



Selected methods of treatment of leachate from municipal landfills - for review

Joanna DŁUGOSZ¹

¹ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, Kielce 25-314, tel 41 -34-24-571, fax 41 – 34-24-535, e-mail: j_dlugosz@interia.eu

Abstract

Article is a review of the literature to the methods of treatment of leachate from municipal landfills (both young and established). In addition, the paper presents a general description of the selected methods and their removal efficiency of pollutants, including COD, TOC, BOD₅ etc.

Keywords: leachate, methods of treatment, Fenton, biological treatment methods, adsorption, coagulation

Streszczenie

Wybrane metody oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych – praca przeglądowa

Artykuł jest przeglądem literatury na temat metod oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych (zarówno młodych, jak i ustabilizowanych). Poza tym w pracy przedstawiono ogólną charakterystykę wybranych metod oraz ich efektywność usuwania zanieczyszczeń, w tym ChZT, OWO, BZT₅ itd.

Słowa kluczowe: odcieki, metody oczyszczania, Fenton, biologiczne metody oczyszczania, adsorpcja, koagulacja

1. Wstęp

W wyniku reakcji oraz przemian zachodzących w trakcie eksploatacji, a także po zamknięciu składowiska powstaje wiele szkodliwych substancji [1, 2]. Najdłużej emitowanym rodzajem emisji powstającym na składowisku odpadów są odcieki [3]. Odcieki wg definicji podanej w Dyrektywie Rady 1999/31/WE o składowiskach odpadów, to „każdy płyn sączący się przez składowane odpady i wydzielany z lub zawarty w składowisku” [4]. Według Rozporządzenia Ministra Środowiska [5] „odcieki ze składowisk odpadów niebezpiecznych oraz ze składowisk odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne gromadzi się w specjalnych zbiornikach lub bezpośrednio odprowadza do kanalizacji”. Warunki zrzutu odcieków do kanalizacji reguluje Rozporządzenie Ministra Budownictwa z dnia 14 lipca 2006 r. w sprawie sposobu realizacji obowiązków dostawców ścieków przemysłowych oraz warunków wprowadzania ścieków do urządzeń kanalizacyjnych (Dz. U. 2006 nr 136 poz. 964). Poza odprowadzeniem do kanalizacji i wspólnym oczyszczaniem ze ściekami bytowo-gospodarczymi, odcieki mogą być zagospodarowane poprzez recyrkulację na składowisku lub podczyszczanie [6]. Warto zauważyć, iż silnie stężone wody odciekowe wymagają specjalistycznego traktowania, a ich ilość, skład oraz prędkość przemieszczania w obrębie składowanych odpadów mogą być zróżnicowane [1, 7]. W tabeli 1.1 sugerowane zakresy stężeń poszczególnych wskaźników są dość szerokie i zależne nie tylko od tego czy dotyczą składowiska młodego czy starego, ale i od źródła literaturowego, z którego zostały zaczerpnięte.

Tabela 1.1. Zakres stężeń zanieczyszczeń w mg/dm^3 , w „typowych” odciekach ze starego i nowego składowiska [8]

Parametr	Składowiska odpadów komunalnych (stare)	Składowiska odpadów komunalnych (nowe)
BZT ₅ [mgO_2/dm^3]	100÷200 50÷100	2000÷30000 10000÷20000
ChZT [$\text{mg O}_2/\text{dm}^3$]	100÷500 500÷3000	3000÷60000 20000÷40000
Azot amonowy [$\text{mgN}_{\text{NH}_4^+}/\text{dm}^3$]	20÷40	10÷800 1000÷2000
LKT jako kwas octowy [mg/dm^3]	50÷100	9000÷25000
Fosfor ogólny [mgP/dm^3]	5÷10	5÷100
pH [-]	6,6÷7,5 7÷8	4,5÷7,5 6÷7 6,9÷8,9

Wybierając technologię oczyszczania odcieków należy uwzględnić m.in. zmieniający się skład chemiczny odcieku (tabela 1.1) i jego ilość. Poza tym niezbędne jest utrzymanie minimalnych kosztów oczyszczania odcieku, w skład których wchodzi np. koszt zakupu środków chemicznych, koszty eksploatacji i utrzymania oczyszczalni, koszty energii elektrycznej, mediów, itp. Istotne jest również maksymalnie wykorzystanie istniejącego potencjału składowiska np. istniejących źródeł ciepła, energii. Wg Szycy [6] procesy, jakim można poddać odcieki w celu ich oczyszczenia lub podczyszczenia dzieli się na:

- mechaniczne,
- biologiczne,
- chemiczne,
- fizyczno-chemiczne,
- kombinacje tych metod.

Ponadto w literaturze [9] zwraca się uwagę, iż w celu podczyszczenia odcieków oraz zmniejszenia ich ilości zastosować można recyrkulację odcieków na pryzmę składowanych odpadów.

