

RADOSŁAW ŚLĘZAK  
LILIANA KRZYSZEK  
STANISŁAW LEDAKOWICZ

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

# Zmiany zawartości węgla organicznego w składowisku tlenowym – symulacja w lizymetrach

## Wprowadzenie

Produkty rozkładu materii organicznej zawartej w odpadach powodują powstawanie odcieków oraz gazu, które wywołują zanieczyszczenie środowiska. Rozkład materii organicznej zawartej w odpadach w warunkach beztlenowych jest procesem długotrwałym w porównaniu do warunków tlenowych. Badaniem przebiegu procesów zachodzących w tlenowych składowiskach odpadów komunalnych w lizymetrach zajmowali się *Bilgili* i inni [1], *Borglin* i inni [2], *Cossu* i inni [3] i *Erses* i inni [4]. *Erses* i inni wykazali, że napowietrzanie przyspiesza rozkład materii organicznej; 90% redukcję ChZT w odciekach osiągnięto w lizymetrach napowietrzanych po 70 dniach, a w nienapowietrzanych po 462 dniach.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań procesu symulacji składowiska tlenowego w lizymetrach i zaproponowano model matematyczny opisujący zmiany zawartości węgla organicznego w odciekach oraz zmiany ilości produkowanego ditlenku węgla.

## Materiały i metody

Symulację składowiska odpadów przeprowadzono w lizymetrach o objętości roboczej 15 dm<sup>3</sup>. Lizymetry załadowano modelowym składem odpadów, który określono na podstawie analizy składu morfologicznego odpadów dla miasta Łodzi [5]. Przyspieszenie symulacji składowiska odpadów w lizymetrach uzyskano poprzez dodanie kompostu pochodzącego z *Kompostowni Odpadów Zielonych* w Łodzi. Warstwę odpadów rozdrobnionych do wymiarów od 2 do 4 cm przesypano warstwą kompostu. Lizymetry załadowano 5 kilogramami masy modelowej, a następnie dodano 5 dm<sup>3</sup> wody.

Napowietrzanie lizymetru rozpoczynano po 8 dniach od chwili załadunku lizymetru. Do lizymetru wprowadzano powietrze z szybkością 1 dm<sup>3</sup>/h, kontrolując szybkość przepływu za pomocą masowego kontrolera przepływu (model 5850TR, *Emmerson*) przez 209 dni. Podczas prowadzonych eksperymentów odcieki recyrkulowano raz na dobę przez 5 minut z szybkością 0,91 cm<sup>3</sup>/s za pomocą pompy perystaltycznej (typ 101 U/R, *WATSON MARLOW PUMPS*). Na wylocie gazu z lizymetru znajdował się analizator gazu oraz przepływomierz. Badania w lizymetrach prowadzone były w trzech powtórzeniach.

W odciekach pobieranych z lizymetrów analizowano lotne kwasy tłuszczowe zgodnie z Polską Normą PN-75/C-04576, wykorzystując aparat *Buchi-Distillation Unit B-324* oraz ogólny węgiel organiczny wykorzystując aparat *IL550 TOC-TN* firmy *Lachat Instruments*. W gazie opuszczającym lizymetry, mierzono stężenie tlenu, metanu, ditlenku węgla za

pomocą analizatora gazu *LMS GAS DATA* oraz ilość powstającego gazu wykorzystując przepływomierz firmy *Ritter* (typ TG01/05).

## Wyniki badań i dyskusja

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów symulacji składowiska tlenowego w lizymetrach zaproponowano model kinetyczny opisujący zmiany zawartości węgla organicznego w odciekach oraz zmiany ilości produkowanego ditlenku węgla. W wyniku hydrolizy węgiel organiczny zawarty w odpadach przechodzi do odcieków. Węgiel organiczny w odciekach podzielono na dwie grupy: węgiel organiczny związków po hydrolizie i węgiel organiczny z lotnych kwasów tłuszczowych. Węgiel organiczny związków po hydrolizie został obliczony jako różnica pomiędzy zawartością ogólnego węgla organicznego w odciekach i węgla organicznego z lotnych kwasów tłuszczowych w odciekach. Węgiel organiczny w formie lotnych kwasów tłuszczowych oraz ditlenek węgla powstawał z węgla organicznego związków po hydrolizie. Następnie z lotnych kwasów tłuszczowych zawartych w odciekach był produkowany ditlenek węgla. Zużywanie węgla organicznego zawartego w odpadach opisano równaniem:

$$\frac{dS}{dt} = -k_1 S \quad (1)$$

gdzie:

$k_1$  – stała szybkości zużywania węgla organicznego zawartego w odpadach [d<sup>-1</sup>],

$S$  – zawartość węgla organicznego w odpadach [gC/kgSM] (SM – sucha masa odpadów).

