

Izabela Zimoch, Ewelina Bartkiewicz

Modelowanie symulacyjne zmian zawartości chloru w wodzie wodociągowej w warunkach eksploatacyjnych wybranego systemu dystrybucji

Z uwagi na starzejącą się infrastrukturę oraz niestabilne źródła wody, zapewnienie dostępu do bezpiecznej wody przeznaczonej do spożycia stanowi poważne wyzwanie, jakie stoi przed przedsiębiorstwami wodociągowymi. Niewłaściwa eksploatacja sieci wodociągowej sprzyja procesom fizycznym, chemicznym i biologicznym powodującym degradację jakości wody. W systemach wodociągowych transport masy i reakcje chemiczne zachodzące w strumieniu transportowanej wody są ściśle powiązane z parametrami hydraulicznymi eksploatacji sieci wodociągowej [1, 2]. Zwiększenie tak zwanego wieku wody, będące skutkiem między innymi jej mniejszego poboru, może powodować problemy związane z powstawaniem biofilmu w przewodach wodociągowych na skutek nadmiernego namnażania się mikroorganizmów oraz nieprawidłowego rozkładu środka dezynfekcyjnego w strumieniu wody, jak również może skutkować złym smakiem i zapachem wody [3]. Procesem zabezpieczającym system dystrybucji wody przed wtórnym zanieczyszczeniem jest niewątpliwie dezynfekcja, przy czym obecność chloru wolnego w wodzie zapobiega jej mikrobiologicznemu skażeniu. Z tego względu utrzymywanie odpowiedniej ilości chloru wolnego w wodzie u odbiorców jest jednym z najważniejszych kryteriów zapewniających dobrą jakość wody. Niestety zbyt duże dawki chloru wprowadzanego do wody powodują powstawanie ubocznych produktów dezynfekcji [4–7]. W Polsce dopuszczalna zawartość chloru wolnego w wodzie u konsumentów, określona w rozporządzeniu Ministra Zdrowia [8], wynosi $0,3 \text{ mgCl}_2/\text{dm}^3$. Chlor w wodzie wodociągowej reaguje z wieloma obecnymi w niej związkami, a prędkość jego zaniku zależy od takich czynników, jak zawartość związków organicznych i nieorganicznych oraz produktów korozji w wodzie, temperatura i pH, wzrost biofilmu, prędkość przepływu wody oraz materiał, z jakiego wykonano przewody [9–11].

Modelowanie matematyczne zarówno hydraulicznej pracy sieci wodociągowej, jak i zmian jakości wody w systemie dystrybucji jest zadaniem złożonym i trudnym do rozwiązania. Wymaga też interdyscyplinarnego podejścia do wielu czynników wpływających na pracę całego systemu dystrybucji wody. Literatura przedmiotu [5–14] dowodzi, że mimo złożoności tych zagadnień, modele prognostyczne sieci wodociągowej, w odniesieniu do parametrów hydraulicznych, są dobrze rozpoznane i znanych jest wiele

pakietów symulacyjnych (Epanet, Piccolo, Mike Net, WaterCad), które można wykorzystać w procesach modelowania [9, 10, 12–14]. Niewątpliwie – pozyskana na podstawie modelowania symulacyjnego – wiedza o rozplywie wody w sieci, wieku wody oraz ilości chloru wolnego pozwoli na opracowanie strategii kontroli i interwencji operacyjnych, mających na celu poprawę jakości wody w systemach wodociągowych oraz zmniejszenie ryzyka błędnie podejmowanych decyzji przez operatora danego systemu [15].

Modele symulacyjne szybkości zaniku chloru

Podstawą do modelowania zmian jakości wody w systemie dystrybucji są wyniki symulacji hydraulicznych, obejmujących natężenia przepływu oraz wysokości ciśnienia i wypełnienia zbiorników. Modele hydrauliczne mogą być opisane liniowymi i nieliniowymi równaniami algebraicznymi [12, 13]. Aby sformułować równania modelu, konieczne jest określenie struktury przestrzennej sieci wodociągowej, która składa się z węzłów i odcinków. Do obiektów węzłowych należą punkty łączenia rur i punkty poboru wody oraz zbiorniki, zaś do obiektów liniowych zalicza się przewody wodociągowe, zawory i pompy. W każdej grupie obiektów otrzymuje się różne zbiory wyników – w przypadku odcinków są to parametry związane z transportem wody, natomiast w przypadku węzłów między innymi wskaźniki jakościowe i wysokość ciśnienia.

