

Jolanta Gumińska

## Wpływ recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego na skuteczność oczyszczania wody w procesie koagulacji

Zastosowanie koagulantów wstępnie zhydrolizowanych w miejsce siarczynu glinu jest powszechnie stosowaną praktyką w zakładach oczyszczania wody, zmierzającą do poprawy skuteczności procesu koagulacji. Konieczność uzyskania jak najwyższej jakości wody wynika nie tylko z warunków określonych w aktach prawnych regulujących kwestię jakości wody przeznaczonej do spożycia, ale także z wymogu zapewnienia jej stabilności biologicznej podczas dystrybucji do odbiorców, przy jednoczesnym zmniejszeniu zapotrzebowania wody na środki dezynfekcyjne [1, 2]. Przyjmuje się, że woda jest bezpieczna pod względem bakteriologicznym, jeżeli jej mętność po procesie filtracji nie przekracza 0,1 NTU. W celu uzyskania takiej jakości wody niezbędne jest przede wszystkim zapewnienie wysokiej skuteczności procesów koagulacji i sedymentacji w usuwaniu koloidów oraz cząstek zawieszonych o bardzo małych rozmiarach (rzędu 1 µm), które nie zostaną zatrzymane w procesie filtracji. Obecność tych cząstek jest szczególnie niepożądana wówczas, gdy do dezynfekcji stosuje się promienie nadfioletowe (UV), gdyż powoduje, że skuteczność tego procesu zmniejsza się z uwagi na możliwość „ukrycia” się mikroorganizmów w „cieniu” cząstek zawieszonych.

W klasycznych układach oczyszczania wody zamiana koagulantu zhydrolizowanego na wstępnie zhydrolizowany, przy zachowaniu właściwych parametrów technologicznych i hydraulicznych, jest jedynym rozwiązaniem pozwalającym na poprawę jakości wody doprowadzanej na filtry. Jednakże proces koagulacji z zastosowaniem koagulantów wstępnie zhydrolizowanych musi być prowadzony odpowiednią dawką, gdyż – w przeciwieństwie do powszechnej opinii – również i w tym przypadku istnieje niebezpieczeństwo ich przedawkowania. Oprócz obecności glinu resztkowego w filtracie, pojawiają się wówczas znaczne ilości bardzo drobnych cząstek, które ze względu na swoje wymiary, nie są zatrzymywane w złożach klasycznych filtrów pospiesznych. Ze względu na wymiar cząstek, zmiany jakości filtratu mogą nie być wychwytywane podczas pomiaru mętności filtratu. Jednak prowadzone badania zarówno w układzie pilotowym, jak i w układzie technicznym potwierdzają, że wzrost liczby bardzo małych cząstek w wodzie po osadniku, a w konsekwencji także w filtracie, obserwuje się szczególnie po płukaniu złożów filtracyjnych, podczas ich wpracowania. Dlatego też, oprócz pomiaru mętności, należałoby zakres kontroli jakości wody poszerzyć o pomiar liczby cząstek [3, 4]. Dotychczasowa praktyka,

zmierzająca do poprawy skuteczności oczyszczania wody przez zmianę rodzaju koagulantu, nie zawsze pozwala na uzyskanie odpowiedniej jakości wody, w tym również jej stabilności biologicznej. Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że jest to możliwe np. przez zastosowanie w klasycznych układach koagulacji recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego. Wprowadzenie osadu pokoagulacyjnego do komory flokulacji ma za zadanie zarówno przyspieszenie procesu aglomeracji nowopowstających kłaczków, jak i sorpcję zanieczyszczeń, co w konsekwencji może umożliwić zmniejszenie dawki koagulantu i/lub poprawę jakości wody oczyszczonej.

W ramach prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań pilotowych przeprowadzonych w zmodyfikowanym układzie koagulacji klasycznej. Zastosowana modyfikacja procesu koagulacji polegała na wprowadzeniu zewnętrznej recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego, której celem było uzyskanie większej skuteczności oczyszczania wody.

### Metodyka badań

Proces koagulacji prowadzono w zespolonej dwusekcyjnej komorze z mieszadłami, natomiast proces sedymentacji w komorze z pakietami sedymentacyjnymi. Parametry hydrauliczne układu badawczego były następujące:

- wydajność: 750 dm<sup>3</sup>/h,
- szybkie mieszanie: mieszacz hydrauliczny,
- czas flokulacji: 2×11 min,
- obciążenie hydrauliczne osadnika: 1,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h,
- wydajność układu recyrkulacji osadu: do 0,15 m<sup>3</sup>/h.

