



Modelowanie procesów biologicznego oczyszczania wybranych ścieków przemysłowych

Ewa Liwarska-Bizukojć

Katedra Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Modelling of the processes of biological treatment of selected industrial wastewater

Summary

The results of modelling of paper mill and textile wastewater biological treatment are presented. It is assumed that bioconversion of organic matter can be divided into two phases: intensive biodegradation and biodegradation limited by available substrate. The total substrate concentration is expressed as Chemical Oxygen Demand (COD_{tot}), readily biodegradable substrate as Biochemical Oxygen Demand (BOD_5) and biomass as volatile suspended solids (VSS). The real time courses of substrates and biomass concentrations are well described by simulated curves. Moreover, good agreement between calculated and experimental degree of biodegradation indicates that the applied mathematical model is of high predictability and can successfully be used for design and optimisation of industrial wastewater treatment processes.

Key words:

modelling, biodegradation, activated sludge, industrial wastewater.

Adres do korespondencji

Ewa Liwarska-Bizukojć,
Katedra Inżynierii
Środowiska,
Politechnika Łódzka,
Al. Politechniki 6,
93-590 Łódź;
e-mail:
ewaliwar@p.lodz.pl

1. Wstęp

Większość modeli dotyczących procesu biologicznego oczyszczania ścieków z udziałem osadu czynnego opiera się na modelach opracowanych przez tzw. grupę roboczą *International Association on Water Pollution Research and Control* (IAWPRC). Modele te, oznaczone symbolem ASM (*Activated Sludge Models*), różnią się między sobą sposobem charakterystyki substratu oraz liczbą uwzględnianych procesów fizykochemicznych i biochemicznych.

Wspólną cechą modeli ASM jest to, że większość procesów biochemicznego rozkładu materii organicznej opisano w nich za pomocą prostej kinetyki Monoda [1-3]. Ważnym elementem modelowania procesów biologicznego oczyszczania ścieków, jak wykazano w pracach grupy IAWPRC, jest wspomniana odpowiednia charakterystyka, „rozfrakcjonowanie” substratu oraz związane z nią uwzględnienie procesów hydrolizy substratu. Hydroliza zachodzi zarówno z fazy stałej do ciekłej, jak i w samej fazie ciekłej. Szybkość hydrolizy najczęściej wyrażana jest równaniem I rzędu względem substratu w fazie stałej albo ciekłej lub równaniem uwzględniającym adsorpcję biomasy (1):

$$r_h = k_{hx} \cdot \frac{S_s / X}{K_x + S_s / X} \cdot X \quad (1)$$

gdzie:

k_{hx} – stała hydrolizy

S_s – stężenie substratu w fazie stałej

X – stężenie biomasy

K_x – stała nasycenia

Innym ważnym procesem uwzględnianym w modelach ASM jest proces obumierania biomasy. Jest on również najczęściej opisywany za pomocą równania I rzędu względem biomasy.

Modele ASM z powodzeniem wykorzystywane są do symulacji procesów oczyszczania ścieków komunalnych, natomiast zdecydowanie mniej wiadomo o zastosowaniu ich do opisu biologicznego oczyszczania ścieków przemysłowych.

W ramach tej pracy badano możliwości zastosowania modelu matematycznego procesu biodegradacji zawiesiny stałych odpadów organicznych do opisu biologicznego oczyszczania ścieków przemysłowych. Celem pracy było przede wszystkim sprawdzenie uniwersalności wymienionego modelu. Poprawność przeprowadzonej symulacji zweryfikowano porównując doświadczalny i obliczony na podstawie symulacji stopień usunięcia $ChZT_{og}$ oraz BZT_5 .

2. Koncepcja modelu

Koncepcja modelu oparta jest na podziale biodegradacji materii organicznej zawartej w ściekach czy odpadach na dwie fazy. W pierwszej zachodzi intensywny proces biodegradacji połączony z hydrolizą substancji z fazy stałej do ciekłej. Towarzyszy temu wykładniczy wzrost biomasy. Druga faza biodegradacji limitowana jest ilością dostępnego, łatwo degradowalnego substratu. Stąd poziom wskaźników zanieczyszczeń obniża się w tej fazie nieznacznie, a stężenie biomasy pozostaje stałe.

