

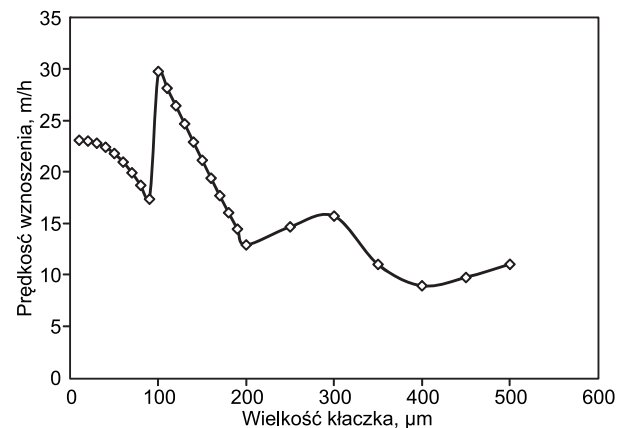
Marcin Kłos

## Założenia technologiczne systemu sterowania procesami koagulacji i flotacji ciśnieniowej w układzie oczyszczania wody

Flotacja ciśnieniowa jest zazwyczaj rozważana jako proces separacji zawieszin pokoagulacyjnych w przypadku, gdy gęstość powstających agregatów jest mniejsza lub niewiele odbiega od gęstości wody. Proces ten osiąga szczególnie wysoką skuteczność wówczas, gdy oczyszczaniu poddawana jest woda zawierająca duże ilości fitoplanktonu lub substancji humusowych, przy jednocześnie małej zawartości zawieszin mineralnych. W oparciu o wyniki badań prowadzonych w układach technicznych oraz na stacjach pilotowych określono zakres stosowania flotacji, jako metody separacji zawieszin pokoagulacyjnych, stwierdzając, że proces ten jest najlepszym rozwiązaniem w przypadku wody o małej mętności (do 10 NTU), bez względu na rodzaj zawieszin. Jednocześnie zaleca się go do oczyszczania wody o mętności do 100 NTU przy założeniu, że usuwane zawiesziny są pochodzenia organicznego. Jakkolwiek zalecenia te są jedynie orientacyjne, to jednak przez wielu projektantów traktowane są bardzo arbitralnie, co często skutkuje odrzucaniem tego procesu już na etapie rozwiązań koncepcyjnych, z uwagi np. na okresowo pojawiającą się mętność ujmowanej wody powyżej 100 NTU [1].

Bez względu na jakość wody, o skuteczności procesu flotacji decyduje w głównej mierze przebieg koagulacji i flokulacji. Celem flokulacji jest wytworzenie agregatów pokoagulacyjnych (kłaczków) o takich właściwościach, aby uzyskać jak najlepszą skuteczność ich separacji, przy jednocześnie dużym stopniu usuwania zanieczyszczeń organicznych poprzez neutralizację i agregację związków koloidalnych oraz adsorpcję zanieczyszczeń rozpuszczonych. W przypadku stosowania flotacji ciśnieniowej, jako metody usuwania kłaczków, o skuteczności ich separacji decyduje wartość współczynnika zderzeń między pęcherzykiem powietrza a kłaczkami, który określa procentową liczbę zderzeń, które zakończyły się sukcesem, czyli stworzeniem trwałego agregatu flotacyjnego. Modele matematyczne opisujące proces flotacji ciśnieniowej w oczyszczaniu wody zakładają, że wartość tego współczynnika jest uzależniona od dwóch podstawowych parametrów – wielkości kłaczków oraz liczby pęcherzyków powietrza obecnych w strefie kontaktu i formujących warstwę zawieszoną w strefie separacji komory flotacji. Na rysunku 1 przedstawiono prędkość wznoszenia aglomeratu flotacyjnego obliczoną na podstawie jednego z powszechnie stosowanych modeli

(model oparty na teorii flokulacji w warunkach burzliwych) przy założeniu, że do kłaczków przyłączyła się jedynie połowa z maksymalnej liczby pęcherzyków, a wielkość pojedynczego pęcherzyka wynosi 100  $\mu\text{m}$ . Pokazuje on, podobnie jak inne modele, że aglomeraty flotacyjne charakteryzują się największą prędkością wznoszenia wówczas, gdy wielkość kłaczków nie przekracza 200  $\mu\text{m}$ . Przy takiej wielkości kłaczków również sprawność działania strefy separacji w komorze flotacji jest największa [1].