2. Metody mechaniczne

Mechaniczne oczyszczanie ścieków eliminuje większe ciała stałe (pływające oraz wleczone), a także cząstki ziarniste o średnicy od 0,1 mm, zawiesiny łatwo opadające, oleje i tłuszcze. Do procesów mechanicznych zalicza się cedzenie, flotację, sedymentację oraz filtrację, a w ciągu technologicznym stosuje się głównie kraty, sita, piaskowniki, tłuszczowniki, a także osadniki wstępne [10]. Wg Szycy [6] oprócz napowietrzania, metody te nie znajdują zastosowania w oczyszczaniu odcieków ze składowisk odpadów, a związane jest to bezpośrednio z ich charakterystyką.

Za pomocą wstępnego napowietrzania z odcieków usunąć można nadmiar azotu amonowego. Zalecane jest to szczególnie w przypadku kierowania odcieków do oczyszczania biologicznego, gdyż wysoka zawartość NH_3 wpływa hamująco na przebieg procesów z udziałem osadu czynnego [6].

3. Metody biologiczne

Oczyszczanie biologiczne realizuje się w oparciu o biomase, która jest utrzymywana w postaci zawieszony w komorze osadu czynnego lub przyczepionej do podłoża, którym jest wypełnienie złoża biologicznego lub piasek w złożu fluidyzacyjnym. Organizmy tworzące biomasę rozkładają zanieczyszczenia zawarte w ściekach w

sposób tlenowy i/lub beztlenowy. Odcieki trudno poddają się oczyszczaniu metodami biologicznymi, co związane jest z ich składem – występuje duża ilość związków azotu, przy jednoczesnej niekorzystnej proporcji do węgla organicznego [11]. W przypadku tlenowego oczyszczania odcieków metodą biologiczną zanieczyszczenia zostają przekształcone przede wszystkim w CO₂ oraz osady. W wyniku beztlenowego oczyszczania substancje organiczne przekształcane są w parę wodną, biogaz zawierający głównie CO₂ oraz CH₄, osady [12].

3.1. Tlenowe oczyszczanie metodą osadu czynnego

Parametrami wpływającymi w istotny sposób na efektywność procesu oczyszczania metodą osadu czynnego są m.in. czas zatrzymania w komorze osadu czynnego (KOC), obciążenie osadu czynnego ładunkiem zanieczyszczeń oraz wiek biomasy. W przypadku przetrzymania odcieku w KOC przez okres 10 dób, a także obciążeniu komory poniżej 0,5 kgBZT₅/m³·d uzyskano obniżenie poziomu BZT₅, ChZT, OWO powyżej 95% [6]. Jednak Szyc [6] zwraca uwagę na to, iż w przypadku tej metody trudne jest uzyskanie tak wysokiej efektywności, chociażby ze względu na zmienność sezonową ilości i jakości odcieków, co zaburza pracę osadu czynnego. Badania przeprowadzone przez Barbusińskiego i in. [13] wykazały, iż możliwe jest usunięcie ChZT na poziomie 70÷92% w przypadku, gdy odcieki stanowią maksymalnie 18% dodatek do mieszaniny ze ściekami bytowo-gospodarczymi. Warto jednak zauważyć, że analizowano odcieki ze starego składowiska, a wartość początkowa ChZT w odciekach zawierała się w przedziale 800÷1300 gO₂/m³. W tej samej publikacji Barbusiński i in. zwrócili uwagę, że nie analizowano przebiegu procesu denitryfikacji, a w przypadku nityfikacji dużych ilości azotu amonowego może wystąpić konieczność stosowania zewnętrznego źródła węgla.

3.2. Oczyszczanie beztlenowe

Metody beztlenowe są dość często stosowane w oczyszczaniu odcieków z młodych składowisk odpadów, gdyż w takich odciekach znajdują się LKT, alkohole i inne związki organiczne podatne na fermentację. Procesy beztlenowego oczyszczania odcieków pozwalają na obniżkę zawartości związków organicznych na poziomie 70÷80% [14]. Wg badań, na które powołuje się Szyc [6] efektywność usuwania związków organicznych wyrażonych w jednostkach ChZT jest jeszcze wyższa i zawiera się w przedziale 92÷99%, pod warunkiem, iż fermentacja prowadzona jest w temperaturze 23÷30°C, trwa 10, 12,5, 15 bądź 27 dni, a stosunek BZT₅:ChZT jest większy niż 0,5 i obciążenie komory zawiera się w przedziale 0,85÷1,05 kgChZT/m³·d.

3.3. Oczyszczanie tlenowo-beztlenowe

W związku z tym, iż odcieki ze składowisk ustabilizowanych charakteryzują się niekorzystnym stosunkiem BZT₅/N, niezbędne jest wprowadzanie zewnętrznego donora elektronów. Następstwem wprowadzenia takiego donora w konwencjonalnej nityfikacji oraz denitryfikacji jest wysokie zapotrzebowanie na węgiel organiczny. W literaturze [15] można znaleźć bardziej nowoczesne technologie oparte na nitytacji (częściowa nityfikacja) oraz denitritacji (skrócona denitryfikacja). Dzięki takim działaniom otrzymuje się wzrost szybkości denitryfikacji, niższą produkcję biomasy, a także zmniejszenie o 25% zapotrzebowania na tlen i 40% redukcję ilości węgla. Wg Kulikowskiej i in. [16] prowadzenie procesów w SBR w warunkach ograniczonego stężenia tlenu (0,7 mg O₂/dm³) oraz w naprzemiennych warunkach tlenowo/anoksydacyjnych wzmaga nitytację. Ponadto w reaktorze, w którym były zapewnione naprzemienne warunki tlenowo/anoksydacyjne efektywność usuwania azotu była ponad 1,3-krotnie wyższa w porównaniu z reaktorem, w którym stosowano ograniczone stężenie tlenu w fazie napowietrzania.

