzą tzw. strukturę turbostratyczną [9], która została przedstawiona na rys. 1.


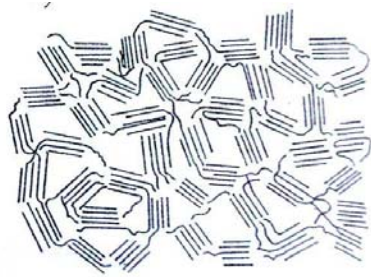


Rys. 1. Struktura turbostratyczna węgla aktywnego [1].

Węgłe aktywne posiadają polidispersyjną strukturę porowatą, która składa się z porów o różnych rozmiarach i kształtach. Struktura i rozkład wielkości porów w dużej mierze są uzależnione od rodzaju materiału wyjściowego i warunków karbonizacji [10].

Franklin podzielił węgle aktywne w zależności od zdolności do grafityzacji na dwie grupy: grafityzujące i niegrafityzujące, które zostały opisane w tab. 1.

Tab. 1. Charakterystyka węgla aktywnych grafityzujących i niegrafityzujących [8, 9, 10].

	Węgłe aktywne grafityzujące	Węgłe aktywne niegrafityzujące
Proces grafityzacji	łatwo mu ulegają	słabo mu ulegają
Twardość	stosunkowo miękkie, słabe właściwości mechaniczne	znaczna twardość
Wiązania poprzeczne	słabe	silne
Struktura porowata	nie mają rozwiniętej	dobrze rozwinięta struktura mikroporowata
Krystality	warstwy tworzące krystality w głównej mierze zorientowane równoległe do siebie	chaotyczne ułożenie krystalitów
Gęstość rzeczywista	w wyniku grafityzacji zbliża się do wartości charakterystycznej dla grafitu (2,26 g/cm <sup>3</sup> )	stosunkowo mała (mniejsza niż 2 g/cm <sup>3</sup> )
Schemat struktury węgla aktywnego		

## Zastosowanie adsorpcji na węglach aktywnych

Węgłe aktywne są wyjątkowymi i bardzo popularnymi materiałami węglowymi [14, 15]. Wykorzystywane są w badaniach naukowych i procesach przemysłowych, w szczególności w adsorpcji, katalizie, separacji i elektrochemii [16].

Adsorpcja jest typowym zjawiskiem powierzchniowym, które polega na wysyceniu powierzchni adsorbentu, czyli substancji adsorbującej cząsteczkami adsorbentu, czyli substancji zaadsorbowanej, który znajduje się w pobliżu granicy faz adsorbat-adsorbent. Procesy adsorpcji mogą zachodzić na granicy faz: ciecz-ciecz, ciecz-gaz, ciało stałe-ciecz lub ciało stałe-gaz. Wykorzystanie w praktyce procesów adsorpcyjnych jest najbardziej powszechne dla dwóch pierwszych przypadków [9].

Na powierzchni adsorbentu cząsteczki lub atomy mają wyższą energię niż cząsteczki w jego wnętrzu [9]. Powierzchnia adsorbentu dąży do wyrównania

szczytkowych sił przez przyciąganie i zatrzymywanie na niej atomów, jonów lub cząsteczek cieczy lub gazu. Skutkuje to większym stężeniem adsorbentu w bliskim sąsiedztwie powierzchni niż w pozostałej fazie objętościowej [9, 10, 17]. Adsorpcja jest rezultatem nierównoważonych i nienasyconych sił molekularnych, które są obecne na powierzchni każdego ciała stałego [10]. Są one równoważone od strony wnętrza adsorbentu, a od strony granicy faz oddziałują z atomami, cząsteczkami i jonami, powodując gromadzenie się na ich powierzchni adsorbentu [9]. Podstawowymi mechanizmami wiążącymi analit z powierzchnią adsorbentu są oddziaływanie hydrofobowe, wiązania wodorowe, wymiana jonowa i wiele innych specyficznych oddziaływań [1].

W zależności od natury zaangażowanych sił wyróżniamy adsorpcję fizyczną i chemiczną, które różnią się od siebie pod wieloma względami [10]. W tab. 2 przedstawione zostały najbardziej znane zastosowania węgla aktywnych.

