

Marcin Kłos

Wykorzystanie licznika cząstek do kontroli pracy filtrów pospiesznych przy zmianie rodzaju koagulantu

Proces filtracji pospiesznej w większości stacji oczyszczania wody wykorzystujących koagulację objętościową jest ostatnim elementem ciągu technologicznego odpowiadającym za separację aglomeratów zawieszin pokoagulacyjnych. Skuteczność ich usuwania z wody jest ściśle związana z ilością resztkowego koagulantu w wodzie. Na jego zawartość w filtracie wpływa wiele czynników, takich jak warunki prowadzenia procesu koagulacji określone przez rodzaj i dawkę stosowanego koagulantu, wartość pH, przy jakim prowadzona jest koagulacja, wielkość powstających agregatów oraz skuteczność separacyjna złoża, zależna głównie od charakterystyki uziarnienia złoża filtracyjnego. W układach technologicznych oczyszczania wody z wykorzystaniem koagulantów hydrolizujących w stabilnych warunkach pH z reguły nie występują problemy z nadmierną ilością glinu resztkowego w wodzie zarówno w formie rozpuszczonej, jak i w postaci bardzo drobnych zawieszin pokoagulacyjnych. Sytuacja zmienia się istotnie, gdy występują duże zmiany wartości pH wody, wpływające na hydrolizę i strącanie form glinu. W takich sytuacjach, w czasie podwyższonej wartości pH ujmowanej wody, bardzo często zmienia się stosowany dotychczas koagulant hydrolizujący na reagent wstępnie zhydrolizowany, który działa skuteczniej przy podwyższonym pH. Jednak zmiana koagulantu silnie wpływa nie tylko na przebieg koagulacji, ale także na warunki pracy filtrów pospiesznych. Jest to spowodowane odmiennymi właściwościami strąconych form hydrolizy koagulantu wstępnie zhydrolizowanego. Dlatego też w takich sytuacjach konieczne jest wprowadzenie bardzo czułego układu kontroli jakości filtratu, pozwalającego na wczesną identyfikację ewentualnych problemów.

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu rodzaju i dawki koagulantu na skuteczność procesu filtracji pospiesznej. Celem tych badań było sprawdzenie, czy i w jaki sposób rodzaj koagulantu wpływa na sprawność filtrów pospiesznych współpracujących z układem koagulacji objętościowej. Zastosowanie w procesie oczyszczania wody koagulantów wstępnie zhydrolizowanych, cechujących się znaczną zawartością polimerowych form glinu, powoduje zmianę właściwości fizycznych zawieszin pokoagulacyjnych. Powstające podczas koagulacji tymi reagentami kłaczkami charakteryzują się odmiennym rozkładem wielkości cząstek o znacznie mniejszych rozmiarach agregatów

pokoagulacyjnych niż w przypadku stosowania koagulantów hydrolizujących. Właściwości zawieszin pokoagulacyjnych mają bezpośredni wpływ na przebieg oraz skuteczność filtracji pospiesznej [1–7].

Przedmiot i metody badań

Badania przeprowadzono na technicznych obiektach stacji oczyszczania wody, w której proces technologiczny opiera się na koagulacji realizowanej z wykorzystaniem komór szybkiego mieszania z mieszaniem mechanicznym, poprzedzających osadniki pionowe z zespolonymi komorami flokulacji z mieszaniem hydraulicznym. Z osadników woda przepływa grawitacyjnie na filtry pospieszne otwarte ze złożem antracytowo-piaskowym. Filtrat kierowany jest następnie do zbiorników wody czystej przez układ niskociśnieniowych lamp UV, za pomocą których prowadzona jest dezynfekcja wody. Oprócz promieniowania nadfioletowego do procesu dezynfekcji wykorzystywane są także związki chloru, których zadaniem jest zabezpieczenie wody pod względem bakteriologicznym na czas transportu do odbiorców końcowych. Filtry pospieszne wyposażone są w złoża dwuwarstwowe, antracytowo-piaskowe, o następującej charakterystyce:

- piasek filtracyjny o uziarnieniu w zakresie $0,5 \pm 0,8$ mm ($d_{10} = 0,6$ mm) i wysokości warstwy 0,6 m,
- antracyt o uziarnieniu w zakresie od 0,8 mm do 1,6 mm ($d_{10} = 0,9$ mm, $d_{60}/d_{10} < 1,4$) i wysokości warstwy 0,6 m.