Osad pokoagulacyjny z leja osadowego był częściowo zawracany do komory flokulacji, natomiast osad nadmierne był okresowo usuwany z układu. W oparciu o wyniki testów laboratoryjnych ustalono, że osad recyrkulowany nie może być tzw. osadem starym, gdyż z upływem czasu tracił właściwości aglomeracyjne, co w konsekwencji prowadziło do pogorszenia skuteczności oczyszczania wody, w porównaniu z procesem prowadzonym z recyrkulacją tzw. osadu świeżego [5].

Jako kryterium wyboru koagulantu przyjęto właściwości wytrzymałościowe kłaczków osadu pokoagulacyjnego. Podczas recyrkulacji kłaczkowe osady pokoagulacyjne mogą ulegać rozpadowi i w konsekwencji powodować pogorszenie jakości wody oczyszczonej w stosunku do klasycznego układu koagulacji. Wyniki przeprowadzonych testów laboratoryjnych wykazały, że lepsze właściwości wytrzymałościowe miały kłaczkowe osady powstałe w oparciu o koagulanty wstępnie zhydrolizowane [6–8]. Stwierdzono wysoką korelację

między udziałem form spolimeryzowanych glinu a wytrzymałością kłaczków, przy czym wytrzymałość kłaczków zawieszin pokoagulacyjnych na rozpad wzrastała wraz ze wzrostem stopnia spolimeryzowania koagulantu. Najmniejszą wytrzymałością charakteryzowały się kłaczkki wytworzone podczas koagulacji siarczanem glinu. W przypadku testowanych koagulantów wstępnie zhydrolizowanych nie znaleziono korelacji między ich zasadowością a wytrzymałością kłaczków pokoagulacyjnych.

Różnice we właściwościach powstających kłaczków można wyjaśnić na podstawie analizy ich struktury – w przypadku koagulantów wstępnie zhydrolizowanych jest ona bardziej zwarta w porównaniu do siarczanu glinu. Badania wykazały, że struktura ta zawierała również formy polimerowe glinu, w przeciwieństwie do produktów powstających podczas hydrolizy siarczanu glinu, które zawierały wyłącznie monomery glinu. Aby je odróżnić od siebie, amfoteryczne produkty strącone podczas hydrolizy siarczanu glinu oznaczono jako  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{am})$ , natomiast powstałe w przypadku koagulantów wstępnie zhydrolizowanych –  $\text{Al}(\text{OH})_3^*(\text{am})$ . Zarówno obecność polikationów  $\text{Al}_{13}$ , jak i struktura strąconych wodorotlenków glinu powstających podczas hydrolizy koagulantów spolimeryzowanych wpływają na ich większą skuteczność, w porównaniu do koagulantów hydrolizujących [9]. Jednak na właściwości strąconych agregatów ma wpływ nie tylko stopień spolimeryzowania koagulantów, czyli udział poszczególnych frakcji glinu, ale także pH. W przypadku koagulantów o wysokim stopniu polimeryzacji, w których podstawową formą glinu jest  $\text{Al}_{13}$ , dominującą strukturą wodorotlenków jest struktura polimerowa, gdyż tridekamery są formami stabilnymi i w zasadzie nie ulegają transformacjom [10]. Jeśli natomiast znaczący udział mają formy monomerowe, wówczas podstawowe znaczenie ma pH. Badania dowodzą, że formy te nie są stabilne i w zależności od pH mogą w wodzie ulegać przemianom, które w sposób pozytywny lub negatywny mogą wpływać na skuteczność oczyszczania wody i właściwości wytrzymałościowe powstających kłaczków [11].

