



## Optimization of advanced oxidation process of the municipal landfill leachate by Fenton's reagent

Justyna KOC-JURCZYK<sup>1</sup>, Łukasz JURCZYK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Biologiczno-Rolniczy, Katedra Biologicznych Podstaw Rolnictwa i Edukacji Środowiskowej, e-mail: [jjurczyk@ur.edu.pl](mailto:jjurczyk@ur.edu.pl)

### Abstract

In this paper the influence of temperature and proportions of chemical reactants ( $\text{Fe}^{2+}$  i  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) on efficiency of COD removal and changes of BOD/COD ratios in leachate from 21 years old municipal landfill have been analyzed (Poland, Podkarpackie province). Four temperature variants: 30, 40, 50 i 60°C. The process was conducted in constant  $\text{H}_2\text{O}_2$  dose of 1 g/dm<sup>3</sup>, and variable proportions of  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ : 1:3, 1:2 i 1:1. It was stated that in temperature of 40°C treatment was most ineffective regardless of reactant doses. The most efficient conditions for examined wastewater was dose 1:1 at the temperature of 30°C.

**Keywords:** landfill leachate, Fenton's reagent, temperature

### Streszczenie

Optymalizacja warunków procesu pogłębionego utleniania odcieków składowiskowych odczynnikiem Fentona

W badaniach analizowano wpływ temperatury i proporcji reagentów chemicznych ( $\text{Fe}^{2+}$  i  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) na efektywność usuwania ChZT i zmiany proporcji BZT<sub>5</sub>/ChZT w odciekach składowiskowych pochodzących z 21-letniego składowiska odpadów komunalnych (Polska, województwo podkarpackie). Przetestowano cztery temperatury prowadzenia procesu: 30, 40, 50 i 60°C. Badania prowadzono przy stałej dawce  $\text{H}_2\text{O}_2$  – 1 g/dm<sup>3</sup> i zmieniającej się proporcji  $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$ : 1:3, 1:2 i 1:1. Stwierdzono, że najniższa efektywność oczyszczania odcieków zachodziła w temperaturze 40°C niezależnie od zastosowanej proporcji reagentów chemicznych. Najbardziej efektywną okazała się proporcja  $\text{Fe}^{2+}:\text{H}_2\text{O}_2$  1:1 i temperatura 30°C.

**Słowa kluczowe:** odcieki składowiskowe, odczynnik Fentona, temperatura

### 1. Wprowadzenie

Składowanie jest najczęściej stosowaną metodą zagospodarowania odpadów komunalnych, stosowaną zarówno z powodów technologicznych, jak i ekonomicznych. To postępowanie ma jednak wiele wad, a jedną z podstawowych jest powstawanie odcieków. Źródłem odcieków mogą być wody powierzchniowe i podziemne, które dopływają do złoża odpadów. Na bilans odcieków w niewielkim stopniu wpływa też, woda dostarczona razem z odpadami oraz powstająca *de novo* z rozkładu substancji organicznych [1]. Pomimo tego, że obecnie składowiska są projektowane i eksploatowane w ten sposób, aby maksymalnie zredukować ilość powstających odcieków, to wciąż stanowią one problem technologiczny, wynikający np.: ze znaczących zmian składu chemicznego odpadów w czasie eksploatacji składowiska [2]. Czynnikiem wpływającym na skład odcieków jest przede wszystkim czas składowania, ale też warunki klimatyczne, skład odpadów, a także sposób eksploatacji składowiska [2-5].

W zależności od czasu eksploatacji składowiska odpadów można podzielić na: młode, które znajdują się w fazie dojrzewania, średnie, znajdujące się w fazie stabilizacji oraz stare, w fazie ustabilizowanej. Porównanie składu odcieków z dojrzewających i ustabilizowanych składowisk przedstawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Skład odcieków z młodych i ustabilizowanych składowisk (*badania własne*)

Wskaźnik	Jednostka	Składowiska	
		Młode	Ustabilizowane
ChZT ( <i>COD</i> )	mg/dm <sup>3</sup>	10130	4034
BZT <sub>5</sub> ( <i>BOD<sub>5</sub></i> )	mg/dm <sup>3</sup>	4559	484
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	505	1218
BZT <sub>5</sub> /ChZT ( <i>BOD<sub>5</sub>/COD</i> )	-	0,45	0,12
N/ChZT ( <i>N/COD</i> )	-	0,05	0,3