W czasie badań proces koagulacji prowadzono z wykorzystaniem dwóch koagulantów technicznych o różnej zasadowości. Analizy ferrometryczne wykazały, że koagulant o większej zasadowości (PAC 85) cechował się znaczną zawartością form glinu w postaci Al_{13} , która wynosiła około 40%, przy czym zawartość glinu w formie monomerów wynosiła poniżej 5%. W przypadku koagulantu o mniejszej zasadowości (PAC 70) zawartość form glinu Al_{13} mierzona metodą ferrometryczną była znacząco niższa i nie przekraczała 5%, natomiast ilość monomerów była bardzo duża i wynosiła ponad 40%. Dawki obu koagulantów w układzie technologicznym określone były w trybie automatycznym na podstawie wyników pomiaru mętności ujmowanej wody. Dodatkowo poprawność doboru dawki była okresowo weryfikowana na drodze testów naczyniowych.

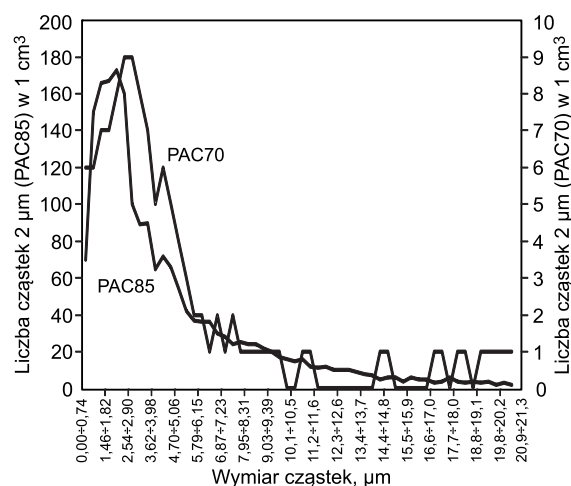
Konieczność stosowania dwóch różnych koagulantów na omawianym obiekcie była spowodowana dwoma czynnikami – pierwszy był związany ze znacznymi zmianami wartości pH ujmowanej wody. W ciągu roku średnia wartość pH kształtowała się w zakresie $7,3 \pm 7,5$. Jednak

w okresach wiosennym i letnim obserwowane były gwałtowne wzrosty wartości pH nawet do około 9,0. Zmiana ta następowała zazwyczaj nawet w ciągu kilku godzin. Podstawowy koagulant – PAC70 – nie sprawdzał się w czasie występowania podwyższonej wartości pH wody, co objawiało się zaburzeniami w przebiegu hydrolizy koagulantów o małej zasadowości, co z kolei skutkowało zwiększeniem mętności wody i mniejszą skutecznością usuwania podstawowych zanieczyszczeń. Drugim czynnikiem była niewielka skuteczność koagulantu o małej zasadowości w usuwaniu zanieczyszczeń z tzw. wód roztopowych. Wody pochodzące z topnienia śniegu zawierają znaczący ładunek zanieczyszczeń organicznych oraz dużą ilość substancji koloidalnych, przy jednocześnie niskiej temperaturze ujmowanej wody. W celu przeciwdziałania niekorzystnym efektom wzrostu pH wprowadza się koagulant o większym stopniu polimeryzacji – PAC85, który pozwala na skuteczne prowadzenie procesu w tych warunkach. Badania przeprowadzono w okresie przejściowym, kiedy pH ujmowanej wody zmieniało się w wartości średniej do maksymalnej. Charakterystyczne wartości wskaźników jakości ujmowanej wody w trakcie badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Jakość wody zasilającej układ techniczny
Table 1. Quality of raw water supplying the technical system

Wskaźnik, jednostka	Zakres	Mediana
Mętność, NTU	0,58÷54	4,5
Barwa, gPt/m ³	0÷36	6
pH	7,0÷7,9	7,3
Ogólny węgiel organiczny, gC/m ³	3,6÷10,1	4,7
Liczba cząstek 2 µm	2890÷21 160	8450
Liczba bakterii <i>E. coli</i> , jtk/cm ³	180÷2800	655