Procesem, na który warto zwrócić uwagę przy omawianiu metod biologicznych, stosowanym w niewielu oczyszczalniach ścieków na świecie jest technologia Sharon. Polega on na wykorzystaniu różnic szybkości wzrostu między nitrozobakteriami, które utleniają jony amonowe do azotynów, a nitrobakteriami, utleniającymi azotyny do azotanów. W technologii Sharon stabilność procesu jest zazwyczaj osiągana poprzez utrzymywanie podwyższonej temperatury, ok. 35°C przy pH powyżej 7. W takich warunkach bakterie utleniające azot azotanowy (III) wykazują prawie dwukrotnie niższe tempo wzrostu w porównaniu z utleniającymi azot amonowy, poza tym technologia ta nie wymaga dodawania węgla organicznego, który jest konieczny dla bakterii denitryfikacyjnych. Proces Sharon zalecany jest do usuwania azotu amonowego ze ścieków o stężeniu powyżej 500 mg/dm³, ponieważ wraz ze wzrostem stężenia koszty potrzebne na przeprowadzenie procesu ulegają zmniejszeniu [17,18].

4. Oczyszczanie ze ściekami bytowo-gospodarczymi

Oczyszczanie odcieków ze składowisk odpadów wraz ze ściekami bytowo-gospodarczymi obecnie jest jedną z najczęściej stosowanych metod [19]. W przypadku wyboru takiego sposobu gospodarki odciekami, należy uwzględnić wiele czynników ograniczających tę metodę. Szyz [6] zwraca uwagę na to, iż maksymalny udział odcieków w dopływie na oczyszczalnię nie powinien przekraczać 5%. Badania przeprowadzone przez Fudalę-Książek [20] wykazały, iż należy każdorazowo wyznaczyć bezpieczny dodatek odcieków do ścieków, gdyż wzrastający udział procentowy odcieków w mieszaninie ze ściekami obniża: szybkość uwalniania fosforanów w fazie beztlenowej, szybkość poboru fosforanów w fazie anoksycznej, a także szybkość poboru fosforanów w fazie tlenowej.

5. Metody chemiczne

5.1. Koagulacja, flokulacja

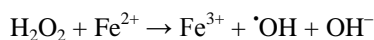
Procesy koagulacji i flokulacji mogą być z powodzeniem stosowane w przypadku odcieków ze starych składowisk odpadów. Oprócz tego mogą być wykorzystywane jako proces wstępnego podczyszczania przed odwróconą osmozą, czy też oczyszczaniem biologicznym. W przypadku zastosowania koagulacji/flokulacji w ostatnim etapie oczyszczania za pomocą tych procesów usuwana jest dodatkowo biodegradowalna materia organiczna. Czynniki, które w istotny sposób wpływają na efektywność procesu są dawka koagulantu, odczyn i obecność substancji wspomagających (bentonit, PWA, krzemionka, zeolity, flokulanty) [21]. Najczęściej stosowanymi koagulantami są m.in. sole żelaza, czy też glinu np. FeCl_3 , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ [22]. Sole żelaza są bardziej efektywne niż sole glinu np. dawka soli żelaza pozwala obniżyć wskaźnik ChZT o 50%, a ta sama ilość soli glinu czy wapna daje efektywność usuwania zanieczyszczeń na poziomie 10÷40% [23]. W procesie koagulacji wg Wiszniewskiego i in. [24] można w 90% usunąć barwę.

Przy dawce $0,3\text{g/dm}^3$ FeCl_3 efektywność usuwania takich metali jak Zn(II), Cd(II), Pb(II) zawiera się w przedziale 95÷98%, natomiast dla Cu(II), Ni(II) oraz Cr(VI) wynosi 74÷87%. Wadami tej metody oczyszczania są zwiększona produkcja osadów oraz wzrost stężenia metali pochodzących z soli koagulantu (glinu, żelaza), a także wrażliwość na zmiany pH [25,21].

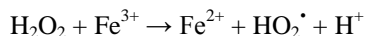
5.2. Zaawansowane metody utleniania

Konwencjonalne metody oczyszczania ścieków nie zawsze są skuteczne i efektywne, a przede wszystkim w przypadku usuwania z nich substancji trudno biodegradowalnych. W związku z tym zaawansowane metody utleniania (ang. Advanced Oxigen Processes - AOP) są alternatywą dla metod konwencjonalnych. W zaawansowanych metodach utleniania stosuje się różne układy utleniające, a wśród nich wymienić można m.in. układy stosujące dwa lub trzy czynniki utleniające: O_3/UV , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{UV}$.

