

Tomasz SUPONIK
Politechnika Śląska, Gliwice

OCENA PARAMETRÓW JAKOŚCI WODY PRZEPLYWAJĄCEJ PRZEZ KOLUMNĘ WYPEŁNIONĄ ŻELAZEM METALICZNYM

Streszczenie. Obecność metali w wodach, w nadmiernych stężeniach, powoduje problemy środowiskowe i zdrowotne. Istnieje więc konieczność ich usuwania. Żelazo metaliczne jest materiałem, które może zapewnić skuteczne, tanie i szybkie rozwiązanie tego problemu. W artykule przedstawiono wyniki badań głównych parametrów zanieczyszczonej wody, która przepływała przez kolumnę filtracyjną wypełnioną żelazem metalicznym i była poddawana oczyszczaniu.

Podczas przepływu wód przez złożę żelaza metalicznego następowało wyraźne i stałe obniżanie się stężenia tlenu, spadek potencjału redox, wzrost i stabilizacja pH oraz wzrost temperatury i przewodności elektrolitycznej. Zmiany wszystkich tych parametrów wskazują na prawdopodobne obniżenie się stężenia metali obecnych w zanieczyszczonych wodach, zmniejszenie się w nich stężenia tlenu oraz powstawanie wodoru. Ponadto, w wyniku tworzących się w kolumnie filtracyjnej warunków redukcyjnych, wody były oczyszczane z Cr(VI) oraz wzbogacały się prawdopodobnie w jony żelaza Fe^{2+} oraz Fe^{3+} .

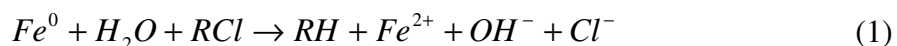
ASSESSMENT OF WATER PARAMETERS FLOWING THROUGH THE COLUMN FILLED WITH ZERO-VALENT IRON

Summary. Toxic metals in water cause environmental and healthy problems. There is a need to remove them from water. The zero-valent iron may assure the efficient, cheap and fast metals removal from both groundwater and industrial wastewater. In the article the results of the water parameters (which was treated) have been presented.

The contaminated water circulated through the column filled with zero-valent iron in the laboratory tests. During the tests, a rapid decrease of the redox potential and the oxygen concentration as well as the increases of the pH, the electrolytic conductivity and the temperature value have also been observed. These changes indicate the decreasing of metals and oxygen concentration in contaminated water (probably) and the creation of H_2 in the iron bed. As a result of condition created in the column the Cr(VI) has been also removed from water and the concentration of Fe^{2+} and Fe^{3+} have probably increased.

1. Wprowadzenie

Żelazo metaliczne jest łatwo pozyskiwanym, długo działającym i relatywnie tanim materiałem stosowanym w technologii PRB (*ang. Permeable Reactive Barrier*), głównie do usuwania szkodliwych węglowodorów chlorowanych (RCl). Reakcję ich odchlorowania można ogólnie zapisać w postaci [9]:

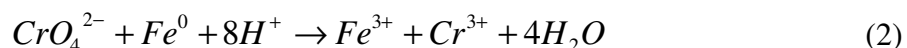


gdzie:

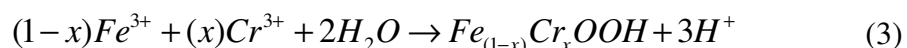
R – rodnik węglowodorowy,

Cl – niewęglowodorowa (chlorowcowa) grupa funkcyjna.

Ostatnie badania wskazują na możliwość jego wykorzystania również do usuwania z wód kationów i anionów metali [4, 8, 9, 11, 15]. I tak na przykład, aniony chromu CrO_4^{2-} i $Cr_2O_7^{2-}$, które są bardzo szkodliwe i często występują w wodach, można zredukować do Cr(III) – postaci nieszkodliwej i łatwej do wytrącania. Ogólną reakcję redukcji Cr(VI) do Cr(III) przy wykorzystaniu żelaza metalicznego jako materiału reaktywnego można opisać następująco [8, 9]:



W dalszym etapie żelazo(III) i chrom(III) wytrącają się zgodnie z równaniem [8, 9]:

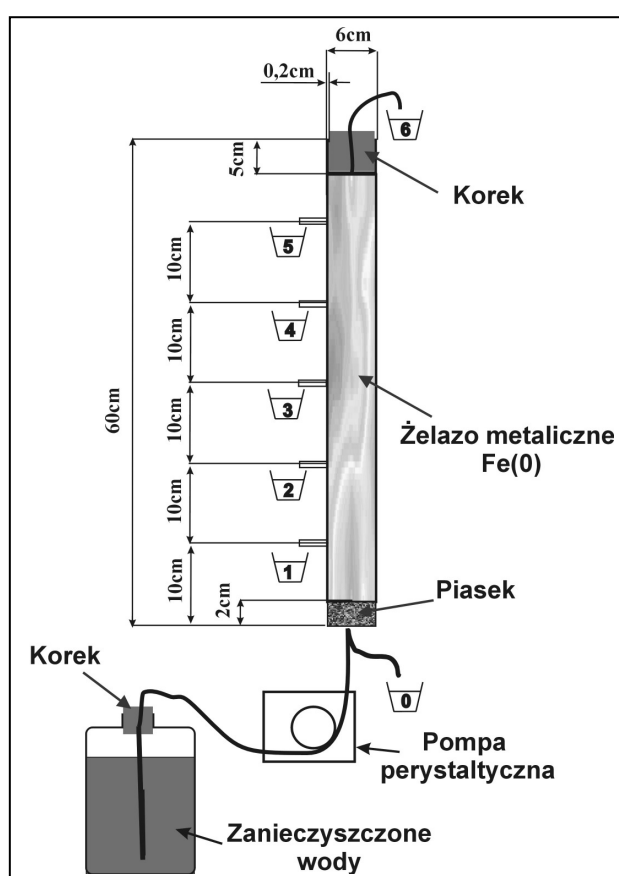


W technologii PRB zanieczyszczenia są usuwane bezpośrednio w warstwie wodonośnej poprzez przepływ skażonego strumienia wód gruntowych przez przepuszczalną barierę wypełnioną odpowiednim materiałem reaktywnym. Żelazo metaliczne stosowane w tej technologii może również służyć do oczyszczania zanieczyszczonych wód lub ścieków w zakładach przemysłowych, w specjalnie przygotowanych kolumnach filtracyjnych lub w urządzeniach, w skład których wchodziłyby zestawy arkuszy z żelaza metalicznego.

Celem pracy była obserwacja podstawowych parametrów zanieczyszczonej metalami wody, umożliwiającą określenie warunków powstałych w kolumnie filtracyjnej wypełnionej żelazem metalicznym oraz opis przebiegającej w niej prawdopodobnych reakcji chemicznych/procesów. Do parametrów tych należały: pH, potencjał redox (Eh), temperatura, przewodność elektrolityczna właściwa oraz stężenie tlenu. Podczas badań oznaczano ponadto (aby ocenić przebieg reakcji 2) stężenie chromu Cr(VI), które występowało w doświadczalnie zanieczyszczonych wodach w postaci anionu CrO_4^{2-} .

2. Metodyka i materiały

Badania kolumnowe, mające na celu usunięcie pierwiastków z wód, były przeprowadzone w instalacji laboratoryjnej przedstawionej na rysunku 1. Polegały one na przepuszczaniu eksperymentalnie zanieczyszczonych wód przez szklaną kolumnę filtracyjną wypełnioną 53 cm warstwą żelaza metalicznego oraz 2 cm (dolną) warstwą piasku średnioziarnistego płukanego wodą destylowaną. Pomiędzy piaskiem a żelazem oraz na dnie kolumny filtracyjnej i na powierzchni złoża żelaza (pomiędzy żelazem a korkiem) umieszczono filtry tkaninowe firmy TAMFELT. Pompa perystaltyczna ZALIMP PP1B-05A tłoczyła wodę przez kolumnę z dołu do góry. Prędkość przepływu wody (prędkość filtracji) wynosiła 0,50 m/dobę.



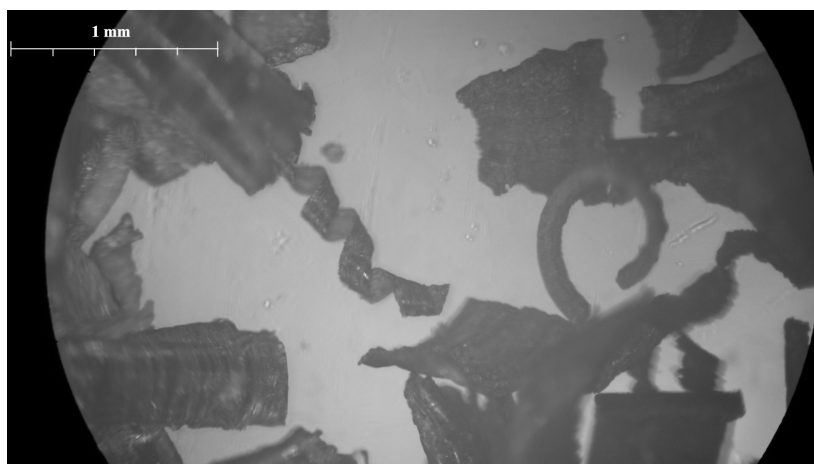
Rys. 1. Instalacja badawcza do symulacji przepływu i oczyszczania zanieczyszczonych wód w złożu żelaza metalicznego wg [14]; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – poziom poboru wody