Tab. 2. Zastosowanie adsorpcji na węglach aktywnych [8, 10, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Dziedzina	Wykorzystywane własności	Przykłady zastosowania
Przemysł spożywczy	Adsorpcja z fazy ciekłej	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cukrownictwo: oczyszczanie i odbarwianie syropów cukrowych</li> <li>• odbarwianie, wybielanie olejów i tłuszczów</li> <li>• polepszanie smaku i innych właściwości napojów alkoholowych</li> <li>• poprawa jakości produktów spożywczych</li> <li>• usuwanie nieprzyjemnych zapachów, barw, niepożądanych składników</li> </ul>
Przemysł chemiczny, farmaceutyczny		<ul style="list-style-type: none"> <li>• klarowanie</li> <li>• odbarwianie i oczyszczanie substancji organicznych, np.: gliceryny, kwasu glutaminowego, kwasu mlekowego</li> <li>• odzyskiwanie rozpuszczalników organicznych, wartościowych substancji np. siarki</li> <li>• odzyskiwanie (wydzielanie) rozpuszczonych substancji z rozcieńczonych roztworów</li> <li>• usuwanie czynników gorączkotwórczych z roztworów do zastrzyków podskórnych</li> </ul>
Petrochemia		<ul style="list-style-type: none"> <li>• usuwanie merkaptanów z benzyny</li> </ul>
Przemysł ciężki		<ul style="list-style-type: none"> <li>• oczyszczanie roztworów po kąpielach galwanicznych</li> </ul>
Przemysł wydobywczy		<ul style="list-style-type: none"> <li>• odzyskiwanie złota</li> </ul>
Ochrona środowiska		<p>Uzdatnianie wody pitnej:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• odchorowywanie</li> <li>• redukcja zabarwienia</li> <li>• usuwania z wody mikrozanieczyszczeń (detergenty, fenole i ich pochodne, metale ciężkie, pestycydy, substancje rakotwórcze, węglowodory alifatyczne i aromatyczne, wirusy i inne)</li> <li>• usuwanie substancji wywołujących nieprzyjemny zapach i smak</li> </ul> <p>Technologia oczyszczania ścieków i odnowa wody:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• jeden z kilku etapów obróbki ścieków w oczyszczalniach (usuwanie substancji refrakcyjnych – gł. detergentów, estrów, barwników, jonów metali ciężkich, pestycydów, węglowodorów)</li> </ul>

	Adsorpcja z fazy gazowej	<p>Usuwanie niebezpiecznych gazów i odorów:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• adsorpcja par rtęci</li> <li>• ochrona górnych dróg oddechowych w środowisku niebezpiecznym</li> <li>• oczyszczania gazów odlotowych ze spalarni odpadów – jest obecnie jeden z ważniejszych (choć stosunkowo nowych) obszarów zastosowań węgla aktywnych</li> <li>• usuwanie gazów powstałych w wyniku spalania w silnikach spalinowych i zakładach energetycznych</li> <li>• usuwanie rozpuszczalników (np. benzenu, eteru, toluenu) i lotnych związków organicznych (LZO) z przemysłowych gazów odlotowych (np. w drukarniach, pralniach),</li> <li>• usuwanie tlenków azotu z gazów odlotowych</li> <li>• usuwanie toksycznych związków zawierających siarkę (dinitlenek siarki, disiarczki węgla, siarkowodór, związki siarkoorganiczne), z gazów spalinowych, gazów odlotowych z elektrowni, elektrociepłowni, przemysłu petrochemicznego i metalurgicznego</li> </ul>
Technologia nuklearna		oczyszczanie gazów odlotowych i obiegowych powstałych przy pracy reaktora jądrowego, produkcji paliwa jądrowego czy przerobie zużytych paliw
Technologia próżniowa		adsorpcja gazów i par m.in. rtęci na węglach aktywnych chłodzonych do niskich temperatur w celu zachowania czystości układu próżniowego
Odzysk		<p>rozdzielanie mieszanin gazowych na poszczególne składniki lub grupy składników, np. odzyskiwanie:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• benzenu z gazu miejskiego</li> <li>• gazoliny, butanu i propanu z gazu ziemnego</li> </ul>
Medycyna	Adsorpcja	<ul style="list-style-type: none"> <li>• adsorpcja substancji trujących np. alkaloidów, barbituranów, insektycydów, soli metali ciężkich</li> <li>• dezodoryzacja w niektórych zabiegach chirurgicznych</li> <li>• hematologia: adsorbowanie antyciał IgG i toksycznych substancji z plazmy</li> <li>• kapsuły węgla aktywnego jako implanty w ciele, z zaadsorbowanymi na ich powierzchni lekami, które są stopniowo dostarczane do organizmu</li> <li>• leczenie w ostrych nieżytkach żołądka</li> <li>• mikrofilmy z węglem aktywnym do transfuzji krwi</li> <li>• Właściwości antybakteryjne.</li> </ul>