Oczyszczanie odcieków metodą Fentona wg danych literaturowych [26,27] jest jedną z najbardziej popularnych oraz stosunkowo tanich metod usuwania zanieczyszczeń organicznych z odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. Proces ten polega na reakcji jonów Fe^{2+} z nadtlaniem wodoru z wytworzeniem rodników hydroksylowych (przy wartości pH poniżej 5) [27]:



Następnie powstałe jony Fe^{3+} ulegają dalszym reakcjom, w wyniku których dochodzi do odtworzenia jonów Fe^{2+} [27]:



Wysoki potencjał oksydacyjno-redukcyjny wytwarzanych rodników hydroksylowych $\cdot\text{OH}$ (potencjał utleniania 2,80V), pozwala na utlenienie większości zanieczyszczeń do prostszych form, ulegających biodegradacji [28]. Istotnymi parametrami mającymi wpływ na efekt końcowy oczyszczania w danym przypadku są wartość pH, rodzaj odczynnika Fentona oraz jego dawka.

Aneggi i in. [30] badali skuteczność niejednorodnego procesu Fentona przy oczyszczaniu odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. Do przeprowadzenia tego procesu użyto szklanego reaktora o ciągłym mieszaniu (400 obrotów na minutę). Badania prowadzono 120minut w temperaturze 70°C (343K) i zrealizowano na próbie 100 ml odcieku z zastosowaniem 10 mg katalizatora i 5 ml 3% H_2O_2 . Najskuteczniejszym katalizatorem spośród analizowanych okazał się tlenek ceru, przy zastosowaniu którego uzyskiwano obniżenie

OWO powyżej 50%. Jednak są to wstępne analizy, które wymagają dalszych badań uwzględniających rozpoznanie wielu zmiennych mających wpływ na proces (m.in. pH, temperatura).

W literaturze można znaleźć również przykłady prowadzenia procesu Fentona wspomaganego koagulacją. Wg Gawdzika i in. [31] efektywnym środkiem wspomagającym usuwanie zanieczyszczeń jest popiół lotny z węgla kamiennego. Popiół taki spełnia rolę koagulantu, środka wspomagającego sedymentację. Wykazano [31], iż niewielki dodatek (na poziomie 0,2%) popiołów lotnych z węgla kamiennego na etapie flokulacji wpływa korzystnie na efektywność usuwania barwy, a także ChZT z odcieków śladowiskowych.

Prowadzenie procesu Fentona w sposób klasyczny, jak i zmodyfikowany, pozwala na usunięcie metali ciężkich z odcieków. W procesie Fentona osiąga się obniżenie stężenia metali do poziomu nieosiąganego za pomocą strącania mlekiem wapiennym, bądź NaOH. W przypadku zmodyfikowanego procesu Fentona po wstępnym zakwaszeniu metale strącają się głównie w formie kompleksów ze związkami humusowymi [27]. Naumczyk i in. [29] uzyskali maksymalne obniżenie wskaźnika ChZT w procesie fotoFentona na poziomie 98%. Ponadto również w przypadku elektrotleniania anodowego otrzymuje się wysoką efektywność usuwania ChZT, a dodatkową zaletą tej metody jest całkowita eliminacja jonów amonowych.

W literaturze [32] znaleźć również można opis metody z zastosowaniem reagentów H_2O_2/UV . W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono [32], iż jest to doskonała alternatywa oczyszczania tak złożonych ścieków jakimi są ocieki ze śladowisk. Optymalnymi warunkami prowadzenia procesu Fentona z reagentami H_2O_2/UV jest temperatura $45^\circ C$ oraz moc żarówki UV 400W. Zaobserwowano, iż dodatek H_2O_2 wpływa korzystnie na szybkość zachodzącego procesu (dawka H_2O_2 (10%) równa 35ml/dm^3). W wyniku reakcji nastąpił spadek stężenia amoniaku o wartość 97% oraz azotynów 66% i azotanów 68%, przy wartościach początkowych: NH_4^+ 446mg/dm^3 , NO_2^- $0,22\text{ mg/dm}^3$, NO_3^- $2,66\text{ mg/dm}^3$ oraz pH 8,01.

Wśród AOP proces Fentona powinien być najlepszym wyborem, ponieważ dzięki niemu można osiągnąć obniżenie ChZT w granicach 49÷89% przy wartościach początkowych od 837 do 8894 mg/dm^3 . Jest to proces opłacalny i prosty pod względem technologicznym, a zarówno żelazo, jak i nadtlenek wodoru są nietoksyczne [33].

6. Metody fizyczno-chemiczne

6.1. Adsorpcja

Adsorpcja to proces zachodzący na powierzchni ciał skondensowanych. Za pomocą adsorpcji można usunąć szereg substancji, w tym substancje rozkładalne biologicznie, substancje humusowe oraz chlorowane węglowodory [19]. Szybkość tego procesu zależy m.in. od wielkości cząstek adsorbentu - im większe cząstki tym wolniej zachodzi proces adsorpcji [21]. Wśród adsorbentów wymienić można m.in. zeolity, aktywny tlenek glinu, węgiel aktywny, popioły powstające ze spalania odpadów komunalnych, żywice itd.