Rys. 1. Zależność prędkości wznoszenia aglomeratu flotacyjnego od wielkości kłaczków

Fig. 1. Dependence of bubble-floc agglomerate rise velocity on floc size

Drugim czynnikiem decydującym o skuteczności procesu flotacji jest ilość powietrza dostarczonego do komory flotacji wraz z wodą recyrkulowaną. Możliwe są trzy podstawowe metody pomiaru ilości wprowadzanego powietrza:

- pomiar masy powietrza rozpuszczonego w wodzie,
- pomiar objętości pęcherzyków powietrza,
- pomiar liczby pęcherzyków powietrza.

W praktyce sterowanie ilością powietrza, przy założonych parametrach eksploatacyjnych procesu saturacji, odbywa się przez kontrolę stopnia recyrkulacji, który jest definiowany jako stosunek strumienia objętości saturowanej wody recyrkulowanej do strumienia objętości oczyszczanej wody [1].

Uwzględniając wpływ poszczególnych czynników na skuteczność separacji zawieszin metodą flotacji ciśnieniowej można stwierdzić, że w porównaniu do koagulacji i sedymentacji rozwiązania stosowane w sterowaniu koagulacją

w połączeniu z flotacją są znacznie bardziej skomplikowane i wymagają zastosowania bardziej rozbudowanych algorytmów uwzględniających specyfikę tej metody usuwania zawieszin. Układy sterowania procesem oczyszczania wody metodą koagulacji skupiają się w głównej mierze na dwóch podstawowych elementach – doborze w czasie rzeczywistym tzw. optymalnej dawki koagulantu, pozwalającej na zwiększenie potencjału elektrokinetycznego koagulowanej wody w okolicy punktu izoelektrycznego oraz sterowaniu procesem flokulacji w celu uzyskania kłaczków o jak najlepszych właściwościach separacyjnych. W przypadku, gdy do usuwania kłaczków stosowane są osadniki oznacza to, że proces prowadzony jest w celu otrzymania kłaczków o dużych rozmiarach i wysokiej gęstości. Przy prawidłowo prowadzonej flokulacji i zastosowaniu odpowiedniej dawki reagentów sedimentacja jest praktycznie wyłączona z zakresu sterowania procesem koagulacji. Jedynie w przypadku stosowania recyrkulacji osadu w algorytmach sterowania należy zdefiniować warunki jej włączenia oraz zależności pomiędzy jakością oczyszczanej wody a stopniem recyrkulacji. Zastosowanie flotacji ciśnieniowej wymaga rozbudowy systemu sterowania procesem o dodatkowe parametry sterujące samą flotacją oraz pozwalające na uzyskanie kłaczków o wymaganych właściwościach zapewniających jak najlepsze warunki łączenia się z pęcherzykami powietrza i stworzenia trwałych aglomeratów flotacyjnych [2].

W artykule przedstawiono czynniki warunkujące prawidłowe działanie układu sterowania procesami koagulacji i flotacji ciśnieniowej podczas oczyszczania wody charakteryzującej się dużą zmiennością jakości. Oparto je na rezultatach badań koagulacji i flokulacji w skali laboratoryjnej oraz na wynikach badań pilotowych prowadzonych na stacjach oczyszczania ujmujących wodę o zbliżonej jakości. Na podstawie analizy uzyskanych wyników sformułowano założenia aplikacyjne działającego w czasie rzeczywistym systemu sterowania układem koagulacji i flotacji ciśnieniowej, pozwalającego na uzyskanie i utrzymanie wysokiej skuteczności oczyszczania bez względu na zmienną jakość ujmowanej wody.

## Metody badań

Badania przeprowadzono w dwóch etapach. Pierwszy obejmował badania laboratoryjne mające na celu określenie wpływu podstawowych parametrów technologicznych, takich jak rodzaj i dawka koagulantu, czas flokulacji oraz intensywność mieszania, na wielkość kłaczków pokoagulacyjnych. Drugi etap badań stanowiły natomiast testy technologiczne z wykorzystaniem stacji modelowej procesu koagulacji i flotacji ciśnieniowej oraz badania przeprowadzone w ramach rozruchu technologicznego dwóch układów technicznych.

W ramach pierwszego etapu badań do testów wytypowano dwa koagulanty – siarczan glinu ALS (Kemipol), jako koagulant hydrolizujący, oraz handlowy chlorowodrotlenek glinu PACl (Dempol Eco), jako tzw. reagent wstępnie zhydrolizowany. Był to koagulant o wysokiej zasadowości równej 85% oraz wysokiej zawartości form glinu  $Al_{13}$ . Testy ferronometryczne wykazały, że zawartość form glinu  $Al_{13}$  wynosiła około 80%.

