

Systemowe podejście do bezpieczeństwa wody w MPECWiK w Środzie Wielkopolskiej z uwzględnieniem generowania ubocznych produktów dezynfekcji wody

A system approach to water safety at MPECWiK in Środa Wielkopolska, taking into account the generation of water disinfection by-products

IZABELA ZIMOCH, ALEKSANDRA GÓRSKA

DOI 10.36119/15.2023.10.5

Dezynfekcja jest jednym z głównych etapów uzdatniania wody, pozwalającym zachować bezpieczeństwo mikrobiologiczne. Niesie ona jednak za sobą ryzyko powstawania ubocznych produktów w wodzie, które w dłuższym okresie spożywania może stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi. Istnieje wiele metod umożliwiających zmniejszenie poziomu powstawania ubocznych produktów dezynfekcji (UPD) w zależności od rodzaju i jakości ujmowanej wody, niemniej jednak procesu tego nie da się w pełni wyeliminować w systemach o dużym potencjale ich generowania. Zarówno konieczność zapewnienia bezpieczeństwa mikrobiologicznego wody jak i konieczność ograniczenia powstawania ubocznych produktów stawia dezynfekcję jako proces technologiczny o szczególnym znaczeniu w procedurach zarządzania bezpieczeństwem dostaw wody do konsumenta.

Na przykładzie Miejskiego Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej, Wodociągów i Kanalizacji Spółka z o.o. w Środzie Wielkopolskiej w artykule przedstawiono proces identyfikacji zagrożeń wynikających z powstawania UPD oraz działania zmierzające do zminimalizowania lub wyeliminowania tego zagrożenia. W związku z powyższym w Spółce przeprowadzono wstępne badania, które wykazały skuteczność zastosowania koagulacji celem ograniczenia potencjału tworzenia UPD w uzdatnianej wodzie. W działaniach tych wykorzystano systemowe podejście do bezpieczeństwa wody oparte na ocenie i zarządzaniu ryzykiem. Celem przeprowadzonych badań była analiza potencjalnego zagrożenia występowania UPD w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi oraz ocena efektywności technologicznej koagulacji jako skutecznej bariery ochronnej w zarządzaniu ryzykiem.

Słowa kluczowe: uboczne produkty dezynfekcji (UPD), dezynfekcja, koagulacja, biodegradowalny rozpuszczony węgiel organiczny (BRWO), ogólny węgiel organiczny (OWO), trihalomentany (THM), ryzyko

Disinfection is one of the main parts of water treatment processes, allowing to maintain microbiological safety. However, it carries the risk of the formation of by-products in the drinking water, which in the long term, may pose a threat to consumer health. There are many methods to reduce the level of disinfection by-products (DBP) formation, depending on the type and quality of water abstraction. However, this process cannot be fully eliminated in water supply systems with a high potential for their generation. Both the need to ensure the microbiological safety of tap water and the need to reduce the formation of DBP make disinfection a technological process of particular importance in the procedures of managing the safety of water delivered to consumers.

On the example of Municipal Heat Energy, Water Supply and Sewage Company Ltd in Środa Wielkopolska city, the article presents the process of identifying threats resulting from the creation of UPD and actions aimed at minimizing or eliminating this threat. In connection with the above, preliminary studies were carried out at the Company, which showed the effectiveness of using coagulation to reduce the potential of UPD formation in the treated water. These activities used a systemic approach to water safety based on risk analysis and management. The aim of the study was to analyze the potential risk of UPD formation in water intended for human consumption and to assess the technological effectiveness of coagulation as an effective protective barrier in risk management.

Keywords: disinfection by-products (DBP), disinfection, coagulation, biodegradable dissolved organic carbon (BDOC), total organic carbon (TOC), trihalomentates (THM), risk

prof. dr hab. inż. Izabela Zimoch <https://orcid.org/0000-0003-3048-4002> – Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Gliwice,

mgr inż. Aleksandra Górską – absolwentka pierwszych Studiów Podyplomowych Systemy Bezpieczeństwa Zaopatrzenia w Wodę, Politechnika Śląska: <https://www.polsl.pl/rie4/>, Miejskie Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej, Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o. o., Środa Wielkopolska. Adres do korespondencji/ Corresponding author: izabela.zimoch@polsl.pl

Wstęp – uboczne produkty dezynfekcji

W latach 70-tych ubiegłego wieku pojawiły się pierwsze informacje dotyczące powstawania produktów ubocznych dezynfekcji wody chlorem. Zidentyfikowano wówczas chloroform, a badania toksykologiczne potwierdziły jego rakotwórczość. Problem powstawania UPD musi być uwzględniony w procesach technologicznych uzdatniania wody w celu zapewnienia jej jakości chemicznej. Jednocześnie Światowa Organizacja Zdrowia [1] (WHO) podkreśla konieczność obecności środka dezynfekcyjnego w wodzie gwarantującego mikrobiologiczną stabilność wody. Racjonalne minimalizowanie skutków wtórnego zanieczyszczenia wody polega między innymi na takim zarządzaniu procesem technologicznym, aby w jak największym stopniu usuwać z wody związki organiczne, a ilość użytych środków do jej dezynfekcji ograniczać lub całkowicie wyeliminować [2, 3].