Węgiel aktywny posiada bardzo wysoką zdolność adsorpcji, co skutkuje usunięciem 84% zanieczyszczeń wyrażonych wskaźnikiem ChZT przy wartości początkowej $1200\text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ [34]. Wg Kulikowskiej i in. [35] proces adsorpcji na pylistym węglu aktywnym (PWA) Norit SX2 najbardziej efektywnie zachodzi w ciągu pierwszych 10min procesu. Najwyższą wartość stałej adsorpcji K_s zaobserwowano przy dawce PWA 10 g/dm^3 i wynosiła ona dla zanieczyszczeń organicznych wyrażonych ChZT $0,0228\text{ g/mg}\cdot\text{min}$. Największe ilości usuniętych zanieczyszczeń w warunkach równowagowych Q_e odnotowano przy dawce węgla wynoszącej 3g/dm^3 . Ponadto efektywność usuwania zanieczyszczeń organicznych wyrażonych ChZT zmieniała się w przedziale od 30,9% do 83,3% przy dawce PWA od 2 g/dm^3 do 10g/dm^3 oraz wartości początkowej ChZT 1007mg/dm^3 [36]. Jednak w przypadku adsorpcji na węglu aktywnym dla zapewnienia skuteczności procesu i zminimalizowania czasu regeneracji oraz kosztów, niezbędna jest wstępna obróbka odcieków [37].

Wg danych literaturowych [38] lepszym adsorbentem w porównaniu z dostępnym handlowo węglem aktywnym jest popiół z łusek ryżu. Wyniki wskazują, iż ma on większą pojemność adsorpcyjną amoniaku ($P=2,2578\text{ mg/g}$) i prawie równie wysoką chłonność zanieczyszczeń wyrażonych jako ChZT ($Q=2,8893\text{ mg/g}$) w porównaniu z dostępnym handlowo węglem.

6.2. Metody membranowe

Zasada działania metod membranowych opiera się na przepływie mieszaniny przez półprzepuszczalną membranę, w wyniku czego następuje rozdzielenie składników mieszaniny. Czynnikiem decydującym o stopniu zatrzymania, bądź przepuszczania cząstek jest rozmiar porów membrany, a siłą napędową wywołującą przepływ

przez membranę może być różnica ciśnień lub różnica potencjałów chemicznych po obu stronach [21]. Jak podaje Rosik-Dulewska [19] najczęściej stosowaną metodą membranową jest odwrócona osmoza (RO), natomiast rzadko stosuje się ultrafiltrację lub nanofiltrację. W wyniku oczyszczania odcieków za pomocą RO osiąga się 8-krotną redukcję objętości ścieków surowych oraz uzyskuje się obniżkę ChZT na poziomie nawet 98%, a przewodnictwa 65%. Wg Bohdziewicz i in. [39] doczyszczanie odcieków za pomocą RO po ich biologicznym oczyszczeniu umożliwia ich bezpośrednie odprowadzenie do odbiornika naturalnego lub też kanalizacji.

6.3. Filtracja z napowietrzaniem

Skuteczną metodą usuwania żelaza i manganu z odcieków składowiskowych podaną przez Ghaly i in. [40] jest zastosowanie filtrów wyposażonych w układ napowietrzania wypełnionych wapieniem bądź mieszanką wapienia i piaskowca (stosunek mieszanki 1:1). Już po 2 godzinach filtracji nastąpiło obniżenie zawartości żelaza odpowiednio o 95,35% (wypełnienie z wapienia) i 96,32% (wypełnienie z wapienia i piaskowca). Wydłużenie czasu retencji do 24 godzin zwiększyło efektywność usuwania żelaza do 99%. Słabszy efekt uzyskano w przypadku manganu – po 24 godzinach filtracji usunięto odpowiednio 44,44% (wypełnienie z wapienia) i 22,22% (wypełnienie z wapienia i piaskowca). Odczyn pH cały czas utrzymywany był poniżej 7,7. Parametrami wpływającymi w istotny sposób na ten rodzaj oczyszczania odcieków (wytrącanie żelaza oraz manganu) są czas oraz temperatura. Jak wykazały badania Ghaly i in. [40] na filtrach wapienno-piaskowych stosując temp. 20°C już w czasie 10 minut usunięto większość żelaza, a w temp. 5°C proces usuwania takiej samej ilości żelaza trwał 50min. W przypadku manganu było podobnie – w temperaturze 20°C w czasie pierwszych 20 minut usunięto 69% tego pierwiastka, a w temperaturze 5°C w tym czasie usunięto go 42%.