Badania laboratoryjne wykonano z użyciem wody modelowej na bazie zdechlorowanej wody wodociągowej. W celu uzyskania zakładanego stężenia związków organicznych oraz mętności do wody dodawano wyciąg torfowy oraz kaolin. Zakres wartości podstawowych

wskaźników jakościowych w próbkach wody surowej odzwierciedlać miał zanieczyszczenie typowe w przypadku wód o zwiększonej intensywności barwy oraz niewielkiej mętności i przedstawiał się następująco:

- mętność:  $1,0 \div 10$  NTU,
- ogólna liczba cząstek (o wymiarach  $0,5 \div 666 \mu\text{m}$ ) w  $1 \text{ cm}^3$ :  $1200 \div 8000$ ,
- ogólny węgiel organiczny:  $3,7 \div 11,2 \text{ gC/m}^3$ ,
- rozpuszczony węgiel organiczny:  $3,6 \div 9,8 \text{ gC/m}^3$ ,
- absorbancja w nadfiolecie próbek niesączonych ( $UV_{254\text{nm}}^{1\text{cm}}$ ):  $0,23 \div 0,47$ ,
- absorbancja w nadfiolecie próbek sączonych ( $UV_{254\text{nm}}^{1\text{cm}}$ ):  $0,18 \div 0,33$ ,
- pH:  $7,3 \div 7,5$ .

Badania laboratoryjne obejmowały testy naczyniowe wykonane z wykorzystaniem 6-stanowiskowego flokulatora Flocculator SW 1 firmy Stuart Scientific. W trakcie badań testowano wpływ zmian czasu flokulacji oraz gradientu mieszania na wielkość kłaczków przy optymalnej dawce koagulantu wyznaczonej w toku standardowych testów naczyniowych. W toku testów laboratoryjnych proces szybkiego mieszania prowadzono przez 1 min przy gradiencie mieszania równym  $380 \text{ s}^{-1}$ . Proces wolnego mieszania prowadzono w czasie  $3 \div 20$  min przy gradiencie mieszania zmienianym w zakresie  $15 \div 45 \text{ s}^{-1}$ . W badanej wodzie w trakcie flokulacji oraz po zakończonej flokulacji i 60-minutowej sedimentacji prowadzono oznaczenia liczby cząstek w zakresie  $0,5 \div 666 \mu\text{m}$  za pomocą analizatora IPS LCW firmy Kamika Instruments.

Badania w skali technicznej prowadzone były w trzech układach badawczych o takiej samej konstrukcji. Każdy układ składał się ze zblokowanego systemu trzech komór – jednostopniowej komory szybkiego mieszania, dwustopniowej komory flokulacji wyposażonej w mieszadła z płynną regulacją obrotów oraz komory flotacji. Układy te różniły się wydajnościami. Pierwszy układ bazujący na stacji pilotowej eksploatowany był przy wydajności  $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , a drugi i trzeci stanowiły techniczne linie technologiczne o wydajności odpowiednio  $250 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $1300 \text{ m}^3/\text{h}$ .

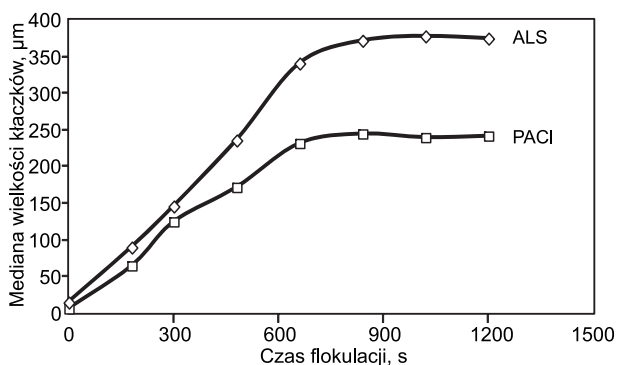
Pierwszy układ pracował w oparciu o wodę ujmowaną z ujęcia powierzchniowego (Jeziro Pątnowskie), która w czasie prowadzenia testów charakteryzowała się stosunkowo małą mętnością ( $5 \div 15$  NTU), znaczną zawartością związków organicznych (OWO w zakresie  $9 \div 11 \text{ gC/m}^3$ ), temperaturą od  $12^\circ\text{C}$  do  $17^\circ\text{C}$  i pH w przedziale  $8,3 \div 8,7$ . Drugi układ był zasilany wodą powierzchniową ujmowaną z Sanu przez system zbiorników retencyjnych. Woda charakteryzowała się bardzo zmienną jakością, wynikającą z intensywnych opadów atmosferycznych w obszarze zlewni. W czasie badań zanotowano mętność wody w zakresie  $12 \div 155$  NTU, przy zawartości związków organicznych mierzonych jako OWO w ilości  $6,2 \div 10,1 \text{ gC/m}^3$ . Temperatura wody podczas badań wynosiła od  $14^\circ\text{C}$  do  $18^\circ\text{C}$ , a jej pH zmieniało się od 7,9 do 8,6. Trzeci układ badawczy oczyszczał wodę powierzchniową ujmowaną z Zalewu Zegrzyńskiego. W czasie testów woda charakteryzowała się małą mętnością ( $4 \div 10$  NTU) i bardzo dużą zawartością zanieczyszczeń organicznych (OWO w zakresie  $14,4 \div 18,9 \text{ gC/m}^3$ ). Podobnie jak w poprzednich przypadkach, badania przeprowadzono latem, więc temperatura wody była stosunkowo wysoka i wynosiła od  $14^\circ\text{C}$  do  $18^\circ\text{C}$ . Wartość pH, podobnie jak w przypadku poprzednich układów badawczych, znacząco przekraczała 8, co potwierdzało, że zanieczyszczenie wody wynikało z rozwoju fitoplanktonu.