Ilość węgla organicznego zawartego w odpadach określano na podstawie równania:

$$S = S_o + T_o + L_o - T - L - G \quad (2)$$

gdzie:

$S_o$  – zawartość węgla organicznego w odpadach na początku napowietrzania [gC/kgSM],

$T_o$  – zawartość węgla organicznego w odciekach na początku napowietrzania w związkach po hydrolizie [gC/kgSM],

$L_o$  – zawartość węgla organicznego w lotnych kwasach tłuszczowych w odciekach na początku napowietrzania [gC/kgSM],

$T$  – zawartość węgla organicznego w odciekach podczas napowietrzania w związkach po hydrolizie [gC/kgSM],

$L$  – zawartość węgla organicznego w lotnych kwasach tłuszczowych w odciekach podczas napowietrzania [gC/kgSM],

$G$  – ilość powstałego ditlenku węgla [gC/kgSM].

Zmiany węgla organicznego w związkach po hydrolizie w odciekach opisano równaniem:

$$\frac{dT}{dt} = k_1(S_o + T_o + L_o - T - L - G) - v_T \frac{T}{K_T + T} X_T \quad (3)$$

gdzie:

$v_T$  – właściwa szybkość zużywania węgla organicznego w związkach po hydrolizie w odciekach przez mikroorganizmy [ $d^{-1}$ ]

$K_T$  – stała *Monoda* dla mikroorganizmów wykorzystujących węgiel organiczny związków po hydrolizie w odciekach [gC/kgSM],

$X_T$  – stężenie mikroorganizmów zużywających węgiel organiczny związków po hydrolizie w odciekach [gC/kgSM].

Zmiany zawartości węgla organicznego z lotnych kwasów tłuszczowych w odciekach opisano równaniem:

$$\frac{dL}{dt} = Rv_T \frac{T}{K_T + T} X_T - v_L \frac{L}{K_L + L} X_L \quad (4)$$

gdzie:

$R$  – współczynnik wydajności określający ilość powstającego węgla organicznego w postaci lotnych kwasów tłuszczowych z węgla organicznego po hydrolizie w odciekach [gC/gC],

$v_L$  – właściwa szybkość zużywania węgla organicznego z lotnych kwasów przez mikroorganizmy [ $d^{-1}$ ]

$K_T$  – stała *Monoda* dla mikroorganizmów wykorzystujących węgiel organiczny z lotnych kwasów tłuszczowych [gC/kgSM],

$X_T$  – stężenie mikroorganizmów zużywających węgiel organiczny z lotnych kwasów tłuszczowych [gC/kgSM].

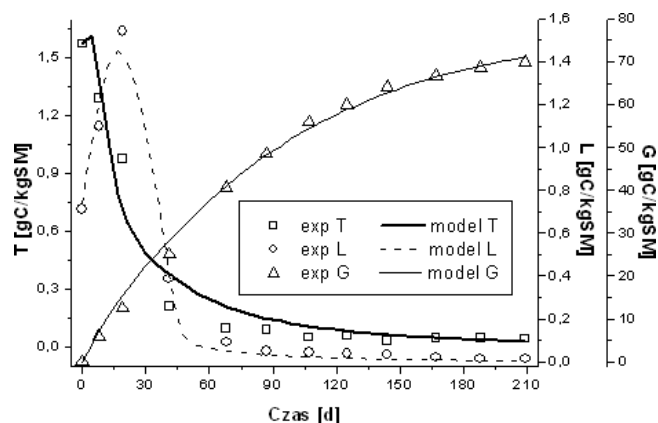
Ilość powstającego ditlenku węgla określono równaniem:

$$\frac{dG}{dt} = (1 - R)v_T \frac{T}{K_T + T} X_T + v_L \frac{T}{K_L + T} X_L \quad (5)$$

Określenie parametrów w równaniach różniczkowych oraz ich rozwiązanie wykonano za pomocą numerycznych procedur zaimplementowanych w programie *Easy-fit* (©Klaus Schittkowski, 2001, University of Bayreuth).