Szybkość hydrolizy substratu w fazie stałej opisano równaniem potęgowym. Ze względu na znikomo małą intensywność hydrolizy w drugiej fazie w porównaniu z pierwszą, procesu tego w drugiej fazie nie uwzględniano ($r_H = 0$). Przyjęto ponad-

to, że w pierwszej fazie biomasa rośnie wykładniczo, natomiast w drugiej wzrost biomasy jest limitowany ilością dostępnego substratu, co opisano równaniem kinetycznym Mosera.

Całkowite stężenie substratu wyrażono jako Chemiczne Zapotrzebowanie Tlenu (ChZT_{og}), a frakcję łatwo ulegającą biodegradacji wyrażono stężeniem Biochemicznego Zapotrzebowania Tlenu (BZT_5). Przyjęto, że zawartość substancji lotnych w zawieszynie (VSS) odpowiadać będzie stężeniu biomasy.

3. Obiekt badań

Obiekt badań stanowiły różnego rodzaju ścieki przemysłowe. Opracowany dla procesu biodegradacji zawiesziny odpadów model matematyczny z powodzeniem zastosowano dla większości z nich. Jedne z najlepszych wyników symulacji uzyskano dla ścieków włókienniczych, a mówiąc dokładniej ścieków z produkcji włókien sztucznych oraz ścieków z przemysłu papierniczego, dlatego też te właśnie wyniki zaprezentowano w pracy. Należy dodać, że badane ścieki przemysłowe są podatne na biodegradację, o czym świadczy iloraz BZT_5/ChZT mieszczący się w zakresie od 0,5 do 0,8.

4. Bilans substratu i biomasy

Uwzględniając równania na szybkość poszczególnych reakcji biochemicznych oraz podział procesu na dwie fazy, bilans stężenia substratu oraz biomasy w poszczególnych fazach biodegradacji przedstawia się następująco:

- dla fazy intensywnej biodegradacji ($t < t_G$)

$$\frac{d([\text{ChZT}_{\text{og}}] - [\text{BZT}_5])}{dt} = -k \cdot ([\text{ChZT}_{\text{og}}] - [\text{BZT}_5])^p \cdot X \quad (2)$$

$$\frac{d([\text{BZT}_5])}{dt} = \left[k \cdot ([\text{ChZT}_{\text{og}}] - [\text{BZT}_5])^p - \frac{1}{Y_{\text{XS}}(t)} \cdot \mu_{\text{max}} \right] \cdot X \quad (3)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{\text{max}} \cdot X \quad (4)$$

- dla biodegradacji limitowanej ilością dostępnego substratu ($t > t_G$)

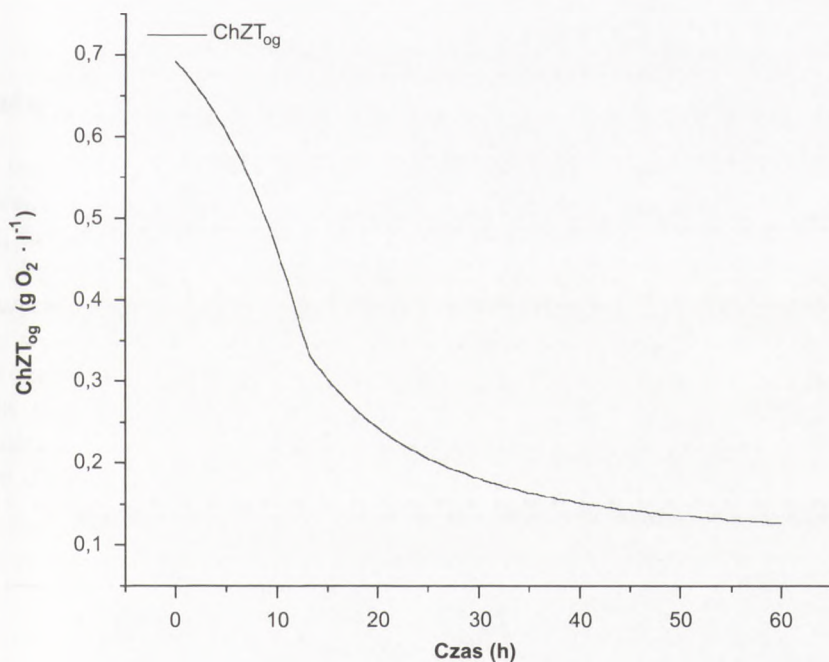
$$\frac{d([\text{ChZT}_{\text{og}}] - [\text{BZT}_5])}{dt} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d([\text{BZT}_5])}{dt} = -\frac{1}{Y_{\text{XS}}(t)} \cdot \mu_{\text{max}} \cdot \frac{[\text{BZT}_5]^n}{[\text{BZT}_5]^n + K_{\text{BZT}}} \cdot X \quad (6)$$