Podczas testów prowadzonych we wszystkich trzech układach badawczych wykorzystano jako koagulanty te same reagenty, które stosowano na etapie badań laboratoryjnych, czyli siarczan glinu oraz handlowy chlorowodorotlenek glinu. W każdym przypadku proces był optymalizowany pod kątem uzyskania jak największego usunięcia związków organicznych (OWO), przy możliwie małej mętności oraz liczbie cząstek w wodzie po flotacji ciśnieniowej. Dawki koagulantu określono na podstawie testów naczyniowych przy parametrach odzwierciedlających warunki hydrauliczne (czas i intensywność mieszania) w układzie technicznym.

### Wyniki testów laboratoryjnych

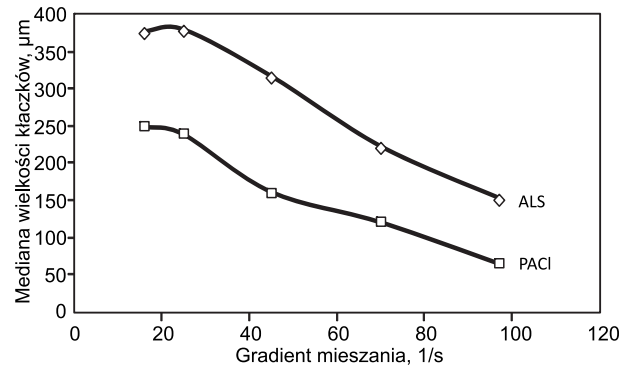
Celem prowadzonych testów laboratoryjnych było określenie możliwości sterowania procesem flokulacji pod kątem uzyskania kłaczków o takich parametrach, które zapewniają jak największą skuteczność ich usunięcia na drodze flotacji ciśnieniowej. Opierając się na wynikach modelowania skupiono się na określeniu zależności pomiędzy intensywnością i czasem trwania wolnego mieszania a wielkością powstających kłaczków w zależności o typu koagulantu.

Wyniki prowadzonych testów pokazały, że wszystkie trzy badane czynniki tj. rodzaj koagulantu oraz czas i intensywność flokulacji bardzo silnie wpływają na wielkość powstających kłaczków. Analiza wyników potwierdziła, że siarczan glinu, jako koagulant hydrolizujący pozwala na powstawanie kłaczków o większych rozmiarach niż reagent zawierający wstępnie zhydrolizowane formy glinu. Spowodowane jest to odmiennym mechanizmem strącania i flokulacji produktów hydrolizy różnych form glinu, determinowanym przez wielkość i rozkład ładunku powierzchniowego. Na rysunku 2 przedstawiono przykładową zależność wielkości kłaczków powstających podczas flokulacji z zastosowaniem obu testowanych koagulantów w przypadku wody o mętności 2,5 NTU i liczbie cząstek ( $0,5 \div 666 \mu\text{m}$ ) w  $1 \text{ cm}^3$  wody równej 4600 oraz gradiencie wolnego mieszania równym  $25 \text{ s}^{-1}$ . Z wykresu widać, że agregaty pokoagulatoryjne powstające w wyniku stosowania siarczanu glinu były o około 15÷35% większe. Największą różnicę można zauważyć po przekroczeniu 10. minuty flokulacji. Kłaczków powstałe na bazie siarczanu glinu osiągnęły rozmiar ok.  $370 \mu\text{m}$ , a kłaczków podczas stosowania PACI nie przekroczyły  $250 \mu\text{m}$ . Kinetyka wzrostu agregatów w przypadku obu koagulantów jest podobna. Wzrost wielkości kłaczków obserwowany był do mniej więcej 10. minuty. Po przekroczeniu tego czasu wielkość kłaczków miała stałą wartość.