Dezynfekcja jest jednym z głównych etapów uzdatniania wody, pozwalająca zachować bezpieczeństwo mikrobiologiczne. Celem dezynfekcji jest zniszczenie żywych i przetrwalnikowych form organizmów patogennych oraz zapobieganie ich wtórnemu rozwojowi w systemie dystrybucji wody. Niewystarczająco efektywna dezynfekcja lub jej brak są przyczyną chorób wodopochodnych [4, 5]. Sam proces dezynfekcji można podzielić na metody fizyczne, czyli promieniowanie UV, ultradźwięki czy też popularne gotowanie (nie mające zastosowania w wodociągach), oraz metody chemiczne. Dezynfekcja wody metodami chemicznymi polega na dawkowaniu utleniaczy, takich jak: podchloryn sodu, dwutlenek chloru, chlor gazowy, brom, jod czy też chloraminy. Do reagentów chemicznych stosowanych w dezynfekcji zaliczany jest również ozon oraz rzadziej używany nadmanganian potasu. Wartości normalnych potencjałów redoks pozwalają uszeregować środki dezynfekcyjne według malejącej zdolności utleniającej: $O_3 - ClO_2 - Cl_2 - Br_2 - J_2$ [6], natomiast stabilność i czas efektywnego działania dezynfekującego różnych utleniaczy maleje następująco: chloraminy – dwutlenek chloru – chlor wolny – chlor – ozon [7]. W zależności od rodzaju wprowadzanego dezynfektanta do wody w wyniku utleniania materii organicznej mogą powstawać UPD. Są to m. in. kwasy organiczne, aldehydy, a także niezidentyfikowane jeszcze związki [8]. UPD są najbardziej niepożądanymi substancjami, które tworzą się na etapie uzdatniania wody wskutek reakcji środków dezynfekcyjnych z zanieczyszczeniami wody. Do najczęściej powstających UPD należą:

– *trójhalemetany*: chloroform, bromodi-

- chlorometan, dibromochlorometan, bromoform,
- *haloacetonitryle*: bromochloroacetonitryl, dibromoacetonitryl, dichloroacetonitryl, trichloroacetonitryl,
- *kwasy haloorganiczne*: kwas chlorooctowy, kwas dichlorooctowy, kwas trichlorooctowy,
- *haloaldehydy*: aldehyd dichlorooctowy, aldehyd trichlorooctowy,
- *halo ketony*: 1,1-dichloropropanon, 1,1,1-trichloropropanon, 1,1-dichloro-2 – -butanon, 1,1,1-trichloro-2-butanon,
- *chlorofenole*: 2-chlorofenol, 2,4-dichlorofenol, 2,4,6-trichlorofenol,
- *i inne* np.: chloropikryna, chlorocyjan, MX [8]

Do najbardziej rozpoznanej grupy UPD zaliczamy trihalometany (THM).

Zarówno w wodach powierzchniowych jak i podziemnych naturalnie występują związki organiczne i nieorganiczne. Substancje organiczne, na przykład kwasy humusowe czy kwasy fulwowe mogą stanowić prekursor w reakcji z chlorem w wodzie. Obecność bromków również przyczynia się do powstawania związków organicznych wchodzących w skład sumy THM-ów. Mianem materii organicznej określa się złożoną mieszaninę związków organicznych, które mogą występować w dwóch podstawowych formach – rozpuszczonej (RWO) i zawieszanej (ZWO), a łączna suma tych obu parametrów stanowi całkowitą zawartość ogólnego węgla organicznego (OWO) [9,10,11]. Podczas procesu dezynfekcji wody zachodzą przemiany zarówno związków organicznych wykazujące działania toksyczne jak i nieorganicznych. Stosując chemiczny środek dezynfekcyjny np. podchloryn sodu jesteśmy pewni, że woda jest o odpowiedniej jakości mikrobiologicznej [3], natomiast stwarzamy zagrożenie wytwarzając potencjalnie niebezpieczne UPD, w szczególności chloroform [2, 8, 11].

THM-y, do których należy m.in chloroform powstają nie tylko w miejscu uzdatniania (tzn. w stacji uzdatniania wody), ale również w sieci wodociągowej, przy czym im dalej transportowana jest woda, tym większa jest ich różnorodność. Cały proces tworzenia UPD trwa do momentu wyczerpania się chloru bądź substancji organicznej. To od jakości wody poddawanej chlorowaniu, zależy ilość powstających trihalometanów [2, 8, 11,12]. Stężenie trihalometanów w wodzie zależy od wielu czynników, głównie: pH, temperatury, dawki chloru, czasu kontaktu, rodzaju i zawartości substancji organicznych. W celu obniżenia ich ilości w chlorowanej wodzie stosowane są różne technologie: usuwanie powstałych THM, usuwanie prekursorów THM, stosowanie środków dezynfekcyjnych innych niż chlor [11,12, 13].

Ubooczne produkty dezynfekcji wody mogą charakteryzować się właściwościami toksycznymi, mutagennymi oraz kancerogennymi [14, 15, 16], dlatego też ich stężenie w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi powinno być ściśle kontrolowane. Jakość wody przeznaczonej do spożycia normowana jest bardzo rygorystycznie zarówno na poziomie międzynarodowym [17] jak i krajowym [18]. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi wartość parametryczna dla sumy THM wynosi $100 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, w tym chloroformu $30 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ [18]. Problem kancerogenności tych związków stanowi prawdopodobnie największe ryzyko zdrowia publicznego. Z tych też względów Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska zmniejszyła dopuszczalne stężenie sumy THM w wodach ze $100 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ do $80 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ [19]. Istnieje wiele dróg narażenia konsumenta wody na szkodliwy wpływ UPD na jego zdrowie. W wodzie THM jako substancje lotne, w większości ulatniają się z niej do powietrza podczas jej użytkowania. Zatem, człowiek jest narażony na te związki poprzez spożywanie wody do picia, jak również poprzez wdychanie powietrza zawierającego te związki czy też kontakt przez skórę podczas kąpieli. W systemach wodociągowych eksploatujących zasoby wód o dużym potencjale generowania THM zgodnie z celem dyrektywy wody do picia 2020/2184 powinno się wdrażać bariery bezpieczeństwa w całym systemie zaopatrzenia w wodę tj. od ujęcia do kranu, stanowiące kluczowy element w procedurach zarządzania ryzykiem dostaw wody do konsumenta [17, 20, 21].