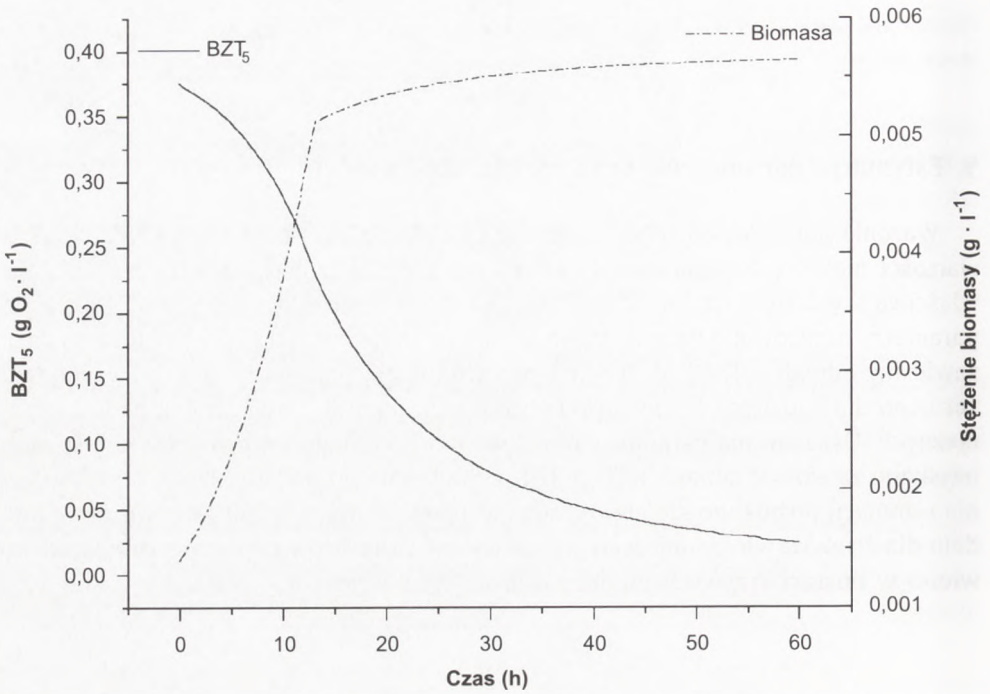
$$\frac{dX}{dt} = \mu_{\max} \cdot \frac{[BZT_5]^n}{[BZT_5]^n + K_{BZT}} \cdot X \quad (7)$$