Rys. 2. Zależność wielkości kłaczków od czasu flokulacji  
Fig. 2. Floc size dependence on flocculation time

Wpływ intensywności mieszania był równie znaczący. Rysunek 3 przedstawia zależność między wielkością kłaczków powstających po 17-minutowej flokulacji w funkcji gradientu mieszania. Widać z niego, że wzrost gradientu mieszania powoduje znaczące zmniejszenie średniej wielkości kłaczków.



Rys. 3. Zależność wielkości kłaczków od gradientu mieszania  
Fig. 3. Floc size dependence on mixing gradient

Analiza uzyskanych danych w zestawieniu z wynikami uzyskanymi z modelowania procesu flotacji ciśnieniowej pokazała, że o warunkach przebiegu flotacji ciśnieniowej decyduje w głównej mierze rodzaj koagulantu. Wyniki przeprowadzonych badań oraz dane literaturowe pokazują, że kłaczków powstające podczas stosowania reagentów zawierających spolimeryzowane formy glinu są mniejsze i powinny tworzyć z pęcherzykami powietrza trwalsze i lepiej flotujące aglomeraty [2, 3].

Uzyskane dane wykazały, że – teoretycznie – w przypadku koagulantu wstępnie zhydrolizowanego (PACI) nie ma potrzeby stosowania układów sterowania gradientem mieszania w komorach flokulacji przy założeniu, że zespolona komora flokulacji i flotacji jest eksploatowana w projektowanym zakresie od 70% do 100% swojej wydajności nominalnej. W przypadku stosowania koagulantu hydrolizującego konieczne jest natomiast zapewnienie możliwości płynnej regulacji obrotów mieszaczy wolnych w celu utrzymania wymaganych warunków flokulacji, zmieniających się np. na skutek zwiększenia wymaganej chwilowej wydajności układu oczyszczania wody.

### Wyniki badań w układach technicznych

Wyniki uzyskane podczas testów technologicznych w układach technicznych pozwoliły stwierdzić, że bez względu na wielkość urządzeń w trzech badanych układach zaobserwowano podobne współzależności pomiędzy parametrami prowadzenia procesu oczyszczania wody a jego skutecznością.

### Rodzaj koagulantu

Wyniki badań przeprowadzonych w układach przepływowych potwierdziły, że kłaczków powstające podczas stosowania koagulantu wstępnie zhydrolizowanego pozwalają na stworzenie agregatów flotacyjnych o lepszych zdolnościach separacyjnych. Było to szczególnie widoczne w przypadku wód o małej mętności oraz niewielkim stopniu recyrkulacji, gdy proces formowania układu kłaczków-pęcherzyk zachodził wg modelu zbliżonego do formowania się agregatów podczas flokulacji. W wszystkich trzech układach badawczych mętność wody po procesie flotacji

była mniejsza w przypadku stosowania PACl niż w przypadku stosowania ALS. Należy jednak zauważyć, że znacznie mniejszej mętności nie towarzyszył znaczący spadek ogólnej liczby cząstek. Spowodowane to było problemem z utrzymaniem optymalnej dawki koagulantu wstępnie zhydrolizowanego. Z uwagi na to, że badane układy techniczne nie były wyposażone w systemy sterowania dawką koagulantu, np. w postaci analizatora prądu strumieniowego, dawki koagulantu zmieniane były indywidualnie na podstawie wyników testów naczyniowych. W przypadku szybkiej zmiany jakości wody zaobserwowano w niektórych próbkach podwyższoną liczbę cząstek o rozmiarach  $1\div 15\ \mu\text{m}$ , spowodowaną prawdopodobnie obecnością niezaglomerowanych produktów hydrolizy koagulantu powstających podczas prowadzenia koagulacji wymiatającej. Obserwowane różnice w skuteczności koagulantów rosły wraz ze zwiększaniem mętności ujmowanej wody, co powodowało konieczność zwiększania stopnia recyrkulacji.