Efektywność oczyszczania odcieków zależy między innymi od wieku składowiska oraz od proporcji BZT<sub>5</sub>/ChZT. Proporcja ta w odciekach z młodych składowisk ma wartość 0,5 – 1, średnich: 0,1 – 0,5, natomiast jeżeli mieści się w zakresie do 0,1 mamy do czynienia z odciekami z ustabilizowanego składowiska odpadów [3, 5]. Odcieki z młodych składowisk odpadów zawierają głównie małowcząsteczkowe substancje organiczne i dlatego mogą być oczyszczane metodami biologicznymi. W czasie fazy metanogennej w odciekach zaczynają dominować trudno rozkładalne na drodze biologicznej substancje organiczne, takie jak kwasy humusowe i fulwowe, a efektem jest obniżenie sprawności oczyszczania odcieków metodami biologicznymi i konieczność wspomaganie metodami fizyko-chemicznymi [6, 7].

Dlatego też, do oczyszczania odcieków, ze starych składowisk stosowane są droższe procesy fizykochemiczne, takie jak: koagulacja i flokulacja [8, 9], adsorpcja na węglu aktywnym [5, 10], filtracja membranowa [11, 12] czy pogłębione utlenianie [2, 13, 14].

Mechanizm procesu pogłębionego utleniania przy użyciu odczynnika Fentona został odkryty i opisany ponad 100 lat temu, jednak metodę tę zaadoptowano do usuwania substancji trudno rozkładalnych z odcieków dopiero w latach 90-tych XX wieku [15]. W procesie tym wykorzystuje się H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> jako utleniacz, a Fe<sup>2+</sup> jako katalizator, do wytworzenia rodników hydroksylowych (OH<sup>•</sup>), zgodnie z równaniami 1.1 – 1.5 [2].



Obecność rodników hydroksylowych prowadzi do mineralizacji lub przekształcania trudno rozkładalnych związków organicznych do form biodegradowalnych, które następnie mogą być usunięte w procesach biologicznych. Podczas reakcji pomiędzy substancjami rozpuszczonymi w odciekach składowiskowych, a odczynnikiem Fentona, związki o dużej masie cząsteczkowej zostają przekształcone do związków o niskiej masie, a rozbudowane aromatyczne i alifatyczne łańcuchy hydrofobowe, transformowane do substancji o budowie hydrofilowej [16, 17].

Efektywność procesu zależy od temperatury i wartości pH oraz wielkości dawek i stosunku molowego reagentów (Fe<sup>2+</sup> i H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

Celem pracy była ocena efektywności usuwania substancji organicznych metodą pogłębionego utleniania przy użyciu odczynnika Fentona, jako alternatywnej metody poprawienia parametrów odcieków kierowanych do reaktora biologicznego. Optymalizując proces określano wpływ temperatury oraz udziału Fe<sup>2+</sup> w mieszaninie reakcyjnej, na takie parametry jak efektywność usunięcia substancji organicznych wyrażonych jako ChZT i BZT<sub>5</sub>, a także zmianę ich stosunku.

## 2. Materiały i metody

### 2.1. Charakterystyka odcieków

Do badań wykorzystano odcieki surowe pochodzące z 21-letniego składowiska odpadów komunalnych w Kozodrzy, Regionalnej Instalacji Przekształcania Odpadów Komunalnych dla północno-zachodniego regionu

województwa podkarpackiego, na które przyjmowane są stałe odpady komunalne, inne niż niebezpieczne, w średniej ilości 55,8 tys. Mg/y. Odcieki pobrane ze zbiornika retencyjnego charakteryzowały się stężeniem substancji organicznych, wyrażonych jako: ChZT, na poziomie 9297 mg/dm<sup>3</sup>, a BZT<sub>5</sub> – 494 mg/dm<sup>3</sup>. W związku z powyższym stosunek BZT<sub>5</sub>/ChZT był niski i wynosił 0,05. Próbki pobierano do 20 l zbiorników i transportowano do laboratorium gdzie przechowywano je do dalszych analiz w 4°C i ciemności.

