

Małgorzata Szlachta, Wojciech Adamski

Ocena skuteczności usuwania naturalnych związków organicznych z wody w procesie koagulacji objętościowej

Skuteczne usuwanie naturalnie występujących w wodzie substancji organicznych (NOM – natural organic matter) przed jej dezynfekcją – ze względu na ryzyko powstawania produktów ubocznych – jest niezmiernie ważne, a tradycyjnie stosowana w tym celu koagulacja z filtracją pospieszną niejednokrotnie nie jest w stanie sprostać temu zadaniu. Intensyfikacja usuwania zanieczyszczeń organicznych z wody podczas koagulacji objętościowej jest możliwa dzięki zastosowaniu optymalnych parametrów procesu, w tym właściwej dawki koagulantu, optymalnego pH, przy którym realizowany jest proces, jak również odpowiedniego czasu i intensywności mieszania. Koagulacja, której celem jest wysoce efektywne usuwanie prekursorów ubocznych produktów dezynfekcji określana jest mianem koagulacji zintensyfikowanej, przy czym wymagana sprawność tego rodzaju koagulacji uwarunkowana jest stopniem zanieczyszczenia organicznego wody surowej oraz jej zasadowością [1]. Większą skuteczność koagulacji w eliminacji ogólnego węgla organicznego (OWO) obserwuje się podczas oczyszczania wody o jego większej początkowej ilości, co powoduje, że wymagany stopień usunięcia węgla organicznego rośnie wraz ze wzrostem jego zawartości w wodzie surowej (tab. 1). Ponadto naturalne substancje organiczne są skuteczniej usuwane przy mniejszym pH, dlatego też – ze względu na większy koszt oczyszczania wody o pH w zakresie zasadowym – wymagany stopień usunięcia OWO maleje wraz ze wzrostem jej zasadowości.

Tabela 1. Wymagana skuteczność usuwania substancji organicznych podczas zintensyfikowanej koagulacji zależnie od jakości wody
Table 1. Required efficiency of NOM removal during enhanced coagulation

OWO, gC/m ³	Zasadowość ogólna, gCaCO ₃ /m ³		
	0÷60	60÷120	>120
2÷4	35%	25%	15%
4÷8	45%	35%	25%
>8	50%	40%	30%

Sprawność procesu koagulacji istotnie wpływa na końcową skuteczność oczyszczania wody uzyskaną w całym układzie technologicznym. Zdaniem wielu badaczy większy wpływ na skuteczność usuwania substancji organicznych ma pH niż rodzaj czy dawka koagulantu. Optymalne pH, a więc takie, przy którym usunięcie związków organicznych w koagulacji

siarczanem glinu jest największe, mieści się w zakresie od 5,0 do 6,0 [2–5]. Jeśli pH jest większe niż 6,0, wówczas stopień usuwania substancji organicznych jest mniejszy, a wymagane dawki koagulantów są większe. Skuteczność procesu koagulacji uwarunkowana jest również rodzajem usuwanych substancji organicznych, ponieważ domieszki organiczne wód naturalnych są związkami o różnorodnych rozmiarach, budowie i składzie chemicznym, a ich skuteczne usuwanie z wody często jest kłopotliwe.

Na podstawie pomiaru absorbancji właściwej w nadfiolecie (SUVA – Specific UltraViolet Absorbance) można ocenić podatność naturalnych związków organicznych na usuwanie w procesie koagulacji. Analizę wpływu wartości SUVA na sprawność koagulacji przedstawiono w m.in. pracach [6–7]. Skuteczność koagulacji w usuwaniu substancji organicznych z wody o dużym SUVA (>4 m³/gC-m), a więc zawierającej przeważnie wielkocząsteczkowe frakcje organiczne, może dochodzić nawet do 80%, natomiast z wody o małym SUVA (<3 m³/gC-m) na ogół nie osiąga 30%, ponieważ w składzie tych wód występują przede wszystkim małowcząsteczkowe hydrofilowe substancje organiczne, niepodatne na usuwanie metodą koagulacji.