### Intensywność mieszania

W czasie badań potwierdzono, że wartość gradientu mieszania ma bardzo duży wpływ na uzyskiwaną skuteczność oczyszczania wody. W przypadku, gdy woda charakteryzowała się małą mętnością i znaczną zawartością związków organicznych, zwiększenie prędkości obrotowej mieszadeł powodowało pogorszenie jakości wody po komorze flotacji. Najlepszą skuteczność uzyskano przy obrotach minimalnych, odpowiadających intensywności mieszania przy wartości gradientu mieszania około  $20\ \text{s}^{-1}$ . Jedną z prawdopodobnych przyczyn tej prawidłowości była jakość oczyszczanej wody. W przypadku małej zawartości zawiesin w ujmowanej wodzie i dużej zawartości zanieczyszczeń organicznych struktura powstających kłaczków wymagała niewielkiej energii mieszania. Pomimo że wyniki badań laboratoryjnych oraz dane literaturowe sugerują, że zwiększenie intensywności mieszania powoduje zmniejszenie wielkości powstających kłaczków, co powinno pozytywnie wpływać na sprawność flotacji, to jednak wyniki analiz próbek wody z komór wolnego mieszania pokazały, że zwiększanie prędkości obrotowej nie powodowało znacznych zmian wielkości agregatów zawiesin pokoagulacyjnych. Wydaje się zatem, że podstawą doboru prędkości obrotowej mieszadeł powinna być nie tylko wielkość kłaczków, ale i trwałość powstających agregatów. Z uwagi na dużą ilość związków humusowych w wodzie, o trwałości kłaczków pokoagulacyjnych decyduje nie sama struktura cząstek wytrąconego koagulantu, ale właściwości kompleksów kwasów humusowych i glinu (KW-Al). Właściwości tych kompleksów uzależnione są od dwóch podstawowych czynników – formy glinu oraz warunków hydraulicznych w komorze flokulacji. W przypadku stosowania siarczanu glinu, który zawiera głównie monomeryczne formy glinu, powstające kompleksy KW-Al są stosunkowo trwałe, ale z uwagi na niezobojętniony ładunek elektryczny mają tendencję do ciągłego wzrostu, a następnie – po przekroczeniu określonych rozmiarów – do samoistnego rozpadu. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki może to oznaczać, że graniczna wielkość kłaczków, przy której następuje ich samoistny rozpad jest znacznie mniejsza niż zmniejszenie ich wymiarów wynikające z warunków hydraulicznych panujących w komorze flokulacji.

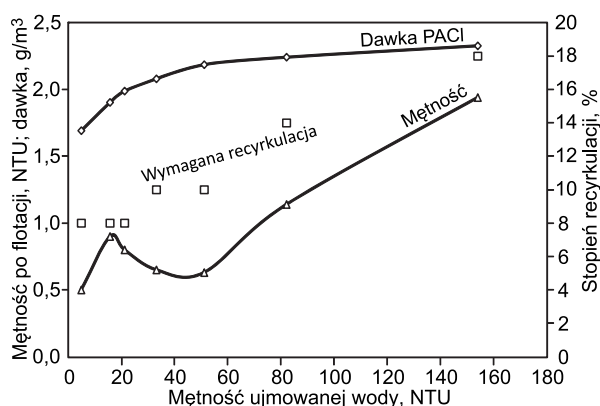
Kompleksy związków humusowych powstające z udziałem koagulantów wstępnie zhydrolizowanych, zawierających tzw. glin  $\text{Al}_{13}$ , miały mniejszą trwałość w większym zakresie wielkości agregatów, ale z uwagi na

znacznie mniejszy wymiar ich wytrzymałość była porównywalna. W tym przypadku przede wszystkim miało miejsce znacznie mniej intensywne zjawisko wzrostu i rozpadu agregatów pokoagulacyjnych. Oznaczało to, że stosowanie koagulantów wstępnie zhydrolizowanych zapewniło bardziej stabilne warunki tworzenia aglomeratów flotacyjnych, podczas gdy koagulanty hydrolizujące, z uwagi na ciągłe zjawisko aglomeracji i rozpadu kłaczków, mogą utrudniać tworzenie trwałych aglomeratów flotacyjnych. Bez względu jednak na formę glinu, lepszą skuteczność procesu uzyskano przy mniejszej energii mieszania w komorach flokulacji. Dzięki temu można zapewnić niezmienną warunki przygotowania wody przed procesem flotacji. Jest to szczególnie ważne z uwagi na turbulentne warunki panujące w strefie kontaktu komory flotacji oraz właściwości hydrofobowe kłaczków, umożliwiające przyłączanie się do nich pęcherzyków powietrza [2, 4–7].