7. Kombinacje metod oczyszczania

Łączenie różnych metod oczyszczania ma na celu usunięcie jak największego spektrum zanieczyszczeń z odcieków. Jak podaje Rosik-Dulewska [19] w Niemczech wśród stosowanych kombinacji metod wymienić można m.in.:

- recykulacja odcieków na złożo odpadów + oczyszczanie biologiczne z nityfikacją/denitryfikacją + adsorpcja na węglu aktywnym + strącanie chemiczne + obróbka osadów,
- recykulacja odcieków na złożo odpadów + dwustopniowa odwrócona osmoza + odparowanie koncentratu + obróbka oparów i kondensatu,
- oczyszczanie biologiczne z nityfikacją/denitryfikacją + jedno- lub dwustopniowa odwrócona osmoza + odparowanie koncentratu + obróbka oparów i kondensatu.

Efektywność usuwania poszczególnych wskaźników zanieczyszczeń w przypadku zastosowania wyżej wymienionych kombinacji metod jest bardzo wysoka. Dla odcieków po recykulacji i wartości początkowych ChZT 4000 gO₂/m³, BZT₅ 500 gO₂/m³, Nog. 2000 gN/m³, AOX 4000 mg/m³ uzyskuje się obniżenie zawartości zanieczyszczeń odpowiednio w przedstawionych powyżej schematach na następującym poziomie [19]:

- dla: ChZT 81,25÷87,50%; BZT₅ <98%; Nog. 93,5%; AOX 86,25÷92,5%,
- dla: ChZT 97,5÷99,5%; BZT₅ 94÷98%; Nog. 80÷97,5%; AOX 80÷95%,
- dla: ChZT 98,75÷99,75%; BZT₅ 98÷99,6%; Nog. 99,0÷99,75%; AOX 87,5÷99,5%.

8. Recykulacja odcieków na pryzmie składowiska odpadów

W przypadku oczyszczania odcieków metodą recykulacji warto zwrócić uwagę, iż w tym przypadku oczyszczanie odcieków zachodzi dopiero w fazie metanowej – zanieczyszczenia organiczne są wykorzystywane do produkcji biogazu, zaś metale ciężkie immobilizowane. Wg danych literaturowych [41] na składowiskach z recykulacją odnotowuje się wyższe niż na składowisku bez recykulacji przewodnictwo elektrolityczne. Związane jest to z dostarczeniem do czaszy składowiska zwiększonej ilości wody, co zwiększa ługowanie soli. Ponadto można zauważyć większą zawartość ogólnego węgla organicznego, frakcji biodegradowalnych oraz jonów metali. Ponadto Lipniacka- Piaskowska [41] zwraca uwagę, iż należy optymalizować ilość dostarczanej wody tak, aby mogła nastąpić intensyfikacja procesów zarówno chemicznych, jak i biochemicznych.

Recykulacja odcieków zapewnia optymalną wilgotność oraz odpowiedni transport wody w złożu składowiska [42, 3].

9. Metody hydrofitowe

Zastosowanie metody hydrofitowej do oczyszczania odcieków pozwala za pomocą procesów zarówno biochemicznych oraz fizykochemicznych na usunięcie substancji organicznej, związków azotu, metali ciężkich oraz wielu mikrozanieczyszczeń (m.in. WWA, PCB, detergenty). Wśród stosowanych konstrukcji są zarówno systemy z powierzchniowym, jak i podpowierzchniowym systemem przepływu odcieków. Najczęściej na te obiekty trafiają już odcieki wstępnie podczyszczone, np. za pomocą sedimentacji, czy też napowietrzania [43].

Na podstawie analizy eksploatacji pilotowej hydrofitowej oczyszczalni odcieków przedstawionej w literaturze [44] wynika, iż w ciągu pierwszego roku pracy danego obiektu osiągnięto wysokie (>70%) obniżenia wartości zanieczyszczeń. Omawiany obiekt składa się ze zbiornika wyrównawczego odcieków, a także 3 złóż o przepływie podpowierzchniowym obsadzonych trzcina pospolitą. Efektywności usuwania zanieczyszczeń wynosiły: dla ChZT 87%, dla BZT₅ 95,4%, dla azotu amonowego ponad 99%, dla azotu ogólnego 98% oraz dla zawiesiny ogólnej 72%. Jednak w kolejnym roku w wyniku zmiany warunków hydraulicznych pracy złóż pionowych oraz zmiany składu odcieków kierowanych na złoża (nie dodawano już ścieków bytowo-gospodarczych) wartości efektywności były już niższe (dla: ChZT 48%, BZT₅ 95%, Nog 86%, N_{NH4} 94%). W wyniku przeprowadzonego bilansu wodnego dla danego obiektu stwierdzono, iż proces ewapotranspiracji nie ma znaczącego wpływu na skuteczność oczyszczania. Co więcej łączny wpływ ewapotranspiracji jest skompensowany opadem atmosferycznym [45].

Podsumowanie

Wybór optymalnej metody lub metod oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych musi uwzględniać m.in. zmienność ich składu i ilości w czasie, wymagania dotyczące oczyszczonych odcieków, ekonomiczne możliwości zarządzającego itp. Ponadto ze względu na różnorodność związków znajdujących się w odciekach niekiedy konieczne jest zastosowanie kombinacji procesów. Metody biologiczne są najskuteczniejsze w przypadku oczyszczania odcieków z młodych składowisk. Efektywność procesów biologicznych zdecydowanie zmniejsza się wraz z wiekiem składowiska. W związku z tym preferowanymi metodami są metody fizyczno-chemiczne, czyli np. pogłębione utlenianie, adsorpcja lub metody membranowe.