### Zastosowanie adsorpcji w oczyszczalniach ścieków

Biologiczne i chemiczne metody stosowane do usuwania związków organicznych i nieorganicznych ze ścieków przynoszą jedynie połowiczny sukces. Powodem tego jest to, że wraz z rozwojem przemysłu farmaceutycznego, chemicznego i wielu innych branży zwiększyła się w ściekach różnorodność i ilość związków chemicznych. Od lat podejmowanych jest szereg działań w kierunku rozwoju skuteczniejszych i wydajniejszych sposobów ich usuwania. Wśród nich coraz częściej rozważa się zastosowanie węgla aktywnych jako potencjalnych sorbentów do usuwania związków chemicznych ze ścieków z uwagi na ich rozwiniętą strukturę porowatą i wysoką reaktywność powierzchni [10]. Węgla aktywne są skuteczne w oczyszczaniu ścieków z niewielkich cząsteczek organicznych, substancji powierzchniowo czynnych, jonów nieorganicznych, związków organicznych (nawet gdy występują w śladowych ilościach), metali (antymon, arsen, chrom, kobalt), a nawet odpornych na chlorowanie wirusów [2, 3]. Również Sorbak [9] podkreśla, że mikrozanieczyszczenia wody takie jak pestycydy, detergenty, fenole i ich pochodne i

metale ciężkie usuwa się przede wszystkim na węglu aktywnym.

Adsorpcja zazwyczaj stanowi jeden z ostatnich etapów cyklu oczyszczania ścieków [9]. Układy technologiczne konstruowane są tak, aby adsorpcję poprzedzały m.in. procesy koagulacji, sedymentacji czy filtracji [25]. Stosuje się ją najczęściej w następujących układach technologicznych oczyszczania ścieków [8]:

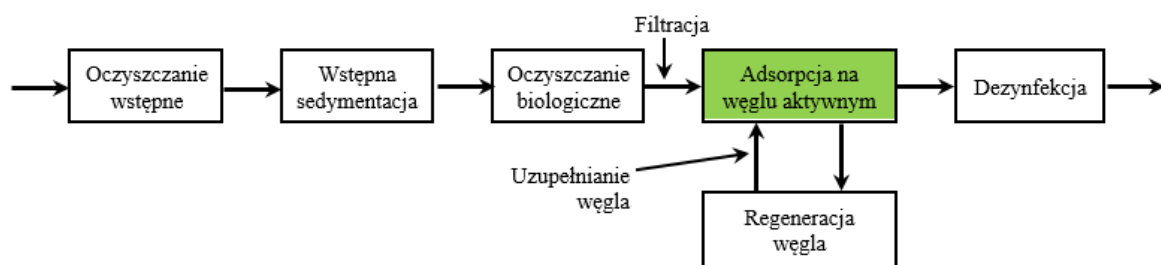
- w trzecim stopniu mechaniczno-biologicznej oczyszczalni w dwóch wariantach:

a) bezpośrednio po oczyszczaniu biologicznym i filtracji (rys. 2);

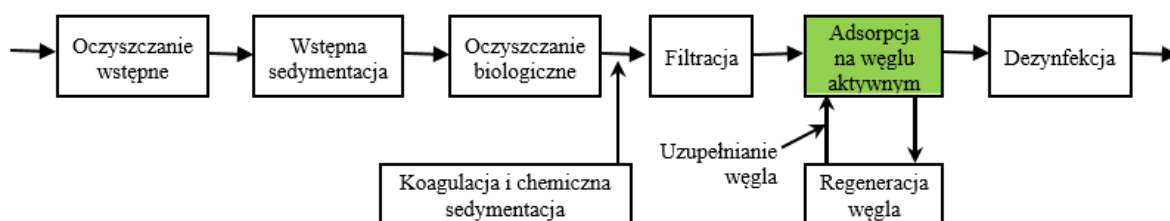
b) po mechaniczno-biologicznym oczyszczaniu, koagulacji i filtracji (rys. 3);