## 2.2. Reakcja Fentona

Badania nad oczyszczaniem odcieków metodą pogłębionego utleniania odczynnikiem Fentona prowadzone były w warunkach statycznych, w reaktorach laboratoryjnych o pojemności 1 dm<sup>3</sup>. Reagenty chemiczne były dozowane jednorazowo na początku cyklu, w fazie mieszania, bezpośrednio do reaktora. Jako pierwszy do reaktora wprowadzono żelazo w postaci FeSO<sub>4</sub>x7H<sub>2</sub>O, a bezpośrednio po nim H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> jako 30% roztwór. Ze względu na aplikacyjny charakter badań w przebiegu doświadczenia nie regulowano odczynu.

W doświadczeniu przeprowadzono cztery serie badawcze różniące się temperaturą (30, 40, 50, 60°C). Reakcję prowadzono w stężeniu H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącym 1g/dm<sup>3</sup>, ale przy różnym udziale Fe<sup>2+</sup>. Stosunek Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynosił 1:3, 1:2, 1:1.

W celu określenia efektywności procesu oczyszczania odcieków metodą pogłębionego utleniania odczynnikiem Fentona analizowano stężenie ChZT (PN-ISO 6060:2006), BZT<sub>5</sub> (DIN EN 1899-1/EN 1899-2) oraz odczyn (PN/90/C-04540.01). Próbki do pomiarów stężenia substancji organicznych pobierano po 1 h mieszania i 0,5 h sedymentacji od podania odczynników.

## 3. Wyniki badań i dyskusja

Odcieki wykorzystane w badaniach, pochodzące z 21-letniego składowiska odpadów komunalnych charakteryzowały się stężeniem substancji organicznych wyrażonych jako ChZT na poziomie 9297 mg/dm<sup>3</sup>, a jako BZT<sub>5</sub> – 494 mg/dm<sup>3</sup>. Badania nad oczyszczaniem odcieków metodą odczynnika Fentona prowadzono w czterech temperaturach: 30, 40, 50 i 60°C, stężeniu H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – 1 g/dm<sup>3</sup> i wzrastającym udziale Fe<sup>2+</sup>.

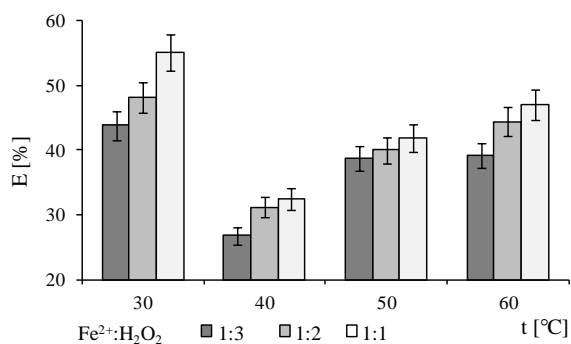
Analizując stężenie ChZT w odciekach poddanych procesowi głębokiego utleniania w temperaturach 30 i 40°C można stwierdzić, że efektywność oczyszczania malała wraz ze wzrostem udziału Fe<sup>2+</sup> w mieszaninie reakcyjnej. Przy proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącej 1:3 stężenie ChZT w odciekach oczyszczonych było najwyższe i wyniosło 5226 mg/dm<sup>3</sup> (w 30°C) oraz 6811 mg/dm<sup>3</sup> (40°C), a po zastosowaniu proporcji 1:1 było najniższe, 4169 mg/dm<sup>3</sup> (w 30°C) oraz 6283 mg/dm<sup>3</sup> (w 40°C). W czasie podwyższania temperatury do 50 i 60°C stwierdzono jednak odwrotną tendencję. Efektywność usuwania substancji organicznych malała wraz ze zmniejszeniem udziału Fe<sup>2+</sup>. Najwyższe stężenie ChZT stwierdzono w przypadku zastosowania Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> w proporcji 1:3 – 5695 mg/dm<sup>3</sup> (50°C) oraz 5652 mg/dm<sup>3</sup> (60°C), najniższe zaś przy proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącej 1:1 - 5402 mg/dm<sup>3</sup> (50°C) oraz 4932 mg/dm<sup>3</sup> (60°C). Na rysunku 3.1 przedstawiono efektywność usuwania substancji organicznych wyrażonych jako ChZT, w zależności od temperatury prowadzenia procesu. Stwierdzono, że najniższą efektywność uzyskano w temperaturze 40°C niezależnie od zastosowanej proporcji reagentów.