5. Estymacja parametrów oraz rozwiązanie modelu

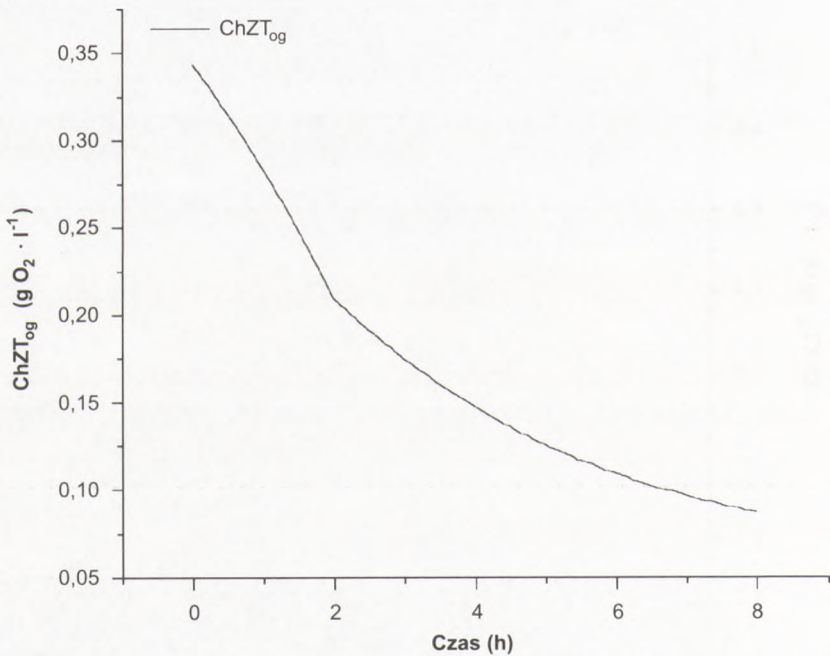
Warunki początkowe, to jest stężenie $ChZT_{og}$, BZT_5 oraz biomasy (VSS), a także wartości niektórych parametrów takich, jak stała hydrolizy (k) oraz maksymalna właściwa szybkość wzrostu biomasy μ_{\max} , zaczerpnięto z literatury [4-6]. Pozostałe parametry oszacowano na podstawie wyników modelowania procesu biodegradacji zawiesiny odpadów [7-9]. W tabeli 1 przedstawiono parametry kinetyczne modelu zarówno dla badanych ścieków przemysłowych, jak i dla zawiesiny odpadów organicznych. Oszacowane parametry podstawiono do układów równań i w ten sposób uzyskano zależność zmian $ChZT_{og}$, BZT_5 oraz biomasy od czasu. Do przeprowadzenia symulacji posłużono się algorytmem Rungego-Kutty IV rzędu. Rozwiązanie modelu dla ścieków włókienniczych jak i ścieków z zakładów papierniczych przedstawiono w postaci krzywych modelowych na rysunkach 1-4.



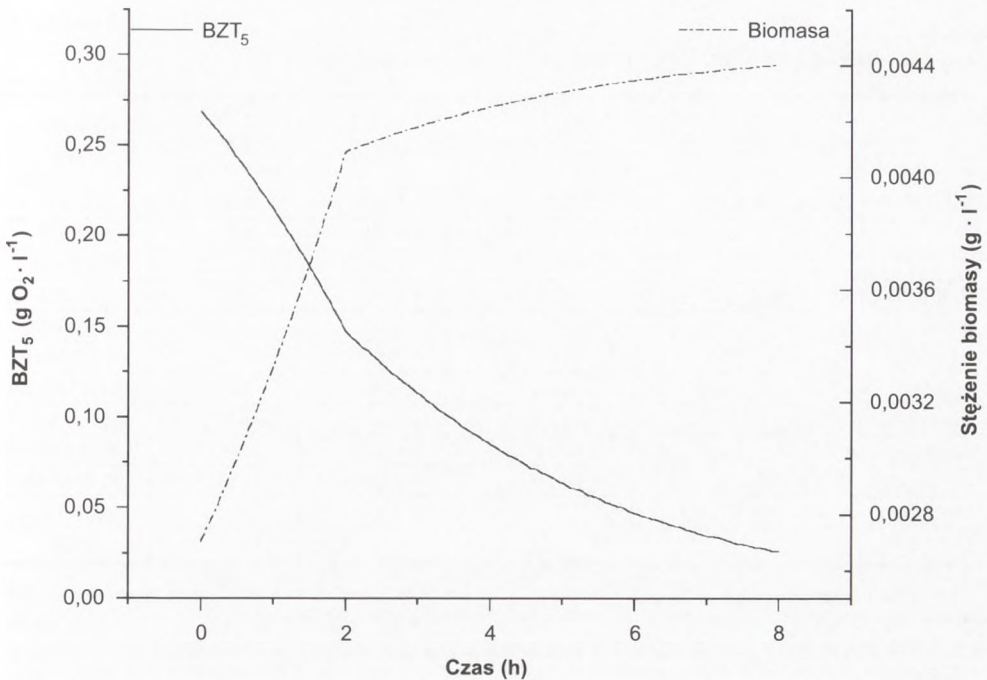
Rys. 1. Symulacja zmian $ChZT_{og}$ podczas biodegradacji ścieków z zakładów papierniczych.