Układ pomiarowy składał się z systemu APF (AQUA SEEN) bazującym ma dwóch licznikach cząstek typu ARTI (HACH). Jedno z urządzeń było zainstalowane na rurociągu zbiorczym wody po osadnikach zasilającej filtry pospieszne, a drugie na rurociągu filtratu jednego z pięciu filtrów pospiesznych. Każdy z liczników dokonywał pomiaru cząstek w dwóch wielkościach z częstotliwością 30 pomiarów na minutę. Pomiaru prowadzono przez 12 tygodni na wszystkich filtrach technicznych. Czas badań podzielono na serie pomiarowe zgodne z czasem trwania cykli filtracyjnych. Zakres pomiarowy liczników został określony na drodze analizy rozkładu wielkości cząstek wykonanego w próbkach filtratu z testowanych filtrów pospiesznych. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy, reprezentatywny rozkład wielkości cząstek w filtracie przy stosowaniu obu koagulantów. Na wykresie widać, że funkcja rozkładu wielkości cząstek w filtracie osiągnęła maksimum przy wielkości cząstek około 2 µm. Uzyskane wyniki są zgodne z prowadzonymi wcześniej badaniami nad separacją zawieszin pokoagulacyjnych powstających podczas stosowania koagulantów wstępnie zhydrolizowanych [8–11]. Uwzględniając te wyniki zakres pomiarowy liczników cząstek zainstalowanych w układzie technicznym został ustalony na wartości 2 µm i 10 µm. W celu weryfikacji zastosowanej dawki koagulantu wykonano także testy naczyniowe oraz testy zmian potencjału zeta w trakcie koagulacji przy zastosowaniu urządzenia Zetasizer (Malvern).



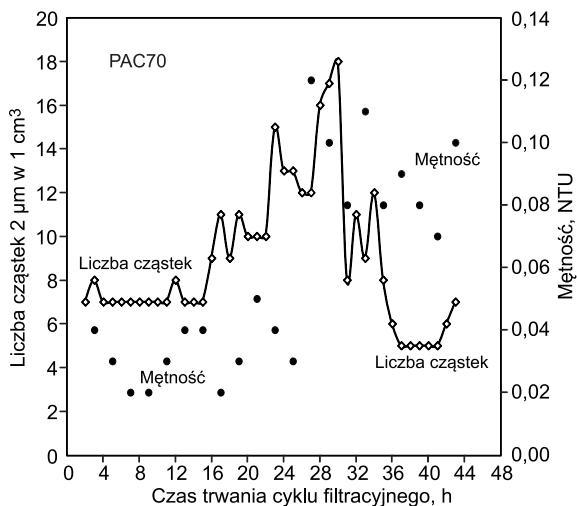
Rys. 1. Rozkład wielkości cząstek w filtracie w zależności od rodzaju koagulantu

Fig. 1. Particle size distribution in filtrate as a function of coagulant type

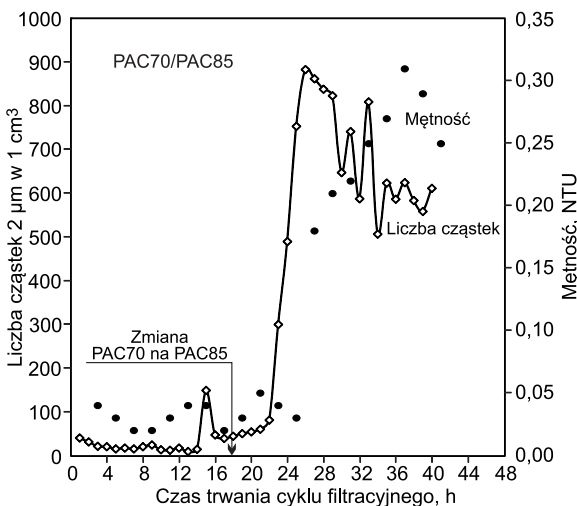
Techniczne filtry pospieszne wykorzystywane w badaniach nie były wyposażone w mętnościomierze pracujące w układzie ciągłym. Dlatego też w celu kontroli tego wskaźnika co dwie godziny pobierano próbki wody napływającej na filtry oraz próbki filtratu, w których oznaczano mętność za pomocą mętnościomierza typu 2100 AN (HACH). Dodatkowo raz w ciągu doby wykonywano analizy mikrobiologiczne na obecność w filtracie bakterii z grupy coli.

