

Marcin Kłos

Zastosowanie licznika cząstek do kontroli i sterowania pracą filtrów pospiesznych w układzie oczyszczania wody powierzchniowej

Filtry pospieszne są podstawowym elementem układu oczyszczania wody powierzchniowej, odpowiedzialnym za usuwanie zawieszin pokoagulacyjnych. W typowych rozwiązaniach układu kontroli i sterowania procesem oczyszczania wody, skuteczność pracy filtrów prowadzona jest w oparciu o pomiar mętności filtratu. Mętność jest wskaźnikiem, który pozwala na szybką ocenę stopnia zanieczyszczenia wody w oparciu o pomiar rozproszenia światła przez próbkę. Znaczenie tego wskaźnika w ocenie jakości wody jest bardzo duże. Zalecenia Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) wskazują na pomiar mętności, jako wskaźnik służący do bieżącej kontroli skuteczności procesu filtracji. Mętność wody po filtrach nie może przekraczać wartości 1 NTU (incydentalnie może osiągać 5 NTU). Jednak taka mętność filtratu nie gwarantuje usunięcia z wody przetrwalnikowych form bakterii i pierwotniaków. Dlatego też w celu zwiększenia bezpieczeństwa bakteriologicznego wody zaleca się, aby utrzymywać mętność filtratu mniejszą niż 0,1 NTU. Jednak zastosowanie jedynie pomiaru mętności do kontroli skuteczności pracy stacji filtrów nie zawsze jest wystarczające. Z uwagi na znaczną selektywność metody nefelometrycznej, spowodowaną wpływem wielkości cząstek na stopień rozproszenia fali świetlnej w zależności od kąta jej odbicia, pomiar mętności nie pozwala na pełną ocenę jakości filtratu podczas oczyszczania wody poddawanej koagulacji.

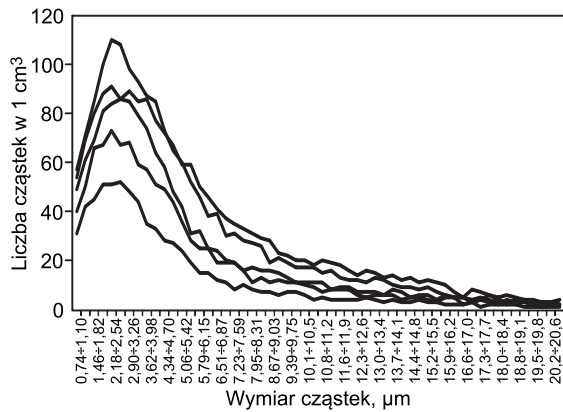
W pracy przedstawiono możliwości zastosowania licznika cząstek do sterowania pracą filtrów pospiesznych, jako uzupełnienia standardowych pomiarów nefelometrycznych. Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie, czy wprowadzenie licznika cząstek do analizy filtratu w czasie rzeczywistym jest zasadne i w jaki sposób pozwoli na zwiększenie skuteczności kontroli i bezpieczeństwa pracy filtrów pospiesznych. Zastosowanie w układzie oczyszczania wody koagulantów wstępnie zhydrolizowanych, cechujących się wysoką zawartością polimerowych form glinu, spowodowało zmianę właściwości fizycznych zawieszin pokoagulacyjnych. Powstające podczas koagulacji tymi reagentami kłaczkami charakteryzują się odmiennym rozkładem wielkości cząstek agregatów pokoagulacyjnych o znacznie mniejszych rozmiarach niż w przypadku stosowania koagulantów hydrolizujących oraz mniejszą wytrzymałością mechaniczną. Właściwości zawieszin pokoagulacyjnych mają bezpośredni wpływ na przebieg oraz skuteczność procesu filtracji pospiesznej [1–7].