Na wykresie 1 przedstawiono dopasowanie modelu kinetycznego do danych doświadczalnych. Zaproponowany model dobrze opisuje zmiany węgla w symulowanym składowisku tlenowym. Podczas pierwszych dni napowietrzania występowało obniżenie zawartości węgla organicznego po hydrolizie w odciekach, podczas gdy ilość węgla organicznego lotnych kwasów tłuszczowych wzrastała. Po 20 dniach napowietrzania zawartość węgla organicznego lotnych kwasów tłuszczowych osiągnęła maksymalną wartość i w kolejnych dniach napowietrzania zaczęła maleć. Wraz ze wzrostem czasu trwania napowietrzania szybkość produkcji ditlenku zmniejszała się, co było spowodowane obniżaniem się ilości węgla organicznego w odpadach.

W tabelicy 1 przedstawiono wartości stałych obliczone na podstawie zaproponowanego modelu kinetycznego. Z modelu wynika, że z 1 g węgla organicznego związków po hydrolizie w odciekach powstawało 0,259 g węgla organicznego w postaci lotnych kwasów tłuszczowych w odciekach. Z pozostałej części węgla organicznego związków po hydrolizie w odciekach powstawał ditlenek węgla. Właściwa szybkość zużywania



Rys. 1. Dopasowanie danych doświadczalnych do modelu kinetycznego

nia węgla organicznego związków po hydrolizie w odciekach była 6,6 razy większa niż właściwa szybkość zużywania węgla organicznego z lotnych kwasów tłuszczowych.

Tabela 1

Zestawienie wartości współczynników

$k_1$	$S_o$	$v_T$	$K_T$	$X_T$	$R$	$v_L$	$K_L$	$X_L$
$d^{-1}$	$\frac{gC}{kgSM}$	$d^{-1}$	$\frac{gC}{kgSM}$	$\frac{gC}{kgSM}$	$\frac{gC}{gC}$	$d^{-1}$	$\frac{gC}{kgSM}$	$\frac{gC}{kgSM}$
$2,305 \cdot 10^{-2}$	76,9	0,466	0,268	4,28	0,259	0,0706	0,0375	5,636

## Wnioski

Zaproponowany model kinetyczny dobrze opisuje dane doświadczalne. Podczas pierwszych dni napowietrzania występowało obniżenie zawartości węgla organicznego związków po hydrolizie w odciekach, a zawartość węgla organicznego z lotnych kwasów tłuszczowych w odciekach wzrastała. Po 20 dniach napowietrzania zawartość węgla organicznego z lotnych kwasów tłuszczowych osiągnęła maksymalną wartość i w kolejnych dniach napowietrzania zaczęła maleć. Wraz z upływem czasu napowietrzania szybkość produkcji ditlenku zmniejszała się, co było wywołane zmniejszaniem się ilości węgla organicznego w odpadach. Z zaproponowanego modelu wynika, że z 1 g węgla organicznego związków po hydrolizie w odciekach powstawało 0,259 g węgla organicznego w postaci lotnych kwasów tłuszczowych w odciekach. Z pozostałej części węgla organicznego po hydrolizie w odciekach powstawał ditlenek węgla. Właściwa szybkości zużywania węgla organicznego po hydrolizie w odciekach była 6,6 razy większa niż właściwa szybkość zużywania węgla organicznego z lotnych kwasów tłuszczowych w odciekach.

**Podziękowania:** Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego za wsparcie finansowe badań w ramach projektu badawczego nr PBZ MEiN 3/2/2006 oraz Marcinowi Bizukoję za możliwość wykonania obliczeń w programie *Easy-fit*.

## LITERATURA

1. M. Bilgili, A. Demir i B. Ozkaya: Environmental Management, **38**, nr 2, 189 (2006).
2. S.E. Borglin, T.C. Hazen, C.M. Oldenburg i P.T. Zawislanski: J. of the Air & Waste Management Association, **54**, nr 7, 815 (2004).
3. R. Cossu, R. Raga i D. Rossetti: Waste Management **23**, nr 1, 37 (2003).
4. A. S. Erses, T.T. Onay i O. Yenigun: Bioresource Technology **99**, nr 13, 5418 (2008).
5. S. Ledakowicz i K. Kaczorek: Waste Management & Research, **22**, nr 3, 149 (2004).