Jak podaje Sing, Tang [2] wraz ze wzrostem ilości Fe<sup>2+</sup> rośnie tempo utleniania substancji organicznych. Jednak jeśli ilość Fe<sup>2+</sup> będzie zbyt duża, to jony Fe<sup>2+</sup> konkurują z substancjami organicznymi o rodniki OH<sup>•</sup>. Również w takim przypadku zaczyna dominować proces koagulacji, produkując dodatkowy osad chemiczny [18].

Przy nadmiarze zarówno Fe<sup>2+</sup> jak i H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wytworzone rodniki OH<sup>•</sup> zostają zużyte zgodnie ze równaniami 3.1 i 3.2, w efekcie spadek ChZT zostaje zahamowany [2, 16].

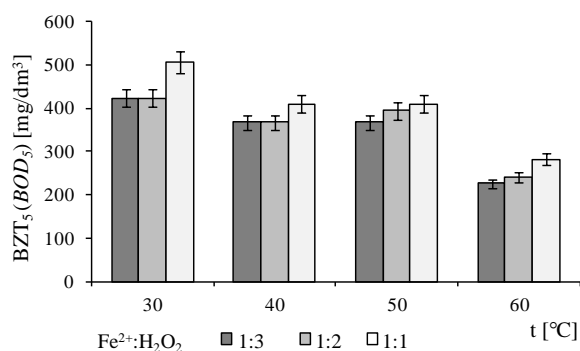


Nadmiar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> może również powodować flotację osadów z powodu wysokiej saturacji roztworu tlenem cząsteczkowym [2].



Rys. 3.1. Efektywność usuwania substancji organicznych (ChZT) z odcieków składowiskowych.

Analizując zmiany stężenia substancji organicznych wyrażonych jako BZT<sub>5</sub> w odciekach oczyszczonych stwierdzono, że prawie we wszystkich analizowanych wariantach oczyszczania stężenie BZT<sub>5</sub> w odciekach oczyszczonych było niższe niż w surowych. Wyjątek stanowiła proporcja Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynosząca 1:1 dla reakcji przeprowadzonej w 30°C (rys. 3.2). Najniższe stężenie BZT<sub>5</sub> wystąpiło w odciekach poddanych oczyszczaniu w temperaturze 60°C niezależnie od zastosowanej proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

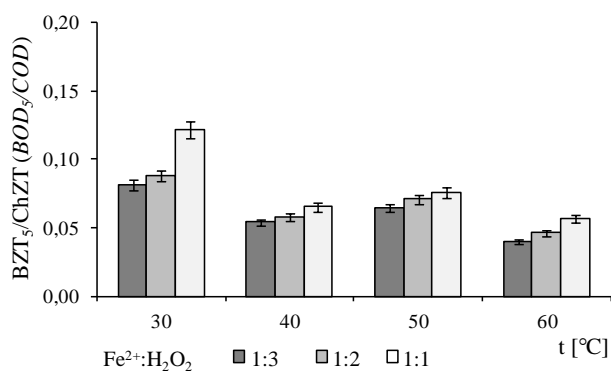


Rys. 3.2 Stężenie substancji organicznych wyrażonych jako BZT<sub>5</sub> w odciekach oczyszczonych.

Wysoko reaktywne formy tlenu powstające podczas reakcji Fentona prowadzą do uproszczenia struktury złożonych związków organicznych, dlatego obserwowany jest spadek ChZT. Zhao i wsp. [16] oraz Singh, Tang [2] podają, że wielkocząsteczkowe substancje organiczne, mogą być skutecznie utleniane przy wykorzystaniu odczynnika Fentona. W niniejszych badaniach stwierdzono jednakże obniżenie wartości ChZT przy równoczesnym spadku BZT<sub>5</sub>. Prawdopodobnie jest więc, że w warunkach jakie zastosowano w doświadczeniu, tempo chemicznej mineralizacji związków biodegradowalnych było wyższe, niż tempo przekształcania się związków trudno rozkładalnych w biodegradowalne.