Fig. 1. Installation for simulation of flow and treatment processes of contaminated groundwater in iron bed after [14]; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – sampling level

W badaniach zastosowano żelazo metaliczne z procesu obróbki skrawaniem żelaza i stali. Zgodnie z rozporządzeniem w sprawie katalogu odpadów [12] żelazo zostało sklasyfikowane kodem 12 01 01 i należy do grupy pod nazwą „odpad z toczenia i piłowania żelaza oraz jego stopów”. Materiał ten powinien charakteryzować się zawartością żelaza >90%, niewielką ilością węgla (<3%), i nie zawierać innych zanieczyszczeń metalicznych, mogących uwalniać

się do środowiska wodnego [5]. Jego powierzchnia nie powinna być pokryta innymi zanieczyszczeniami zmniejszającymi jego reaktywność, np. olejem, smarami itp.

Drobiny żelaza, występujące w postaci skrawków, wiórów oraz sprężyn (rys. 2), przed umieszczeniem w kolumnie zostały oczyszczone w celu usunięcia oleistych zanieczyszczeń znajdujących się na ich powierzchni (z zastosowaniem benzyny lakowej). Żelazo wysuszone następnie w suszarce laboratoryjnej i tuż przed wprowadzeniem do kolumny (porcjami, ostrożnie zagęszczając) przemyto wodą destylowaną. Po wypełnieniu kolumny, do wysokości 55 cm od dna, żelazo unieruchomiono przez zamknięcie kolumny korkiem gumowym i natychmiast rozpoczęto pompowanie zanieczyszczonych wód. Przez korek przeprowadzono wężyk w celu spuszczenia i poboru wody. Podobnie został zamknięty zbiornik ze sztucznie zanieczyszczoną wodą (rys. 1), aby wyeliminować dostęp powietrza atmosferycznego (zbiornik początkowo był wypełniony do pełna).



Rys. 2. Żelazo metaliczne Fe(0) zastosowane w badaniach laboratoryjnych [14]

Fig. 2. Zero-valent iron Fe(0) used in laboratory tests [14]

Skład ziarnowy żelaza zastosowanego do badań kolumnowych został przedstawiony w tabeli 1. Maksymalny wymiar drobin żelaza wynosił 4 mm. Materiał przeznaczony do badania składu ziarnowego oraz do oznaczenia parametrów przedstawionych w tabeli 2 przemyto rozcieńczalnikiem (benzyną lakową) i wysuszone w suszarce laboratoryjnej.

Do oznaczenia gęstości właściwej żelaza (metodą piknometryczną zgodnie z normą [17]) zastosowano benzen cz.d.a. (woda destylowana z trudnością wnikała w pory materiału i następowało jego zbrylenie), a piknometry ogrzewano w łaźni wodnej, co umożliwiło wniknięcie benzenu w pory materiału. Współczynnik filtracji wyznaczono metodą rurki Kamieńskiego, zaś gęstość objętościową i porowatość efektywną odpowiednio metodą opisaną w normie PN-88/B-04481 oraz metodą wysokich kolumn przedstawioną w pracach [10, 16]. Wyniki parametrów charakteryzujących żelazo metaliczne przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1

Skład ziarnowy żelaza metalicznego użytego w teście kolumnowym [14]

Średnice poszczególnych klas ziarnowych, mm	4,0-2,0	2,0-1,6	1,6-1,0	1,0-0,71	0,71 – 0,5	<0,5
Procentowa zawartość klasy ziarnowej, %	1,77	1,28	7,26	38,79	36,57	14,33

Zanieczyszczone roztwory zostały przygotowane poprzez dodanie do 20 dm³ wody destylowanej 108 mg CuSO₄·5H₂O, 82 mg CoCl₂, 84 mg NiSO₄·7H₂O, 140 mg BaCl₂·2H₂O, 228 mg ZnSO₄·7H₂O, 20 mg K₂CrO₄, 36 mg CdSO₄·8/3H₂O oraz 28 mg PbCl₂.