Metody usuwania

Istnieje wiele metod umożliwiających zmniejszenie UPD w zależności od rodzaju i jakości ujmowanej wody. Zaliczyć do nich można, usuwanie prekursorów (PUPD) przed zastosowaniem dezynfekcji poprzez proces koagulacji i sorpcji na węglu aktywnym, co wiąże się z szeregiem badań zawartości materii organicznej zarówno w wodzie ujmowanej jak i w biofilmie w sieci wodociągowej. Do koagulacji w celu skutecznego obniżenia PUPD stosuje się najczęściej sole glinu i żelaza. Stosowane koagulanty glinowe to siarczan (VI) glinu $Al_2(SO_4)_3$, chlorek glinu $AlCl_3$, glinian sodu $Na_2Al_2O_4$. W ostatnich latach coraz popularniejsze jest użycie wstępnie zhydrolizowanych koagulantów np. zasadowych chlorków poliglinu. [22]. W celu obniżenia zawartości matrycy prekursorów THM w wodzie stosuje się zaawansowane, wysokoefektywne procesy uzdatniania oparte na ozonowaniu pośrednim i sorpcji na

złożu węgla aktywnego. Kolejnym sposobem technologicznym ograniczenia procesu generowania UPD jest zmiana lub dołożenie środka dezynfekcyjnego o mniejszym potencjale wytwarzania UPD bądź zastosowanie innej niż chemiczna metody dezynfekcji. Ograniczenie powstawania trihalometanów można osiągnąć także zmniejszając dawkę chloru w procesie dezynfekcji, należy jednak kontrolować stabilność mikrobiologiczną, aby redukcja dawki chloru nie odbiła się negatywnie na skuteczności dezynfekcji. Podczas chlorowania wpływ na rodzaj powstających produktów ubocznych ma również odczyn wody pH. Zmniejszenie wartości pH obniża jednocześnie stężenie THM, jednak powoduje wzrost stężenia kwasów haloocetowych i na odwrót, jeżeli zwiększymy pH zmniejszymy ilość kwasów haloocetowych, a zwiększymy zawartość THM.

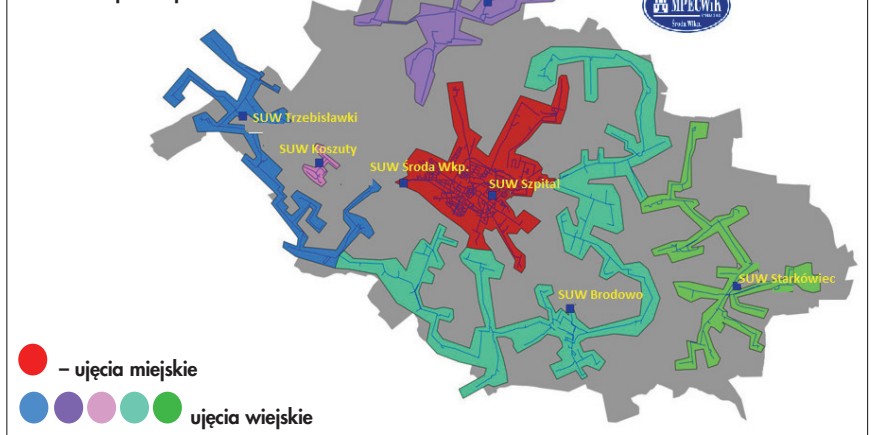
Pomimo tego, że wskazane powyżej metody są powszechnie znane, to każda ingerencja w układ technologiczny uzdatniania wody musi być poprzedzona szeregiem badań potwierdzających skuteczność zastosowania danej metody.

System zarządzania ryzykiem dostaw wody w Środzie Wielkopolskiej

Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej, Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Środzie Wielkopolskiej zaliczane jest do średniej wielkości przedsiębiorstw, które dostarcza wodę do około 30 tys. mieszkańców miasta i gminy. Średzki System Zaopatrzenia w Wodę (SZW) składa się z sześciu stref zasilania, eksploatujących dwa ujęcia miejskie oraz 5 ujęć wiejskich (rys. 1). Łącznie pobiera ok. 2 mln m³ wody rocznie, z czego 75 tys. m³ pobierane jest z poziomu wodonośnego czwartorzędu, co stanowi 4% całego poboru wody, natomiast pozostała ilość wody pobierana jest z trzeciorzędu. Łącznie eksploatowanych jest 30 studni o głębokości ok. 150 m oraz dwie o głębokości ok. 50 m. Woda ujmowana poddawana jest uzdatnieniu poprzez napowietrzanie w zbiorniku kontaktowym, filtrację oraz dezynfekcję podchlorynem sodu, następnie jest magazynowana w zbiornikach wody czystej, z których tłoczona jest do sieci wodociągowej.

Mając na uwadze rekomendowane przez Światową Organizację Zdrowia (WHO) od 2004 r. podejście do dostaw wody oparte na strategii zarządzania ryzykiem ujęte na zasadzie fakultatywności w rewizji DWD z 2015 r. MPECWiK Sp. z o.o. w Środzie Wielkopolskiej w 2016 r. podjęło działania mające na celu opracowanie i wdrożenie Planu Bezpieczeństwa Wody (PBW), który leży u podstaw świadomej