Modele zaniku chloru w masie transportowanej wody symulują zawartość chloru wolnego w całym systemie dystrybucji. Modele te, w celu obliczenia ilości chloru wolnego w węzłach sieci wodociągowej, wykorzystują równanie zachowania masy z warunkami początkowymi i brzegowymi w postaci [9, 10, 16, 17]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial c_i}{\partial x_i} - K_i c_i \quad (1)$$

w którym:

i – odcinek sieci

c_i – zawartość chloru wolnego, $\text{mgCl}_2/\text{dm}^3$

x_i – odległość odcinka od punktu początkowego, m

u_i – prędkość przepływu wody, m/s

K_i – stała szybkości zaniku chloru, 1/h

Wartość stałej K_i zależy od jakości wody oraz stanu technicznego sieci wodociągowej, co ujmuje równanie [16]:

$$K_i = k_b + \frac{k_w k_f}{r_{hi}(k_w + k_f)} \quad (2)$$

w którym:

k_b – stała reakcji zaniku chloru w strumieniu wody, 1/h
 k_w – współczynnik reakcji w strefie przyściennej (reakcja pierwszego rzędu), m/h
 r_{hi} – promień hydrauliczny, m
 k_f – współczynnik transportu masy, m/h

Równanie (2) można zapisać w następującej postaci uproszczonej:

$$K_i = k_b + k'_w \quad (3)$$

w którym:

k'_w – stała szybkości reakcji w warstwie przyściennej, 1/h
 Wartości stałej k_b zależą od jakości ujmowanej wody oraz technologii jej oczyszczania, a także od pory roku, natomiast wartości stałej k_w zależne są od rodzaju materiału rurociągów oraz od ilości i rodzaju osadów w rurociągach (produkty korozji, biofilm) [18].

Charakterystyka przedmiotu badań

Przedmiotem badań był wydzielony podsystem sieci wodociągowej zaopatrujący w wodę kilka aglomeracji miejskich i strefy przemysłowe województwa śląskiego. Analizowany podsystem składa się ze stacji uzdatniania wody (A), przepompowni (B) oraz z dwóch kompleksów zbiorników wyrównawczo-zapaszowych (C i D). Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy badanego podsystemu wraz ze średniodobowym zapotrzebowaniem na wodę, prędkością i natężeniem przepływu w poszczególnych odcinkach sieci oraz ilością wody kierowanej do sieci. Stacja uzdatniania A ujmuje wodę powierzchniową z beskidzkiej części zlewni Soły. Technologia oczyszczania wody obejmuje koagulację siarczanem glinu, filtrację kontaktową i dezynfekcję chlorem gazowym. Średnia dobową ilość wody kierowanej do sieci wynosi około 50 tys. m³, natomiast zapotrzebowanie na wodę podsystemu, z którego korzysta ponad 260 tys. osób, wynosi 40,3 tys. m³/d. Woda ze stacji A transportowana jest grawitacyjnie do pompowni B oddalonej o około 30 km, a następnie do zbiorników C (odległość około 14 km), które zasilane są dodatkowo z dwóch niezależnych stacji oczyszczania również ujmujących wody powierzchniowe. Po wymieszaniu dopływających strumieni wody w zbiornikach C, woda jest dalej transportowana w czterech kierunkach, między innymi do zbiorników D (odległość około 15 km).

Sieć wodociągowa badanego podsystemu zbudowana jest z przewodów o średnicach 600÷1500 mm, przy czym największe przekroje rurociągów znajdują się między stacją uzdatniania A i zbiornikami C, zaś najmniejsze na końcówkach podsystemu. Rurociągi wykonane są głównie ze stali, które stanowią 55% całkowitej długości podsystemu, natomiast pozostałe 45% to rurociągi żelbetowe. Ze względu na duże przekroje przewodów i małe natężenie

przepływu wody w podsystemie, występuje duże zróżnicowanie prędkości przepływu – od 0,07 m/s w końcówkach stref zasilania do 0,34 m/s w obszarze zasilania pomiędzy pompownią B i zbiornikami C. Badania przeprowadzono w 2017 r., z którego zgromadzono dane dotyczące dobowej ilości wody wprowadzanej do sieci, zapotrzebowania na wodę, dawek chloru oraz zmienności parametrów hydraulicznych pracy podsystemu dystrybucji wody (przepływ i ciśnienie).