Metody badań

Badania przeprowadzono na technicznych obiektach stacji oczyszczania wody powierzchniowej. Układ technologiczny badanej stacji obejmował proces koagulacji prowadzony z wykorzystaniem mechanicznych komór szybkiego mieszania, poprzedzających osadniki pionowe z zespolonymi hydraulicznymi komorami flokulacji. Z osadników woda przepływała grawitacyjnie na filtry pospieszne otwarte, z których filtrat kierowany był do zbiorników wody czystej poprzez układ lamp UV. Oprócz promieni nadfioletowych, do dezynfekcji wody wykorzystywano także związki chloru, których zadaniem było zabezpieczenie wody pod względem bakteriologicznym na czas transportu siecią wodociągową.

Filtry pospieszne były wypełnione dwuwarstwowym złożem antracytowo-piaskowym o następującej charakterystyce: warstwa piasku filtracyjnego o wysokości 0,6 m i uziarnieniu $0,5 \div 0,8$ mm ($d_{10} = 0,6$ mm) oraz warstwa antracytu o tej samej wysokości i uziarnieniu $0,8 \div 1,6$ mm ($d_{10} = 0,9$ mm, $d_{60}/d_{10} < 1,4$). W czasie badań proces koagulacji prowadzony był z wykorzystaniem koagulantu wstępnie zhydrolizowanego o zasadowości około 85%. Przeprowadzone badania ferrometryczne wykazały, że cechował się on znaczną zawartością form glinu w postaci Al_{13} , która wynosiła około 40%, a zawartość glinu w formie monomerów wynosiła poniżej 5%. Dawka koagulantu dobierana była automatycznie w oparciu o pomiar mętności ujmowanej wody oraz sprawdzana okresowo na drodze testów naczyniowych.

Układ pomiarowy składał się z dwóch liczników cząstek typu ARTI firmy HACH. Jedno z urządzeń zainstalowano na dopływie wody zasilającej filtry pospieszne, a drugie na rurociągu filtratu. Każdy z liczników dokonywał pomiaru liczby cząstek w dwóch wielkościach z częstotliwością 30 pomiarów na minutę. Pomiar prowadzono przez dwa miesiące, na wszystkich filtrach, w seriach pomiarowych zgodnych z czasem trwania cykli filtracyjnych. Zakres pomiarowy liczników został określony na drodze analizy rozkładu wielkości cząstek w próbkach filtratu z testowanych filtrów pospiesznych. Pomiar wykonano przy pomocy laboratoryjnego licznika cząstek typu IPC firmy Kamika. Na rysunku 1 przedstawiono rozkład wielkości cząstek w filtracie po poszczególnych filtrach. Z przedstawionego wykresu widać, że funkcja rozkładu wielkości cząstek w filtracie, w przypadku wszystkich badanych filtrów, osiągała maksimum przy wymiarze cząstek około $2 \mu m$. Uzyskane wyniki były zgodne z prowadzonymi wcześniej badaniami nad separacją zawieszin pokoagulacyjnych powstających



Rys. 1. Rozkład wielkości cząstek w odplywie z pięciu badanych filtrów pospiesznych

Fig. 1. Particle size distribution in filtrate from five rapid filters tested

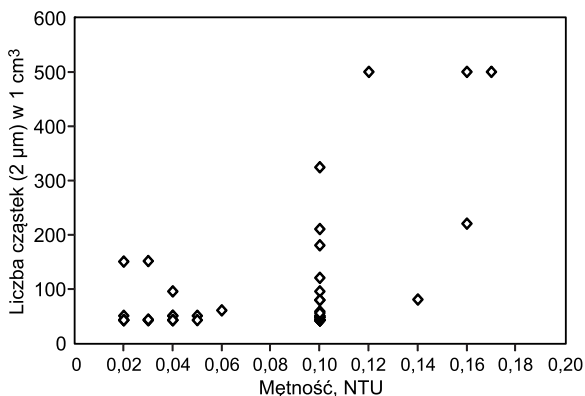
podczas stosowania koagulantów wstępnie zhydrolizowanych. Uwzględniając powyższe wyniki, zakres pomiarowy liczników cząstek zainstalowanych w układzie technicznym został ustawiony na wartości 2 μm i 10 μm .