Mając na uwadze skuteczność procesu koagulacji w usuwaniu substancji organicznych, zarówno tridekamery pierwotnie obecne w koagulancie, jak i te, które powstały w wyniku procesu transformacji monomerów glinu, intensyfikują proces koagulacji ze względu na duży dodatni ładunek tych form, jednak właściwości powstających agregatów są zupełnie odmienne. W przypadku pierwotnie obecnych polikationów  $\text{Al}_{13}$  powstające struktury zawierają formy polimerowe, natomiast gdy te formy są wynikiem zachodzących przemian, co ma miejsce w przypadku koagulantów hydrolizujących, czy koagulantów wstępnie zhydrolizowanych o niskiej polimeryzacji, wówczas powstające agregaty form polimerowych nie zawierają. Wprawdzie struktury powstające w oparciu o produkty transformacji wykazują znacznie większą wytrzymałość niż kłaczkki wodorotlenku glinu zawierającego w swojej strukturze jedynie formy monomerowe ( $\text{Al}_m$ ), jednak nie są tak wytrzymałe jak te, które powstają w oparciu o produkty wstępnej hydrolizy. Przyczyną takich różnic we właściwościach agregatów powstających w oparciu o tridekamery pierwotne i będących wynikiem przemian, jest stabilność powstających struktur. Struktury powstające jako produkty wstępnej hydrolizy są stabilne i wraz z upływem czasu flokulacji ich stabilność rośnie, natomiast kłaczkki powstające w oparciu o wtórnie powstające polimery  $\text{Al}_{13}$  ulegają transformacjom do struktur o mniejszej wytrzymałości.

Podczas usuwania substancji organicznych powstające kompleksy kwasów humusowych i glinu w postaci  $\text{HA-Al}_{13}$  ulegają z czasem transformacji do kompleksów  $\text{HA-Al}_m$ , przy czym wiązania międzycząsteczkowe są znacznie osłabione, co wpływa niekorzystnie na wytrzymałość kłaczków.

Biorąc pod uwagę właściwości kłaczków przyjęto, że badania pilotowe będą prowadzone z zastosowaniem koagulantu o wysokim stopniu spolimeryzowania, w którym dominującą formą glinu są pierwotnie obecne tridekamery  $\text{Al}_{13}$ , aby zapewnić nie tylko dużą skuteczność koagulacji, ale również powstawanie kłaczków o dużej wytrzymałości, co jest pożądaną ich właściwością podczas recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego. Analiza specyjalna glinu w wytypowanym koagulancie, oznaczona w testach ferronometrycznych w oparciu o stałe szybkości reakcji, była następująca [12, 13]:

- monomery: 11,1%,
- formy niskopolimeryzowane (szybko reagujące z ferromem): 41,7%,
- tridekamery  $\text{Al}_{13}$ : 47,2%.

### Jakość ujmowanej wody

Układ badawczy zasilano wodą doprowadzaną do układu technicznego zakładu oczyszczania wody. Badania w układzie pilotowym prowadzono przez 6 miesięcy. Zakres wartości podstawowych wskaźników jakościowych próbek ujmowanej wody był następujący:

- mętność: 2,5÷16,1 NTU (mediana 5,1 NTU),
- barwa pozorna: 22÷108 gPt/m<sup>3</sup> (mediana 44 gPt/m<sup>3</sup>),
- absorbancja w nadfiolecie (próbki niesączone) ( $\text{UV}_{254\text{nm}}^{1\text{m}}$ ): 4,8÷20,5 (mediana 13,8),
- absorbancja w nadfiolecie (próbki sączone) ( $\text{UV}_{254\text{nm}}^{1\text{m}}$ ): 1,2÷12,8 (mediana 8,75),
- liczba cząstek o wymiarze 1 μm w 1 cm<sup>3</sup>: 12281÷34992 (mediana 21269),
- liczba cząstek o wymiarze 10 μm w 1 cm<sup>3</sup>: 105÷1405 (mediana 332).

Jako podstawowy element oceny skuteczności procesu oczyszczania wody przyjęto liczbę cząstek, która jest wiarygodnym wskaźnikiem prawidłowego doboru dawki koagulantu. Wyniki wcześniej przeprowadzonych badań zarówno laboratoryjnych, jak i w układzie technicznym pokazały, że zastosowanie niewłaściwej dawki koagulantu spolimeryzowanego może przejawiać się nie tylko nadmierną ilością glinu pozostałego w wodzie, ale także gwałtownym wzrostem liczby cząstek o bardzo małych wymiarach [3].

Pomiar liczby cząstek wykonano przy wykorzystaniu analizatora ARTI WPC21 (Hach), natomiast mętność wody zmierzono za pomocą mętnościomierza Turbimax W CUS41 (Hach). Oznaczenia absorbancji w nadfiolecie wykonano z zastosowaniem sondy UVAS plus sc (Hach).