Z uwagi na duże odległości występujące w analizowanym podsystemie, w celu zapewnienia jakości mikrobiologicznej woda jest dochlorowywana w przepompowni B oraz w zbiornikach C i D podchlorynem sodu. Dodatkowa dezynfekcja jest prowadzona w taki sposób, aby utrzymać założoną ilość chloru wolnego w strumieniu wody za punktem dawkowania. W przypadku poszczególnych obiektów zawartość chloru wolnego wynosiła:

- stacja uzdatniania wody A: 0,26 mgCl₂/dm³,
- pompownia B: 0,18 mgCl₂/dm³,
- zbiorniki C: 0,35 mgCl₂/dm³,
- zbiorniki D: 0,20 mgCl₂/dm³.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe statystyki charakteryzujące zmienność zawartości chloru wolnego w strumieniu wody za punktem dochlorowywania w 2017 r.

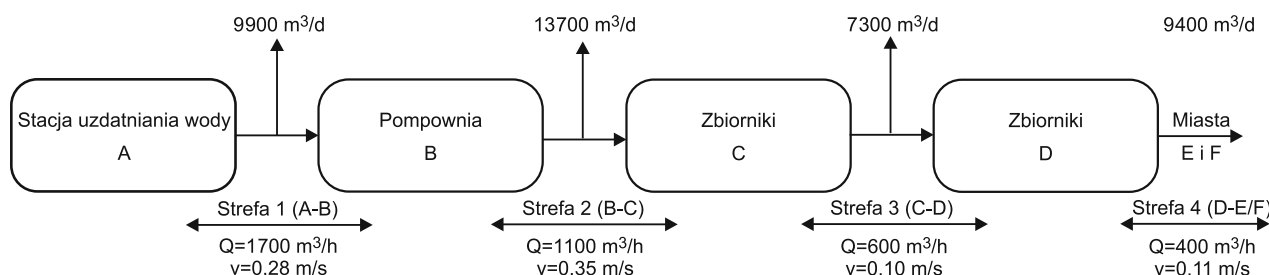
Tabela 1. Statystyki opisowe zawartości chloru wolnego w wybranych punktach systemu dystrybucji wody
 Table 1. Descriptive statistics of free residual chlorine concentration in selected points of the water distribution system

Statystyka	Zawartość chloru wolnego, mgCl ₂ /dm ³			
	A*	B**	C**	D**
Średnia	0,26	0,18	0,35	0,20
Minimum	0,10	0,02	0,18	0,09
Maksimum	0,40	0,28	0,50	0,37
Odchylenie standardowe	0,06	0,07	0,08	0,06

*dezynfekcja chlorem gazowym, **dezynfekcja podchlorynem sodu

Metody badań

W badaniach wykorzystano model hydrauliczny sieci wodociągowej utworzony w programie Epanet 2.0. Model ten zbudowano na podstawie średnich wartości zapotrzebowania na wodę w 2017 r., a podczas jego kalibracji i walidacji uzyskano dużą zgodność wartości szacowanych z rzeczywistymi – w przypadku natężenia przepływu współczynnik korelacji (r) osiągnął wartość 0,987, a ciśnienia – 0,986. Oszacowane wartości zweryfikowano również za pomocą współczynnika determinacji (R²), który wynosił



