

Urszula Olsińska, Tomasz Brągiel

Wpływ sekwencyjnego napowietrzania i ozonowania na skuteczność usuwania związków żelaza i manganu z wody podziemnej

Wody podziemne często zawierają związki żelaza i manganu w ilościach przewyższających ich maksymalną dopuszczalną zawartość w wodzie przeznaczonej do spożycia, a o metodzie ich usuwania decyduje forma występowania tych metali w oczyszczanej wodzie [1–3]. W wodach podziemnych o małej zawartości związków organicznych formy występowania zarówno żelaza, jak i manganu zależą głównie od wartości potencjału redukcyjno-utleniającego (Eh) oraz pH. Przy wartości Eh około $-0,1\text{ V}$ i pH w zakresie $7,2\div 7,6$ oba metale występują w postaci związków łatwo rozpuszczalnych, przy czym w procesie hydrolizy uwalniane są jony Fe(II) [1], które są skutecznie usuwane w wyniku napowietrzania i filtracji pospiesznej, poprzedzonej sedymentacją, gdy ilość jonów żelaza w oczyszczanej wodzie przekracza 5 gFe/m^3 [4]. Jony Fe(II) są utleniane tlenem rozpuszczonym w wodzie do Fe(III) , wytrąconego w postaci koloidalnych cząstek trudno rozpuszczalnego wodorotlenku żelaza(III). Zapewnienie właściwego czasu reakcji umożliwia flokulację wytrąconych cząstek do postaci łatwo usuwalnej w złożach filtrów pospiesznych. Odmanganianie wody polega natomiast na utlenieniu jonów Mn(II) do Mn(IV) i ich wytrąceniu w postaci uwodnionego tlenku manganu(IV). Jednak hydroliza soli manganu(II) przebiega wolniej niż związków żelaza(II) [3, 5], a ponadto jony Mn(II) są skutecznie utleniane tlenem do MnO_2 dopiero w środowisku zasadowym ($\text{pH} > 9,5$) [6]. W celu poprawy skuteczności utleniania Mn(II) do Mn(IV) bez alkalizacji wody można zastosować ozon [7, 8]. W procesach oczyszczania wody z udziałem rozpuszczonego tlenu czy ozonu ważną rolę odgrywa etap filtracji. Niewłaściwie dobrane złożo filtracyjne lub wadliwa eksploatacja może powodować obniżenie stopnia usunięcia zanieczyszczeń wytrąconych w procesach napowietrzania lub ozonowania [9]. Z drugiej strony dobrze wpracowane złożo, którego ziarna pokryte są tlenkami żelaza o własnościach sorpcyjnych, zwiększa sprawność procesu odżelaziania. Podobnie wytrącony tlenek manganu(IV) wykazuje własności adsorpcyjne w stosunku do jonów Mn(II) , odgrywając rolę utleniacza jonów Mn(II) do Mn(III) utlenianych następnie

tlenem rozpuszczonym w wodzie do Mn(IV) w postaci trudno rozpuszczalnego $\text{MnO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [1].

Przedstawiona idea odżelaziania i odmanganiania wody stanowiła podstawę do opracowania koncepcji modernizacji Zakładu Produkcji Wody „Gliwice-Łabędy”. Wstępnie, w oparciu o analizę składu wody z ujęć głębinowych, założono sekwencyjne utlenianie związków żelaza i manganu. Pierwszy stopień oczyszczania wody obejmował intensywne napowietrzanie (powietrzem i gazem wylotowym z komór kontaktowych zawierającym resztkowy ozon) i filtrację pospieszną w celu odgazowania wody i usunięcia żelaza, a drugi stopień stanowiła filtracja pospieszna poprzedzona ozonowaniem w celu poprawy skuteczności procesu odmanganiania. W dalszej części pracy przeprowadzono ocenę skuteczności oczyszczania wody w wyniku zastosowania sekwencyjnego utleniania tlenem i ozonem. Ocenie poddano wyniki oczyszczania wody uzyskane po poszczególnych stopniach oraz końcową jakość wody kierowanej do systemu dystrybucji. Dodatkowo oszacowano czas potrzebny do wpracowania złoża filtracyjnego.