- jako końcowy proces oczyszczania fizyko-chemicznego oczyszczalni ścieków przemysłowych albo ścieków miejskich o dużym stężeniu substancji toksycznych uniemożliwiających oczyszczanie biologiczne (rys. 4);

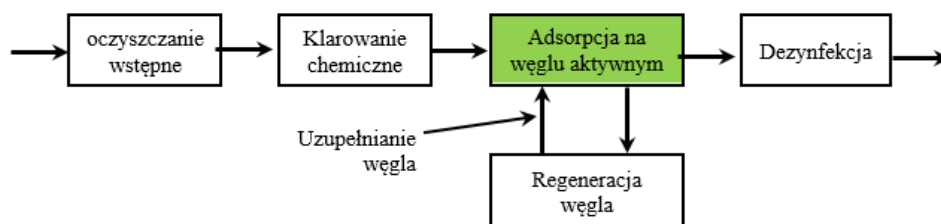
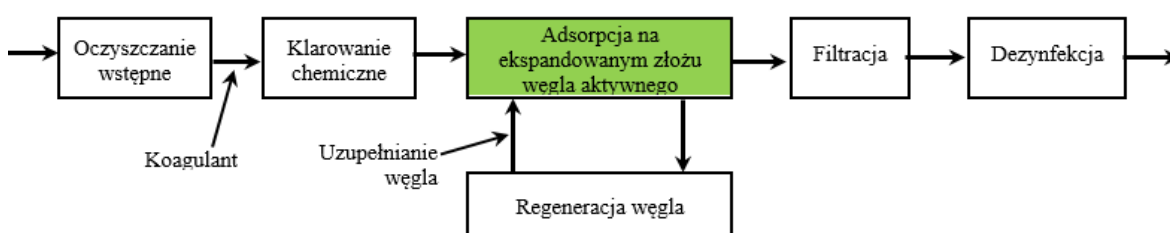
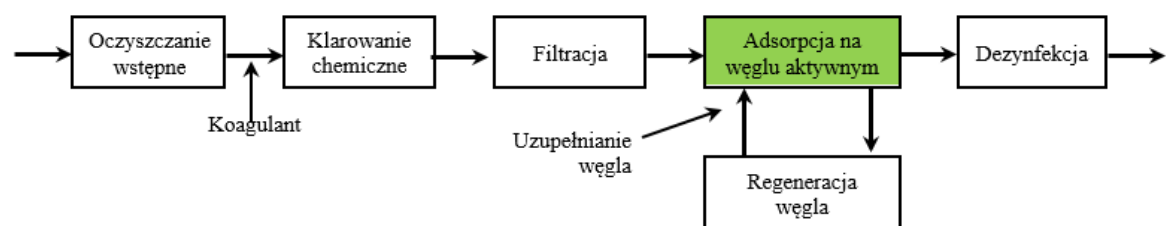
- jako proces wspomagający biologiczne oczyszczanie poprzez dodatek węgla w pylistej postaci do komory zawierającej osad czynny, gdzie adsorpcja zachodzi równocześnie z procesem biochemicznego rozkładu organicznych zanieczyszczeń.



Rys. 2. Punkty stosowania węgla aktywnego w oczyszczalni mechaniczno-biologicznej [8].



Rys. 3. Punkty stosowania węgla aktywnego w oczyszczalni mechaniczno-biologicznej [8].



Rys. 4. Punkty stosowania węgla aktywnego w oczyszczalni fizyko-chemicznej [8].