Literatura

1. Żygadło M., Gospodarka odpadami komunalnymi. Skrypt Nr 384, s. 92-94, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2002.
2. Osada T., Nemoto K., Nakanishi H., Hatano A., Shoji R., Naruoka T., and Yamada M., Review Article Analysis of Ammonia Toxicity in Landfill Leachates. International Scholarly Research Network ISRN Toxicology, Volume 2011, s. 1-6 DOI:10.5402/2011/954626.
3. Kylefors, K., Predictions of Leaching from Municipal Solid Waste (MSW) and Measures to Improve Leachate Management at Landfills. Doctoral thesis. Luleå University of Technology, Department of Environmental Engineering, Division of Waste Science and Technology, 2002, 32.
4. Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów.
5. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (Dz. U. 2003 nr 61 poz. 549).
6. Szyk J., Odcieki ze składowisk odpadów komunalnych. Instytut Ochrony Środowiska, s. 42-49, Warszawa 2003
7. Machajski J., Olearczyk D., Bilans wodny w obrębie składowiska odpadów komunalnych. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, PAN, Oddział w Krakowie, Nr 7, 2008, s. 89-100.
8. Oleszkiewicz J., Eksploatacja składowisk odpadów. poradnik decydenta, Lem Projekt s.c., Kraków 1999, s. 126-127.

9. Bilgili M.S., Demir A., Akkaya E., Ozkaya B., COD fractions of leachate from aerobic and anaerobic pilot scale landfill reactors. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 158, 2008, s. 157-163.
10. Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J.A., Sozański M.M., *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*, PZiITS, Poznań 1997.
11. Jurczyk Ł., Koc-Jurczyk J., Różalska P., Dynamika ilościowa AOB w procesie biologicznego oczyszczania odcieków składowiskowych w warunkach beztlenowych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 14, nr 4, 2011, s. 309-322.
12. Lema, J.M., R. Mendez and R. Blazquez, 1988. Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: A review. *Water air soil pollut.*, nr 40, s. 223-250. DOI: 10.1007/BF00163730.
13. Barbusiński K., Pieczykolan B., Kościelniak H., Amalio-Kosel M., Wpływ odcieków składowiskowych na skuteczność oczyszczania ścieków miejskich i właściwości osadu czynnego. *Ochrona Środowiska* vol. 32, nr 3, 2010, s. 33-37.
14. Surmacz-Gorska J., Miksch K., Kita M., Możliwości podczyszczania odcieków z wysypisk metodami biologicznymi. *Archiwum Ochrony Środowiska*, vol. 26, Nr 3, 2000, s.43-54.
15. Abeling U., Seyfried C.F., Anaerobic – aerobic treatment of high – strength ammonium wastewater – nitrogen removal via nitrite. *Water Science Technology*, 5 (6/26), 1992, 1007–1015.
16. Kulikowska D., Bernat K., Kowalski B., Wpływ strategii napowietrzania w cyklu pracy SBR na efektywność nitracji-denitracji podczas oczyszczania odcieków składowiskowych. *Inżynieria Ekologiczna* nr 28, 2012, s. 32-42.
17. Błaszczak M. K., *Mikroorganizmy w ochronie środowiska*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
18. Koc-Jurczyk J., Jurczyk Ł., Micał P., Wpływ wypełnienia w reaktorze sekwencyjnym na efektywność usuwania substancji organicznych i azotu z odcieków składowiskowych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 14, nr 1, 2011, s. 59-71.
19. Rosik-Dulewska C., *Podstawy gospodarki odpadami*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
20. Fudala-Książek S., *Wpływ zrzutu odcieków składowiskowych na efektywność pracy miejskiej oczyszczalni ścieków*. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Gdańsk 2011.
21. Kulikowska D., Charakterystyka oraz metody usuwania zanieczyszczeń organicznych z odcieków pochodzących z ustabilizowanych składowisk odpadów komunalnych. *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 16, nr. 3, 2009, s. 389-403.
22. Amokrane, A., C. Comel and J. Veron, 1997. Landfill leachates pretreatment by coagulation flocculation. *Water Res.*, nr 31, s. 2775-2782, DOI: 10.1016/S0043-1354(97)00147-4.
23. Abbas A. A., Jingsong G., Ping L. Z., Ya P. Y., Al-Rekabi W. S., Review on Landfill Leachate Treatments, *American Journal of Applied Sciences*, nr 6 (4), 2009, s. 672-684.
24. Wiszniowski J., Robert D., Surmacz-Górska J., Miksch K., Weber J.V., Landfill leachate treatment methods: A review, *Environmental Chemistry Letters*, vol. 4, nr 1, s. 51-61, DOI: 10.1007/s10311-005-0016-z, 2006.
25. Renou S., Givaudan J.G., Poulain S., Dirassouyan F., Moulin P. Landfill leachate treatment: Review and opportunity, *Journal of Hazardous Materials* , nr 150 (3), 2008, s. 468-493.
26. Tengrui L., Al-Harbawi A., Jun Z., Ming Bo L., The effect and its influence factors of the Fenton process on the old landfill leachate, *Journal of Applied Sciences*, nr 7(5), 2007, s. 724-727.
27. Krzysztozek A., Bogacki J., Naumczyk J., Badania nad usuwaniem metali ciężkich z odcieków ze składowisk odpadów w procesie Fentona oraz zastosowanie jego modyfikacji. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 51, 2011, 36–42.