Rys. 1. Schemat blokowy podsystemu wodociągowego
 Fig. 1. Block diagram of water supply subsystem

odpowiednio 0,973 (natężenie przepływu) i 0,971 (ciśnienie). Model hydrauliczny został następnie wykorzystany do budowy modelu zaniku chloru w strumieniu transportowanej wody. Na jego potrzeby przeprowadzono testy laboratoryjne mające na celu wyznaczenie wartości stałej szybkości zaniku chloru (k_b) w strumieniu wody. Testy wykonano metodą butelkową z użyciem naczyń z ciemnego szkła o pojemności 100 cm³ z doszlifowanym korkiem. Aby wyeliminować wpływ temperatury na szybkość zaniku chloru próbki wody przechowywano w stałej temperaturze 15°C. W wodzie pobranej do testów oznaczono także temperaturę, pH, mętność, barwę, zawartość żelaza i manganu, glinu, azotu amonowego, azotanów(III) i azotanów(V), przewodność właściwą, zawartość tlenu rozpuszczonego, związki organiczne (OWO, utlenialność, absorbancja w UV-254 nm i UV-272 nm), a także wskaźniki mikrobiologiczne (ogólna liczba bakterii po 48 h i po 72 h, bakterie grupy coli, *Escherichia coli* oraz *Clostridium perfringens*). W eksperymencie użyto taki środek dezynfekcyjny, jaki był stosowany w układzie rzeczywistym (tab. 1). W pierwszym etapie wyznaczono zapotrzebowanie wody zasilającej układ na chlor, które wynosiło 0,94 mgCl₂/dm³ i na tej podstawie w eksperymencie zastosowano dawkę 2 mgCl₂/dm³. W tym celu do 50 butelek wypełnionych całkowicie badaną wodą wprowadzono środek dezynfekcyjny pod jej powierzchnię. Następnie w poszczególnych próbkach w wyznaczonych odstępach czasu oznaczono zawartość chloru wolnego metodą spektrofotometryczną (PN-EN ISO 7393-2:2011). Przez pierwsze 30 min oznaczenie chloru pozostałego wykonywano co 10 min, a przez kolejne 30 min co 15 min. Od pierwszej do czwartej godziny trwania eksperymentu próbki pobierano w odstępach 30-min., następny pobór nastąpił w szóstej godzinie trwania eksperymentu, a przez kolejne 18 godzin chlor był oznaczany w odstępach 6-godz. Następnie, aż do 96. godziny eksperymentu, próbki pobierano co 12 godz., a w ostatnich trzech dobach jego trwania co 24 godz. Łącznie eksperyment trwał 7 d, w czasie którego pobrano 25 próbek wody, w których oznaczono chlor pozostały i temperaturę. Wszystkie analizy przeprowadzono w dwóch powtórzeniach.

Próbki wody zostały pobrane w miejscach jej dezynfekcji, dzieląc tym samym analizowany podsystem na cztery strefy: 1 – od stacji uzdatniania wody A do pompowni B, 2 – od pompowni B do zbiorników C, 3 – od zbiorników C do zbiorników D oraz 4 – od zbiorników D do miast E i F. Wartości współczynnika k_b zostały wyznaczone z równania:

$$\ln(C_t/C_0) = -k_b t \quad (4)$$

w którym:

C_t – zawartość chloru wolnego po czasie t , mgCl₂/dm³

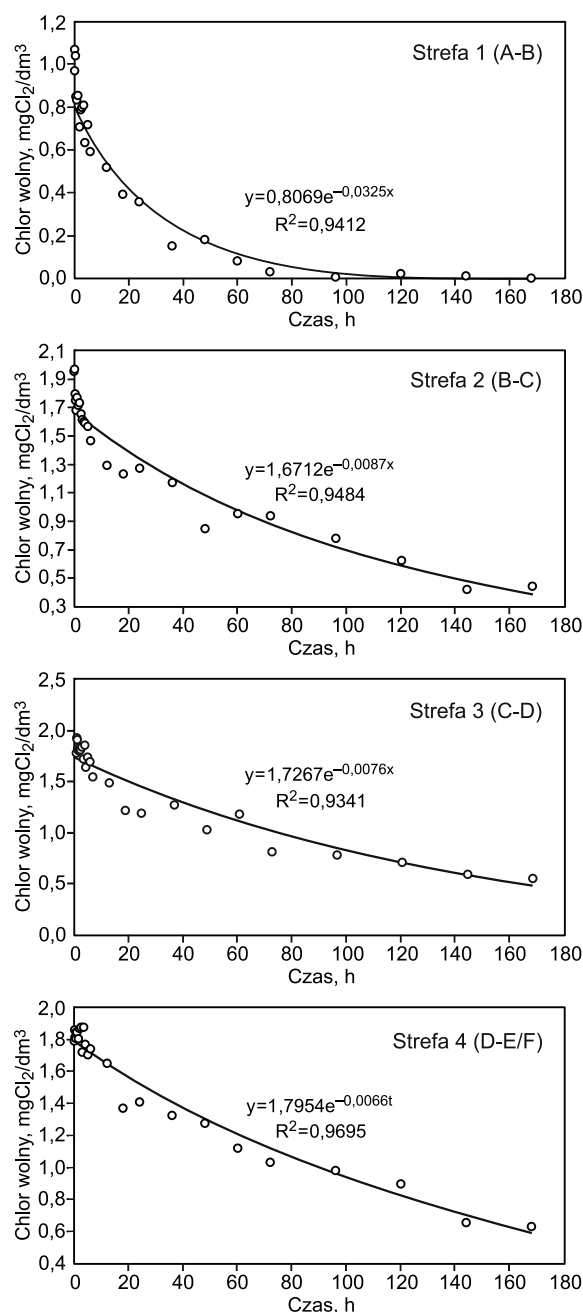
C_0 – zawartość początkowa chloru wolnego, mgCl₂/dm³