Rys. 2. Symulacja zmian BZT₅ oraz biomasy podczas biodegradacji ścieków z zakładów papierniczych.



Rys. 3. Symulacja zmian ChZT_{og} podczas biodegradacji ścieków włókienniczych.



Rys. 4. Symulacja zmian BZT₅ oraz biomasy podczas biodegradacji ścieków włókienniczych.

6. Omówienie wyników

Na wstępie należy zaznaczyć, że procesy biodegradacji ścieków przemysłowych i zawiesiny odpadów charakteryzowały się odmiennymi warunkami początkowymi. Chodzi tu przede wszystkim o znacznie mniejsze, o jeden, a nawet dwa rzędy wielkości, obciążenie substratu ładunkiem zanieczyszczeń w przypadku ścieków przemysłowych. Biomasa osadu czynnego także w istotny sposób różni się od składającej się prawie wyłącznie z bakterii autochtonicznej mikroflory zawiesiny odpadów. Różnice te znajdują odzwierciedlenie w wartościach parametrów kinetycznych modelu (tab. 1). Wartości stałych nasycenia są o dwa rzędy wielkości niższe, a współczynniki wydajności biomasy względem substratu o dwa rzędy wielkości wyższe dla procesu biodegradacji ścieków przemysłowych.

Zestawienie warunków początkowych i parametrów kinetycznych modelu

Parametr		Ścieki włókiennicze	Ścieki z przemysłu papierniczego	Zawiesina odpadów
warunki początkowe	ChZT _{og} (gO ₂ l ⁻¹)	0,343	0,692	53-124
	BZT ₅ * (gO ₂ l ⁻¹)	0,269	0,375	4,7-19,1
	s.m.o. ** (g l ⁻¹)	0,0027	0,0014	0,035-0,12
stała hydrolizy k(t) (l ^p g _{biomasy} ⁻¹ ·h ⁻¹ ·gO ₂ ^{1-p})		5,5	8,6	1,07-10,2
p (-)		0,4	0,25	0,0153-0,096
współczynniki wydajności Y _{XS} (g _{biomasy} ·g O ₂ ⁻¹)	faza I	0,0104	0,0104	0,00509-0,0136
	faza II	0,00256	0,00256	0,000417-0,0269
n (-)		1	1,5	0,586-9,657
stałe nasycenia (g O ₂ l ⁻¹)	faza I	0,002	0,002	0,81-1,86
	faza II	1,15	1,15	468-1,546·10 ⁶
maksymalna właściwa szybkość wzrostu (h ⁻¹)		0,20	0,1	0,055-0,13
czas graniczny (h)		3	13	18-36

* w przypadku zawiesiny odpadów ChZT w fazie ciekłej; ** w przypadku odpadów stężenie biomasy oszacowane na podstawie RNA.