28. Piaskowski K., Świdorska-Dąbrowska R., Zastosowanie procesu Fentona i sekwencyjnych reaktorów porcjowych do oczyszczania ścieków z produkcji okien drewnianych. *Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Rocznik Ochrony Środowiska*, t. 12, 2010, s. 503-523.
29. Naumczyk J., Dmochowska A., Prokurat I., Oczyszczanie odcieków ze składowisk odpadów komunalnych za pomocą wysokoefektywnych metod utleniania i elektROUTLENIANIA, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 3, 2006, s. 33-37.
30. Aneggi E., Cabbai V., Trovarelli A., Goi D., Potential of Ceria-Based Catalysts for the Oxidation of Landfill Leachate by Heterogeneous Fenton Process, Hindawi Publishing Corporation, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, 8 pages, DOI:10.1155/2012/694721
31. Gawdzik J., Latońska J., Żygadło M., Application of Fenton for the landfill leachate treatment, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*, vol. 14, nr 3, 2012, p. 21-26.
32. Brito N.N., Paterniani J. E. S., Brota G. A., Pelegrini R. T., Ammonia removal from leachate by photochemical process using H₂O₂, *Ambi-Agua, Taubaté*, vol.5, nr 2, 2010, s. 51-60, DOI: 10.4136/ambi-agua.136.
33. Li W., Zhou Q., Hua T., Removal of Organic Matter from Landfill Leachate by Advanced Oxidation Processes: A Review, Hindawi Publishing Corporation, *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2010, 10 pages, DOI:10.1155/2010/270532.
34. Rodriguez J., Castrillón L., Marañón E., Sastre H., Fernández E., Removal of non-biodegradable organic matter from landfill leachates by adsorption. *Water Research*, 2004.
35. Kulikowska D., Sułek P., Usuwanie zanieczyszczeń organicznych z odcieków składowiskowych metoda adsorpcji na pylistym węglu aktywnym część II. *Kinetyka adsorpcji, Czasopismo Techniczne, Wyd. Politechniki Krakowskiej*, z. 1-Ś/2008, s. 99-105.
36. Kulikowska D., Sułek P., Usuwanie zanieczyszczeń organicznych z odcieków składowiskowych metoda adsorpcji na pylistym węglu aktywnym część I. *Efektywność procesu, Czasopismo Techniczne, Wyd. Politechniki Krakowskiej*, z. 1-Ś/2008, s. 89-98.
37. Robert A. Corbitt, *Standard Handbook of Environmental Engineering*, 2nd Edition, Wyd. McGraw-Hill Companies, 1998.
38. Halim A. A., Zainal Abidin N. N., Awang N., Ithnin A., Othman M. S., Wahab M. I., Ammonia and COD removal from synthetic leachate using rice husk composite adsorbent, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, vol. 5, nr 1, s.24-31, 2011, doi: 10.4090/juee.2011.v5n1.024031.
39. Bohdziewicz J., Świerczyńska A., Dobór najkorzystniejszych warunków prowadzenia biomembranowego współocyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. *Nauka Przyroda Technologie*, t. 5, z. 4, 2011, s.1-9.
40. Ghaly A. E., Kamal M. A., Mahmoud N. S., Cote R., Treatment of Landfill Leachate using Limestone/Sandstone Filters Under Aerobic Batch Conditions, *American Journal of Environmental Sciences*, nr 3 (2), 2007, s. 43-53.
41. Lipniacka-Piaskowska A., Funkcjonowanie składowiska odpadów z recykulacją odcieków. Praca doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii Chemicznej Nieorganicznej i Inżynierii Środowiska, Szczecin 2010.
42. Kaczorek K., Ledakowicz S., Analiza pracy składowiska odpadów z punktu widzenia inżynierii bioreaktorowej. *Biotechnologia*, nr 2 (69), 2005, s.69-87.
43. Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., *Hydrofitowe oczyszczanie wód i ścieków*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
44. Wojciechowska E., Doświadczenia z eksploatacji pilotowej hydrofitowej oczyszczalni odcieków ze składowiska odpadów komunalnych w zależności od reżimu hydraulicznego. *Inżynieria Ekologiczna*, nr 25, 2011, s. 176-187.

45. Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E., Koncepcja oczyszczania odcieków o wysokich stężeniach zanieczyszczeń metodą hydrofitową. Monografie Komitetu Inżynieria Środowiska PAN, vol. 61, t. 4, s.9-18, Lublin 2009.
-