k_b – stała szybkości zaniku chloru w strumieniu wody, 1/h

t – czas, h

Omówienie wyników

Wyniki badań zmian ilości chloru w czasie przedstawiono na rysunku 2. Wyznaczone funkcje zaniku chloru charakteryzowały się dużą wartością współczynnika R^2 , z przedziału od 0,9341 (strefa od zbiorników C do zbiorników D) do 0,9695 (strefa od zbiorników D do miast E i F). W każdej ze stref wyznaczono wartości współczynnika kinetyki zaniku chloru w strumieniu wody w przedziałach czasu odpowiadających rzeczywistemu przepływowi wody



Rys.2. Zmiana zawartości chloru wolnego w czasie w strefach badawczych systemu dystrybucji wody

Fig. 2. Changes in the free residual chlorine concentration in time in research zones

w sieci wodociągowej, natomiast wartości współczynnika przyściennego zaniku chloru wyznaczono metodą prób i błędów, dostosowując wyniki szacowania do pomiarów ilości chloru wolnego w punktach kontrolnych (tab. 2).

Tabela 2. Zestawienie wartości współczynników k_b i k_w w strefach badawczych systemu dystrybucji wody
Table. 2. Comparison of k_b and k_w coefficient values in research zones

Strefa	k_b , 1/h	k_w , 1/h
1 (A-B)	-0,89	-0,48
2 (B-C)	-0,34	-0,09
3 (C-D)	-0,05	-0,26
4 (D-E/F)	-0,07	-5,00

Otrzymany model symulacji zmian ilości chloru w wodzie utworzony w programie Epanet 2.0 charakteryzował się wysoką dokładnością prognozy ($r=0,976$, $R^2=0,954$) i posłużył do szacowania jakości wody według trzech scenariuszy analitycznych obejmujących:

- I: minimalny pobór wody w rozpatrywanej strefie badań, stanowiący 70% średniego zapotrzebowania na wodę,
- II: średni pobór wody w rozpatrywanej strefie badań,
- III: maksymalny pobór wody w rozpatrywanej strefie badań, stanowiący 125% średniego zapotrzebowania na wodę.

Analizowane scenariusze cechowały się odmiennymi wartościami natężeń i prędkości przepływu wody. Prędkości otrzymane według scenariusza I były mniejsze o 23÷50% w stosunku do modelu zakładającego wartości średnie (scenariusz II), podczas gdy według scenariusza III prędkości przepływu wody w poszczególnych odcinkach sieci były większe o 36÷146%. Podczas symulacji jakości wody zachowano stężenia chloru wolnego na wyjściu z obiektów zgodnie z utrzymywanym trendem (wartości średnie – tabela 1). Wyniki przeprowadzonych symulacji zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki symulacji zawartości chloru wolnego w zmiennych warunkach pracy systemu dystrybucji wody
Table 3. Simulation results of free residual chlorine concentration for different water distribution system operating conditions