Charakter zmian krzywych modelowych ChZT_{og}, BZT₅ oraz biomasy nie odbiega od rzeczywistego przebiegu tych parametrów przedstawianego dla badanych ścieków przemysłowych w literaturze [6]. Na szczególną uwagę zasługuje jednak porównanie obliczeniowych oraz doświadczalnych wartości stopni usunięcia zanieczyszczeń przedstawione w tabeli 2. Stopień „obliczeniowy” uzyskano na podstawie wyników przeprowadzonej symulacji, natomiast „doświadczalny” stopień usunięcia zanieczyszczeń pochodzi ze źródła literaturowego [6], z którego zaczerpnięto również warunki początkowe oraz wartości niektórych parametrów kinetycznych dla wybranych ścieków przemysłowych. Przewidywany stopień usunięcia zanieczyszczeń, zarówno dla ChZT_{og}, jak i dla BZT₅, jest zbliżony do tego, jaki uzyskiwano dla badanych ścieków w praktyce przemysłowej. Wynosi on ponad 90% BZT₅ dla obydwu rodzajów ścieków oraz 74% ChZT_{og} dla ścieków włókienniczych, i między 81 a 88% dla ścieków z zakładów papierniczych. Świadczy to jednoznacznie o poprawności zastosowanego modelu matematycznego, a także o jego wysokich wartościach predykcyjnych i uniwersalności. Należy w tym miejscu też podkreślić, że zgodność wyników symulacji z wynikami eksperymentów w odniesieniu do stopnia usunięcia zanieczyszczeń zaobserwowano również w przypadku procesu biodegradacji zawiesin odpadów organicznych [9].

Tabela 2

Porównanie obliczeniowego i doświadczalnego stopnia usunięcia zanieczyszczeń

Rodzaj substratu	Czas (h)	Stopień biodegradacji ChZT _{og} (%)		Stopień biodegradacji BZT ₅ (%)	
		obliczeniowy	doświadczalny	obliczeniowy	doświadczalny
ścieki włókiennicze	8	74,4	74,1	90,2	93,8
ścieki z przemysłu papierniczego	60	81,6	88,6	93,4	97,8

7. Wnioski

Model procesu biodegradacji zawiesiny stałych odpadów organicznych można z powodzeniem zastosować do opisu biologicznego oczyszczania ścieków z udziałem osadu czynnego. Uzyskana symulacja zmian stężenia substratu zarówno ChZT_{og}, jak i BZT₅ oraz stężenia biomasy dobrze oddaje rzeczywisty przebieg zmian tych parametrów.

Drugim ważnym potwierdzeniem przydatności i wysokich walorów predykcyjnych tego modelu jest zgodność doświadczalnego i obliczonego na podstawie symulacji stopnia biodegradacji zanieczyszczeń. W przypadku obydwu wskaźników zanieczyszczeń ChZT_{og}, jak i BZT₅, uzyskano zbliżone wartości obliczeniowych i doświadczalnych poziomów ich usunięcia.

Podsumowując, wymienione wnioski świadczą o uniwersalności i szerokich możliwościach zastosowania modelu matematycznego opracowanego dla procesu biodegradacji zawiesiny stałych odpadów organicznych w bioreaktorze.

Literatura

1. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T., (1987), Activated Sludge model No. 1. IAWPRC Scientific and Technical Reports, No. 1, London: IAWPRC.
2. Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M. C., Marais G.v.R., (1995), Activated Sludge Model No.2. IAWQ Scientific and Technical Reports, No. 3, London: IAWQ.
3. Gujer W., Henze M., Loosdrecht M., Mino T., (1999), *Wat. Sci. Tech.*, 39 (1), 183-193.
4. Henze M., Harremoës P., Jansen J. L. C., Arvin E., (1995), *Wastewater treatment. Biological and chemical processes*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
5. Henze M., (1999), *Modeling of aerobic wastewater treatment processes*, in: *Biotechnology. Environmental processes*, vol.11a, 2nd ed. H.-J. Rehm, & G. Reed, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
6. Eckenfelder W. W., Mustermann J. L., (1995), *Activated sludge treatment of industrial wastewater*, Technomic Publishing Company, Lancaster-Basel.
7. Liwarska-Bizukojć E., Bizukojć M., Ledakowicz S., (2001), *Bioproc. Biosys. Eng.*, 24(5), 195-202.
8. Liwarska-Bizukojć E., Bizukojć M., Ledakowicz S., (2002), *Wat. Res.*, 36, 2124-2132.
9. Liwarska-Bizukojć E., (2001), *Kinetyka aerobowej biodegradacji zawiesin odpadów organicznych w bioreaktorach*, praca doktorska, PL.