Charakterystyka zakładu oczyszczania wody

Badania przeprowadzono w nowym, oddanym do eksploatacji w 2014 r., zakładzie produkcji wody „Gliwice-Łabędy”, gdzie oczyszczana jest woda ujmowana z podziemnego zbiornika triasu gliwickiego, charakteryzująca się podwyższoną zawartością związków żelaza i manganu. Technologia oczyszczania wody oparta została na dwustopniowym utlenianiu i wytrącaniu związków żelaza i manganu oraz filtracji pospiesznej. Woda z ujęć głębinowych dostarczana jest do dwóch równoległych – pracujących niezależnie – ciągów technologicznych, z których każdy ma wydajność $400\text{ m}^3/\text{h}$. W pojedynczy ciąg technologiczny stacji oczyszczania wody włączone są kolejno procesy napowietrzania i filtracji I stopnia, ozonowania i filtracji II stopnia oraz naświetlanie promieniami nadfioletowymi w celu dezynfekcji. Aby zapewnić ochronę systemu dystrybucji wody przed wtórnym skażeniem mikrobiologicznym stosuje się profilaktyczną dezynfekcję końcową podchlorynem sodu, wytwarzanym na miejscu.

W każdym ciągu technologicznym proces napowietrzania jest realizowany w aeratorach (z wkładem rozdeszczającym) o średnicy $2,4\text{ m}$ i wysokości $8,0\text{ m}$. Ujmowana

Dr inż. U. Olsińska: Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Zakład Wodociągów i Kanalizacji, ul. Stanisława Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, urszula.olsinska@polsl.pl

Mgr inż. T. Brągiel: Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji sp. z o.o., ul. Rybnicka 47, 44-100 Gliwice, tomasz.bragiel@pww.gliwice.pl

woda przepływa grawitacyjnie przez aerator do zbiornika kontaktowego (o pojemności 23 m³), który w zależności od ilości oczyszczanej wody zapewnia czas reakcji równy co najmniej 3,5 min. Do aeratora doprowadzane jest również powietrze z kolumn kontaktowych systemu ozonowania, zawierające ozon resztkowy. Całkowita wydajność układu napowietrzania wynosi 3000 m³/h. Z aeratora woda jest tłoczona czterema zespołami pomp pośrednich do czterech ciśnieniowych pionowych filtrów pospiesznych, wykonanych jako dwa filtry piętrowe o średnicy 3,6 m, o łącznej powierzchni filtracyjnej (w jednym ciągu technologicznym) równej 40,7 m². Warstwę filtracyjną o wysokości około 1,3 m stanowi piasek kwarcowy o granulacji 0,8÷1,4 mm, ułożony na zwirowej warstwie podtrzymującej. Woda odprowadzana jest z filtrów za pomocą drenażu wysokooporowego rurowego z dyszami. Płukanie złożeń filtracyjnych odbywa się trójstopniowo, tj. samym powietrzem, powietrzem i wodą (równocześnie) oraz samą wodą. Instalacja umożliwia zastosowanie do płukania złożeń wody po procesie ozonowania (przy dezynfekcji filtrów – jednokrotnie w miesiacu).

Do rurociągu zbiorczego odprowadzającego wodę z filtrów I stopnia wprowadzany jest ozon za pomocą inżektora. Właściwe wymieszanie fazy gazowej i ciekłej zapewnia mieszacz statyczny, z którego oczyszczana woda przepływa do pierwszej kolumny kontaktowej. W każdej linii technologicznej pracują dwie kolumny kontaktowe połączone szeregowo, zapewniające przy maksymalnej wydajności zakładu czas kontaktu równy 10 min. Każda linia technologiczna jest wyposażona w generator ozonu o wydajności nominalnej 500 gO₃/h, współpracujący z wytwornicą tlenu. Sterowanie wydajnością ozonatorów odbywa się na podstawie pomiaru ilości ozonu pozostałego w wodzie. Z kolumn kontaktowych woda jest tłoczona zestawem czterech pomp pośrednich do filtrów II stopnia, gdzie usuwane są wytrącone związki żelaza i manganu. Filtry II stopnia gabarytowo i konstrukcyjnie są identyczne do filtrów I stopnia. Obciążenie hydrauliczne pojedynczego filtra nie przekracza wartości 9,6 m³/(m²h). Strumień objętości wody przepływającej przez złoża filtracyjne jest regulowany po stronie odpływu z filtra. Oczyszczona woda poddawana jest dezynfekcji końcowej z wykorzystaniem średniociśnieniowych lamp UV o wydajności 400 m³/h, intensywności promieniowania 400 J/m² i transmitancji T_{1cm}=90%, z chemicznym systemem czyszczenia. Mimo iż woda po procesie ozonowania i dezynfekcji promieniami nadfioletowymi nie wykazuje zapotrzebowania na chlor, to w celu jej zabezpieczenia przed wtórnym skażeniem mikrobiologicznym w systemie dystrybucji do przewodów przed zbiornikami magazynowymi wody czystej i/lub do przewodu tłoczącego wodę do sieci dawkowany jest podchloryn sodu. W zmodernizowanej stacji przewidziano również oczyszczanie i zwracanie wód popłucznych przed komory napowietrzania. Wszystkie urządzenia objęte są automatycznym systemem kontroli i sterowania.