Temperaturę, pH, potencjał redox (Eh), przewodność elektrolityczną właściwą oraz stężenie tlenu oznaczano metodami elektrometrycznymi (miernikami PORTAMESS 913 pH z elektrodą kombinowaną SenTix 41; PORTAMESS 913 pH z elektrodą POLYPLAST ORP; PORTAMESS 913 Count; PORTAMESS 913Oxy z sondą tlenową SE 302). Podczas badań oznaczano również stężenie Cr(VI) – w spektrofotometrze DR5000 HachLange; metodą z 1,5-dwufenylokarbazydem; test firmy Hach nr 8023; pomiaru dokonano przy długości fali 540 nm.

Tabela 2

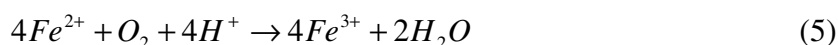
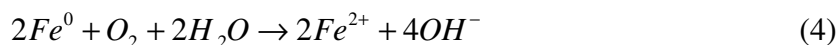
Parametry charakteryzujące żelazo metaliczne Fe(0) [14]

Parametry charakteryzujące żelazo metaliczne, jednostka	Wartość
Współczynnik filtracji m/s	4,47·10 ⁻⁴
Gęstość właściwa, g/cm ³	7,85
Gęstość objętościowa, g/cm ³	1,96
Porowatość efektywna, -	0,46

Pomiary rozpoczęto po uzyskaniu stabilności oczyszczania – po dziesięciokrotnym przepuszczeniu przez kolumnę objętości wody mieszczącej się w wypełnionej kolumnie. Roztwory pobierano z różnych poziomów kolumny (rys. 1). W przypadku poziomów poboru wody 1, 2, 3, 4 i 5 próbki pobierano poprzez odkręcenie kranika umieszczonego na szklanej rurce spełniającej rolę wylewu.

3. Wyniki i dyskusja

Żelazo metaliczne zastosowane w badaniach kolumnowych ma zdolność do tworzenia w złożu warunków redukcyjnych oraz do usuwania Cr(VI) (rys. 3a). Potencjał redox (Eh) zmieniał się podczas przepływu zanieczyszczonych wód w sposób wyraźny, dynamiczny i ciągły (rys. 3c), wskazując, iż w kolumnie filtracyjnej tworzą się bardzo szybko warunki redukcyjne. Potencjał redox wód surowych (niepoddanych oczyszczaniu) wynosił 186 mV i sukcesywnie obniżał się do wartości -70 mV w 6 poziomie poboru wody. Podobny charakter zmian był obserwowany dla tlenu rozpuszczonego w wodzie (rys. 3b). Wartości jego stężenia obniżały się również, w kolejnych poziomach poboru, w sposób ciągły, dynamiczny i wyraźny, i wynosiły 7,25 mg/dm³ oraz 4,59 mg/dm³ odpowiednio w zerowym i w szóstym poziomie poboru wody. Tlen najprawdopodobniej był usuwany w wyniku reakcji 4, a po pojawieniu się w wodach jonów Fe²⁺ również reakcji 5, tworząc prawdopodobnie nierozpuszczalne wodorotlenki żelaza (III).