Celem prezentowanych badań była ocena skuteczności procesu koagulacji objętościowej w usuwaniu substancji organicznych obecnych w wodzie naturalnej. Analizowano wpływ pH, przy którym realizowano proces oraz dawki koagulantu na skuteczność usuwania substancji organicznych. Określono także zmianę rozkładu mas cząsteczkowych związków organicznych występujących w próbkach wody surowej i pozostających w wodzie po procesie koagulacji, jak również sprawność koagulacji w usuwaniu poszczególnych frakcji substancji organicznych.

Materiały i metodyka badań

Przedmiotem badań była woda powierzchniowa (Odra w przekroju Wrocławia), o charakterystyce zanieczyszczenia organicznego przedstawionej w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyka zanieczyszczenia organicznego wody
Table 2. Characteristics of water pollution by NOM

Wskaźnik, jednostka	Zakres
Barwa, gPt/m ³	15,3÷16,3
Absorbancja w UV ₂₅₄ ^{1,0} nm	12,14÷13,66
RWO, gC/m ³	3,5÷3,9
SUVA, m ³ /gC-m	3,36÷3,83

W badaniach skuteczności usuwania substancji organicznych w procesie koagulacji zastosowano standardowe procedury testu naczyńniowego. Optymalny czas kontaktu i warunki mieszania, wyznaczone w pracy [8], były następujące:

- czas mieszania: szybkie mieszanie 180 s, flokulacja 1800 s,
- gradient prędkości mieszania: szybkie mieszanie 180 1/s, flokulacja 10 1/s.

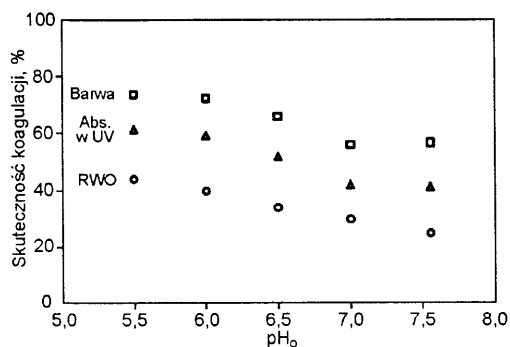
Jako koagulant zastosowano $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, który dawkowano w postaci 1% roztworu wodnego. W celu oceny wpływu pH, przy którym realizowano proces, na stopień zmniejszenia mierzonych wskaźników składu fizyczno-chemicznego badanej wody przeprowadzono badania, w których testy wykonano w próbkach wody o początkowym pH (pH_0) korygowanym w zakresie od 5,5 do 7,0 i pH naturalnym (pH_{n-o}), stosując dawkę koagulantu równą $2,53 \text{ gAl/m}^3$. Korektę pH przeprowadzono za pomocą wodnych roztworów HCl i NaOH ($0,1 \text{ mol/dm}^3$). Z kolei analizując zmianę skuteczności usuwania substancji organicznych w zależności od ilości dawkowanego koagulantu wykonano serie badań przy $\text{pH}_0=6,0$, w których testowane dawki koagulantów były z zakresu od $1,01 \text{ gAl/m}^3$ do $3,04 \text{ gAl/m}^3$.

Próbki wody surowej oraz po procesie koagulacji przesączono przez sączek membranowy o średnicy porów $0,45 \mu\text{m}$ i oznaczano w nich intensywność barwy, absorbancję w $\text{UV}_{254}^{\text{nm}}$ oraz rozpuszczony węgiel organiczny (RWO), wykorzystując do tych celów spektrofotometr UV-VIS i analizator TOC-5050 (Shimadzu). Pomiar potencjału elektrokinetycznego wykonano w próbkach wody surowej o naturalnym i korygowanym pH oraz w próbkach po szybkim mieszanii przy użyciu analizatora Zetameter 2000 (Malvern). Z kolei analizę rozkładu mas cząsteczkowych związków organicznych wykonano metodą chromatografii wykluczenia (HPSEC – High Pressure Size Exclusion Chromatography) przy użyciu wysokosprawnego chromatografu cieczonego z detektorem UV-VIS (Shimadzu). Rozdział chromatograficzny wykonano przy długości fali 254 nm. Próbkę przed pomiarem przesączono przez sączki membranowe o średnicy porów $0,45 \mu\text{m}$. Opierając się na doniesieniach literaturowych dotyczących skuteczności rozdziału różnych eluentów [9–11], jak również na wynikach przeprowadzonych testów, w badaniach jako fazę ruchomą wykorzystano roztwór buforu fosforanowego. Do kalibracji kolumny chromatograficznej zastosowano wzorce soli sodowych sulfonianu polistyrenu (American Polymer Standards Corporation) o średniej masie cząsteczkowej (MC) z zakresu $2+30 \text{ kDa}$. Na podstawie sporządzonej krzywej kalibracyjnej wyznaczono zakres mas cząsteczkowych zanieczyszczeń obecnych w próbkach wody. Otrzymane chromatogramy wykluczenia zinterpretowano zgodnie z metodyką podaną w literaturze [12].

Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie uzyskanych wyników badań określono skuteczność usuwania naturalnych substancji organicznych z wody metodą koagulacji objętościowej w zależności od wartości pH_0 , przy której realizowano proces. Otrzymane wyniki badań obrazuje rysunek 1.

Przedstawione zależności wskazują na większą skuteczność koagulacji w usuwaniu substancji organicznych i barwnych, gdy proces realizowany był przy pH_0 skorygowanym do wartości $\leq 6,0$. Przyczyny tego należy szukać w mniejszym



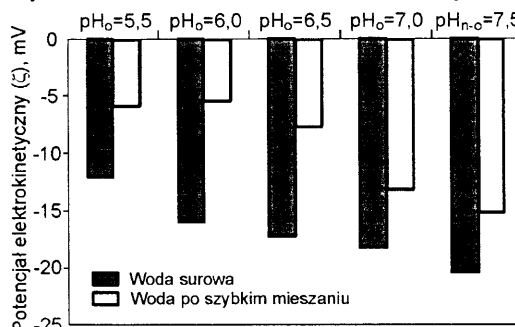
Rys. 1. Skuteczność koagulacji w zależności od pH_0 wody
Fig. 1. Efficiency of coagulation vs. water pH_0

stopniu dysocjacji substancji organicznych obecnych w oczyszczanej wodzie oraz minimalnej rozpuszczalności wytrąconego wodorotlenku glinu w tym zakresie pH. Ponadto ilość dodatnio naładowanych produktów hydrolizy koagulantu glinowego zobojętniających koloidy organiczne jest większa przy $\text{pH}_0 \leq 6,0$, w porównaniu do ich ilości występujących w wodzie o większych wartościach pH.

W badanych próbkach wody zmniejszenie zawartości RWO wyniosło 43,7% i 39,8%, odpowiednio przy pH_0 równym 5,5 i 6,0, natomiast intensywniej usuwane były aromatyczne formy zanieczyszczeń organicznych, które usunięto ze skutecznością 61% i 59%. Zmniejszeniu zawartości substancji o charakterze aromatycznym towarzyszyło zmniejszenie SUVA po procesie. W badanym zakresie pH najmniejszą wartość SUVA równą $2,65 \text{ m}^3/\text{gC}\cdot\text{m}$ odnotowano przy najmniejszym pH_0 , co wskazywało na pozostawanie w wodzie mniejszej liczby cząstek hydrofobowych o większych rozmiarach. Z kolei intensywność barwy w próbkach wody o pH skorygowanym do 5,5 zmniejszyła się o 73%, a do wartości 6,0 prawie o 72%.

Realizacja koagulacji przy $\text{pH}_0 \geq 6,5$ skutkowała zmniejszeniem sprawności procesu. Najgorszą skuteczność zaobserwowano w przypadku pH naturalnego ($\text{pH}_{n-o}=7,55$), gdzie odnotowano zmniejszenie (o ok. 20 pkt. proc.) skuteczności usuwania związków organicznych mierzonych zawartością RWO i absorbancją w UV, w stosunku do skuteczności koagulacji realizowanej przy najmniejszym pH_0 równym 5,5. W przypadku barwy spadek ten był mniejszy i wynosił około 17%.