Jako miarę podatności na biologiczny rozkład substancji organicznych w odciekach, przyjmuje się stosunek związków organicznych mierzonych wskaźnikiem BZT<sub>5</sub> do związków organicznych mierzonych wskaźnikiem ChZT. Jest to również ważna proporcja z punktu widzenia dalszego oczyszczania odcieków metodami biologicznymi. Ocieki surowe wykorzystane w pracy charakteryzowały się niską wartością stosunku BZT<sub>5</sub>/ChZT, na poziomie 0,05.

Na rysunku 3.3 przedstawiono stosunek BZT<sub>5</sub>/ChZT w odciekach poddanych oczyszczonym działaniu odczynnika Fentona. Z analizy danych wynika, że tylko w odpływie z reaktora, w którym zastosowano proporcję Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącą 1:3 w temperaturze 60°C, stosunek ten był niższy niż w odciekach surowych. Brak zmian stosunku BZT<sub>5</sub>/ChZT zaobserwowano po procesie utleniania w temperaturze 40°C, przy stosunku reagentów chemicznych wynoszącym 1:3 oraz po zwiększeniu stężenia żelaza w temperaturze 60°C (Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = 1:2).

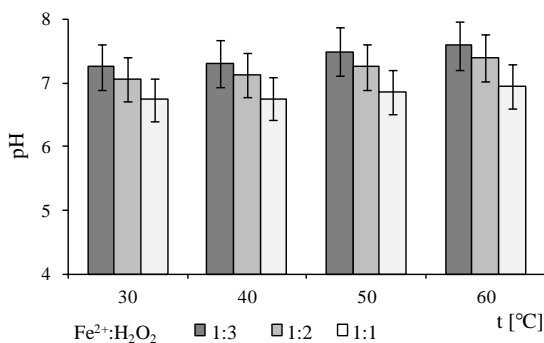


Rys. 3.3. Proporcja BZT<sub>5</sub>/ChZT w odciekach oczyszczonych.

Efektywność oczyszczania odcieków w procesie Fentona zależy głównie od stężenia obu zastosowanych reagentów. Chociaż jak podają Sing, Tang [2] to H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> jest głównym utleniaczem substancji refrakcyjnych.

Można przypuszczać, że przy proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącej 1:1 procesem dominującym w oczyszczaniu odcieków była koagulacja, w pozostałych proporcjach reagentów chemicznych utlenianie. Według Neyens, Baeyens [18] koagulacja dominuje przy stosunku Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącym >1, a chemiczne utlenianie <1. Rodniki hydroksylowe reagują głównie z jonami Fe<sup>2+</sup>, ponieważ reakcja pomiędzy Fe<sup>2+</sup> i OH<sup>•</sup> jest dziesięć razy szybsza niż pomiędzy OH<sup>•</sup> i H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Nadmiar nadtlenu wodoru powoduje samorzutny rozpad H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, a pozostałości H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mogą hamować dalsze oczyszczanie [1].

Dane literaturowe donoszą, że wartość pH ma wpływ na degradację substancji organicznych podczas oczyszczania ścieków metodą Fentona. Odczyn kwaśny jest konieczny do wyprodukowania maksymalnej ilości rodników hydroksylowych (OH<sup>•</sup>) w procesie rozkładu H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> katalizowanego przez Fe<sup>2+</sup>. Optymalne pH prowadzenia procesu wynosi 2,5-3. pH reakcji wyższe niż 5 powoduje obniżenie efektywności oczyszczania. Wynika to nie tylko z powodu rozkładu H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ale także deaktywacji katalizatora żelazowego, który tworzy kompleksy żelazowo-hydroksylowe [19, 20]. W doświadczeniu, z powodu aplikacyjnego charakteru badań nie regulowano odczynu, ciągła kontrola i regulacja pH podnosiłaby bowiem w zastosowaniu praktycznym koszty i znacznie komplikowała proces. Skierowanie ścieków do reaktora biologicznego wymagałoby następnie neutralizacji. Wartość pH odcieków surowych wynosiła 8,12. Na zmiany wartości tego wskaźnika w procesie oczyszczania wpływ miały zarówno proporcja reagentów chemicznych, jak i temperatury prowadzenia reakcji (rys. 3.4). Analizując uzyskane wyniki stwierdzono, że odczyn odcieków obniża się wraz ze wzrostem ilości Fe<sup>2+</sup> w mieszaninie reakcyjnej i spadkiem temperatury reakcji. W rezultacie najniższe pH, wynoszące 6,74 uzyskano w odciekach poddanych działaniu temperatury 30°C i proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącej 1:1, a najwyższe w temperaturze 60°C i proporcji 1:3. Jak podaje Hsueh i wsp. [20] przy prowadzenia procesu w pH wyższym niż 3 hydroliza Fe<sup>3+</sup> powoduje obniżenie tempa powstawania OH<sup>•</sup>.