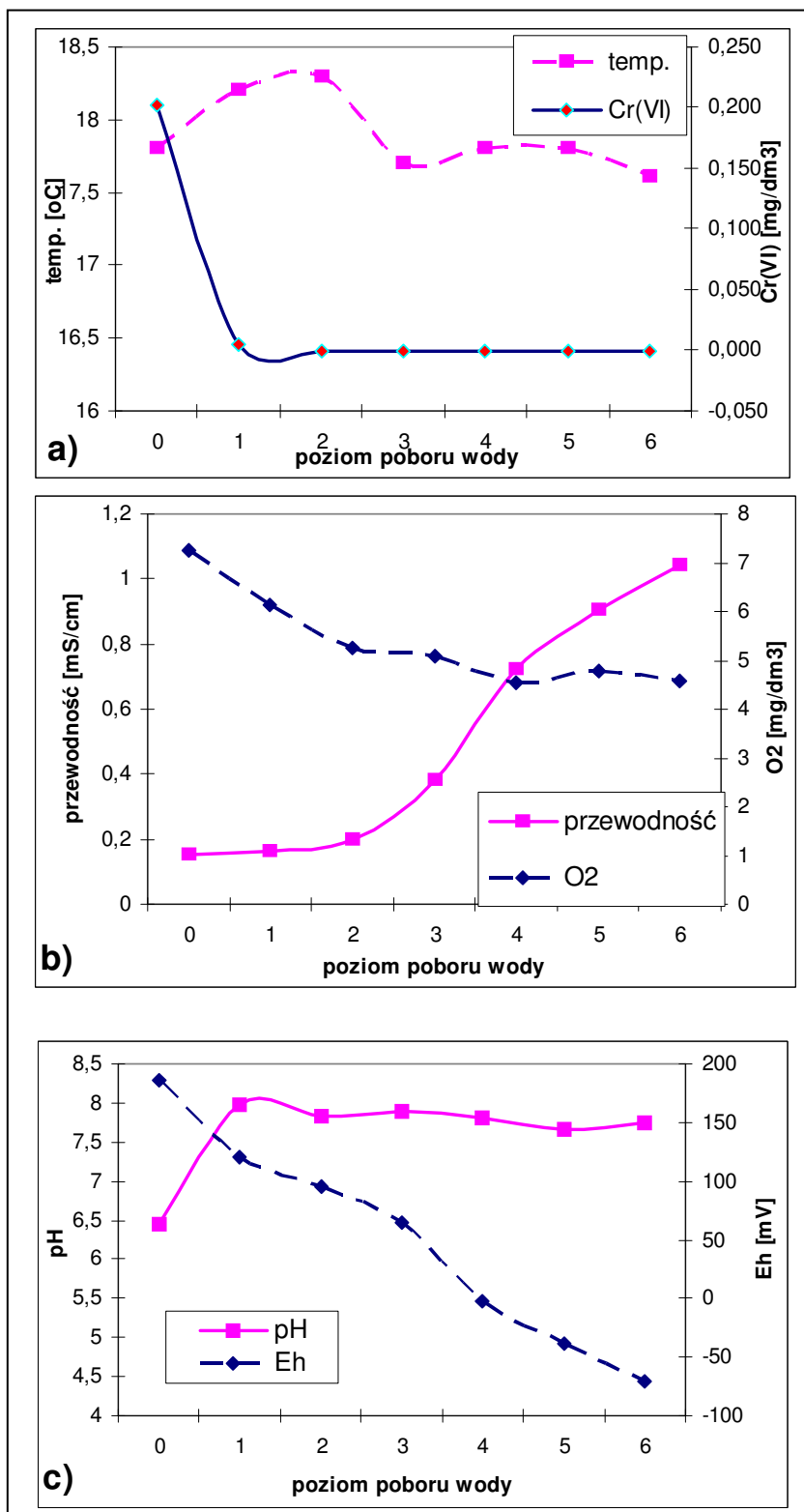


O przebiegu reakcji 4, ale również (w mniejszym stopniu) reakcji 5 może świadczyć także sukcesywny wzrost przewodności elektrolitycznej właściwej z wartości 0,1507 mS/cm w zerowym poziomie poboru wody, do wartości 1,040 mS/cm w szóstym poziomie poboru wody (rys. 3b).

Inny charakter zmian dotyczył temperatury, pH oraz stężenia Cr(VI). W przypadku tych parametrów, pomiędzy zerowym i pierwszym poziomem poboru wody, była obserwowana nagła zmiana wartości, a następnie, w kolejnych poziomach, stabilizacja z ewentualnymi niewielkimi wahnięciami.

Wzrost pH w pierwszym poziomie pomiarowym z wartości 6,44 do 7,98 (rys. 3c) następował najprawdopodobniej w wyniku obniżenia się stężenia chromu w wodach (reakcje 2 i 3), redukcji rozpuszczonego w niej tlenu (reakcja 4) oraz przebiegającej bardzo wolno reakcji 6. Wartość pH w następnych poziomach poboru ulegała niewielkiemu obniżaniu, by osiągnąć w szóstym poziomie poboru wartość 7,74.



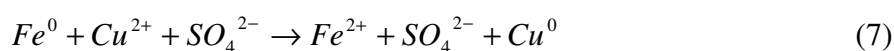


Rys. 3. Wartości: a) temperatury i stężenia Cr(VI); b) przewodności elektrolitycznej właściwej i stężenia tlenu rozpuszczonego w wodach; c) pH i Eh, oznaczone w wodach pobranych z kolejnych poziomów badawczych (rys. 1)

Fig. 3. The value of: a) temperature and concentration of Cr(VI); b) electrolytic conductivity and concentration of oxygen dissolved in water; c) pH and redox potential Eh, measured in water sampled during laboratory tests (installation – see Fig. 1)

Znacząca redukcja stężenia Cr(VI) (rys. 3a) nastąpiła już w dolnej części złoża - tuż przed pierwszym poziomem pomiarowym, w którym jego stężenie wynosiło jeszcze 0,005 mg/dm³. W drugim poziomie pomiarowym stężenie Cr(VI) osiągnęło wartość niższą od granicy oznaczalności. Początkowe stężenie chromu Cr(VI) wynosiło 0,202 mg/dm³.