Ponieważ filtry pospieszne będące przedmiotem badań nie były wyposażone w mętnościomierze pracujące w układzie ciągłym, dlatego też w celu kontroli mętności prowadzono co dwie godziny pobór próbek wody napływającej na filtry oraz filtratu, które analizowano za pomocą mętnościomierza typu 2100AN firmy HACH. Dodatkowo raz w ciągu doby przeprowadzane były analizy mikrobiologiczne wody na obecność bakterii grupy coli.

Wyniki badań

Zależność pomiędzy mętnością wody a liczbą cząstek zawieszonych

Wyniki przeprowadzonych badań pokazały, że zastosowanie jedynie mętnościomierzy do kontroli skuteczności filtracji pospiesznej w układzie oczyszczania wody, pracującym w oparciu o proces koagulacji, może okazać się niewystarczające. Na rysunku 2 przedstawiono zależność między mętnością wody a liczbą cząstek o wymiarze 2 μm , określoną przy stałej dawce koagulantu w czasie dwóch cykli filtracyjnych. Z jej przebiegu widać, że nie można określić istotnych zależności pomiędzy tymi dwoma wskaźnikami. Było to szczególnie widoczne w zakresie małych mętności wody ($<0,2\text{NTU}$), gdzie rozrzut pomiędzy wartościami tych wskaźników był największy.



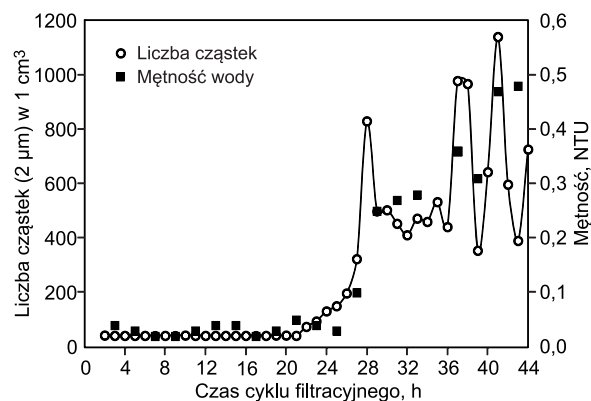
Rys. 2. Zależność pomiędzy liczbą cząstek o wymiarze 2 μm a mętnością filtratu

Fig. 2. Correlation between 2 μm particle number and filtrate turbidity

Brak korelacji wyników pomiarów obu metod wynika z silnej zależności rozkładu intensywności rozproszenia światła w zależności od kierunku odbicia fali. Zgodnie z teorią rozpraszania światła na cząstkach sferycznych (Mie), wraz ze wzrostem stosunku wielkości cząstki do długości fali rośnie asymetria między rozpraszaniem fali w różnych kierunkach. Im większa jest cząstka w stosunku do długości fali, tym więcej światła rozprasza się w osi padania światła. Biorąc pod uwagę, że w nefelometrii pomiar światła rozproszonego wykonywany jest pod kątem 90° w stosunku do jego źródła, to pomiar mętności jest bardzo selektywny i pozwala na lepszą identyfikację małych cząstek, tj. o wymiarach poniżej 0,5 μm . W przypadku wód naturalnych, gdzie rozkład wielkości cząstek jest zazwyczaj potęgowy, pomiar mętności jest wystarczający do oceny jakości wody. W wodach poddanych koagulacji, zwłaszcza z użyciem koagulantów wstępnie zhydrolizowanych, w oparciu o mechanizm koagulacji wymiatającej, rozkład wielkości cząstek jest inny. Znacząco zmniejsza się liczba małych cząstek, a pojawia się duża liczba cząstek o wymiarach od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów, które usuwane są w procesach separacji zawieszin pokoagulacyjnych, takich jak sedimentacja lub flotacja. Jednak badania wielkości kłaczków pokazują, że oprócz zmian w rozkładzie wymiarów cząstek zawieszin pokoagulacyjnych bardzo często pojawiają się lokalne maksima w zakresie cząstek o wymiarach od około 2 μm do 10 μm . Ich pojawianie się związane jest z obecnością produktów hydrolizy koagulantu, który stosowany jest w dawce większej niż wynika to z potencjału elektrokinetycznego cząstek. Dokładny wymiar powstających kłaczków jest uzależniony od wielu czynników, z których najważniejszy jest stopień polimeryzacji form glinu. W prezentowanych badaniach (rys. 1) wymiar tych agregatów oscylował w okolicach 2 μm .