Harmonogram i metody badań

Badania wykonano w początkowym etapie eksploatacji zakładu oczyszczania wody (od II 2014 r. do IV 2015 r.). W celu oceny sprawności układu technologicznego pobierano próbki ujmowanej wody, a po czasie odpowiadającym czasowi jej przepływu przez kolejne urządzenia, pobierano próbki wody oczyszczonej z przewodu tłocznego pompowni sieciowej. Dodatkowo, w celu rozdziału skuteczności

odżelaziania i odmanganiania wody uzyskanych w wyniku utleniania Fe(II) i Mn(II) podczas napowietrzania i ozonowania, próbki pobierano z przewodów po filtrach I i II stopnia z obu ciągów technologicznych.

Analizy fizyczno-chemiczne obejmowały pomiar podstawowych wskaźników jakości wody, takich jak intensywność barwy, mętność, pH, temperatura, zawartość związków żelaza i manganu oraz związków organicznych i jonów amonowych. Analizą objęto również azotany(III) i azotany(V), ponieważ przy stosowanej długości fali promieniowania UV wytwarzanego w lampach średniociśnieniowych może dochodzić do redukcji azotanów(V) do azotanów(III) [10], których zawartość w wodzie przeznaczonej do spożycia nie powinna przekraczać 0,5 gNO₂⁻/m³ [11, 12]. Zawartość związków żelaza i manganu mierzono za pomocą spektrofotometru absorpcji atomowej Varian AA-100. Oznaczenia azotanów(III) i azotanów(V) wykonano metodą chromatografii jonowej (DionexTH ICS 5000+) z detekcją za pomocą detektora konduktometrycznego. Eluentem był roztwór 4,5 mmol Na₂CO₃/0,8 mmol NaHCO₃. Zawartość związków organicznych w wodzie – mierzonych jako ogólny węgiel organiczny (OWO) – oznaczono za pomocą analizatora TOC/AOX 1200 wersja 4.2.1 (Thermo Electron Corporation). Zawartość ozonu pozostałego w fazie ciekłej mierzono z wykorzystaniem procedury 4500-O3 B (U.S. EPA) [13] – metoda kolorymetryczna ze wskaźnikiem indygo. Pomiar ozonu pozostałego w odpływie z komór kontaktowych realizowano za pomocą analizatora Krypton[®]O₃ (Kuntze GmbH), a do kontroli ilości chloru wolnego wykorzystano analizator Krypton[®]KCl₂ (Kuntze GmbH). Odczyn wody mierzono za pomocą pH-jonometru Metrohm 692 wyposażonego w elektrodę referencyjną Ag/AgCl nr 6.0502.100 i elektrodę pomiarową nr 6.0133.100. Oznaczenia pozostałych wskaźników, w tym mikrobiologicznych, wykonano metodami referencyjnymi lub według norm zalecanych w rozporządzeniu Ministra Zdrowia [11]. Wyniki analiz podano wraz z niepewnością rozszerzoną obliczoną przy k=2, co odpowiada przedziałowi ufności 95% [14]. Podana wartość uwzględnia niepewność związaną z próbkowaniem.

Wyniki badań

Woda oczyszczana w zakładzie wodociągowym „Gliwice-Labędy” charakteryzowała się w całym czasie badań potencjałem redukcyjno-utleniającym na poziomie zbliżonym do Eh≈-0,1 V, a jej pH zmieniało się nieznacznie i mieściło w zakresie 7,2÷7,4. Stałą wartość utrzymywała także zasadowość wody (160 gCaCO₃/m³), a wartość stosunku [OWO]/[Fe] zmieniała się w przedziale od 1,65 do 2,58. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wyniki analiz fizyczno-chemicznych i mikrobiologicznych ujmowanej wody podziemnej w czterech seriach pomiarowych (seria A – 29-12-2014, seria B – 26-01-2015, seria C – 16-02-2015, seria D – 13-04-2015).