Omówienie wyników badań

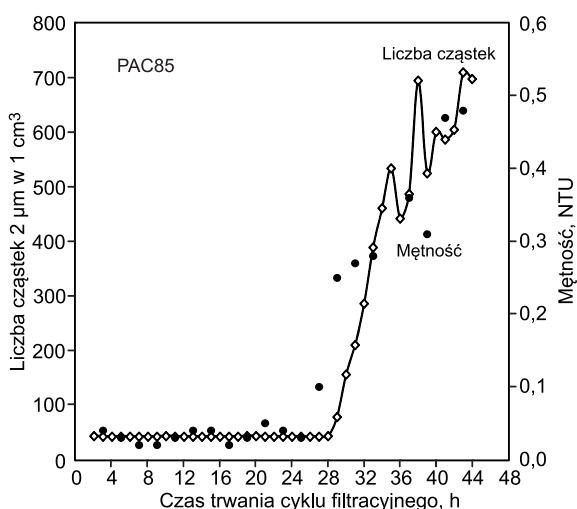
Wyniki pomiarów jakości filtratu wykazały, że wpływ rodzaju koagulantu na sprawność działania filtrów był bardzo istotny. Na rysunkach 2–4 przedstawiono zmianę średniej liczby cząstek o wymiarze 2 µm oraz mętności filtratu w przypadku stosowania koagulantów PAC85 i PAC70 w czasie trzech następujących po sobie cykli filtracyjnych tego samego filtru. Rysunek 2 przedstawia przebieg zmian liczby cząstek i mętności filtratu w przypadku, gdy koagulacja prowadzona była za pomocą koagulantu PAC70. Liczba cząstek o wymiarze 2 µm była bardzo mała i kształtowała poniżej 20 w 1 cm³ wody, a jej mętność nie przekraczała wartości 0,15 NTU. Pod koniec cyklu zaczęto obserwować wahania w pracy filtru wynikające ze zmiany jakości wody napływającej do układu i korekty dawki koagulantu. Po wyłączeniu filtru z eksploatacji i wypłukaniu złoża jakość filtratu poprawiła się (rys. 3), a liczba cząstek o wymiarze 2 µm ponownie zmalała do poniżej 20 w 1 cm³, przy mętności <0,1 NTU. Niemniej na wskutek ciągłego pogarszania się jakości wody poddawanej koagulacji, co potwierdzał wzrost jej mętności z około 5 NTU do wartości w zakresie 15÷20 NTU, w 15. godzinie cyklu filtracyjnego ponownie nastąpiło pogorszenie jakości filtratu. Dlatego też zdecydowano się na zmianę koagulantu z PAC70 na PAC85. Zmiany tej dokonano w 18. godzinie cyklu filtracyjnego, przy czym dawka koagulantu w przeliczeniu na glin była taka sama i wynosiła około 4 gAl/m³. Teoretyczny czas przetrzymania wody w osadnikach wynosił w tym czasie około 6 h. Po około 22 godzinach trwania cyklu filtracyjnego zauważono wzrost liczności małych cząstek w odpływie z monitorowanego filtru, a po kilku godzinach pracy filtru nastąpiło także zwiększenie mętności filtratu. W około 34. godzinie cyklu stwierdzono gwałtowne zmniejszenie liczby cząstek, pomimo większej mętności ujmowanej wody



Rys. 2. Liczba cząstek o wielkości 2 µm i mętność filtratu podczas cyklu filtracyjnego po zastosowaniu koagulantu PAC70
Fig. 2. 2 µm particle number and filtrate turbidity during filtration cycle following application of PAC70



Rys. 3. Liczba cząstek o wielkości 2 µm i mętność filtratu podczas cyklu filtracyjnego w trakcie zmiany koagulantu PAC70 na PAC85
Fig. 3. 2 µm particle number and filtrate turbidity during filtration cycle during the coagulant change from PAC70 to PAC85