Kontrola jakości filtratu

Na rysunku 3 przedstawiono jakość filtratu jednego z badanych filtrów pospiesznych, określoną jako liczba cząstek w wymiarze 2 μm oraz mętność wody w czasie trwania cyklu filtracyjnego. Z porównania wartości obu wskaźników jakości filtratu widać, że przebieg punktów ilustrujących zmiany mętności i liczby cząstek w filtracie nie pokrywają się. Analiza przebiegu zmian liczby cząstek o wymiarze 2 μm pokazuje, że w 21. godzinie cyklu filtracyjnego zaobserwowano wzrost liczby cząstek w filtracie z notowanego do tej pory poziomu około 40 do ponad 70 w 1 cm^3 wody. W dalszym ciągu trwania cyklu filtracyjnego



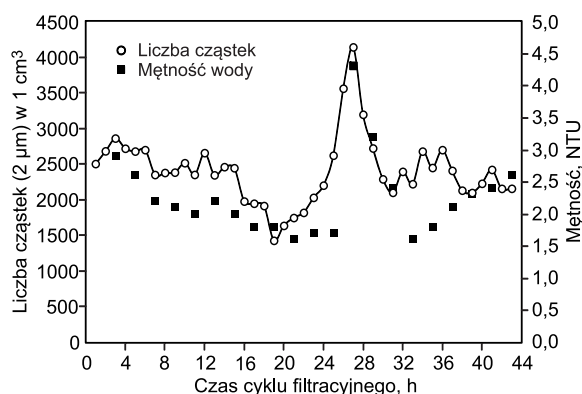
Rys. 3. Zmiany liczby cząstek o wymiarze 2 μm i mętności filtratu w czasie cyklu filtracyjnego

Fig. 3. Variations in 2 μm particle number and filtrate turbidity during filtration cycle

liczba cząstek ciągle wzrastała, przekraczając w 24. godzinie pracy filtru wartość 150 w 1 cm^3 . Poziom 150 cząstek w 1 cm^3 wody był przyjętą wartością dopuszczalną z uwagi na to, że po przekroczeniu tej liczby cząstek w filtracji obserwowano pojawianie się pojedynczych komórek bakterii grupy coli. Ciągły wzrost liczby cząstek w filtracji był obserwowany aż do 27. godziny cyklu filtracyjnego, kiedy to osiągnęła ona wartość ponad 800 w 1 cm^3 , a następnie utrzymywała się w zakresie od 400 do 1000 w 1 cm^3 wody.

Zmiany liczby cząstek w filtracji nie pokrywały się w czasie z obserwowanymi zmianami mętności wody. Mętność filtratu aż do 26. godziny cyklu filtracyjnego była poniżej 0,05 NTU. W 27. godzinie osiągnęła wartość 0,1 NTU, a następnie zwiększała się już aż do końca trwania cyklu filtracyjnego, osiągając wartość ok. 0,5 NTU. Oznacza to, że w analizowanym przypadku zwłoka czasowa pomiędzy zmianą jakości filtratu, kontrolowaną poprzez pomiar cząstek $2\text{ }\mu\text{m}$, a zmianą mętności wynosiła 5÷6 godzin. W innych badanych cyklach filtracyjnych, w przypadku pozostałych filtrów pospiesznych, czas ten kształtował się w zakresie od 2 do nawet 10 godzin.