Podobny charakter zmian opisano dla kationów miedzi Cu²⁺ w pracy Suponika [13]. Reakcja powodująca ich usunięcie z wód, przy wykorzystaniu żelaza metalicznego jako materiału wypełniającego złoża (żelazo pobrane zostało ze składowiska odpadów hutniczych HK EKO GRYS w Dąbrowie Górniczej i charakteryzowało się innymi parametrami hydrogeologicznymi, niż zaprezentowane w niniejszym artykule), przedstawia się następująco:

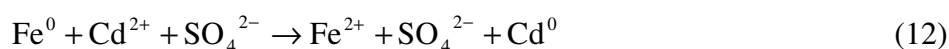
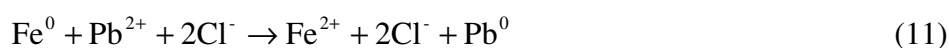
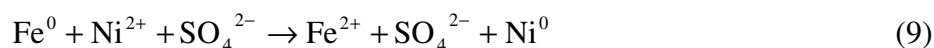


Przebieg tej reakcji jest uzależniony od następującego warunku (tabela 3):

$$Eh_{Fe/Fe^{2+}} < Eh_{Cu/Cu^{2+}} \quad (8)$$

gdzie: $Eh_{Fe/Fe^{2+}}$ – potencjał utleniająco-redukcyjny, V.

Zakłada się, iż przy zastosowaniu żelaza metalicznego w badaniach kolumnowych, również inne metale ciężkie występujące w wodach jako kationy (Ni²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺, Co²⁺), uległy redukcji i wytrąceniu, ponieważ charakteryzują się wyższym potencjałem utleniająco-redukcyjnym od żelaza Fe(0) (tabela 3). Połówkowe reakcje redukcji metali można zapisać następująco:



Wymienione w nawiasie formy specjacyjne pierwiastków należą do najczęściej występujących w wodach i z wyjątkiem kobaltu są bardzo szkodliwe dla organizmów żywych.

Innym możliwym mechanizmem oczyszczania wód z metali, szczególnie tych, które charakteryzują się potencjałem niższym od -0,447 V (wśród zanieczyszczających wodę były to Ba²⁺ oraz Zn²⁺), jest sorpcja. Według Wilkin i McNeil [15], gdy pH przyjmuje wartość niższą od 7 (tak jak w zerowym poziomie poboru wody, gdzie wynosiło 6,44), usuwanie kationów metali przez żelazo metaliczne przebiega w wyniku ich sorpcji na powierzchni żelaza lub na produktach korozji żelaza.

Tabela 3

Standardowe potencjały redukcji różnych form metali
w warunkach: 25°C; 101,325 kPa [1, 2, 3, 7]

Reakcja półokowa	Eh [V]
$Cu^{3+} + e^{-} \rightarrow Cu^{2+}$	+2,4
$Co^{3+} + e^{-} \rightarrow Co^{2+}$	+1,92
$Pb^{4+} + 2e^{-} \rightarrow Pb^{2+}$	+1,67
$HCrO_4^{-} + 7H^{+} + 3e^{-} \rightarrow Cr^{3+} + 4H_2O$	+1,350
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^{+} + 6e^{-} \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1,232
$Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$	+0,771
$Cu^{+} + e^{-} \rightarrow Cu^0$	+0,521
$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cu^0$	+0,3419
$Cu^{2+} + e^{-} \rightarrow Cu^{+}$	+0,153
$Fe^{3+} + 3e^{-} \rightarrow Fe^0$	-0,037
$Pb^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Pb^0$	-0,1262
$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e^{-} \rightarrow Cr(OH)_3 + 5OH^{-}$	-0,13
$Cd(SO)_4 + 2e^{-} \rightarrow Cd^0 + SO_4^{2-}$	-0,246
$Ni^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ni^0$	-0,257
$PbCl_2 + 2e^{-} \rightarrow Pb^0 + 2Cl$	-0,2675
$Co^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Co^0$	-0,28
$Pb(SO)_4 + 2e^{-} \rightarrow Pb^0 + SO_4^{2-}$	-0,3588
$Cd^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Cd^0$	-0,4030
$Fe^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Fe^0$	-0,447
$PbHPO_4 + 2e^{-} \rightarrow Pb^0 + HPO_4^{2-}$	-0,465
$Zn^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Zn^0$	-0,7618
$Cd(OH)_2 + 2e^{-} \rightarrow Cd^0 + 2OH^{-}$	-0,809
$Ba^{2+} + 2e^{-} \rightarrow Ba^0$	-2,912