Rys. 1. System zaopatrzenia w wodę eksploatowany przez MPECWiK w Środzie Wielkopolskiej



i prawidłowej eksploatacji SZW oraz ich kontroli. Systemowe podejście do bezpieczeństwa wody, które oparte jest na ocenie ryzyka i zarządzaniu nim z punktu widzenia średniej wielkości przedsiębiorstwa wodociągowego nie jest zadaniem prostym zarówno ze względów organizacyjnych, kadrowych jak i ekonomicznych. W roku 2016 powołany został Zespół ds. bezpieczeństwa wody jako jednostka doradcza i pomocnicza w celu opracowania, wdrożenia, bieżącej aktualizacji i przestrzegania założeń przyjętych w PBW. W pierwszej kolejności sporządzono opis systemu zaopatrzenia w wodę. Zebranie i uporządkowanie wszystkich informacji dotyczących infrastruktury zaopatrzenia w wodę wymagało sporządzenia inwentaryzacji, ewidencji obiektów i urządzeń, przeprowadzenia audytów, w szczególności audytu technologicznego stacji uzdatniania wody oraz dokonania przeglądów i aktualizacji dostępnej dokumentacji. Następnie przystąpiono do identyfikacji zagrożeń oraz zdarzeń niebezpiecznych jakie mogą pojawić się w SZW w Środzie Wielkopolskiej na każdym etapie jej dostaw, tj. od obszaru zasilania do kranu u konsumenta. Zespół ds. bezpieczeństwa wody wraz z innymi pracownikami podczas wielu spotkań przy zastosowaniu technik SWOT, drzewa zdarzeń, "analizy muchy" oraz "burzy mózgow" ocenił każdy etap procesu pod względem mogących wystąpić zagrożeń i zdarzeń niebezpiecznych. Mając zidentyfikowane zagrożenia i niebezpieczne zdarzenia, przystąpiono do sporządzania ocen ryzyka. Poziom ryzyka w przedsiębiorstwie wodociągowym w Środzie Wielkopolskiej obliczono w oparciu o matryce opublikowane w normie PN – EN 15975-2 *Bezpieczeństwo zaopatrzenia w wodę do spożycia – Wytyczne dotyczące zarządzania kryzysowego – Część 2 Zarządzanie ryzykiem*. Efektem sporządzonych

ocen ryzyka było ustalenie tzw. listy priorytetowych ryzyk. Lista priorytetowych ryzyk ustalona została przy uwzględnieniu dopuszczalnego poziomu ryzyka. Do ryzyk tych na podstawie przeprowadzonej "burzy mózgow" określono środki zmniejszające bądź eliminujące to ryzyko. Do takich środków zaliczyć można, m.in. opracowanie niezbędnych procedur, szkolenia pracowników, opracowanie i wdrożenie planu modernizacyjnego. Wdrożony w Spółce PBW poddawany jest ciągłej aktualizacji. Stanowi on bardzo ważne źródło wiedzy na temat funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę i jest podstawą do podejmowania decyzji w procesie zarządzania.

Charakterystyka jakości wody w SZW w Środzie Wielkopolskiej

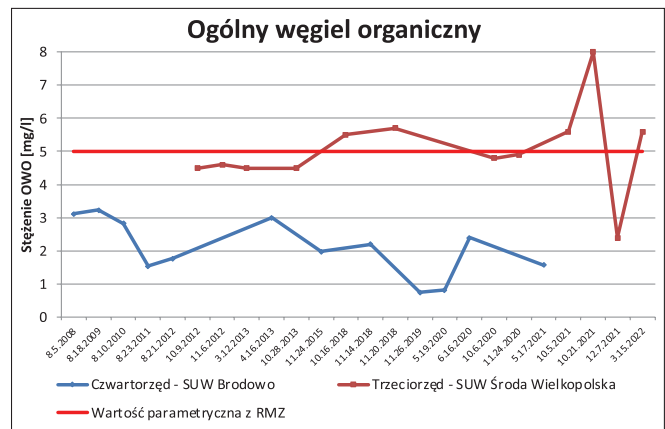
Monitorowanie jakości wody w Średnim SZW realizowane jest indywidualnie do potrzeb każdej strefy zaopatrzenia, jak również uzależnione jest od zagrożeń zidentyfikowanych na każdym etapie od ujęcia wody do kranu u konsumenta, zgodnie z procedurami kontroli jakości wody wdrożonego w Spółce Planu Bezpieczeństwa Wody. Analizując wyniki badań jakości wody z okresu obejmującego lata 2008-2022 w próbach wody pobranych w całym SZW w Środzie Wielkopolskiej zwrócono uwagę na występowanie związków chlorowcopochodnych w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Jakość wody ujmowanej zarówno z ujęć trzeciorzędowych jak i czwartorzędowych wskazuje, że jest bezpieczna i czysta pod kątem podstawowych wskaźników mikrobiologicznych. Rozległa sieć wodociągowa i duża zmienność rozbioru wody zarówno sezonowa jak i dobową były przestanką dozowania do wody podchlorynu sodu w celu utrzymywania stabilności mikrobiologicznej w sieci wodociągowej

i zapobiegania wtórnemu skażeniu mikrobiologicznemu wody.

Ujmowane wody z ujęć czwartorzędowych posiadają wysokie stężenia żelaza, manganu, chlorków, siarczanów jak również większą mętność niż woda ujmowana z ujęć trzeciorzędowych (tabela 1). Na uwagę zasługują jony amonu, które w płytszych studniach występują w niższych stężeniach niż w ujęciach głębszych – trzeciorzędowych. W ujęciach wód podziemnych w Środzie Wielkopolskiej przeważają jony amonu pochodzenia geogenicznego. Barwa w wodzie ujmowanej zarówno z ujęć trzeciorzędowych jak i czwartorzędowych kształtuje się na podobnym poziomie, średnio 24 mg Pt/l. Należy zwrócić uwagę, że barwa pozorna związana jest z dużą zawartością żelaza, natomiast barwę rzeczywistą tworzą tu występujące w wodzie związki humusowe.