W przypadku, gdy mętność oczyszczanej wody przekraczała 70 NTU jakość wody opuszczającej komorę flotacji pogarszała się. Zwiększenie prędkości obrotowej mieszadeł, skutkujące zwiększeniem gradientu mieszania z wartości około  $20\ \text{s}^{-1}$  do około  $35\ \text{s}^{-1}$ , pozwoliło na zahamowanie pogarszania się mętności wody sklarowanej. Pomiarzy wykonane z użyciem licznika cząstek wykazały, że w przypadku ujmowanej wody o mętności około 100 NTU wielkość powstających kłaczków była o ponad 40% mniejsza niż w przypadku wody z tego samego źródła, ale o niższej mętności (25 NTU). Konieczność wzrostu gradientu mieszania w przypadku wzrostu mętności oczyszczanej wody wynikała prawdopodobnie z większego udziału mechanizmu sedymentacji w czasie formowania kłaczków w komorach flokulacji.

### Stopień recyrkulacji

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że największy wpływ na wartość wymaganego stopnia recyrkulacji miały ilość i rodzaj zawiesin w wodzie zasilającej komorę flotacji. Do zachowania poprawnego przebiegu flotacji wymagany jest określony (minimalny) stosunek ilości pęcherzyków powietrza powstających w strefie kontaktu komory flotacji do ilości wprowadzanych do niej kłaczków pokoagulacyjnych. W przypadku wody o niewielkiej mętności, kiedy powstające zawiesiny o bardzo małej gęstości pochodzą głównie z hydrolizy koagulantu, stosunek ten był w miarę stały. Chwilowe zmiany zawartości związków organicznych w oczyszczanej wodzie, wymagające zwiększenia lub zmniejszenia dawki koagulantu, nie powodowały konieczności zmiany stopnia recyrkulacji. Dopiero gwałtowne zwiększenie mętności ujmowanej wody, spowodowane obecnością zawiesin mineralnych i skutkujący zmianą gęstości powstających kłaczków, wymuszał konieczność zwiększenia stopnia recyrkulacji. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pracy drugiego układu technicznego uzyskane w trakcie prób prowadzonych przy nagłym pogorszeniu jakości ujmowanej wody. Z danych przedstawionych na wykresach widać, że zmiana mętności wody w zakresie do około 35 NTU wymagała jedynie korekty dawki koagulantu. Po przekroczeniu wartości 40 NTU, pomimo zapewnienia odpowiedniej dawki reagenta, zaobserwowano pogorszenie jakości wody na odpływie z komory flotacji. Powodowało to konieczność zwiększenia stopnia recyrkulacji z 8% do 10%. Dalsze zwiększenie mętności oczyszczanej wody wymagało kolejnych zmian wartości dawki koagulantu i stopnia recyrkulacji. Analizując zmiany wartości obu parametrów widać, że zwiększenie dawki przy



Rys. 4. Wpływ mętności ujmowanej wody na parametry procesu oczyszczania i mętność wody sklarowanej  
Fig. 4. Effect of intake water turbidity on treatment process parameters and clarified water turbidity

zmianie mętności z 40 NTU do 150 NTU wynosiło tylko ok. 10%, w porównaniu z ponad 20% wzrostem przy zmianie mętności z 5 NTU do 40 NTU. Trend wzrostu stopnia recyrkulacji był natomiast odmienny. Początkowe zwiększenie mętności nie wymagało zmiany stopnia recyrkulacji, dopiero po przekroczeniu wartości 30 NTU wymagany stopień recyrkulacji wzrósł z 8% do 10%. Po przekroczeniu mętności około 40 NTU zależność między mętnością ujmowanej wody a stopniem recyrkulacji stała się liniowa. Przebieg zależności między mętnością a dawką koagulantu i stopniem recyrkulacji wynikał ze zmiany mechanizmów koagulacji i flotacji zachodzących podczas wzrostu ilości zawieszin mineralnych w ujmowanej wodzie oraz gęstości powstających agregatów. W zakresie niewielkich wartości mętności wody dominującym mechanizmem była koagulacja wymiatająca, natomiast przy dużej zawartości zawieszin mineralnych w wodzie większe znaczenie odgrywała neutralizacja ładunku powierzchniowego usuwanych zanieczyszczeń.

## Wnioski

♦ Na skuteczność separacji zawieszin pokoagulacyjnych w procesie flotacji ciśnieniowej największy wpływ miał rodzaj koagulantu oraz jakość ujmowanej wody. Przed przystąpieniem do projektowania systemu sterowania koagulacją i flotacją należy wykonać badania pilotowe w celu wyboru rodzaju koagulantu, jego dawki i zakresu pH w przypadku obu mechanizmów koagulacji, tj. koagulacji wymiatającej i na drodze neutralizacji ładunku.