W omawianych układach można stosować węgle aktywne w postaci pylistej (PWA) albo granulowanej (GWA) [8], które charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą, stabilnością termiczną i chemiczną, dobrze rozwiniętą strukturą porowatą oraz możliwością modyfikacji właściwości powierzchniowych [26]. Adsorpcja PWA prowadzona jest w wydzielonych reaktorach, które często połączone są z osadnikami albo symultanicznie z czynnym osadem [8]. Węgiel ten może być również

stosowany łącznie z procesem koagulacji i strącania [2, 3]. Czas kontaktu węgla aktywnego ze ściekami zawiera się w przedziale 10-30 minut, natomiast wielkości stosowanych dawek sorbentu wynoszą 100-1000 g/m<sup>3</sup>. Na końcu procesu po sedymentacji cząstek węgla w osadnikach niezbędne jest również przeprowadzenie procesu filtracji [8]. W tab. 3 przedstawione zostały zalety i wady pylistych węgli aktywnych.

Tab. 3. Wady i zalety PWA [8, 10, 27].

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> <li>• duża elastyczność układu, która umożliwia szybką zmianę dawki węgla w zależności od do składu ścieków</li> <li>• niskie koszty inwestycyjne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• trudności z całkowitym usunięciem najdrobniejszych cząstek węgla ze ścieków</li> <li>• uciążliwość podczas eksploatacji, ponieważ mogą powodować spadek ciśnienia w wyniku dużych oporów przepływu</li> <li>• zużyty węgiel nie jest poddawany regeneracji</li> </ul>

Ze względu na wymienione wady węgle aktywne w postaci pylistej nie są powszechnie stosowane w technologiach wysokoefektywnego oczyszczania ścieków. Wykorzystuje się je natomiast często w stacjach uzdatniania wody, a szczególnie w okresowej lub interwencyjnej adsorpcji zanieczyszczeń [28]. Węgiel żarnisty nie odznacza się wadami, które są charakterystyczne dla węgla pylistego. GWA są twarde, odporne na ścieranie, mają gęstość adekwatną do oporów złoża, mogą być regenerowane. Są jednak stosunkowo drogie w porównaniu do PWA [10], jednak dzięki możliwości wielokrotnego wykorzystania ostatecznie są adsorbentem o wiele tańszym [8]. Według danych „Reskill Reports” spośród produkowanych węgli aktywnych 70% produkcji stanowią GWA, a pozostałe 30% PWA [29].

Kowal i Świdorska-Bróz [30] określili skuteczność klasycznych metod oczyszczania ścieków zanieczyszczonych jonami rtęci. Według nich przy pomocy adsorpcji na granulowanym węglu aktywnym można usunąć 20-90% jonów rtęci, natomiast przy pomocy adsorpcji na pylistym węglu aktywnym 20-60% [31]. Istnieje wiele metod (grawitacyjne, ciśnieniowe, kombinowane) wykorzystania węgla aktywnego jako sorbentu. Kolumny z węglu aktywnym mogą pracować w różnych systemach technologicznych, które zostały przedstawione w tab. 4. Zanieczyszczony roztwór jest przepuszczany przez kolumnę albo kolumny z sorbentem – węglu aktywnym, który ulega nasyceniu zanieczyszczeniem [31].

Tab. 4. Systemy technologiczne w jakich pracują kolumny z węglu aktywnym [8].

Rodzaj systemu	Charakterystyka
kolumny ciśnieniowe z przepływem ścieków w dół lub do góry	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dają większą elastyczność w eksploatacji</li> <li>• umożliwiają pracę w przypadku większych strat ciśnienia</li> </ul>
kontakторы grawitacyjne z przepływem do góry i w dół	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tańsze w eksploatacji</li> <li>• mogą zostać wykonane z betonu – bardziej ekonomiczne, konieczne dokładniejsze usuwanie zawiesin</li> </ul>
kolumny z przepływem do góry:	duża efektywność wykorzystania węgla
ze złożem zwartym	dla małych obciążeń hydraulicznych
ze złożem ekspandowanym (rozszerzonym)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dla zwiększonych obciążeń</li> <li>• nie zatrzymują zawiesin</li> <li>• po adsorpcji należy stosować filtrację</li> </ul>
ze złożem ruchomym, opierającym się na stopie	dla dużych obciążeń
kolumny połączone w układzie równoległym	jedno- lub wielostopniowe
kolumny połączone w układzie szeregowym	optymalne wykorzystanie węgla w układzie dwóch kolumn połączonych szeregowo