Problemy z pracą filtrów wynikały bezpośrednio ze zmiennej jakości wody zasilającej te urządzenia (po osadnikach). Na rysunku 4 przedstawiono zmiany liczby cząstek o wymiarze $2\text{ }\mu\text{m}$ oraz mętności wody zasilającej filtry pospieszne w czasie trwania cyklu filtracyjnego. Z przebiegu zmian wartości tych wskaźników widać, że w wodzie zasilającej filtry w okolicach 20. godziny trwania cyklu filtracyjnego nastąpił wzrost liczby cząstek, który trwał do 27. godziny cyklu. Jednocześnie wzrostowi liczby cząstek nie towarzyszyła zwiększona mętność wody, którą zanotowano dopiero w 27. godzinie cyklu, po czym nastąpiła poprawa jakości wody do poprzedniego poziomu. Zmiany jakości wody po koagulacji wynikały z okresowych zmian jakości wody ujmowanej przez stację oraz braku prawidłowej korekty dawki koagulantu kompensującej te zmiany. Stosowany system kontroli dawki koagulantu opierał się na stałej korelacji pomiędzy dawką koagulantu a mętnością wody. Ponieważ mętność ujmowanej wody wzrosła z wartości 17 NTU do 41 NTU, w związku z tym zwiększyła się także dawka koagulantu o około 35%. Jak widać po wzroście liczby cząstek, była to dawka zdecydowanie za duża w stosunku do dawki optymalnej. Zwiększona ilość koagulantu spowodowała pojawienie się znacznej liczby niezaglomerowanych cząstek strąconego koagulantu o wymiarze $2\text{ }\mu\text{m}$. Dopiero wprowadzona ręczna korekta dawki koagulantu do poprzedniego poziomu spowodowała polepszenie jakości wody zasilającej filtry pospieszne.



Rys. 4. Zmiany liczby cząstek o wymiarze $2\text{ }\mu\text{m}$ i mętności wody zasilającej filtry pospieszne w czasie cyklu filtracyjnego
Fig. 4. Variations in $2\text{ }\mu\text{m}$ particle number and turbidity of influent water during filtration cycle

Wahania jakości wody zasilającej filtry, spowodowane niedostosowaniem dawki koagulantu do jakości oczyszczanej wody, miały istotny wpływ na skuteczność pracy filtrów. Do momentu zmiany dawki koagulantu filtry pracowały poprawnie, jednakże po wprowadzeniu dużej liczby cząstek strąconego koagulantu zostały one zaadsorbowane na powierzchni ziaren złoża filtracyjnego. Biorąc pod uwagę średnicę d_{10} ziaren złoża, proces filtracji przebiegający w oparciu o mechanizm sitowy pozwalał na zatrzymanie cząstek o wymiarach powyżej $40\text{ }\mu\text{m}$. Mniejsze cząstki zatrzymywane były na drodze interakcji z ziarnami złoża i zatrzymanymi wcześniej zawiesinami. Z uwagi na to, że cząstki te nie były obojętne elektrycznie, stworzyły na powierzchni ziaren powłokę z naładowanych dodatnio strąconych form glinu, która zaczęła odpychać cząstki obecne w filtrowanej wodzie, uniemożliwiając ich zatrzymanie. Dlatego też po przedawkowaniu koagulantu i pojawieniu się dużej liczby cząstek strąconego koagulantu w wodzie odpływającej z osadnika, złoża filtracyjne nie było w stanie odzyskać swojej skuteczności, pomimo poprawy jakości napływającej wody i należało je poddać płukaniu.

Wnioski

◆ Zastosowanie licznika cząstek pozwala na lepszą kontrolę jakości filtratu niż w przypadku wykonywania jedynie nefelometrycznego pomiaru mętności wody. Z uwagi na obserwowaną selektywność nefelometrów, jedynie liczniki cząstek pozwalają na szybką identyfikację obecności w wodzie strąconych produktów hydrolizy koagulantów o dużym stopniu polimeryzacji form glinu.