### Interpretacja wyników

Uwarunkowania technologiczne związane z rozbudową klasycznego układu koagulacji o węzeł recyrkulacji osadu wynikają z mechanizmów przebiegu procesu koagulacji. Z uwagi na jakość ujmowanej wody, w celu uzyskania możliwie największego stopnia usunięcia zanieczyszczeń, konieczne było prowadzenie tzw. koagulacji wymiatającej w warunkach przesylenia układu produktami hydrolizy

koagulantu. Jest to bardzo skuteczny sposób koagulacji, wpisujący się w konwencję tzw. koagulacji pogłębionej, który przy zastosowaniu koagulantów wstępnie zhydrolizowanych pozwala na prowadzenie tego procesu bez konieczności zmiany pH oraz mniejszymi dawkami reagenta. Mankamentem tego sposobu realizacji koagulacji jest pojawianie się w odpływie z komory sedymentacji bardzo drobnych cząstek zawieszin pokoagulacyjnych. Typowym rozwiązaniem tego problemu w warunkach technicznych jest zastosowanie odpowiednio dobranego flokulantu w postaci wysokocząsteczkowych polimerów organicznych, przy czym nie zawsze jest to rozwiązanie optymalne. Bardzo często dawkowanie flokulantów nie daje założonego efektu technologicznego, a nawet pogarsza skuteczność filtracji pospiesznej. Dodatkowym mankamentem jest niebezpieczeństwo tworzenia kancerogennych ubocznych produktów dezynfekcji w czasie reakcji form monomerycznych flokulantu ze środkami dezynfekcyjnymi zawierającymi chlor.

Alternatywą dla flokulantów organicznych może być recyrkulacja osadu pokoagulacyjnego. Rozwiązanie to jest znane od dawna i powszechnie stosowane w układach oczyszczania wody obejmujących proces dekarbonizacji wapnem. Wprowadzenie do komory reakcji cząstek węgla wapna, jako zarodników krystalizacji, znacząco przyspiesza procesy strąceniowe, co pozwala na skrócenie czasu przetrzymania wody w reaktorze oraz polepsza skuteczność separacji zawieszin. W przypadku koagulacji mechanizm agregacji zawieszin pokoagulacyjnych z osadem recyrkulowanym jest inny, gdyż decydujący wpływ na skuteczność tego procesu ma nie tylko ilość recyrkulowanego osadu, ale także jego właściwości – wiek oraz wytrzymałość i zdolności sorpcyjne. W przypadku stosowania koagulantów hydrolizujących, konfiguracja parametrów technologicznych procesu koagulacji z recyrkulacją osadu jest stosunkowo prosta. Wynika to z faktu, że w przypadku takich koagulantów, jak np. siarczan glinu, maksimum ilości zawieszin w układzie koagulacji pokrywa się z punktem izoelektrycznym. Chcąc przeprowadzić w takim układzie proces koagulacji z recyrkulacją osadu wystarczy określić właściwą dawkę koagulantu i sterować wartością pH w celu kontroli przejścia strefowego pomiędzy poszczególnymi strefami określającymi mechanizm koagulacji. Przy określonej konfiguracji dawki i pH wystarczy dobrać stopień recyrkulacji, dający najlepszą skuteczność technologiczną procesu.

W sytuacji, gdy koagulacja prowadzona jest koagulantami wstępnie zhydrolizowanymi, przebieg procesu jest odmienny. Z uwagi na znacznie większą gęstość ładunku powierzchniowego koagulantu, dawki wymagane do osiągnięcia punktu izoelektrycznego są znacznie mniejsze, skutkiem czego ilość powstających zawieszin pokoagulacyjnych również jest mniejsza. Dodatkowo stosowanie tych reagentów, w przeciwieństwie do koagulantów hydrolizujących, nie zmniejsza pH wody, co też ma wpływ na mechanizm koagulacji. W konsekwencji charakterystyka cząstek zawieszin pokoagulacyjnych znacząco różni się od tych, które powstają podczas stosowania np. siarczanu glinu. Dotyczy to głównie rozkładu wielkości kłaczków, co bardzo istotnie przekłada się na skuteczność ich separacji – cząstki zawieszin są znacznie mniejsze, więc ich usunięcie wymaga stosowania flokulantów organicznych.