Konsekwencją zwiększenia pH_0 badanej wody był wzrost bezwzględnej wartości potencjału elektrokinetycznego (ζ), który przyczynił się do większej stabilności układu koloidalnego (rys. 2.). Zmierzona wartość potencjału elektrokinetycznego w próbkach wody surowej przy pH_0 z zakresu od 5,5 do 7,55 wynosiła od $-12,1 \text{ mV}$ do $-20,4 \text{ mV}$. Przy większych

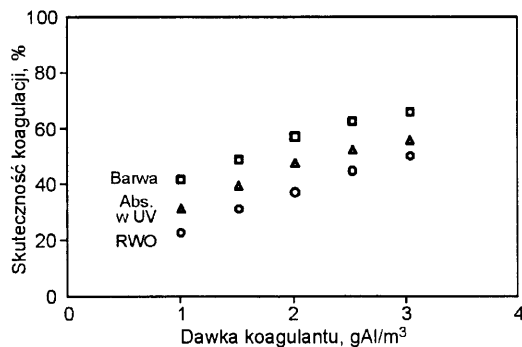


Rys. 2. Potencjał elektrokinetyczny cząstek w wodzie surowej i po szybkim mieszanii w zależności od pH_0

Fig. 2. Electrokinetic potential of particles in raw water and in water after rapid mix related to pH_0

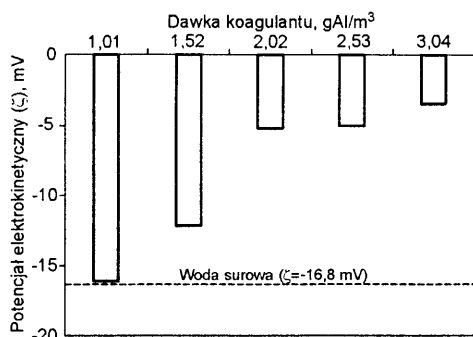
początkowych bezwzględnych wartościach potencjału ζ odnotowano mniejszą skuteczność destabilizacji koloidów (większe bezwzględne wartości ζ w próbkach wody po szybkim mieszaniu). Największy stopień destabilizacji układu koloidalnego uzyskano natomiast w próbkach wody o pH_0 korygowanym do 5,5 i 6,0.

Następnie analizowano wpływ ilości dawkowanego siarczanu glinu na zawartość substancji organicznych w wodzie oczyszczonej metodą koagulacji. Obserwowane zmiany skuteczności procesu z zastosowaniem różnych dawek koagulantu przedstawiono na rysunku 3.



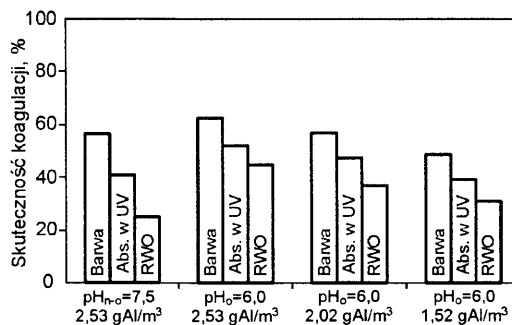
Rys. 3. Skuteczność koagulacji w zależności od dawki koagulantu
Fig. 3. Efficiency of coagulation vs. coagulant dose

Stopień usuwania substancji organicznych wyraźnie zwiększał się wraz ze wzrostem ilości dawkowanego koagulantu, a w zakresie stosowanych dawek skuteczniej eliminowane były frakcje RWO charakteryzujące się dużą zawartością składników aromatycznych, a tym samym dużym potencjałem tworzenia ubocznych produktów dezynfekcji. Przykładowo, stosując dawkę 1,01 gAl/m³ zmniejszenie zawartości RWO wynosiło 22,3%, a przy dawce 3,04 gAl/m³ było równe 50,1%, podczas gdy absorbancja w UV została zmniejszona odpowiednio o 31,1% i 55,7%. Z kolei skuteczność zmniejszenia intensywności barwy wody wynosiła około 41% i 65%, odpowiednio przy dawkach 1,01 gAl/m³ i 3,04 gAl/m³. Ponadto największa ilość koagulantu zapewniła największy stopień destabilizacji koloidów organicznych, a zastosowanie dawki najmniejszej prowadziło do większej stabilności układu koloidalnego (rys. 4).