Zmienność występowania we wszystkich ujęciach w Środzie Wielkopolskiej, na przełomie 14 lat, związków organicznych wyrażanych OWO w wodach z poziomu wodonośnego czwartorzędowego charakteryzowała się średnimi stężeniem 2 mg/l, a w ujęciach trzeciorzędowych przyjmowała wartości

Rys. 2
Ogólny węgiel organiczny w wodzie uzdatnionej w latach 2008 – 2022



Rys. 3.
Zmienność stężenia chloroformu w wodzie uzdatnionej w latach 2008-2022

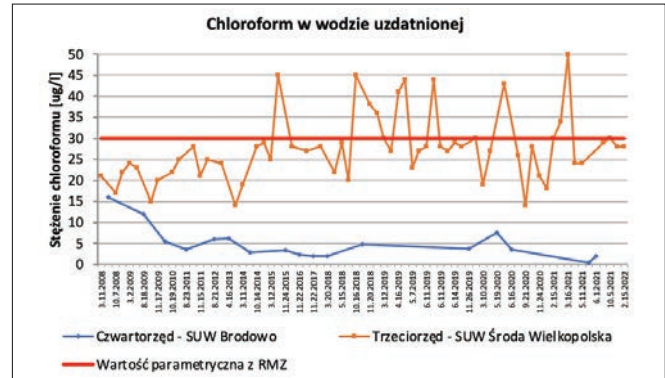


Tabela 1. Charakterystyka zmienności jakości wody ujmowanej w latach 2010 – 2022

Parametr		Ujęcie czwartorzędowe		Ujęcia trzeciorzędowe				
		Brodowo	Brodowo	Babin	Starkówiec Piątkowski	Koszuty	Trzebistawki	Środa Wlkp.
Barwa mgPt/l	min	5	10	5	10	10	10	10
	max	40	40	65	40	30	30	50
	śr	24	27	22	24	17	22	26
	med	23	30	20	30	20	20	30
OWO mg/l	min	2,1	4,1	6,9	5,6	5,5	7	5,8
	max	2,6	6,1	8,7	5,9	5,8	8,4	6,2
	śr	2	5,1	7,8	5,8	5,7	7,7	6,0
	med	2,4	5,1	7,8	5,8	5,7	7,7	6,0
Żelazo ug/l	min	710	143	256	167	408	232	64
	max	4760	2250	3560	3540	4620	2530	4420
	śr	2337	884	1465	1126	1207	1265	1191
	med	2580	807	1425	968	1110	780	1055
Mangan ug/l	min	69	26	0,3	30	23	23	22
	max	505	193	180	232	193	144	167
	śr	230	48	66	68	78	66	20
	med	219	38	58,5	50	60	76	50
Jony amonu mg/l	min	0,071	0,071	0,716	0,435	0,128	0,103	0,590
	max	0,803	0,900	1,27	0,962	1,05	0,928	1,12
	śr	0,199	0,645	0,949	0,728	0,814	0,726	0,692
	med	0,122	0,662	0,934	0,741	0,834	0,761	0,740
Mętność NTU	min	1,3	0,5	1,1	0,71	3,3	0,9	0,58
	max	38	9,1	66	53	41	17	31
	śr	18	2,1	12	5,6	8,4	5,9	5,1
	med	15	1,7	8,5	2,6	6,9	3,6	3
Chlorki mg/l	min	43	14	5,7	6,5	5,1	6,4	8,1
	max	132	18	6,6	11,6	6	7,9	17
	śr	29	4	6,10	9,7	5,6	1,9	1,1
	med	92	15	6	10,4	5,6	7,1	14,2
Siarczany mg/l	min	110	<5,0	<5,0	<5,0	5	<5,0	6,1
	max	228	<5,0	<5,0	<5,0	5,4	<5,0	6,2
	śr	45	<5,0	<5,0	<5,0	5,2	<5,0	0,2
	med	169	-	-	-	5,2	-	6,2

z przedziału od 4,6 do 6,6 mg/l. W wodzie uzdatnionej, w próbkach pobranych z kranu u konsumenta stężenie OWO jest proporcjonalne do wielkości stężenia w wodzie ujmowanej. Analiza stężeń OWO w wodzie w systemie dystrybucji wyraźnie wskazuje istotne zróżnicowanie jego zawartości w próbkach wody uzdatnionej pobieranej z ujęć czwartorzędowych, dla których średnie stężenie w latach 2008-2022 jest blisko 2,5-krotnie mniejsze w odniesieniu do wody z ujęć trzeciorzędowych (rys. 2). Fakt ten przekłada się również na zmienność stężeń chloroformu w wodzie dostarczanej konsumentom, która ściśle powiązana jest ze zmiennością OWO w Średnim SZW.

Analiza zmienności zawartości chloroformu w wodzie chlorowanej dla wód z ujęć czwartorzędowych charakteryzuje się blisko 6-krotnie mniejszym stężeniem w stosunku do jego wielkości dla wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi pochodzącej z trzeciorzędowych pokładów wodonośnych (rys. 3).

System zarządzania ryzykiem – działania naprawcze zmierzające od obniżenia UPD w wodzie dostarczanej mieszkańcom Środy Wielkopolskiej

Przeprowadzona analiza zmienności chloroformu w Średnim SZW wskazuje na utrzymujący się lekko wzrostowy trend zawartości UPD, charakteryzujący się powtarzającymi przekroczeniami wartości parametrycznej