Strefa	Punkt	Zawartość chloru wolnego, mgCl ₂ /dm ³		
		średnia	minimum	maksimum
1 (A-B)	W1	0,16	0,11	0,22
	T1	0,10	0,07	0,17
	M1	0,09	0,05	0,15
2 (B-C)	T2	0,18	0,18	0,18
	T3	0,16	0,15	0,17
	C	0,13	0,12	0,16
3 (C-D)	R1	0,22	0,15	0,25
	D	0,16	0,00	0,20
4 (D-E/F)	Z1	0,05	0,03	0,06

Tabela 4. Zmiana ilości chloru wolnego w wodzie w zależności od prędkości przepływu i odległości od punktu początkowego
Table 4. Variation in the free residual chlorine concentrations depending on flow velocity and distance from the initial point

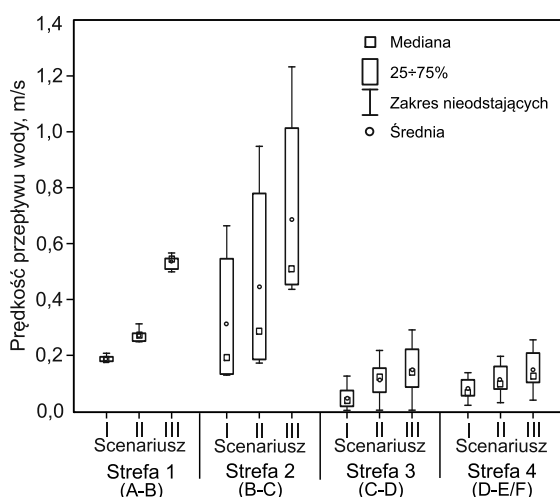
Odcinek	L, m	Scenariusz I		Scenariusz II		Scenariusz III	
		v, m/s	ΔC, mgCl ₂ /dm ³	v, m/s	ΔC, mgCl ₂ /dm ³	v, m/s	ΔC, mgCl ₂ /dm ³
A-W1	8500	0,19	0,19	0,28	0,14	0,55	0,08
W1-T1	4900	0,19	0,04	0,28	0,06	0,55	0,05
T1-M1	2800	0,20	0,02	0,29	0,01	0,57	0,02
B-T2	60	0,46	0,00	0,60	0,00	0,78	0,00
B-T3	1000	0,16	0,03	0,24	0,02	0,54	0,01
T3-C	10800	0,14	0,03	0,20	0,03	0,49	0,01
C-R1	18500	0,06	0,19	0,12	0,12	0,17	0,09
R1-D	6000	0,05	0,15	0,10	0,06	0,15	0,05
D-Z1	5500	0,07	0,17	0,11	0,15	0,15	0,14

Uzyskane wyniki symulacji przeanalizowano pod względem zależności szybkości zaniku chloru od prędkości przepływu wody. W tabeli 4 zestawiono rezultaty analiz zmiany ilości chloru wolnego, prędkości przepływu i odległości punktów kontrolnych. Na podstawie tych danych oraz wartości współczynników zaniku chloru k_b i k_w (tab. 2) zbudowano model statystyczny, w którym zmienna zależna – zmiana ilości chloru wolnego (ΔC) – została opisana funkcją liniową zmiennych niezależnych, takich jak prędkość przepływu wody w odcinku sieci wodociągowej (v), odległość od punktu zasilania (L) oraz współczynnik szybkości zaniku chloru w strumieniu transportowanej wody (k_b). Model ten został zbudowany za pomocą modelu regresji wielorakiej w oprogramowaniu Statistica 13. Postać modelu wyrażono formułą:

$$\Delta C = 0,050193 + 0,00000L - 0,133059v - 0,039172k_b \quad (5)$$

Otrzymany model statystyczny zmian ilości chloru w transportowanej wodzie charakteryzował się współczynnikiem korelacji $r=0,748$ oraz współczynnikiem determinacji $R^2=0,5602$. Błąd estymacji modelu wynosił 0,4461. Uzyskany model był istotny statystycznie na poziomie $\alpha=0,05$ ($p=0,0024$).