W czasie, w którym prowadzono badania zakład nie osiągnął projektowej (maksymalnej) wydajności, a obciążenie hydrauliczne i teoretyczny czas kontaktu wody z utleniaczami zmieniały się wraz ze zmianą ilości wody dostarczanej z ujęć. Warunki pracy instalacji technologicznej w czasie skorelowanym z poborem próbek do oceny jakości ujmowanej wody zestawiono w tabeli 2. Zamieszczone dane dotyczą obydwu jednocześnie pracujących ciągów technologicznych. Zostały one podane jako wartości średnie w przedziale czasu, w którym pobierano próbki wody przed i po oczyszczeniu.

W początkowym czasie eksploatacji zakładu oczyszczania wody sprawność odżelaziania była porównywalna z wynikami przedstawionymi w tabeli 3. Zawartość związków żelaza w oczyszczonej wodzie mieściła się w zakresie $0,004 \div 0,007 \text{ gFe/m}^3$, jednak manganu była znacznie większa ($0,026 \div 0,030 \text{ gMn/m}^3$). Zmniejszenie zawartości manganu do $0,005 \text{ gMn/m}^3$ osiągnięto po 9 miesiącach eksploatacji. Jednocześnie zaobserwowano dalszą poprawę sprawności odżelaziania i odmanganiania wody po drugim stopniu oczyszczania, tj. po ozonowaniu i filtracji pospiesznej II stopnia ze złożami wpracowanymi.

Dyskusja wyników

Wyniki analiz ujmowanej wody podziemnej (tab. 1) wskazują na jej stabilny skład fizyczno-chemiczny. Aby spełniała ona kryteria wody przeznaczonej do spożycia wymagane było zmniejszenie mętności, intensywności barwy oraz zawartości zarówno związków żelaza, jak i manganu. Cel ten osiągnięto na drodze dwustopniowego utleniania i filtracji pospiesznej. Uzyskane wartości wskaźników jakościowych (tab. 3) potwierdzają wysoką sprawność wdrożonego układu oczyszczania wody.

Tabela 1. Wartości wybranych wskaźników jakości ujmowanej wody podziemnej
Table 1. Selected parameters of groundwater quality

| Wskaźnik, jednostka | Seria A | Seria B | Seria C | Seria D |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Barwa, gPt/m ³ | 20±1 | 22,9±4,5 | 24,4±4,9 | 5,3±1,1 |
| Mętność, NTU | 7,6±1,7 | 6,9±2,1 | 2,5±0,76 | 7,4±2,2 |
| pH | 7,2±0,3 | 7,4±0,4 | 7,4±0,4 | 7,4±0,4 |
| Temperatura, K | 281±1 | 282±1 | 284±2 | 284±1 |
| Jon amonowy, gNH ₄ ⁺ /m ³ | 0,206±0,021 | 0,212±0,032 | 0,201±0,030 | 0,226±0,034 |
| Azotany(V), gNO ₃ ⁻ /m ³ | <0,18 | <0,18 | <0,18 | <0,18 |
| Azotany(III), gNO ₂ ⁻ /m ³ | <0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Żelazo ogólne, gFe/m ³ | 0,83±0,12 | 1,06±0,15 | 0,99±0,14 | 0,66±0,093 |
| Mangan, gMn/m ³ | 0,228±0,027 | 0,452±0,054 | 0,214±0,028 | 0,211±0,025 |
| Ogólny węgiel organiczny, gC/m ³ | 1,64±0,34 | 1,75±0,33 | 1,80±0,33 | 1,70±0,31 |
| Liczba kolonii mikroorganizmów (jtk) w temp. 22°C po 72h w 1 cm ³ wody | 1 | 4 | 15 | 30 |
| Bakterie grupy coli (jtk) w 100 cm ³ wody | | | | |
| <i>Escherichia coli</i> (jtk) w 100 cm ³ wody | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Enterokoki (jtk) w 100 cm ³ wody | | | | |