30 µg/l określonej w rozporządzeniu Ministra Zdrowia w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. W związku z powyższym zgodnie z zasadami wdrożonego w Spółce PBW podjęto działania naprawcze mające na celu skuteczne obniżenie wartości UPD w wodzie. Działania, które podjęto w pierwszej kolejności polegały na zmniejszeniu nastaw dawkowania podchlorynu sodu przy jednoczesnej kontroli ogólnej liczby mikroorganizmów w 22°C oraz zwiększeniu częstotliwości badania chloroformu. Proces ten odbywał się dwuetapowo. W pierwszym etapie zmniejszono nastawy dozowania podchlorynu sodu z dawki 0,3 mg/l do 0,2 mg/l, natomiast w drugim etapie z poziomu 0,2 mg/l do 0,1 mg/l. Monitoring operacyjny polegał na wyznaczeniu 13 punktów zgodności na terenie miasta i gminy, w których pobierane były próbki wody zgodnie z określonym na ten cel wewnętrznym harmonogramem. Uzyskane wyniki badań wykonane w ramach monitoringu operacyjnego wykazały, że po pierwszym etapie zmniejszenia dawki dezynfektanta podjęte działania okazały się niewystarczające by obniżyć ryzyko generowania chloroformu w wodzie w kranie u konsumenta do poziomu bezpiecznego dla jego zdrowia. Natomiast po drugim etapie podjętych działań obniżenia dawki podchlorynu sodu stężenie chloroformu tylko w jednym punkcie zgodności spadło z 41 µg/l do 22 µg/l, a w pozostałych nie uległo zmianie, zatem podjęto dalsze działania naprawcze.

Podjętym środkiem kontroli była także analiza rozkładu chloru w sieci wodociągowej. Skorzystano z danych laboratoryjnych, które jednoznacznie wskazały na brak chloru wolnego w sieci wodociągowej. W większości przypadków jego stężenie w wodzie wynosiło od 0,0 mg/l do 0,03 mg/l. W tych okolicznościach, zaczęto analizować, czy terminy dostawy podchlorynu sodu odgrywały w tym jakąkolwiek rolę. Zestawiono, zatem terminy dostaw dezynfektanta oraz czas magazynowania ze zmiennością rozkładu stężeń chloroformu w wodzie w sieci wodociągowej. Niestety i ta analiza nie wniosła żadnych informacji do procesu rozpoznania przyczyn generujących zagrożenie.

W celu wyeliminowania ryzyka związanego z rozwojem mikroorganizmów w sieci wodociągowej, a także uzasadnienia dozowania podchlorynu sodu do wody zbadano parametr biodegradowalnego rozpuszczonego węgla organicznego (BRWO). Oznaczenie polega na pomiarze spadku OWO podczas inokulacji badanej wody, piaskiem z florą bakteryjną charakterystyczną dla danej wody [23]. Badanie to obejmowało zaszczepienie próbki bakteriami, w celu sprawdzenia czy węgiel zawarty w wodzie jest atrakcyjny dla bakterii, tzn. czy stanowi

dla nich wystarczającą pożywkę. Wyniki pokazały, że jego wartość we wszystkich próbkach jest niewykrywalna. Oznacza to, że woda surowa i uzdatniona nie zawiera związków umożliwiających rozwój bakterii, czyli jest wodą stabilną mikrobiologicznie.

Badania eksperymentalne nad obniżeniem prekursorów UPD wraz z omówieniem uzyskanych efektów technologicznych

Oznaczanie zanieczyszczeń wody stanowi skomplikowany problem analityczny. Związane jest to m.in. z bardzo niskim poziomem stężeń zanieczyszczeń w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi. W matrycy wodnej rozpuszczonych jest wiele rodzajów substancji. W chemii analitycznej do oznaczania związków THM wykorzystywane są takie metody instrumentalne jak chromatografia gazowa z detektorem wychwytu elektronów (GC – ECD) oraz chromatografia gazowa z detektorem spektrometrii mas (GC – MS). Wyniki badań UPD wykorzystywane w niniejszych pracach badawczych wykonywane były przez akredytowane Laboratorium badawcze Aquanet w Poznaniu metodą zgodną z normą PN-EN ISO 15680:2008 *Oznaczanie metodą chromatografii gazowej niektórych monocyklicznych węglowodorów aromatycznych, naftalenu i kilku związków chlorowanych z zastosowaniem techniki purge-and-trap z desorpcją termiczną*.

Możliwości modernizacji i rozbudowy istniejącego ciągu technologicznego przeanalizowano podczas konsultacji pod kątem technicznym, technologicznym i ekonomicznym. Rozważono zmianę lub dołożenie dezynfektanta – np. dwutlenku chloru, w celu stworzenie tzw. multibarierowej ochrony technologicznej wody. Ponieważ dwutlenek chloru generowałby dodatkowe produkty uboczne dezynfekcji w związku z tym to rozwiązanie uznano za nieprzydatne. Kolejnymi analizowanymi rozwiązaniami były modernizację układu technologicznego uzdatniania wody uwzględniające procesy wykorzystania pylistego węgla aktywnego dodawanego do wody przed filtracją, lamp UV oraz procesy nanofiltracji, jak również zastosowanie złoża biologicznie aktywnych filtrów węglowych, które powodują usuwanie z wody biodegradowalnej frakcji węgla organicznego, zapewniając zmniejszenie dawek środków dezynfekujących oraz stabilność biologiczną wody wodociągowej [24,

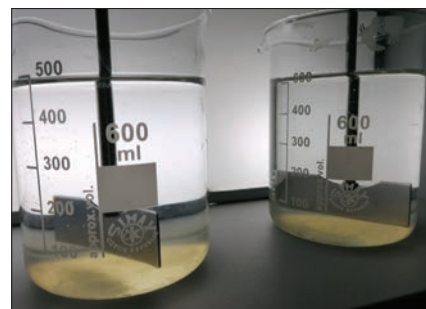
25]. W każdym z tych przypadków zarówno koszty inwestycyjne jak i eksploatacyjne uniemożliwiły zastosowanie tych rozwiązań.

Dla SZW w Środzie Wielkopolskiej modernizacja procesu koagulacji okazała się optymalnym rozwiązaniem. Aby rozważyć możliwość zastosowania koagulacji przeprowadzono badania, których celem było sprawdzenie czy proces ten pozwoli na obniżenie poziomu substancji organicznych w wodzie oraz poprawi jej barwę. W badaniach wykorzystano wstępnie zhydrolizowane koagulanty glinowe tj. • PAX XL 60 • PAX XL 10 • PAX XL 19F • PAX 18. Przeprowadzono dwie serie badań. Celem pierwszej serii było sprawdzenie skuteczności usuwania barwy oraz OWO przy zastosowaniu tych samych dawek 100 mg/l dla wytypowanych do badań czterech koagulantów.