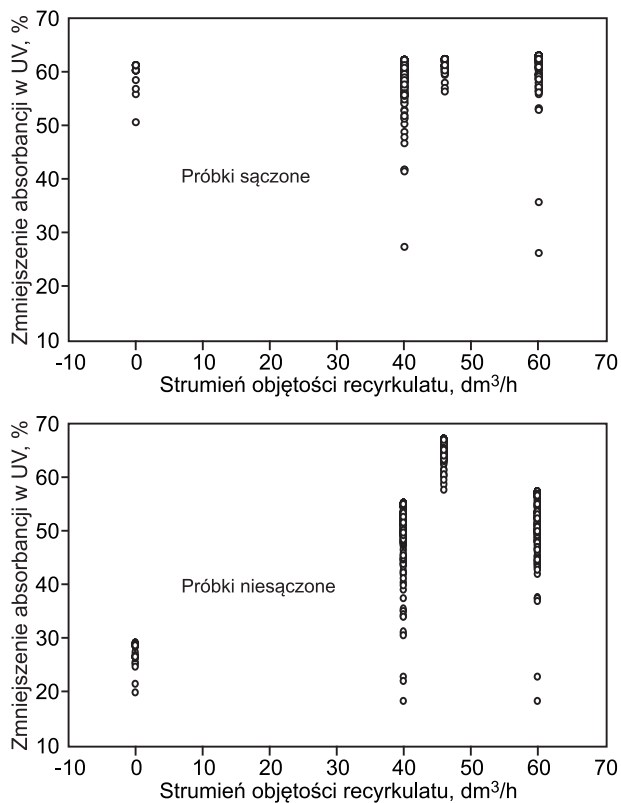
W większości przypadków dobór dawki koagulantu poddyktowany jest nie tyle skutecznością usuwania zawieszin, ile przede wszystkim usuwaniem związków organicznych.

W rezultacie tego zmienia się mechanizm koagulacji i proces ten prowadzi się w oparciu o koagulację wymiatającą. Skutkiem takiego sposobu prowadzenia koagulacji jest pojawienie się znaczącej ilości drobnych cząstek z zaadsorbowanymi zanieczyszczeniami organicznymi, ale z nieutralizowanym ładunkiem powierzchniowym. Problem obecności tych cząstek rozwiązywany jest w praktyce przez stosowanie średnio i słabo anionowych flokulantów organicznych. Niemniej jednak, jak pokazują badania, rozwiązanie to nie jest pozbawione wad. Oprócz kwestii niebezpieczeństwa powstania ubocznych produktów dezynfekcji, stosowanie tych reagentów może powodować wiele problemów technologicznych, m.in. konieczność dostosowania dawki flokulantu do jakości wody po szybkim mieszaniu, a w przypadku niewłaściwie dobranej dawki – przedostawanie się polielektrolitu na złoża filtrów pospiesznych powodując ich trwałą kolmatację.

Rozwiązaniem problemu konieczności stosowania flokulantów organicznych może być wprowadzenie do układu koagulacji recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego. Mechanizm aglomeracji zawieszin opiera się na częściowej neutralizacji potencjału elektrokinetycznego zanieczyszczeń wody ładunkiem powierzchniowym recyrkulowanych zawieszin pokoagulacyjnych. Zwiększenie skuteczności technologicznej układu koagulacji po wprowadzeniu procesu recyrkulacji uzależnione jest w głównej mierze od mechanizmu samej koagulacji oraz właściwości osadu recyrkulowanego, opisywanego jako tzw. wiek osadu (na podobieństwo układu biologicznego oczyszczania ścieków). Wyniki wcześniejszych badań wskazują, że w przypadku koagulacji opartej na mechanizmie neutralizacji ładunku oraz agregacji zawieszin, wprowadzenie recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego pozwala na znaczące zmniejszenie dawki koagulantu [5]. Na podstawie analizy wyników badań pilotowych stwierdzono natomiast, że w przypadku koagulacji wymiatającej wpływ recyrkulacji osadu na pracę układu koagulacji był inny, co wynikało z innych kryteriów stosowanych w obu przypadkach. Podstawowym kryterium stosowanym w przypadku koagulacji wymiatającej było usuwanie związków organicznych, a zwłaszcza tych, które mogą być prekursorami ubocznych produktów dezynfekcji. W przypadku wody zasilającej układ badawczy, zarówno OWO, jak i potencjał tworzenia trójhalemetanów (PTTHM) bardzo silnie korelowały z wartościami absorbancji w nadfiolecie ( $\lambda=254\text{nm}$ ). Na rysunku 1 przedstawiono zmiany tego wskaźnika (próbki sączone i niesączone) w zależności od strumienia objętości recyrkulowanego osadu pokoagulacyjnego. Analiza danych przedstawionych na tym rysunku pozwoliła wnioskować, że stopień recyrkulacji nie miał statystycznie istotnego wpływu na uzyskaną skuteczność usuwania związków organicznych (próbki sączone). Niezależnie od tego, czy recyrkulacja była stosowana czy nie, stopień zmniejszenia wartości absorbancji w nadfiolecie w przypadku próbek sączonych wynosił średnio  $55\div 60\%$ . Oznaczało to, że dawki koagulantu zostały dobrane poprawnie z uwagi na usuwanie związków organicznych mierzonych wartością tego wskaźnika, a różnice w skuteczności pracy układu koagulacji były spowodowane innymi czynnikami, głównie problemami z odprowadzeniem osadu nadmiernego.