O przebiegu reakcji usuwania metali (reakcje 2, 7, 9, 10, 11, 12 i/lub adsorpcja), ale również w mniejszym stopniu o reakcjach usuwania tlenu (reakcje 4 i 5), może świadczyć również wzrost temperatury wody przepływającej przez złożę (rys. 3a), bowiem wszystkie te procesy są egzotermiczne i samorzutne (tabela 4; zakresy wartości entalpii adsorpcji fizycznej i chemicznej wynoszą odpowiednio od – 4 do – 80 kJ/mol oraz od – 80 do – 410 kJ/mol [6]). Temperatura badanej wody wzrastała od 17,8°C w zerowym poziomie poboru do 18,3°C w drugim poziomie, by następnie spaść w pozostałych poziomach (3, 4, 5, 6) do 17,8°C ± 0,1°C. Wzrost temperatury tłumaczy się ujemnymi entalpiami procesów przebiegających w dolnej części kolumny (gdy prawdopodobnie są usuwane kationy i aniony metali), natomiast spadek (w poziomach 3, 4, 5, 6) wyrównaniem temperatury wody znajdującej się

w kolumnie z temperaturą otoczenia (temperatura powietrza w laboratorium wynosiła 17,6°C ± 0,2°C).

Tabela 4

Wartości zmian entalpii ΔH_{298} , zmian potencjałów termodynamicznych ΔG_{298} i zmian entropii ΔS_{298} dla reakcji prawdopodobnie przebiegających w złożu żelaza metalicznego

Reakcja	Standardowe molowe entalpie reakcji (ciepła tworzenia) ΔH_{298} , kJ	Entropia reakcji ΔS_{298} , J/K	Entalpia swobodna reakcji (potencjał termodynamiczny tworzenia) ΔG_{298} , kJ
$CrO_4^{2-} + Fe^0 + 8H^+ \rightarrow Fe^{3+} + Cr^{3+} + 4H_2O$	-593,252	-318,21	-447,204
$2Fe^0 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^-$	-523,884	-668,21	-324,758
$4Fe^{2+} + O_2 + 4H^+ \rightarrow 4Fe^{3+} + 2H_2O$	-410,876	-631,51	-176,662
$Fe^0 + CuSO_4 \rightarrow FeSO_4 + Cu^0$	-152,26	-5,55	-149,94
$Fe^0 + NiSO_4 \rightarrow FeSO_4 + Ni^0$	-24,3	48,97	-38,57
$Fe^0 + CoCl_2 \rightarrow FeCl_2 + Co^0$	-20	43,05	-33,47
$Fe^0 + PbCl_2 \rightarrow FeCl_2 + Pb^0$	-89,53	-96,96	-60,67
$Fe^0 + CdSO_4 \rightarrow FeSO_4 + Cd^0$	-14,3	-23,75	-7,74

4. Wnioski

Temperatura, pH, potencjał redox, stężenie tlenu rozpuszczonego w wodzie oraz przewodność elektrolityczna właściwa są ważnymi parametrami wody, łatwo wyznaczanymi podczas badań. Parametry te są jednocześnie dobrymi wskaźnikami warunków formujących się w złożu żelaza metalicznego.

Podczas przepływu zanieczyszczonych wód przez kolumnę filtracyjną wypełnioną żelazem metalicznym następuje, w wyniku przebiegających procesów, wyraźne, sukcesywne i stałe obniżenie stężenia tlenu oraz spadek potencjału redox. Jednocześnie w początkowym etapie oczyszczania (w dolnej części kolumny) następuje wzrost i stabilizacja pH z wartości ok. 6,5 do ok. 7,8 oraz wzrost i ponowny spadek temperatury – do temperatury otoczenia. Obserwowany wzrost temperatury wody wskazuje, iż w dolnej części kolumny filtracyjnej przebiegają procesy egzotermiczne, wśród których prawdopodobne są redukcja tlenu oraz adsorpcja i/lub redukcja metali, występujących w zanieczyszczonych wodach jako kationy i aniony o następujących stopniach utlenienia: Cu(II), Cr(VI), Ni(II), Pb(II), Cd(II), Zn(II),

Ba(II) oraz Co(II). Jednocześnie wzrasta w szybkim tempie przewodność elektrolityczna, świadcząca również, iż podczas utleniania żelaza, poza redukcją metali, następuje także redukcja innych substancji, m.in. O₂ oraz H₂O.