Przy projektowaniu kolumn uwzględnia się takie parametry jak [8]:

- częstotliwość płukania (jeden do kilka dni),
- intensywność płukania – ilość wody płuczącej, która jest na ogół przepuszczana przez kolumnę w ciągu 10-15 minut nie przekracza 5% wielkości produkcji instalacji,
- liczba stopni procesu adsorpcji (od 1 do 3),
- przeciętna średnica ziaren węgla (0,5-2,5 mm),
- wielkość ekspansji złoża (15-30%),
- wielkość obciążenia hydraulicznego – uzależniona od sposobu pracy złoża,
- wysokość złoża adsorbentu w kolumnie (3-10 m).

We wszystkich wymienionych systemach technologicznych stosuje się zwykle regenerację zużytego węgla aktywnego [32] i zwracanie go do obiegu z jednoczesnym uzupełnianiem strat świeżym węglem. Metody regeneracji węgla aktywnego można podzielić na kilka grup: termiczne, chemiczne, ekstrakcyjne i utleniania na

mokro, próżniowe, gazowe, biologiczne, elektrochemiczne i elektryczne, z wykorzystaniem promieni rentgenowskich [11].

### Podsumowanie

Ilość wysokoefektywnych oczyszczalni ścieków (przemysłowych i miejskich), w których jest wykorzystywany proces adsorpcji na węglu aktywnym (głównie GWA) rośnie na świecie z każdym rokiem. Coraz częściej podkreślana jest jego efektywność w usuwaniu zanieczyszczeń ścieków, szczególnie tych występujących w śladowych ilościach, z którymi inne metody sobie nie radzą. Przeszkodą w powszechnym stosowaniu może być jednak koszt wytworzenia węgla aktywnych, dlatego też nieustannie poszukuje się nowych, efektywnych i tanich adsorbentów.

### Literatura

1. Matisowá, E., Škrabáková, S., Carbon sorbents and their utilization for the preconcentration of organic pollutants in environmental Samales, *Journal of Chromatography A*, 1995, 707, pp. 145-179.
2. Pąprowicz, J., 1987. Ocena przydatności granulowanych węgla aktywnych do oczyszczania wody, *Ochrona Środowiska*, 1987, 2-3 (9), s. 109-114.
3. Jankowska, H., Nefie, S., 1987. Adsorpcyjne i jonowymienne właściwości węgla aktywnych o utlenionej powierzchni, *Ochrona Środowiska*, 1987, 2-3 (9), s. 43-48.
4. Lussier, G., Shull, J.C., Miller, D.J., Activatedcarbon from cherry Stones, *Carbon*, 1994, 32, pp. 1493-1498.
5. Gergova, K., Eser, S., Effects of activationmethod on the porestructure of activatedcarbons from apricot Stones, *Carbon*, 1996, 34, pp. 879-888.
6. Jia, F., Steele, C.J., Hayward, I.P., Thomas, K.M., Mechanism of adsorption on gold and silverspecies on activatedcarbons, *Carbon*, 1998, 36, pp. 1299-1308.
7. Ziętek, S., Zin, M., Grochola, W., Wpływ struktury kapilarnej na właściwości otrzymanych z nich sorbentów impregnowanych solami metali, *Przemysł Chemiczny*, 1998, t. 67, s. 277-278.
8. Jankowska, H., Świątkowski, A., Choma, J., Węgiel aktywny, WNT, Warszawa, 1985.
9. Sorbak, Z., Adsorpcja i adsorbenty: teoria i zastosowanie, Wyd. Naukowe Uniwersytetu im. A. Mickiewicza, Poznań, 2000.
10. Bansal, R.C., Goyal, M., Adsorpcja na węglu aktywnym, WNT, Warszawa, 2009.
11. Choma, J., Kloske, M., Otrzymywanie i właściwości impregnowanych węgla aktywnych, *Ochrona środowiska*, 1999, 2 (73), s. 3-6.
12. Bielański, A., Podstawy chemii nieorganicznej, PWN, Warszawa, 2006.
13. Gauden, P.A., Terzyk, A.P., Zarys teorii adsorpcji par i gazów w mikroporach materiałów węglowych, WICHiR, Warszawa, 2002.
14. Choma, J., Jaroniec, M., Ustinow, E.A., Adsorpcyjna charakterystyka węgla aktywnych o bardzo dobrze rozwiniętej porowatości, *Ochrona środowiska*, 2004, 4, s. 3-7.
15. Choma, J., Jaroniec, M., Podstawowe metody adsorpcyjne stosowane do oceny powierzchniowych i strukturalnych właściwości węgla aktywnych. *Ochrona środowiska*, 2005, 3, s. 3-8.
16. Choma, J., Jaroniec, M., Kloske, M., Zawiaślak, A., Mezoporowate materiały węglowe: Synteza z wykorzystaniem matryc krzemionkowych i charakterystyka właściwości sorpcyjnych, *Ochrona środowiska*, 2008, 2, s. 3-15.
17. Kowal, A.L., O adsorpcji, *Ochrona środowiska*, 1987, 2-3, s. 5-7.
18. Buczek, B., Czepirski, L., Adsorbenty węglowe – surowce, otrzymywanie, zastosowanie, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 2001, T. 17, z. 2, s. 29-61.
19. Warych, J., Oczyszczanie gazów. Procesy i aparatura, WNT, Warszawa, 1998.
20. Derbyshire, F., Jagtoyen, M., Andrews, R., Rao, A., Martin-Gullon, I., Grulke, E.A., Carbon materials in environmental applications. *Chemistry and Physics of Carbon*, 2001, vol. 27, pp.1-66, ed. L.R. Radovic, Marcel Dekker, Inc., New York-Basel.
21. Świątkowski, A., Zastosowanie węgla aktywnych w ochronie środowiska – usuwanie zanieczyszczeń z fazy gazowej, *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*, 2002, 9, s. 537-543.