Rys. 3.4. Zmiany wartości pH w czasie prowadzenia procesu utleniania odcieków

Temperatura jest jednym z czynników wpływających na skuteczność utleniania w reakcji Fentona. Jak podają Deng, Englehardt [21] temperatura prowadzenia reakcji poniżej 8,3°C powoduje niższą początkową szybkość reakcji utleniania co wpływa na efektywność oczyszczania. Z jednej strony wyższa temperatura przyspiesza tempo wytwarzania rodników OH<sup>•</sup>, z drugiej temperatura powyżej 55°C przyspiesza rozpad H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> do tlenu i wody [22]. Również Umar i wsp. [23] podają, że temperatura powyżej 50°C negatywnie wpływa na efektywność usuwania ChZT z powodu destabilizacji powstających osadów. Według Wu i wsp. [22] efektywność usuwania kwasów humusowych rośnie wraz ze wzrostem temperatury z 5 do 45°C, osiągając wartość od 55 do 81%. Dopiero podwyższenie temperatury o dalsze 10°C spowodowało spadek efektywności utleniania do 53%. Autorzy ci prowadzili proces przy proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynoszącej 1:4.

Ponieważ zbyt niska i zbyt wysoka temperatura wpływają negatywnie na stabilność i efektywność procesu, wydaje się, że temperatura w zakresie 20-30°C jest najbardziej odpowiednia do prowadzenia procesu utleniania odczynnikami Fentona. Potwierdzają to niniejsze badania, z których wynika, że w temperaturze 30°C efektywność usuwania ChZT z odcieków była najwyższa niezależnie od zastosowanej proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> i wyniosła od 43 do 55%.

#### 4. Wnioski

W badaniach analizowano wpływ proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> i temperatury prowadzenia procesu oczyszczania na efektywność usuwania z odcieków składowiskowych substancji organicznych wyrażonych jako ChZT i BZT<sub>5</sub> oraz zmian ich stosunku.

W pracy stwierdzono, że:

1. efektywność usuwania substancji organicznych (ChZT) wahała się od 26,7 do 55,1%; najefektywniejsza okazała się temperatura 30°C i proporcja Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wynosząca 1:1.
2. prawie we wszystkich analizowanych wariantach oczyszczania wartości BZT<sub>5</sub> w odciekach oczyszczonych były wyższe niż w surowych. Wyjątek stanowiło zastosowanie proporcji Fe<sup>2+</sup>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1:1 i temperatury 30°C. Również w tym wariantcie oczyszczania uzyskano najwyższy stosunek BZT<sub>5</sub>/ChZT w odciekach oczyszczonych wynoszący 0,12.
3. pH odcieków poddanych procesowi chemicznego utleniania zmieniało się w niewielkim zakresie (6,74-7,6) stwierdzono jednak, że obniża się wraz ze wzrostem ilości Fe<sup>2+</sup> w mieszaninie reakcyjnej i spadkiem temperatury reakcji.