Tabela 2. Wartości parametrów eksploatacyjnych
Table 2. Operating parameters

| Parametr, jednostka | Seria A | Seria B | Seria C | Seria D |
|---|------------|------------|-------------|-------------|
| Natężenie przepływu, m ³ /h | 521,6±6,52 | 518,9±7,3 | 487,7±22,31 | 491,2±15,71 |
| Dawka ozonu, gO ₃ /m ³ | 0,330 | 0,359 | 0,241 | 0,227 |
| Ozon pozostały, gO ₃ /m ³ | 0,12±0,005 | 0,15±0,003 | 0,12±0,013 | 0,12±0,004 |

Tabela 3. Wartości wybranych wskaźników jakości wody oczyszczonej
Table 3. Selected parameters of treated water quality

| Wskaźnik, jednostka | Seria A | Seria B | Seria C | Seria D |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Barwa, gPt/m ³ | <5 | <5 | <5 | <5 |
| Mętność, NTU | 0,12±0,03 | 0,12±0,04 | 0,11±0,03 | 0,11±0,03 |
| pH | 7,8±0,3 | 7,6±0,4 | 7,6±0,5 | 7,7±0,5 |
| Chlor wolny, gCl ₂ /m ³ | 0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Jon amonowy, gNH ₄ ⁺ /m ³ | <0,06 | <0,06 | <0,06 | <0,06 |
| Azotany(V), gNO ₃ ⁻ /m ³ | 0,26±0,02 | 0,457±0,046 | 0,310±0,031 | 0,694±0,069 |
| Azotany(III), gNO ₂ ⁻ /m ³ | <0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Żelazo ogólne, gFe/m ³ | 0,007±0,0010 | 0,010±0,0014 | 0,009±0,0012 | 0,011±0,002 |
| Mangan, gMn/m ³ | 0,002±0,0003 | 0,004±0,0006 | 0,002±0,0002 | 0,003±0,0003 |
| Ogólny węgiel organiczny, gC/m ³ | 1,63±0,34 | 1,72±0,32 | 1,75±0,33 | 1,67±0,33 |
| Liczba kolonii mikroorganizmów (jtk) w temp. 22°C po 72h w 1 cm ³ wody | 1 | 1 | 1 | 3 |
| Bakterie grupy coli (jtk) w 100 cm ³ wody | | | | |
| <i>Escherichia coli</i> (jtk) w 100 cm ³ wody | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Enterokoki (jtk) w 100 cm ³ wody | | | | |

Zawartość jonów żelaza w oczyszczonej wodzie wahała się w zakresie $0,007 \div 0,011 \text{ gFe/m}^3$, podczas gdy wartość dopuszczalna wynosi $0,2 \text{ gFe/m}^3$ [11, 12]. Równie skutecznie był usuwany mangan, którego zawartość zmalała do wartości w zakresie $0,002 \div 0,004 \text{ gMn/m}^3$, znacznie mniejszych od dopuszczalnej ($0,05 \text{ gMn/m}^3$) [11, 12]. Skuteczność usuwania związków żelaza i manganu z wody wynosiła 99%. Żelazo było skutecznie usuwane z oczyszczonej wody już po pierwszym stopniu oczyszczania. Częściowo usuwany był również mangan, mimo iż proces był prowadzony bez alkalizacji wody. Dalsze zmniejszenie jego zawartości o około 14÷28% uzyskano w wyniku ozonowania i filtracji. Osiągnięcie takiej sprawności układu oczyszczania, po wpracowaniu złóż filtracyjnych, prawdopodobnie było możliwe dzięki zastosowaniu stosunkowo dużej ilości tlenu i wydłużeniu czasu kontaktu do ponad 5 min w wyniku zmniejszenia wydajności zakładu w stosunku do założonej na etapie projektowym. Przy małej zawartości RWO, pod nieobecność NO_2^- i siarczków, do utlenienia F(II) i Mn(II) w procesie napowietrzania wystarcza stechiometryczna ilość tlenu rozpuszczonego ($0,14 \text{ gO}_2/\text{gFe}$; $0,29 \text{ gO}_2/\text{gMn}$) [3]. Tymczasem w Zakładzie Produkcji Wody „Gliwice-Ląbędy” szacunkowa ilość tlenu rozpuszczonego w wodzie odniesiona do ilości jonów metali wynosiła średnio odpowiednio $1,1 \text{ gO}_2/\text{gFe}$ i $3,5 \text{ gO}_2/\text{gMn}$. Ponieważ do aeratora wprowadzane było powietrze zawierające ozon resztkowy, to przypuszczalnie rzeczywista siła utleniająca była wyższa. Podobnie ilość ozonu rozpuszczonego w wodzie była większa od ilości stechiometrycznej ($0,43 \text{ gO}_3/\text{gFe}$; $0,88 \text{ gO}_3/\text{gMn}$) [3]. Akceptowalne (bez nieprawidłowych zmian) były, w świetle obowiązujących rozporządzeń Ministra Zdrowia [11, 12], także wskaźniki fizyczne i organoleptyczne oraz mikrobiologiczne wody.