22. Buczek, B., Czepirski, L., Procesy adsorpcyjne w ochronie atmosfery. X Ogólnopolskie Mikrosymposium „Adsorpcja i Kataliza w Ochronie Środowiska”. Wydawnictwo Pracowni Adsorpcji i Katalizy w Ochronie Środowiska. Wydział Chemii UAM. Poznań, 2004, s. 4-14.
23. Jastrząb, K., Szarawara, J., Usuwanie tlenków azotu z gazów spalinowych przy użyciu sorbentów węglowych, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2000, 3, s. 365-375.
24. Yu-Chun Chiang, P.E., Pen-Chi Chiang, P.E., Chang, E.E., Effects of Surface Characteristics of Activated Carbons on VOC Adsorption, *J. Environ. Eng.*, 2001, 127, s. 54-62.
25. Adamski, W., Zagadnienia adsorpcji w technologii wody, *Ochrona Środowiska*, 1985, 2-3, s. 15-18.
26. Choma, J., Jaroniec, M., Otrzymywanie i właściwości modyfikowanych nanoporowatych adsorbentów krzemionkowych, *Ochrona Środowiska*, 2003, 1, s. 3-8.
27. Fang, C.S., Lai, P.M.C. Microwave regeneration of spent powder activated carbon, *Chem. Eng. Comm.*, 1996, 147, pp. 17-27.
28. Granulowany węgiel aktywny w uzdatnianiu wody pitnej, seen technologie. Inżynierowie dla środowiska [http://foto.solniczka.wbaniaku.pl/Granulowany\\_wegiel\\_aktywny\\_w\\_uzdatnianiu\\_wody\\_pitnej.pdf](http://foto.solniczka.wbaniaku.pl/Granulowany_wegiel_aktywny_w_uzdatnianiu_wody_pitnej.pdf) (dostęp 12.02.2016).
29. Roskill Reports, Expanding the World's Knowledge of Metals and Minerals Markets, 2002.
30. Kowal, A.L., Świdzka-Bróż, M., Oczyszczanie wody, PWN, Warszawa-Wrocław, 1996.
31. Malicka, M., Metody usuwania jonów rtęci z zanieczyszczonych roztworów wodnych. Prace Naukowe GIG, *Górnictwo i Środowisko*, 2007, 4, s. 19-30.
32. Venter, T., Surface chemical evaluation of decontamination of exhausted activated carbon by supercritical carbon dioxide, Foundation for Water Research, Report No 923/1/00, 2000.