Rys. 4. Liczba cząstek o wielkości 2 µm i mętność filtratu podczas cyklu filtracyjnego po zastosowaniu koagulantu PAC85
Fig. 4. 2 µm particle number and filtrate turbidity during filtration cycle following application of PAC85

i zwiększonej dawki koagulantu. Czas, jaki upłynął od momentu zmiany rodzaju koagulantu z PAC70 na PAC85 wyniósł około 14 h, co odpowiadało dwukrotnej wymianie wody w osadnikach. Oznaczało to, że poprawa jakości filtratu była związana z napływem na filtr wody sklarowanej po koagulacji prowadzonej nowym koagulantem. W 40. godzinie cyklu filtracyjnego złożo zostało wypłukane. Po wznowieniu procesu filtracji jakość filtratu uległa zdecydowanej poprawie (rys. 4). Średnia liczba cząstek o wymiarze 2 µm była znacznie mniejsza niż w podczas poprzedniego cyklu filtracyjnego przy stosowaniu koagulantu PAC85 i wynosiła 40÷50 w 1 cm³ wody. Tak niewielka wartość utrzymywała się do około 28÷29. godziny cyklu filtracyjnego, kiedy nastąpiło powolne zwiększenie liczby cząstek o wymiarze 2 µm, przy utrzymującej się niewielkiej mętności filtratu. W porównaniu z sytuacją, gdy proces koagulacji prowadzony był koagulantem PAC70 zaobserwowano znaczące skrócenie czasu trwania cyklu filtracyjnego, czego nie można było wytłumaczyć jedynie zwiększeniem obciążenia złoża ładunkiem zawieszin pochodzących z ujmowanej wody i dawki koagulantu. Przedstawione wyniki pokazują, że było to spowodowane problemem z utrzymaniem właściwej dawki koagulantu. Koagulanty o dużej zasadowości i znacznym stopniu polimeryzacji charakteryzują się znacznie większą gęstością ładunku powierzchniowego produktów hydrolizy niż reagenty o dużej zawartości monomerów glinu. Z tego powodu bardzo trudno jest utrzymywać odpowiednią wartość dawki koagulantu w przypadku szybkich zmian jakości ujmowanej wody. W przypadku, gdy dochodzi do przedawkowania koagulantu, w odpływie z osadników występuje znaczna liczba drobnych cząstek, które nie mogą być zatrzymane w złożu filtracyjnym. Jest to spowodowane ich znacznym jednoimiennym ładunkiem powierzchniowym, który na skutek wzajemnych oddziaływań tych cząstek nie pozwala na ich przechwytywanie przez aglomeraty wcześniej zatrzymane w złożu. Skutkuje to koniecznością zakończenia cyklu filtracyjnego, pomimo niewyczerpanej pojemności czynnej złoża. W przypadku stosowania koagulantu o mniejszej zasadowości i mniejszym stopniu polimeryzacji łatwiej jest kontrolować dawkę koagulantu i dostosowywać ją do zmieniającej się jakości ujmowanej wody [12, 13].

Wnioski

◆ Zastosowanie licznika cząstek pozwala na bardziej skuteczną kontrolę jakości filtratu niż pomiar jedynie mętności. Z uwagi na 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 przypadku układów technologicznych, w których stosuje się koagulanty wstępnie zhydrolizowane. Urządzenia te pozwalają w sposób pośredni zidentyfikować problemy z doбором wymaganej dawki koagulantu i zweryfikować skuteczność stosowanych w tym celu procedur.

◆ Aby zapewnić poprawną pracę układu filtracji pospiesznej (po procesie koagulacji objętościowej) należy zapewnić skuteczny sposób doboru dawki koagulantu w zależności od zmian jakości ujmowanej wody. Proste metody wykorzystujące korelację dawki z podstawowymi wskaźnikami jakości wody, takimi jak mętność czy intensywność barwy, nie pozwalają na właściwy dobór dawki koagulantu w przypadku nagłych zmian jakości ujmowanej wody.