Obecność żelaza metalicznego, charakteryzującego się niższym potencjałem utleniająco-redukcyjnym od anionów chromu CrO₄²⁻ występujących w wodach surowych, stwarzała dogodne warunki do ich redukcji i prawdopodobnie współstrącenia. Procesy te oraz redukcja tlenu rozpuszczonego w wodach i wolno przebiegające tworzenie się wodoru powodowały wspomniany wzrost wartości pH w wodach przepływających przez złożę żelaza metalicznego.

BIBLIOGRAFIA

1. Bard A. J., Parsons R., Jordan J.: Standard Potentials in Aqueous Solutions, Marcel Dekker, New York 1985.
2. Bratsch S. G.: J. Phys. Chem. Ref. Data, 18, 1989.
3. Dorabalska A., Łada Z., Michalski M., Rodewald W. (koordynatorzy), Poradnik fizykochemiczny, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974.
4. Fiore, S., Zanetti M. C.: Preliminary Tests Concerning Zero-Valent Iron Efficiency in Inorganic Pollutants Remediation; American Journal of Environmental Sciences 5(4): 556–561; 2009.
5. ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). Permeable Reactive Barrier: Technology Update. PRB-5. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, PRB: Technology Update Team. 2011. www.itrcweb.org.
6. Jankowska H.: Chemia fizyczna, Państwowe Wydawnictwa Szkolnictwa Zawodowego, Warszawa 1968.
7. Milazzo G, Caroli S., Dharma V. K.: Tables of Standard Electrode Potentials, Wiley, Chichester 1978.
8. Meggyes T., Holzlohner U., August H.: A multidisciplinary approach to improving the safety and durability of landfill barriers. In Contaminated and derelict land (Sarsby R.W. (ed)), Kraków. Thomas Telford, London 1998, p. 413-420.
9. Puls R. W., Powell M. R., Blowes D. W., Gillham R. W., Schulz D., Sivavec T., Vogan J. L., Powell P. D.: Permeable reactive barrier technologies for contaminant remediation. United States Environmental Protection Agency, Washington 1998.
10. Pazdro Z., Kozerski B.: Hydrogeologia ogólna, Wyd. Geologiczne, Warszawa 1990.

11. Rangsviek, R., Jekel M. R.: Removal of Dissolved Metals by Zero-Valent Iron (ZVI): Kinetics, Equilibria, Processes and Implications for Stormwater Runoff Treatment, *Water Research* 39: 4153–4163; 2005.
12. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów, DzU, 2001 nr 112, poz. 1206.
13. Suponik T.: Zastosowanie żelaza metalicznego w technologii PRB, Rozdział w monografii *Rekultywacja i rewitalizacja terenów zdegradowanych*. Praca zbiorowa pod red. prof. Grzegorza Maliny. Wydawnictwo Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, Oddział Wielkopolski (Inżynieria na rzecz ochrony środowiska/red. Jan F. Lemański, Sergiusz Zabawa; nr 866), Poznań 2009, s. 161-172.
14. Suponik T.: Groundwater treatment with the use of zero-valent iron in the PRB Technology (przygotowywany do opublikowania w *Physicochemical Problems of Mineral Processing* w roku 2012).
15. Wilkin R. T., McNeil M. S.: Laboratory evaluation of zero-valent iron to treat water impacted by acid mine drainage, *Chemosphere* 53: 715–725; 2003.
16. Wiczysty A.: *Hydrogeologia inżynierska*, PWN, Warszawa 1982.
17. PN-88/B-04481.

Abstract

Zero-valent iron Fe(0) used as a reactive material in PRB (Permeable Reactive Barrier) Technology may remove cationic and anionic metals from groundwater. In PRB technology, the contaminants are removed from the aquifer by the flow of the groundwater through a reactive barrier filled with a special reactive material. The thesis of the article is that the observation of physicochemical and physical parameters may allow to assess the possible chemical reactions/processes proceeded in zero-valent iron bed used in a column tests. The parameters are: pH, redox potential, temperature, conductivity and oxygen concentration. They are easily monitored during the tests and are good indicators of conditions created in the iron bed.

The column tests were conducted in a glass column packed with scrap iron taken from the machining plant and with coarse sand located at the bottom of the column. The contaminated water circulated through the column from bottom to top and during that time the various chemical reactions/processes occurred.

The results of the research show a rapid decrease of the redox potential and the oxygen concentration as well as the increase and stabilization of the pH value. Furthermore, the

temperature of the treated water increased in the lower part of the column and then dropped due to the air temperature in the laboratory, while the conductivity of the tested water was increasing as it has been flowing through the column. It all shows that the oxygen reduction and the adsorption and/or reduction (and precipitation) of cationic and anionic metals occurred in the iron bed (especially in the lower part of the bed).