Pobraną wodę surową ze studni trzeciorzędowej rozlano do 4 zlewek po 0,5 L każda. Następnie do każdej zlewki wprowadzono inny koagulant (rys. 4). Po procesie szybkiego mieszania z prędkością obrotową 100,0 obr/min przez 2 min, obroty zmniejszono do 25 obr/min, mieszając dalej wodę przez kolejne 20 min. Po procesie flokulacji próby wody poddano 20 minutowej sedymentacji. Po sedymentacji zdekantowano sklarowaną wodę i przeprowadzono analizy barwy i OWO (tabela 2).

Uzyskane wyniki, jak również ocena wizualna (najlepiej wyflokulowanych kłaczków osadu), pozwoliły na wytypowanie dwóch koagulantów do drugiej serii badań: PAX XL 60 oraz PAX XL 19F.

W drugiej serii badań pobraną wodę surową ze studni trzeciorzędowej również rozlano do 4 zlewek po 0,5 L każda. Następnie do dwóch zlewek wprowadzono koagulant PAX XL 60 oraz PAX XL 19H w dwóch dawkach 50 mg/l oraz 150 mg/l. Proces koagulacji obejmował 2 minutowe szybkie



Rys. 4. Test zlewkowy – widok wyflokulowanych kłaczków z zaadsorbowanymi związkami węgla organicznego

Tabela 2. Efektywność koagulacji przy dawce koagulantu 100 mg/l

Seria I	Woda surowa	Dawka koagulantu 100 mg/l			
		PAX XL 60	PAX XL 10	PAX XL 19 F	PAX 18
Barwa mg/l	10	5	5	2,5	2,5
OWO mg/l	5,9	4,5	4,3	2,6	5,4

Tabela 3. Efektywność koagulacji przy dawce koagulantu 50 i 150 mg/l

Seria II	Woda surowa	Dawka koagulantu 50 mg/l		Dawka koagulantu 150 mg/l	
		PAX XL 60	PAX XL 19 F	PAX XL 60	PAX 19 F
Barwa mg/l	10	2,5	2,5	5	2,5
OWO mg/l	5,9	4	2,5	3,9	3,3

mieszanie z prędkością obrotową 100,0 obr./min oraz 20-minutową flokulację z prędkością 25 obr./min. Po 20-minutowej sedymentacji w sklarowanej wodzie przeprowadzono analizę barwy i OWO (tabela 3).

Z przeprowadzonych badań jednoznacznie wynikało, iż koagulacja pozwala efektywnie usunąć barwę oraz OWO z wody. Najlepsze efekty redukcji 75% dla barwy oraz 58% dla OWO uzyskano dla PAX XL 19 F o dawce 50 mg/l.

Przeprowadzone badania wykazały zasadność wdrożenia do układu technologicznego procesu koagulacji. W przypadku dozowania koagulantu przed złożami filtracyjnymi należy stosować mniejsze dawki niż w koagulacji objętościowej, dzięki wytworzeniu się warstwy filtracyjnej z wyflokulowanych kłaczków koagulantu. Zastosowanie procesu koagulacji kontaktowej w złożu filtracyjnym na SUW w Środzie Wielkopolskiej nie wiąże się z koniecznością przebudowy układu technologicznego. Koszty inwestycyjne ograniczają się jedynie do zakupienia systemu dozowania koagulantu wraz z automatyką i zbiornikiem magazynowania koagulantu oraz wymiany części złoża filtracyjnego. Przeprowadzona analiza ekonomiczna kosztów dawkowania koagulantu wykazała niski wzrost kosztów produkcji wody w zakresie od 2 do 4 g/m³ (w zależności od wielkości dawki koagulantu). Rozwiązanie to gwarantuje obniżenie OWO w uzdatnionej wodzie, a co za tym idzie zmniejsza potencjał generowanych THM.

Wnioski

Wdrożenie w MPECWiK Sp. z o. o. w Środzie Wielkopolskiej systemowego podejścia do bezpieczeństwa wody opartego na ocenie ryzyka i zarządzaniu ryzykiem umożliwiło zidentyfikowanie zagrożenia jakim jest występowanie UPD tj. podwyższonych stężeń chloroformu w wodzie pobieranej z trzeciorzędowych warstw wodonośnych. W trakcie prowadzonych badań stwierdzono, że zagrożenie takie nie występuje w wodzie uzdatnionej pobieranej z warstw czwartorzędowych, co jest skorelowane z zawartością materii organicznej.

Stężenie OWO w wodzie w SZW w Środzie Wielkopolskiej jest na dość wysokim poziomie co związane jest z występowaniem nieakceptowalnego ryzyka wtórnego zanieczyszczenia wody UPD w trakcie jej transportu do konsumenta.

Przeprowadzone badania jednoznacznie wykazały, iż jednoczesne ograniczanie chlorowania wody oraz zastosowanie koagulacji w celu zmniejszenia stężenia OWO w wodzie będzie powodowało zmniejszenie poziomu generowanych THM oraz poprawi barwę wody w kranie u konsumenta. Potencjalne korzyści i wady zastosowania zarówno koagulacji jak i ograniczania chlorowania należy obserwować w dłuższym czasie, uwzględniając m.in. stagnację wody w sieci wodociągowej, sezonowość i wiele innych czynników, które pozwolą osiągnąć akceptowalne stężenia UPD z jednoczesnym zagwarantowaniem stabilności mikrobiologicznej wody dostarczonej konsumentom.