Podsumowanie

Zastosowana technologia oczyszczania wody podziemnej, w której proces napowietrzania połączono z zawracaniem gazu wylotowego z komór kontaktowych ozonu i filtracją pospieszną, zapewnia dużą skuteczność odżelaziania wody o małej zawartości związków organicznych i żelaza występującego w postaci jonów Fe(II). W wyniku tych samych procesów z wody usuwany jest również

częściowo mangan, a wysoki stopień jego usunięcia zapewnia utlenianie jonów Mn(II) za pomocą rozpuszczonego w wodzie ozonu w połączeniu z filtracją pospieszną przez złoża wpracowane.

LITERATURA

1. A.L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓZ: Oczyszczanie wody. Podstawy teoretyczne i technologiczne, procesy i urządzenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
2. J. GÓRSKI: Kształtowanie się jakości wód podziemnych utworów czwartorzędowych w warunkach naturalnych oraz wymuszonych eksploatacją. Instytut Kształtowania Środowiska, Warszawa 1981.
3. B. LANGLAIS, D.A. RECKHOW, D.R. BRINK: Ozone in Water Treatment. Application and Engineering. Lewis Publishers Inc., Michigan 1991.
4. A.L. KOWAL: Technologia wody. Arkady, Warszawa 1977.
5. F.J. BELTRAN: Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Systems. Taylor & Francis e-Library, 2005.
6. J. MAĆKIEWICZ: Niekonwencjonalne metody uzdatniania wód podziemnych. *Ochrona Środowiska* 1998, vol. 20, nr 3, ss. 31–34.
7. J. NAWROCKI [red.]: Uzdatnianie wody. Procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2010.
8. J. PERKOWSKI, R. ZARZYCKI: Zastosowanie ozonu. Polska Akademia Nauk, Łódź 2005.
9. L. TAN, W. JOHNSON: Removing organic color and by-products from groundwater with ozone and pressurized biologically-active filtration. *Ozone Science & Engineering* 2001, Vol. 23, No. 3, pp. 393–400.
10. C. SHARPLESS, M. PAGE, K. LINDEN: Impact of hydrogen peroxide on nitrite formation during UV disinfection. *Water Research* 2003, Vol. 37, No. 19, pp. 4730–4736.
11. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 29 marca 2007 r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 61, poz. 417.
12. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 72, poz. 466.
13. National Primary Drinking Water Regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts. U.S. EPA, Federal Register, 1998, No. 63, pp. 241–250.
14. PN-ISO 5725: Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.

Olsińska, U., Brągiel, T. Influence of Sequential Aeration and Ozonation on Effectiveness of Iron and Manganese Removal from Groundwater. *Ochrona Środowiska* 2015, Vol. 37, No. 3, pp. 25–28.

Abstract: Effectiveness of two-step groundwater treatment technology implemented at an upgraded water treatment plant supplying the city of Gliwice was assessed. For oxidation of soluble forms of Fe(II) and Mn(II) both oxygen and ozone were applied, while insoluble metal species were captured at multi-stage pressure filters. The results of experiments carried out on the technical scale demonstrated that the applied aeration and filtration techniques led to satisfactory iron and manganese

removal as well as reduction in water color and turbidity. The overall effectiveness of iron and manganese removal was very high and amounted to almost 99%. It was demonstrated that the groundwater treatment technology, where the aeration stage was coupled with gas recirculation from ozone contact tanks and rapid filtration, was highly effective in terms of iron removal from water of low organic content. Additionally, the same unit processes led to partial manganese removal. High level of its elimination was ensured by oxidation of Mn(II) ions by water-soluble ozone coupled with rapid filtration at ripened filter beds.

Keywords: Iron removal, manganese removal, residual ozone, ripened filter bed.