Analiza danych uzyskanych w przypadku próbek niesączonych wykazała silną zależność między strumieniem objętości osadu recyrkulowanego a skutecznością zmniejszenia absorbancji w nadfiolecie. Różnica między wartościami absorbancji w przypadku próbek sączonych i niesączonych

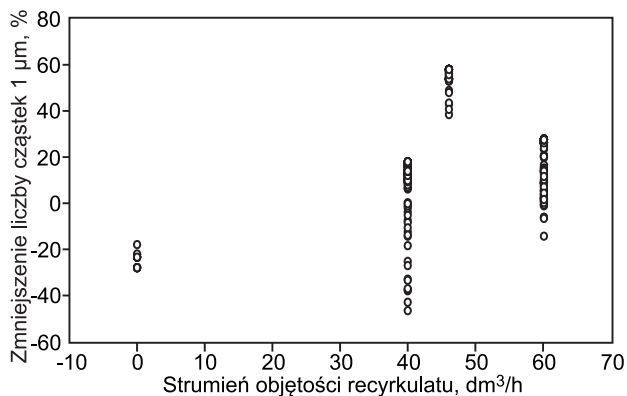




Rys. 1. Skuteczność zmniejszania wartości absorbancji w nadfiolecie (254 nm) w zależności od strumienia objętości osadu recykulowanego

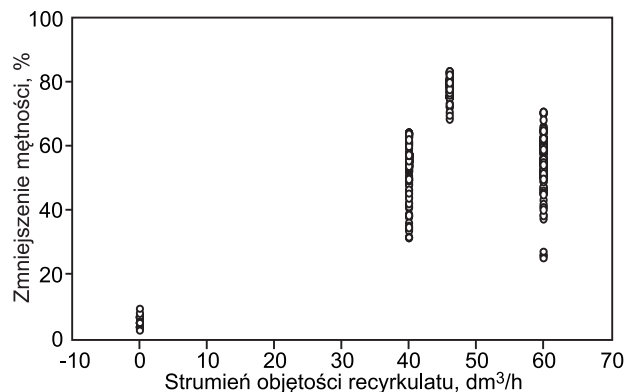
Fig. 1. Efficiency of reduction in UV absorbance (254 nm) related to the flow rate of recirculated post-coagulation sludge

wynikała z obecności w wodzie opuszczającej osadnik drobnych cząstek zawiesin. Ilustrują to rysunki 2 i 3, które przedstawiają skuteczność usuwania cząstek o wymiarach  $1\ \mu\text{m}$  oraz zmniejszania mętności w zależności od wartości strumienia objętości recykulatu. Uzyskane wyniki wykazały, że w przypadku badanej wody istniała taka wartość tego parametru ( $46\ \text{dm}^3/\text{h}$ ), przy której uzyskano wymaganą skuteczność oczyszczania wody, a jej zwiększenie spowodowało pogorszenie jakości wody sklarowanej. Zależności przedstawione na rysunkach 1–3, mówiące o wpływie obecności niezaglomerowanych drobnych cząstek zawiesin na wartość absorbancji w nadfiolecie ( $\lambda=254\ \text{nm}$ ), znajdują potwierdzenie w obliczeniach statystycznych (test nieparametryczny ANOVA Kruskala-Walisa).



Rys. 2. Skuteczność usuwania cząstek o wymiarach  $1\ \mu\text{m}$  w zależności od strumienia objętości osadu recykulowanego

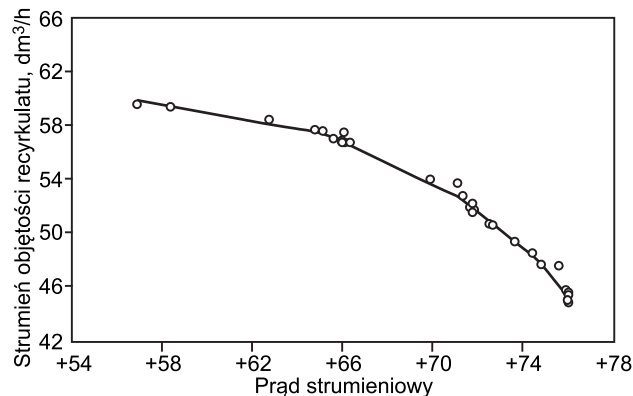
Fig. 2. Efficiency of  $\sim 1\ \mu\text{m}$  particle removal related to the flow rate of recirculated post-coagulation sludge