#### Literatura

1. Hermosilla D., Cortijo M., Huang C.P.: Optimizing the treatment of landfill leachate by conventional Fenton and photo-Fenton processes, *Science of the Total Environment*, nr. 407, 2009, s. 3473-3481
2. Singh S.K., Tang W.Z.: Statistical analysis of optimum Fenton oxidation conditions for landfill leachate treatment, *Waste Management*, nr. 33, 2013, s. 81-88
3. Ahmed F.N., Lan C.Q.: Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review, *Desalination*, nr 287, 2012, s. 41-54
4. Guo J.S., Abbas A.A., Chen Y.P., Liu Z.P., Fang F., Chen P.: Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process, *Journal of Hazardous Materials*, nr. 178, 2010, s. 699-705
5. Foo K.Y., Hameed B.H.: An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process, *Journal of Hazardous Materials*, 2009, nr. 171, s. 54-60
6. Huo S.L., Xi B.D., Yu H.C., He L.S., Fan S.L., Liu H.L.: Characteristics of dissolved organic matter (DOM) in leachate with different landfill ages, *Journal of Environmental Science*, nr. 20, 2008, s. 492-498
7. Kulikowska D.: Charakterystyka oraz metody usuwania zanieczyszczeń organicznych z odcieków pochodzących z ustabilizowanych składowisk odpadów komunalnych, *Ecological Chemistry and Engineering S*, nr. 3 vol. 16, 2009, s. 389-402



8. Amokrane A., Comel C., Veron J.: Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation, *Water Research*, nr. 31, 1997, s. 2775-2782
9. Aziz H.A., Alias S., Adlan M.N., Asaari F.A.H., Zahari M.S.: Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes, *Bioresource Technology*, nr. 98, 2007, s. 218-220
10. Singh S.K., Townsend T.G., Mazyck D., Boyer T.H.: Equilibrium and intraparticle diffusion of stabilized landfill leachate onto micro- and meso-porous activated carbon, *Water Research*, nr. 46, 2012, s. 491-499
11. Tabet K., Moulin P., Vilomet J.D., Amberto A., Charbit F.: Purification of landfill leachate with membrane processes: preliminary studies for an industrial plant, *Separation Science and Technology*, nr. 37, 2002, s. 1041-1063
12. Li H.S., Zhou S.Q., Sun Y.B., Lv J.A.: Application of response surface methodology to the advanced treatment of biologically stabilized landfill leachate using Fenton's reagent, *Waste Management*, nr. 30, 2010, s. 2122-2129
13. Rivas F.J., Beltran F., Carvalho F., Acedo B., Gimeno O.: Stabilized leachates: sequential coagulation-flocculation plus chemical oxidation process, *Journal of Hazardous Materials*, nr. 116, 2004, s. 95-102
14. Mahmud K., Hossain M.D., Shams S.: Different treatment strategies for highly polluted landfill leachate in developing countries, *Waste Management*, nr. 32, 2012, s. 2096-2105
15. Huang C.P., Dong C., Tang Z.: Advance chemical oxidation: its present role and potential future in hazardous waste treatment, *Waste Management*, nr. 13, 1993, s. 361-377
16. Zhao X., Wei X., Xia P., Liu H., Qu, J.: Removal and transformation characterization of refractory components from biologically treated landfill leachate by  $\text{Fe}^{2+}/\text{NaClO}$  and Fenton oxidation, *Separation and Purification Technology*, nr. 116, 2013, s. 107-113
17. Koc-Jurczyk J.: Removal of Refractory Pollutants from Landfill Leachate Using Two-Phase System, *Water Environment Research*, nr. 86, 2014, s. 74-80
18. Neyens E., Baeyens J.: A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique, *Journal of Hazardous Materials*, nr. 98, 2003, s. 33-50
19. Kang Y.W., Hwang K.Y.: Effect of reaction conditions on the oxidation efficiency in the Fenton process, *Water Research*, nr. 34, 2000, s. 2786-2790
20. Hsueh C.L., Huang Y.H., Wang C.C., Chen C.Y.: Degradation of azo dyes using low iron concentration of Fenton and Fenton-like system, *Chemosphere*, nr. 58, 2005, s. 1409-1414
21. Deng Y., Englehardt J.D.: Treatment of landfill leachate by the Fenton process, *Water Research*, nr. 40, 2006, s. 3683-3694
22. Wu Y., Zhou S., Qin F., Zheng K., Ye X.: Modeling the oxidation kinetics of Fenton's process on the degradation of humic acid, *Journal of Hazardous Materials*, nr. 179, 2010, s. 533-539
23. Umar M., Aziz H.A., Yusoff M.S.: Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate. *Waste Management*, nr. 30, 2010, s. 2113-2121