Przeprowadzone analizy szybkości zaniku chloru w systemie dystrybucji wody w zmiennych warunkach hydraulicznych wskazały na związek między prędkością przepływu wody a szybkością zaniku środka dezynfekcyjnego. Zwiększenie prędkości przepływu wody (scenariusz III) spowodowało mniejszy ubytek chloru, natomiast przy minimalnym zapotrzebowaniu na wodę (scenariusz I) wystąpiła zależność odwrotna. Najmniejsze różnice między zmianami ilości chloru wolnego w analizowanych przypadkach otrzymano w strefie 3, która była zasilana z pompowni, dzięki czemu utrzymywana była wysoka prędkość przepływu wody w sieci wodociągowej (rys. 3). Przy prędkości powyżej 0,40 m/s otrzymano najmniejsze zmiany zawartości chloru wolnego w wodzie. Z równania (5) wynika, że zmiana ilości chloru wolnego w znacznej mierze zależała od prędkości przepływu wody oraz od wartości współczynnika k_b . Opracowany model statystyczny szacowania zmian zawartości chloru w systemie dystrybucji wody pozwolił na wyznaczenie optymalnej prędkości przepływu wody, zapewniającej najmniejsze zużycie środka dezynfekcyjnego (tab. 5).



Rys. 3. Zmienność prędkości przepływu wody w strefach badawczych systemu dystrybucji wody według trzech scenariuszy analitycznych

Fig. 3. Water flow rate variability in research zones according to three analytical scenarios

Tabela 5. Wyniki modelu statystycznego
Table 5. Statistical model results

Strefa	v, m/s	ΔC , mgCl ₂ /dm ³
1 (A-B)	0,62	0,012
2 (B-C)	0,50	0,010
3 (C-D)	0,81	0,011
4 (D-E/F)	0,89	0,011

Przeprowadzona analiza wykazała również, że zwiększenie prędkości przepływu wody w sieci o około 50% w strefach 1 i 2 oraz o około 120% w strefach 3 i 4 pozwoliłoby na kilkukrotne zmniejszenie zużycia chloru.

Podsumowanie

Opracowany i skalibrowany model jakościowy wydzielonego systemu dystrybucji wody aglomeracji śląskiej stanowi użyteczne narzędzie analityczne, pozwalające na badanie symulowanych zdarzeń eksploatacyjnych. Model ten – przez uwzględnienie horyzontu czasowego symulacji oraz jej kroku – umożliwia badanie systemu wodociągowego w warunkach dynamicznych, najbardziej zbliżonych do rzeczywistości. Model ten pozwala także na określenie procedur dezynfekcji wody w rozległym systemie wodociągowym, zapewniających stabilność mikrobiologiczną wody. Wykorzystanie wyników analiz komputerowych funkcjonowania systemu dystrybucji wody zarówno w warunkach minimalnego, jak i maksymalnego zapotrzebowania na wodę daje możliwość podejmowania kroków minimalizujących skutki nieoczekiwanych zdarzeń losowych (całkowity zanik chloru wolnego w transportowanej wodzie), a co za tym idzie – zmniejsza ryzyko, jakie w tym zakresie ponoszą przedsiębiorstwa wodociągowe.

Przeprowadzone badania wykazały, że czas kontaktu chloru z wodą, który zależy od prędkości jej przepływu w sieci, istotnie wpływa na zawartość chloru wolnego w transportowanej wodzie, przy czym korzystne warunki hydrauliczne, z uwagi na jakość wody, występują przy prędkości jej przepływu powyżej 0,50 m/s.

Niniejszy artykuł został przygotowany między innymi w ramach prac statutowych BK-259/RIE-4/2018.