Rys. 4. Potencjał elektrokinetyczny cząstek w wodzie po szybkim mieszaniu w zależności od dawki koagulantu
Fig. 4. Electrokinetic potential of particles in raw water and in water after rapid mix related to coagulant dose

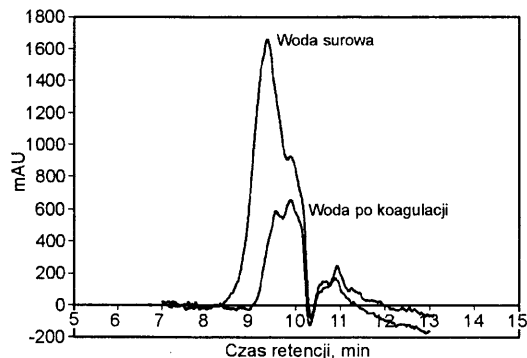
Z porównania wpływu ilości dawkowanego siarczanu glinu na skuteczność usuwania substancji organicznych w procesie koagulacji realizowanym przy naturalnym i korygowanym pH wynika, że zakwaszenie wody przed koagulacją pozwoliło na uzyskanie lepszych efektów przy mniejszej dawce koagulantu, niż gdy koagulacja była realizowana przy naturalnym pH wody (rys. 5).



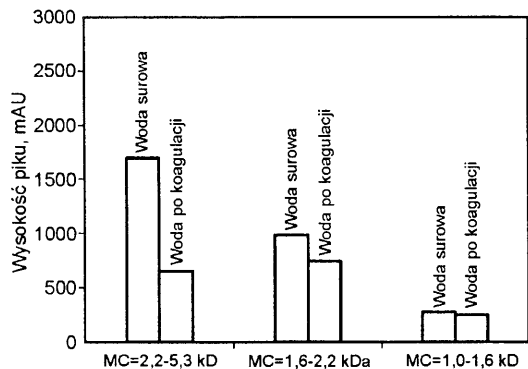
Rys. 5. Wpływ dawki koagulantu i pH_0 wody na skuteczność usuwania zanieczyszczeń organicznych
Fig. 5. Effect of coagulant dose and pH_0 on the efficiency of NOM removal

W próbkach wody o korygowanym pH_0 równym 6,0 uzyskano większy stopień usunięcia substancji organicznych niż wówczas, gdy koagulację realizowano z tą samą dawką koagulantu równą 2,53 gAl/m³, lecz w próbkach o pH naturalnym. Dawkowanie koagulantu w ilości mniejszej o 20% (2,02 gAl/m³) skutkowało większym usunięciem RWO i zmniejszeniem absorbancji w UV w przypadku wody o korygowanym niż o pH naturalnym, do której dawkowano większą ilość koagulantu (2,53 gAl/m³), podczas gdy z podobną skutecznością zmniejszona została jedynie intensywność barwy wody. Z kolei stosując dawkę koagulantu mniejszą o 40% (1,52 gAl/m³), osiągnięto lepszą skuteczność usuwania RWO w porównaniu z tą, jaką otrzymano realizując koagulację przy pH naturalnym z dawką 2,53 gAl/m³. Jednakże w tym przypadku mniejsza dawka koagulantu okazała się niewystarczająca do uzyskania barwy i absorbancji w UV, jakie uzyskano w wyniku koagulacji przy pH_{n-o} .

Niezależnie od tego, przy jakim pH realizowano proces koagulacji lub jaka została zastosowana dawka koagulantu, w wodzie po procesie wciąż pozostawała pewna ilość małych cząsteczkowych substancji organicznych niepodatnych na usuwanie metodą koagulacji. Analiza HPSEC pozwoliła na określenie zmian rozkładu mas cząsteczkowych związków organicznych występujących w próbkach wody surowej i pozostających w wodzie po procesie koagulacji realizowanej przy $pH_0=6,0$ i dawce koagulantu 2,02 gAl/m³. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono chromatogramy wykluczenia oraz wysokość pików, które odpowiadały zawartości związków organicznych w wodzie surowej i po koagulacji. Wysokość poszczególnych pików na chromatogramie korespondowała z ilością substancji organicznych o określonej średniej masie cząsteczkowej, natomiast suma wysokości wszystkich pików odpowiadała sumarycznej ilości substancji organicznych obecnych w badanej próbce wody.