◆ Wprowadzenie licznika cząstek do kontroli jakości filtratu jest szczególnie zalecane w układach technologicznych wykorzystujących koagulanty wstępnie zhydrolizowane. W przypadku, gdy taki układ nie jest wyposażony w system kontroli dawki koagulantu, jedynie licznik cząstek pozwala na identyfikację problemów wynikających z braku dostosowania dawki do zmiennej jakości wody i dostosowanie harmonogramu pracy filtrów do danej sytuacji.

◆ W przypadku przedostawania się na filtr zawiesin po-koagulacyjnych powstających podczas przedawkowania koagulantu wstępnie zhydrolizowanego dochodzi do pogorszenia jakości filtratu, określanej na podstawie ogólnej liczby cząstek o wymiarach w zakresie $1\text{ }\mu\text{m}$ – $15\text{ }\mu\text{m}$. Niewłaściwa jakość filtratu utrzymuje się nawet po zmianie dawki koagulantu na optymalną. Oznacza to, że w przypadku przedawkowania koagulantu wstępnie zhydrolizowanego (poza zakres koagulacji wymiatającej) konieczne jest przerwanie cyklu filtracyjnego i wypłukanie złoża.

LITERATURA

1. C. HU, G. CHEN, H. LIU, H. ZHAO, J. QU: Characterization of flocs generated by preformed and in situ formed Al_{13} polymer. *Chemical Engineering Journal* 2012, Vol. 197, pp. 10–15.
2. P. ZHANG, Z. WU, G. ZHANG, G. ZENG, H. ZHANG, J. LI, J. DONG: Coagulation characteristics of polyaluminum chlorides PAC-Al30 on humic acid removal from water. *Separation and Purification Technology* 2008, Vol. 63, No. 3, pp. 642–647.
3. M. YAN, D. WANG, J. QU, W. HE, C. 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, No. 2, pp. 482–489.

4. D. WANG, W. SUN, Y. XU, H. TANG, J. GREGORY: Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2004, Vol. 243, No. 1–3, pp. 1–10.
5. A. PRUSS, P. PRUSS: Usuwanie zanieczyszczeń organicznych z wody powierzchniowej o małej zasadowości (Organic pollutant removal from low alkalinity surface water). *Ochrona Środowiska* 2013, vol. 35, nr 4, ss. 47–50.
6. W. XU, B. GAO, Q. YUE, Q. WANG: Effect of preformed and non-preformed 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, No. 1, pp. 83–90.
7. M. DUDZIAK: Retention of mycoestrogens with industrial nanofiltration modules. *Desalination and Water Treatment* 2013, Vol. 51, No. 19–21, pp. 4157–4161.

Klos, M. Application of Particle Counters in Rapid Filter Control in Surface Water Treatment System. *Ochrona Środowiska* 2014, Vol. 36, No. 2, pp. 17–20.

Abstract: Application of particle counting in rapid filter control was presented as an addition to the standard nephelometric method of water turbidity measurement. The studies were performed on a real technological surface water treatment system using pre-hydrolyzed coagulant. It was stated that the particle counter allowed better quality monitoring of a filtrate in comparison to water turbidity measurement alone. In addition, it allowed rapid identification of precipitated hydrolysis products of coagulants characterized by

high degree of aluminum form polymerization. It was demonstrated that membrane fouling by post-coagulation suspensions resulting from pre-hydrolyzed coagulant overdose led to deterioration in the filtrate quality, defined by the general particle size within the range from 1 to 15 μm . Inadequate filtrate quality was maintained even following the adjustment of the coagulant dose to optimal level. Therefore, in case of the pre-hydrolyzed coagulant overdose (out of sweep coagulation range) termination of the filtration cycle and filter bed washing are required.

Keywords: Suspended solids removal, sweep coagulation, rapid filtration control, pre-hydrolyzed coagulant.