Rys. 3. Skuteczność zmniejszania mętności wody w zależności od strumienia objętości osadu recykulowanego

Fig. 3. Efficiency of reduction in water turbidity related to the flow rate of recirculated post-coagulation sludge

Uzyskane wyniki potwierdziły wcześniejsze obserwacje o konieczności określenia właściwego stopnia recyrkulacji w celu uzyskania jak najmniejszej liczby niezaglomerowanych cząstek, przy maksymalizacji skuteczności usuwania związków organicznych. Przeprowadzone analizy nie wykazały istotnych zależności między stopniem recyrkulacji a wartościami wskaźników jakości wody. Oznacza to, że w badanym zakresie zmienności parametrów oczyszczanej wody nie było możliwości uzależnienia wymaganego stopnia recyrkulacji od jakości wody poddawanej oczyszczaniu. W układach dekarbonizacji wody z recyrkulacją zewnętrzną stopień recyrkulacji uzależniony jest głównie od zawartości zawiesin w strefie reakcji, która to wartość zależy od kinetyki strącania węgla wapnia. Z uwagi na inny mechanizm powstawania cząstek zawiesin węgla wapnia oraz kłaczków zawiesin pokoagulacyjnych, nie można bezpośrednio przenieść rozwiązań stosowanych w reaktorach dekarbonizacyjnych do układów koagulacji. Założenia teoretyczne procesu koagulacji pokazują, że ilość zawiesin zawracanych do komory flokulacji powinna być uzależniona od wartości potencjału elektrokinetycznego cząstek w wodzie przed komorą flokulacji. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki przewidywania stopnia recyrkulacji w funkcji zmiany wartości prądu strumieniowego. Stwierdzono, że w przypadku mechanizmu koagulacji opartej na neutralizacji ładunku (wartości w zakresie od  $+50$  do  $+70$ ) można określić zależność pomiędzy wartością potencjału elektrokinetycznego a stopniem recyrkulacji osadu, natomiast równoczesna analiza wpływu stopnia recyrkulacji na



Rys. 4. Zależność strumienia objętości osadu recykulowanego od wartości prądu strumieniowego

Fig. 4. Flow rate of recirculated post-coagulation sludge related to the stream current value

usuwanie cząstek o wymiarach 1  $\mu\text{m}$  i mętności (rys. 2 i 3) oraz wyników przewidywania stopnia recyrkulacji (rys. 4) pozwala wnioskować, że w przypadku, kiedy proces jest prowadzony wg mechanizmu koagulacji wymiatającej (wartość prądu strumieniowego przekracza +70) konieczne jest wprowadzenie dodatkowego elementu pozwalającego na oszacowanie wymaganego stopnia recyrkulacji osadu. Parametrem tym może być liczba cząstek zawieszonych odpływających z osadnika. Jednak określenie zależności między tymi parametrami jest niemożliwe. Zatem sterowanie stopniem recyrkulacji zależnie od liczby cząstek w odpływie powinno być realizowane w funkcji sprzężenia zwrotnego, w celu utrzymania możliwie małej ich zawartości.

## Wnioski

♦ Wprowadzenie recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego w układzie klasycznej koagulacji, realizowanej w oparciu o mechanizm koagulacji wymiatającej, poprawiło skuteczność procesu sedymentacji, zwłaszcza w zakresie usuwania drobnych cząstek.

♦ Stopień recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego nie miał statystycznie istotnego wpływu na skuteczność usuwania rozpuszczonych związków organicznych. Niezależnie od tego, czy proces oczyszczania prowadzono z zastosowaniem recyrkulacji czy bez, zmniejszenie absorbancji w nadfiolecie ( $\lambda=254\text{ nm}$ ) w przypadku próbek sączonych kształtowało się w zakresie 55÷60%.

♦ Określenie właściwego stopnia recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego pozwoliło na uzyskanie minimalnej liczby niezaglomerowanych cząstek zawieszonych w wodzie odpływającej z osadnika, przy maksymalizacji stopnia usunięcia związków organicznych z wody.

♦ W badanym zakresie zmienności jakości oczyszczanej wody nie stwierdzono zależności między wymaganym stopniem recyrkulacji osadu pokoagulacyjnego a jej podstawowymi wskaźnikami jakościowymi.