Rys. 6. Chromatogramy wykluczenia substancji organicznych w wodzie surowej i po koagulacji
Fig. 6. Exclusion chromatograms for NOM in raw water and in water after coagulation



Rys. 7. Piki odpowiadające zawartości substancji organicznych w wodzie surowej i po koagulacji

Fig. 7. Peaks corresponding to NOM content in raw water and in water after coagulation

Na podstawie wartości SUVA wody surowej wynoszącego w tej serii badawczej $SUVA_0=3,52 \text{ m}^3/\text{gC}\cdot\text{m}$ wnioskowano, że w jej składzie obecne były substancje zarówno o małych, jak i większych masach cząsteczkowych, co następnie potwierdzono w analizie HPSEC. Masa cząsteczkowa substancji organicznych występujących w badanej wodzie naturalnej mieściła się w zakresie od około 1,0 kDa do 5,3 kDa. Najwięcej, bo 57,3%, było cząstek o masie z przedziału 2,2+5,3 kDa, 33,4% stanowiły cząstki mniejsze, o masie 1,6+2,2 kDa, natomiast najmniej, bo nieco ponad 9%, było cząstek najmniejszych o masie do 1,6 kDa. Na podstawie otrzymanych chromatogramów określano sprawność koagulacji w usuwaniu poszczególnych frakcji substancji organicznych, a wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Skuteczność koagulacji w usuwaniu substancji organicznych o określonej masie cząsteczkowej

Table 3. Efficiency of coagulation in removing NOM of a defined molecular weight

Masa cząsteczkowa kDa	Zawartość substancji organicznych %	Skuteczność koagulacji %
2,2+5,3	57,3	61,6
1,5+2,2	33,4	24,6
1,0+1,6	9,3	10,8

Sprawność koagulacji w usuwaniu frakcji o $MC \leq 1,6 \text{ kDa}$ była najmniejsza i wynosiła nieco ponad 10%, natomiast substancji organicznych o masie z zakresu 1,6+2,2 kDa w wodzie po koagulacji pozostało znacznie mniej, gdyż skuteczność eliminacji tej frakcji wynosiła około 24,6%. Ponadto koagulacja, czego należało się spodziewać, była najbardziej skuteczna w usuwaniu cząstek o największych rozmiarach, a więc cechujących się dużą aromatywnością i hydrofobowością. Fakt ten pozostaje w zgodzie z uzyskanymi wynikami badań, w których stopień usunięcia rozpuszczonych substancji organicznych o charakterze aromatycznym był większy niż stopień usunięcia RWO.

Podsumowanie

Niezależnie od dawki koagulantu i pH, przy którym realizowano proces, skuteczność koagulacji była największa w przypadku usuwania substancji barwnych i organicznych o charakterze aromatycznym. Z kolei skuteczność usuwania RWO była mniejsza i mieściła się w zakresie 25+50%, który uznawany jest za typowy podczas koagulacji siarczanem

glinu realizowanej w próbkach wody o SUVA w zakresie 2+4 $\text{m}^3/\text{gC}\cdot\text{m}$. Realizacja procesu koagulacji przy większym pH przyczyniła się do większej stabilności układu koloidalnego oraz mniejszej skuteczności obniżenia intensywności barwy, absorbancji w UV i zawartości RWO, podczas gdy jego realizacja przy $\text{pH} \leq 6,0$ spowodowała zwiększenie skuteczności procesu. Ponadto zakwaszenie wody przed koagulacją pozwoliło na uzyskanie lepszej skuteczności usuwania zanieczyszczeń organicznych z niższą dawką koagulantu, niż gdy koagulacja była realizowana przy naturalnym pH wody. Jednakże zakwaszenie wody przed koagulacją skutkuje intensyfikacją jej agresywności kwasowęglowej po procesie, co jest szczególnie widoczne w przypadku stosowania siarczanu glinu jako koagulantu. W przeprowadzonych badaniach potwierdzono przydatność koagulacji w usuwaniu z wody naturalnych substancji organicznych o większych rozmiarach ($MC > 2,2 \text{ kDa}$) (prawie 62%), gdy tymczasem skuteczność tego procesu w eliminacji małych cząsteczkowych związków ($MC < 1,6 \text{ kDa}$) była znacznie mniejsza (nieco ponad 10%).

Praca naukowa została sfinansowana ze środków przeznaczonych na naukę w latach 2005–2007 jako projekt badawczy nr 3 T09D 026 28.