Przeprowadzone wstępne badania BRWO wskazują, że woda pobierana zarówno z warstw trzeciorzędowych jak i czwartorzędowych nie ma tendencji do zanieczyszczenia mikrobiologicznego. Oznacza to, że woda surowa i uzdatniona nie ma związków umożliwiających rozwój bakterii. Niemniej jednak przedsiębiorstwo wodociągowe widzi konieczność prowadzenia dalszych badań celem określenia szczegółowych warunków stosowania koagulacji w poszczególnych stacjach uzdatniania wody w Średzkiem SZW, jak również optymalizacji stosowania dezynfekcji wody. Dostarczanie mieszkańcom miasta i gminy Środa Wielkopolska wody o odpowiednim ciśnieniu, w odpowiedniej ilości i co najważniejsze bezpiecznej dla zdrowia jest najważniejszym celem Miejskiego Przedsiębiorstwa Energetyki Ciepłej, Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o. o.

LITERATURA

- [1] Wytyczne dotyczące jakości wody do picia – wydanie czwarte, Wydawnictwo Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”. Bydgoszcz 2014 r., str. 51
- [2] ZIMOCH I.: Niezawodnościowa interpretacja wyników monitoringu jakości wody w sieci wodociągowej. *Ochrona Środowiska* 2009, Vol 31. Nr 4 s. 51-55.
- [3] ŁOMOTOWSKI J.: Jak oceniać stabilność chemiczną i biologiczną wody w systemach wodociągowych. *INSTAL* 2018, nr 1, s. 37-40.
- [4] KOWAL A.L., ŚWIDERSKA-BRÓŹ M., *Oczyszczanie wody*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [5] ZIMOCH I., PACIEJ J.: Spatial risk assessment of drinking water contamination by nitrates from agricultural areas in the Silesia province. *Desalination and Water Treatment* 2016, Vol. 57 No 3, pp. 1084-1097.
- [6] MONTGOMERY J.M.: *Water treatment principles and design*. A Wiley and Sons, Inc., Intersci. Publ., New York 1985.
- [7] HOFF J.C., Geldreich E.E.: Comparison of the biocidal efficiency of alternative disinfectants.

- [8] WIENBERG H.: Disinfection by-products in drinking water: the analytical challenge, *Analytical Chemistry* 1999, Vol 71, pp. 801A-808A. E.T. Urbansky, M.L. Magnuson, Analyzing drinking water for disinfection by-products, *Analytical Chemistry* 2002, Vol 74, No. 9, pp. 260A.
- [9] OUYANG Y.: Simulating dynamic load of naturally occurring TOC from watershed into a river, *Water Research* 2003, Vol. 37, pp. 823 – 832.
- [10] PIETRZYK A., PAPICIK D.: Materia organiczna w wodach naturalnych – formy występowania i metody oznaczania, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA*, t. XXXIII, Z. 63 (2/1/16), kwiecień-czerwiec 2016, s. 241-252.
- [11] ZIMOCH I., STOLARCZYK A.: Raman spectroscopy in estimating THM formation potential in water pipe network. *Environment Protection Engineering*, 2010, Vol. 36 No 1), pp. 55-64.
- [12] ZIMOCH I., BARTKIEWICZ E.: Analysis of disinfectant decay in a water supply system based on mathematical model. *Desalination and Water Treatment*, 2018, Vol 134, pp. 272-280
- [13] NAWROCKI J. Biłozor S.: *Uzdatnianie wody, procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [14] KENNETH P.: *Carcinogens in Drinking Water: The Epidemiologic Evidence*, Reviews on Environmental Health, 2010, Vol. 25, No. 1, 9-16.
- [15] MCGREGOR D.B.: *Genotoxic Chemicals in the Human Environment: Their Identification and Interaction, Methods for Assessing the Effects of Mixtures of Chemicals*, 1987, 523-542.
- [16] ZBIĘC E., DOJLIDO J.R.: *Uboczne produkty dezynfekcji wody. Ochrona Środowiska* 1999, nr 3, s. 37-44.
- [17] Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. *OJ L 435*, 23.12.2020, p. 1-62
- [18] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dn. 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. (Dz.U.2017, poz.2294).
- [19] National Center for Environmental Research, Final Report: „Reagentless Field-Usable Fixed – Site and Portable Analyzer for Trihalomethane (THM) Concentrations in Drinking Water”, 2009,
- [20] ZDANOWICZ A., OLEJNIK A., OBIERAK I. Wdrażanie planów bezpieczeństwa wodnego w MPWiK w Warszawie. *INSTAL* 2018, nr 3, s.22-26.
- [21] ZIMOCH I., MULIK B.: Dyrektywa w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi – implementacja. *INSTAL* 2020, nr 7, s.30-33 DOI: 10.36119/15.2020.7.5
- [22] MROCZKO D., ZIMOCH I.: The use of zeta potential measurement as a control tool of surface water coagulation. *Journal of Ecological Engineering* 2020, Vol. 21 Mi 3, pp. 237-242.
- [23] OLEJNIK A., NAWROCKI J.: Czy woda wodociągowa musi być dezynfekowana chemicznie, *Ochrona Środowiska* 2013, Vol. 35, nr 4, s.
- [24] ZIMOCH I., SZOSTAK A.: Ocena pracy filtrów węglowych eksploatowanych w zakładzie produkcji wody Goczałkowice, w Węgiel aktywny w ochronie środowiska i przemysle, Redakcja Z. Dębowski, Politechnika Częstochowska 2006, Tom 59, ISSN 1234-9895, s.247-258.
- [25] LASOCKA-GOMUŁA I., i in.: Uzuwanie związków organicznych podczas filtracji wody przez złoża biologicznie aktywne filtrów węglowych – badania w skali technicznej. *Technologia Wody* 2018, nr 5 (61) s. 8-15.