♦ W przypadku, gdy proces oczyszczania wody prowadzi się zgodnie z mechanizmem koagulacji wymiatającej, sterowanie stopniem recyrkulacji powinno być uzależnione od liczby cząstek w wodzie odpływającej z osadnika i realizowane na zasadzie sprzężenia zwrotnego minimalizującego ich liczbę.

## LITERATURA

1. M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ: Czynniki współdecydujące o potencjale powstawania i rozwoju biofilmu w systemach dystrybucji wody. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 3, ss. 1–7.
2. B. KOŁWZAN: Analiza zjawiska biofilmu – warunki jego powstawania i funkcjonowania. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 4, ss. 3–14.
3. J. GUMIŃSKA, M. KŁOS: Analiza konsekwencji przedawkowania koagulantu wstępnie zhydroлизованego. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 3, ss. 15–18.
4. J. GUMIŃSKA: Zastosowanie pomiaru liczby cząstek do analizy mechanizmu i skuteczności procesu koagulacji zanieczyszczeń wody. *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 2, ss. 21–26.
5. J. GUMIŃSKA, M. KŁOS: Role of recycled sludge age in coagulation of colored water. *Archives of Environment Protection* 2009, Vol. 35, No. 1, pp. 33–43.
6. J. GUMIŃSKA, M. KŁOS: Właściwości wytrzymałościowe kłaczków w uzdatnianiu wód. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 1, ss. 24–28.
7. J. GUMIŃSKA, M. KŁOS: Wpływ rodzaju koagulantu na właściwości zawiesiny pokoagulacyjnej. *Instal* 2010, nr 6, ss. 46–48.
8. J. GUMIŃSKA, M. KŁOS: Analysis of post-coagulation properties of flocs in terms of coagulant choice. *Environment Protection Engineering* 2012, Vol. 38, No. 1, pp. 103–144.
9. D. PERNITSKY, J. EDZWALD: Practical Paper. Selection of alum and polyaluminum coagulants: Principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 2006, Vol. 55, pp. 121–141.
10. D. WANG, W. SUN, Y. XU, H. TANG, J. GREGORY: Speciation stability of inorganic polymer flocculant – PACI. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2004, Vol. 243, No. 1–3, pp. 1–10.
11. W. XU, B. GAO, Q. YUE, Q. WANG: Effect of preformed and non-preformed  $\text{Al}_{13}$  species on evolution of floc size, strength and fractal nature of humic acid flocs in coagulation process. *Separation and Purification Technology* 2011, Vol. 78, pp. 83–90.
12. C. YE, D. WANG, X. WU, J. QU: k-Value-based ferron assay and its application. *Journal of Colloid and Interface Science* 2009, Vol. 335, No. 1, pp. 44–49.
13. W. ZHOU, B. GAO, Q. YUE, L. LIU, Y. WANG: Al-Ferron kinetics and quantitative calculations of Al(III) species in polyaluminum chloride coagulants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2006, Vol. 278, No. 1–3, pp. 235–240.

**Guminska, J. Effect of Post-coagulation Sludge Recirculation on the Efficiency of Water Treatment Involving Coagulation. *Ochrona Środowiska* 2012, Vol. 34, No. 3, pp. 19–23.**

**Abstract:** Pilot tests have produced the following findings. The inclusion of recirculation of post-coagulation sludge into the conventional coagulation system improved the efficiency of the sedimentation process, especially with respect to suspended fine particle ( $\sim 1\ \mu\text{m}$ ) removal. Determination of the desired extent of recirculation made it possible to significantly reduce the number of non-agglomerated suspended particles in the effluent from the settling tank and, at the same time, maximize the efficiency of organic matter removal from the water being treated. No effect was observed of the extent of recirculation on the efficiency of

dissolved organic matter removal from the water. Regardless of whether the treatment process was conducted with or without recirculation, the reduction in UV absorbance (254 nm) in the case of filtered samples averaged between 55% and 60%. When the water treatment process follows the mechanism of sweep coagulation, the extent of recirculation will require control based not only on the number of particles in the effluent from the settling tank, but also on the feedback principle minimizing their number. To reliably assess the efficiency of the coagulation process, it is necessary to measure the number of particles in the water after sedimentation – in addition to water turbidity control.

**Keywords:** Water treatment, sweep coagulation, post-coagulation sludge, recirculation, pre-hydrolyzed coagulant, stream current analyzer.