♦ Zmiana rodzaju koagulantu lub warunków prowadzenia procesu koagulacji wiąże się z koniecznością prowadzenia wzmożonego nadzoru technologicznego układu filtrów pospiesznych. Zakres nadzoru nie może się ograniczać do standardowego pomiaru mętności filtratu, ponieważ nie można na jego podstawie zauważyć pogorszenia jakości filtratu, wynikającego z przedawkowania koagulantu o dużym udziale wysokopolimeryzowanych form glinu. Niedostosowanie dawki koagulantu do jakości oczyszczanej wody skutkuje koniecznością zakończenia cyklu filtracyjnego pomimo niewyczerpanej pojemności czynnej 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- Al_{30} 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.W.K. CHOW: Relative importance of hydrolyzed $Al(III)$ species (Al_a , Al_b , and Al_c) 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. 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.
6. M. DUDZIAK: Retention of mycoestrogens with industrial nanofiltration modules. *Desalination and Water Treatment* 2013, Vol. 51, No. 19–21, pp. 4157–4161.
7. A. PRUSS: Removal of organic matter from surface water during coagulation with sludge flotation and rapid filtration – a full-scale technological investigation. *Water Science and Technology* 2015, Vol. 71, No. 4, pp. 645–652.
8. D. GHERNAOUT, B. GHERNAOUT: Sweep flocculation as a second form of charge neutralisation – a review. *Desalination and Water Treatment* 2012, Vol. 44, No. 1–2, pp. 15–28.
9. J. DUAN, J. WANG, T. GUO, J. GREGORY: Zeta potentials and sizes of aluminum salt precipitates – effect of anions and organics and implications for coagulation mechanisms. *Journal of Water Process Engineering* 2014, Vol. 4, pp. 224–232.
10. W. XU, B. GAO, Y. WANG, Z. YANG, X. BO: Role of Al_{13} species in removal of natural organic matter from low specific UV absorbance surface water and the aggregates characterization. *Chemical Engineering Journal* 2011, Vol. 171, No. 3, pp. 926–934.
11. J. GUMINSKA: Zastosowanie pomiaru liczby cząstek do analizy mechanizmu i skuteczności procesu koagulacji zanieczyszczeń wody (Use of particle number measurement in analyzing the mechanism and efficiency of water pollutant coagulation). *Ochrona Środowiska* 2010, vol. 32, nr 2, ss. 21–26.
12. D. GHERNAOUT, A.I. AL-GHONAMY, M.W. NACEUR, A. BOUCHERIT, N.A. MESSAOUDENE, M. AICHOUNI, A.A. MAHJOUBI, N.A. ELBOUGHDIRI: Controlling coagulation process: From zeta potential to streaming potential. *American Journal of Environmental Protection* 2015, Vol. 4, No. 5–1, pp. 16–27.
13. J. DUAN, J. WANG, T. GUO, J. GREGORY: Zeta potentials and sizes of aluminum salt precipitates – effect of anions and organics and implications for coagulation mechanisms. *Journal of Water Process Engineering* 2014, Vol. 4, pp. 224–232.

Kłos, M. Application of Particle Counter to Rapid Filter Monitoring During a Change in Coagulant Type. *Ochrona Środowiska* 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 15–18.

Abstract: In majority of water treatment stations that operate on the basis of conventional volume coagulation, rapid filtration is the last element of technological system responsible for effectiveness of post-coagulation suspension separation. The process efficiency depends on many factors, such as conditions of the preceding coagulation step (coagulant dose and pH of the treated waste), size of post-coagulation aggregates and effectiveness of filter bed separation. The paper presents results of the research conducted within technical filter system on the impact of coagulant type change on rapid filters operation and effectiveness. For this purpose, a system of filter operation analysis (APF – active power filter) based on solid particle counters measuring suspension presence in the filtrate

was applied. It was demonstrated that change in the coagulant type, *i.e.* to the reagent of higher polymerization degree, poses a danger of filtrate quality deterioration due to the appearance of a significant number of coagulant hydrolysis products. The test results might be used for verification of procedures of rapid filter operation and backwashing, in order to minimize the danger of releasing into the filtrate too many post-coagulation suspended particles and microorganisms. Introduction of the particle counter for filtrate quality monitoring is particularly recommended in technological systems where pre-hydrolyzed coagulants are used. Such devices indirectly allow for identification of problems with selection of required coagulant dose and for verification of effectiveness of the procedures applied.

Keywords: Water treatment, coagulation, pre-hydrolyzed coagulant, filtration, water quality.