LITERATURA

1. A. JACHIMOWSKI: Factors affecting water quality in a water supply network. *Journal of Ecological Engineering* 2019, Vol. 20, No. 5, pp. 1–6
2. I. ZIMOCH, E. ŁOBOS: Comprehensive interpretation of safety of wide water supply systems. *Environment Protection Engineering* 2012, Vol. 38, No. 3, pp. 107–117.
3. Y. SHEN, C. HUANG, J. LIN, W. WU, N.J. ASHBOLT, W.T. LIU, T.H. NGUYEN: Effect of disinfectant exposure on *Legionella pneumophila* associated with simulated drinking water biofilms: Release, inactivation, and infectivity. *Environmental Science & Technology* 2017, Vol. 51, No. 4, pp. 2087–2095.
4. S.E. HRUDEY, L.C. BACKER, A.R. HUMPAGE, S.W. KRASNER, D.S. MICHAUD, L.E. MOORE: Evaluating evidence for association of human bladder cancer with drinking-water chlorination disinfection by-products. *Journal of Toxicology and Environmental Health – Part B: Critical Reviews* 2015, Vol. 18, No. 5, pp. 213–241.
5. S.E. HRUDEY, J. FAWELL: 40 years on: What do we know about drinking water disinfection by-products (DBPs) and human health? *Water Science and Technology: Water Supply* 2015, Vol. 15, pp. 667–674.
6. M. KUMARI, S.K. GUPTA, B.K. MIHRA: Multi-exposure cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in drinking water supplies – a case study of Eastern region of India. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2015, Vol. 113, pp. 433–438.
7. K.P. CANTOR: Drinking water and cancer. *Cancer Causes and Control* 1997, Vol. 8, No. 3, pp. 292–308.
8. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 7 grudnia 2017 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. *Dziennik Ustaw* 2017, poz. 2294.
9. I. ZIMOCH: Zastosowanie modelowania komputerowego do wspomagania procesu eksploatacji systemu wodociągowego. *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 3, ss. 31–35.
10. A. MUSZ, B. KOWALSKA, M.K. WIDOMSKI: Some issues concerning the problems of water quality modeling in distribution systems. *Ecological Chemistry and Engineering S* 2009, Vol. 16, No. 2, pp. 175–184.
11. D. NONO, I. BASUPI, P.T. ODIRILE, B.P. PARIDA: The effects of hydraulic performance and operation interventions on water quality: The case of Phakalane water distribution system in Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 2018, Vol. 108, pp. 48–59.
12. L.A. ROSSMAN: EPANET 2 Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati 2000, pp. 187–188.
13. K.E. LANSEY, W. EL-SHORBAGY, I. AHMED, J. ARAUJO, C.T. HAAN: Calibration assessment and data collection for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering* 2001, Vol. 127, No. 4, pp. 270–279.
14. T.M. WALSKI, D.V. CHASE, D.A. SAVIC, W. GRAYMAN, S. BECKWITH, E. KOELLE: Introduction to Water Distribution Modeling. In: *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, Bentley Institute Press, Pennsylvania 2007, pp. 76–106.
15. I. ZIMOCH, E. SZYMURA: Niezawodności operatora w szacowaniu ryzyka eksploatacji systemów przemysłowych. *Przemysł Chemiczny* 2014, vol. 93, nr 1, ss. 111–116.
16. L.A. ROSSMAN, R.M. CLARK, W.M. GRAYMAN: Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering* 1994, Vol. 120, pp. 803–820.
17. I. ZIMOCH, E. BARTKIEWICZ: Analysis of disinfectant decay in a water supply system based on mathematical model. *Desalination and Water Treatment* 2018, Vol. 134, pp. 272–280.
18. L. MONTEIRO, D. FIGUEIREDO, S. DIAS, R. FREITAS, D. COVAS, J. MENAIA, S.T. COELHO: Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. *Procedia Engineering* 2014, Vol. 70, pp. 1192–1200.

Zimoch, I., Bartkiewicz, E. Simulation Modeling of Chlorine Content Variation in Water for Different Operating Conditions of the Water Distribution System. *Ochrona Srodowiska* 2019, Vol. 41, No. 1, pp. 17–22.

Abstract: Simulation models (Epanet, Piccolo, Mike Net, WaterCad) are common analytical tools employed to evaluate various operational scenarios of water supply systems. Their use includes estimating hydraulic conditions for variable water demand in water pipe networks. Hydraulic models are also used to design changes in water quality, the scope of which largely depends on hydraulic conditions of water supplies. The paper presents the simulation results of free residual chlorine decay according to three operational scenarios for the water supply

system, including minimum, medium, and maximum water demand from year 2017. The results were used to build a statistical model of free residual chlorine concentration changes in water, considering the distance from the disinfectant dosing point, water flow velocity, and bulk chlorine decay rate. According to the constructed model, hydraulic conditions had a major impact on quality of the supplied water, while the free residual chlorine decay factor proved less significant. Favorable conditions with respect to tap water quality were noted for the water flow velocity above 0.5 m/s.

Keywords: Water supply system, water pipe network, water quality, water disinfection, free residual chlorine, water quality simulation model, predictive statistical model.