

## STRESZCZENIE

---

Wzrost emisji rtęci, szczególnie generowanej przez sektor energetyczny, stanowi istotne zagrożenie dla środowiska i zdrowia publicznego, co wymaga opracowania skutecznych metod jej usuwania, w tym również ze ścieków powstających w procesach mokrego odsiarczania gazów spalinowych. Jednocześnie obserwuje się systematyczny wzrost ilości odpadów pochodzących zarówno z energetyki konwencjonalnej (popioły lotne) oraz niekonwencjonalnej (zużyte panele fotowoltaiczne), co stwarza potrzebę poszukiwania innowacyjnych sposobów ich zagospodarowania. Jednym z obiecujących kierunków jest wykorzystanie wspomnianych materiałów jako źródła krzemionki do syntezy zeolitów, które mogą znaleźć zastosowanie w usuwaniu jonów rtęci w procesach adsorpcji. Istnieje jednak wyraźna luka badawcza w zakresie kompleksowej oceny efektywności adsorbentów zeolitowych z uwzględnieniem zarówno warunków statycznych, jak i dynamicznych. Porównanie tych dwóch podejść jest kluczowe, ponieważ badania prowadzone wyłącznie w układach statycznych nie pozwalają na pełne poznanie mechanizmów sorpcji, jakie mogą zachodzić w rzeczywistych warunkach procesowych. Współczesne podejście badawcze coraz częściej uwzględnia także zastosowanie metod numerycznych, takich jak statystyczne metody planowania eksperymentów, które pozwalają nie tylko ograniczyć liczbę niezbędnych prób, ale również identyfikować istotne i często nieintuicyjne zależności pomiędzy zmiennymi procesowymi. Ma to znaczenie nie tylko z punktu widzenia efektywności badań, ale także z perspektywy ich wpływu na środowisko – mniejsza liczba eksperymentów oznacza niższe zużycie reagentów, energii i ograniczenie ilości generowanych odpadów.

Badania rozpoczęto od wytypowania odpowiednich surowców do syntezy materiałów zeolitowych oraz przeprowadzenia ich charakterystyki. Do otrzymania zeolitu typu X wykorzystano popiół lotny pochodzący ze spalania węgla kamiennego, natomiast do syntezy zeolitu typu A zastosowano frakcję termolitycznie przetworzonego panelu fotowoltaicznego, charakteryzującą się wysoką zawartością krzemu.

W dalszym etapie opracowano pełny, dwupoziomowy, zdeterminowany plan statystyczny typu PS/DK2<sup>4</sup> zgodny z metodą *Design of Experiments* (DOE), który stanowił podstawę projektowania eksperymentów syntezy. Na jego bazie przeprowadzono szereg reakcji syntezy hydrotermicznej zeolitów. W celu oceny efektywności syntezy oraz identyfikacji korelacji między zmiennymi dokonano analizy jakościowej otrzymanych dyfraktogramów rentgenowskich, porównując stopień krystaliczności i typy struktur zidentyfikowanych w końcowych produktach.

Zeolity typu X oraz typu A wykazujące najwyższy stopień krystaliczności wytypowano jako adsorbenty jonów rtęci z roztworów wodnych. W pierwszym etapie badania prowadzono w układzie statycznym z wykorzystaniem modelowych roztworów monokationowych. Analizowano wpływ podstawowych parametrów procesowych, takich jak: pH oraz stężenie adsorbentu, czas kontaktu oraz ilość użytego adsorbentu na efektywność procesu sorpcji. Uzyskane dane porównano z klasycznymi modelami izoterm adsorpcji, stosując zarówno modele dwuparametrowe (Langmuira, Freundlicha, Dubinina-Raduszkiewicza), jak i bardziej złożone modele trójpametrowe (Sipsa, Totha, Redlicha-Petersona).

Na podstawie wyników uzyskanych z układu statycznego przeprowadzono eksperymenty sorpcji dynamicznej, wykorzystując zarówno sztuczne roztwory monokationowe, jak i rzeczywiste ścieki pochodzące z instalacji mokrego odsiarczania gazów spalinowych. Uzyskane dane zestawiono z modelami opisującymi przepływ i kinetykę sorpcji w złożach - Wolborskiej, Boharta-Adamsa oraz Yoona-Nelsona, co stanowiło końcowy etap badań.

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że odpady pochodzące z sektora energetycznego mogą stanowić wartościowy surowiec do otrzymywania zeolitów o właściwościach sorpcyjnych efektywnych w procesach oczyszczania ścieków pochodzących z procesu mokrego odsiarczania spalin. Zarówno zeolit typu X, jak i typu A wykazały skuteczność w usuwaniu jonów rtęci z modelowych roztworów wodnych, przy czym była ona zależna od warunków procesowych i charakteru układu sorpcyjnego. Połączenie eksperymentów prowadzonych w układach statycznych i dynamicznych pozwoliło na pełniejszą ocenę właściwości sorpcyjnych materiałów, a zastosowanie zaawansowanych modeli izoterm oraz modeli przepływu umożliwiło ilościowy opis procesów.

Wyniki badań potwierdzają zasadność wykorzystania materiałów odpadowych jako surowców do syntezy funkcjonalnych adsorbentów oraz wskazują na konieczność prowadzenia analiz w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do rzeczywistych. Dodatkowo, zastosowanie metod statystycznych i numerycznych w planowaniu eksperymentów przyczyniło się do zwiększenia efektywności badań i zmniejszenia ich wpływu na środowisko.