LITERATURA

1. Drinking Water Regulations and Health Advisories. Disinfectant/disinfection by-products rule. U.S. EPA, 1996.
2. G. CROZES, P. WHITE, M. MARSHALL: Enhanced coagulation: Its effect on NOM removal and chemical costs. *Journal of the American Water Works Association* 1995, Vol. 87, No. 1, pp. 78–89.
3. R.C. CHENG, S.W. KRASNER, J.F. GREEN, K.L. WATTIER: Enhanced coagulation: A preliminary evaluation. *Journal of the American Water Works Association* 1995, Vol. 87, No. 2, pp. 91–103.
4. J. QIN, M.H. OO, K.A. KEKRE, F. KNOPS, P. MILLER: Impact of coagulation pH on enhanced removal of natural organic matter in treatment of reservoir water. *Separation and Purification Technology* 2006, Vol. 49, No. 3, pp. 295–298.
5. C. VOLK, K. BELL, E. IBRAHIM, D. VERGES, G. AMY, M. LECHEVALLIER: Impact of enhanced and optimized coagulation on removal of organic matter and its biodegradable fraction in drinking water. *Water Research* 2000, Vol. 34, No. 12, pp. 3247–3257.
6. J.K. EDZWALD, J.E. TOBIASON: Enhanced coagulation: USA requirements and a broader view. *Water Science and Technology* 1999, Vol. 40, No. 9, pp. 63–70.
7. M. MOŁCZAN, M. SZLACHTA, A. KARPIŃSKA, A. BIŁYK: Zastosowanie absorbancji właściwej w nadfioletcie (SUVA) w ocenie jakości wody. *Ochrona Środowiska* 2006, vol. 28, nr 4, ss. 11–16.
8. M. SZLACHTA: Analiza zjawisk w koagulacji objętościowej wspomaganą pylistym węglem aktywnym. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wrocław 2007 (praca niepublikowana).
9. D. HONGVE, J. BAANN, G. BECHER, S. LOMO: Characterization of humic substances by means of high-performance size exclusion chromatography. *Environment International* 1996, Vol. 22, No. 5, pp. 489–494.
10. CH. WU: Handbook of Size Exclusion Chromatography and Related Techniques. Marcel Dekker, New York 2004.

-
11. P. CONTE, A. PICCOLO: High pressure size exclusion chromatography (HPSEC) of humic substances: Molecular sizes, analytical parameters, and column performance. *Chemosphere* 1999, Vol. 38, No. 3, pp. 517–528.
12. A. MATILAINEN, N. LINDQVIST, S. KORHONEN, T. TUHKANEN: Removal of NOM in the different stages of the water treatment process. *Environment International* 2002, Vol. 28, No. 6, pp. 457–465.
-

Szlachta, M., Adamski, W. Assessing the Efficiency of Natural Organic Matter (NOM) Removal from Water by Coagulation. *Ochrona Srodowiska* 2008, Vol. 30, No. 3, pp. 9–13.

Abstract: In this study, the efficiency of the coagulation process in removing organic substances from natural water was related to the pH at which the process was conducted and to the quantity of the coagulant applied. The experiments have produced the following findings. The application of an acidic pH prior to the process resulted in a higher removal efficiency at a lower coagulant dose than when coagulation was performed at a natural water pH. When coagulation was carried out at a higher pH ($\text{pH}_0 \geq 6.5$), this was concomitant with a higher stability of the colloids and a lower efficiency of the water treatment process (measured in terms of color, UV absorbance ($\lambda=254$ nm) and DOC). The increase in the coagulant dose noticeably raised the

extent of NOM removal; it should, however, be noted that within the range of the coagulant doses applied the DOC fractions with a high content of aromatic compounds (and consequently with a high potential of generating disinfection by-products) were removed with a higher efficiency. The differences in the distributions of the NOM molecular weights between raw water samples and the samples treated by coagulation have substantiated the significant contribution of this process to the removal of the high-molecular-weight NOM (>2.2 kDa)(approx. 62%); in the case of low-molecular-weight NOM (<1.6 kDa), the efficiency of removal by coagulation was found to be substantially lower (approx. 10%).

Keywords: Water treatment, coagulation, natural organic matter (NOM), molecular weight.