♦ Stosowanie koagulantów hydrolizujących wymaga płynnej regulacji prędkości obrotowej mieszadeł w komorach flokulacji. Pozwala to na utrzymanie odpowiedniej wielkości kłaczków, od czego zależy skuteczność powstawania aglomeratów flotacyjnych oraz ich wytrzymałość na naprężenia mechaniczne. Wyniki badań wykazały, że w praktyce możliwe jest zastosowanie regulacji obrotów w komorach flokulacji w czasie rzeczywistym, w zależności od wartości określonego wskaźnika jakości wody. Najlepszym wskaźnikiem w tym celu wydaje się być mętność lub liczba cząstek w wodzie opuszczającej komorę flotacji.

♦ Wartość wymaganego stopnia recyrkulacji może być określana w czasie rzeczywistym w oparciu o jakość wody sklarowanej. Jednak jest to rozwiązanie bardzo trudne w realizacji z uwagi na to, że na sprawność działania procesów koagulacji i flotacji ciśnieniowej wpływa zbyt wiele czynników. Szczególną uwagę należy zwrócić na rozgraniczenie wpływu nieodpowiedniej dawki koagulantu oraz niewłaściwego stopnia recyrkulacji. Opierając się na wynikach przeprowadzonych badań wydaje się, że lepszym rozwiązaniem jest wykorzystanie informacji o ilości i rodzaju zawieszin obecnych w ujmowanej wodzie, uzyskanych na drodze pomiaru absorbancji w nadfiolecie i mętności.

## LITERATURA

1. J. EDZWALD: Dissolved air flotation and me. *Water Research* 2010, Vol. 44, pp. 2077–2106.
2. M. KŁOS, J. GUMIŃSKA, E. LATAWIEC: Wpływ parametrów technologicznych na przebieg koagulacji i flotacji ciśnieniowej. *Instal* 2010, nr 10, ss. 57–61.
3. Y. WANG, B.-Y. GAO, X.-M. XU, W.-Y. XU, G.-Y. XU: Characterization of floc size, strength and structure in various aluminum coagulants treatment. *Journal of Colloid and Interface Science* 2009, Vol. 332, No. 2, pp. 354–359.
4. D. BACHE, E. RASOOL: Characteristics of alumino-humic flocs in relation to DAF performance. *Water Science and Technology* 2001, Vol. 43, pp. 203–208.
5. C. OVENDEN, H. XIAO: Flocculation behaviour and mechanisms of cationic inorganic microparticle/polymer systems. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2002, Vol. 197, pp. 225–234.
6. B. SHI, Q. WEI, D. WANG, Z. ZHU, H. TANG: Coagulation of humic acid: The performance of preformed and non-preformed Al species. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2007, Vol. 296, pp. 141–148.
7. M.Q. YAN, D.S. WANG, J.H. QU, W.J. HE, C.W.K. CHOW: Relative importance of hydrolyzed Al(III) species during coagulation with polyaluminum chloride: A case study with the typical micro-polluted source waters. *Journal of Colloid and Interface Science* 2007, Vol. 316, pp. 482–489.

**Kłos, M. Technological Assumptions of Coagulation and Dissolved Air Flotation Control System in Water Treatment Process. *Ochrona Srodowiska* 2013, Vol. 35, No. 3, pp. 39–43.**

**Abstract:** Based on technical and laboratory scale study results, design recommendations for coagulation and dissolved air flotation control system in water treatment train with high quality variability were presented. Hydrolyzing coagulants, when applied, were demonstrated to require fluent rotational stirrer speed regulation in flocculators. This allows maintenance of adequate floc size which determines bubble-floc agglomerate formation efficacy and their resistance to mechanical tension in the contact zone of flotation tank. In practice, real time rotation regulation in flocculators

might be applied, depending on water turbidity or particle number in water fraction leaving flotation tank. Required recirculation factor might be estimated in real time, based on the clarified water quality. However, this solution is very difficult to implement due to many factors that affect efficiency of coagulation and dissolved air flotation processes. It was demonstrated that special attention should be paid to differentiation between the effect of inadequate coagulant dose and the improper recirculation factor. Use of information on the amount and type of suspensions in the intake water, obtained based on UV-absorbance and turbidity measurements, appears to be a better approach.

**Keywords:** Water treatment, turbidity, UV-absorbance, variable water quality, process control.