

WALDEMAR WIECHECKI  
RAFAŁ WIŚNIEWSKI

Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

# Modelowanie pracy węzła fermentacji metanowej w warunkach zróżnicowanych temperatur. Część I: Model pracy pojedynczej komory i jego weryfikacja

## Wprowadzenie

W trakcie dotychczas prowadzonych badań opracowano ogólny model mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków i za pomocą modelowania badano jej funkcjonowanie [1, 2]. Wyniki modelowania potwierdziły poprawność opracowanego modelu oraz wykazały, że istotną rolę w pracy oczyszczalni odgrywa węzeł fermentacji metanowej, składający się z kilku komór fermentacji metanowej (KFM). Z tego względu opracowano model takiego węzła, który po zweryfikowaniu posłużył do badania metodą modelowania wpływu zmiennych sterujących na efektywność jego pracy, rozumianą jako stopień redukcji w węźle ładunków obciążników ścieków i osadów [3–5].

Obecnie, w ramach kontynuacji, prowadzone są badania wpływu temperatury fermentacji metanowej na efektywność pracy węzła. Ze względu na złożoność tego zagadnienia w pierwszym etapie badano proces wytwarzania biogazu w pojedynczej KFM w warunkach zróżnicowanych temperatur. Przedmiotem etapu drugiego będzie modelowanie pracy węzła, składającego się z kilku KFM o zróżnicowanych temperaturach fermentacji.

Poniżej przedstawiono wyniki pierwszego etapu, w którym opracowano poszerzony model pracy pojedynczej KFM, uwzględniający zmodyfikowaną w stosunku do wcześniejszych prac kinetykę procesów wytwarzania biogazu oraz wpływ temperatury na pracę KFM a następnie, w oparciu o dane z przemysłowych KFM, zweryfikowano poszerzony model i wyznaczono jego parametry.

## Kinetyka procesu fermentacji metanowej

W procesie fermentacji metanowej substrat, przykładowo charakteryzowany wartością biologicznego zapotrzebowania tlenu BZT<sub>5</sub>, zużywany jest na trzy główne sposoby:

1. Do produkcji biomasy – zazwyczaj to zużycie opisywane jest jako proces, którego szybkość jest związana ze stężeniami biomasy  $X$  i substratu  $S$  w sposób następujący:

$$\frac{d}{dt} X = \mu X \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} \quad (2)$$

gdzie współczynnik  $\mu$  to właściwa szybkość wzrostu a  $\mu_{\max}$  jest maksymalną jego wartością, gdy wzrost biomasy nie jest limitowany, zaś  $K_s$  to stała *Michaelisa-Menten*.

2. Do wytwarzania produktu (biogazu) – wytwarzanie biogazu  $P$  jest powiązane z przyrostem biomasy następująco:

$$\frac{d}{dt} P = \frac{1}{Y_{XP}} \cdot \frac{d}{dt} X \quad (3)$$

gdzie  $Y_{XP}$  jest współczynnikiem konwersji wiążącym przyrost biomasy z ilością produktu:

$$Y_{XP} = \frac{X - X_0}{P - P_0} \quad (4)$$

3. Podtrzymanie funkcji życiowych biomasy – zwykle opisywane równaniem:

$$-\frac{d}{dt} S = \beta X \quad (5)$$

gdzie  $\beta$  jest współczynnikiem proporcjonalności.

Opisując kinetykę zużycia substratu należy zatem przyjąć, że produkcja biogazu jest powiązana z przyrostem biomasy i podtrzymaniem jej funkcji życiowych [6] – tak więc, uwzględniając powyższe zależności, równanie kinetyczne zużycia substratu będzie następujące:

$$-\frac{d}{dt} S = \frac{1}{Y_{XS}} \mu X + \beta X \quad (6)$$

gdzie  $Y_{XS}$  jest współczynnikiem konwersji dla wytwarzania biomasy i biogazu o postaci analogicznej jak  $Y_{XP}$ .

Przystępując do całkowania równania (6) dokonano następujących uproszczeń:

1. Zużycie substratu dla podtrzymania funkcji życiowych biomasy jest zanedbywalnie małe.
2. Podczas fermentacji metanowej biomasa przyrasta znacznie wolniej niż w warunkach idealnych, zatem  $K_s > S$ . Stąd można zapisać:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s} \quad (7)$$

3. Ponieważ  $K_s$  jest znacznie większe od  $S$ , więc szybkość przyrostu biomasy jest niewielka i porównywalna z szybkością zamierania komórek – założyć więc można, że  $X = \text{const}$ .

Uwzględniając powyższe uproszczono równanie (6) do postaci następującej:

$$-\frac{d}{dt} S = \lambda S \quad (8)$$

gdzie  $\lambda$  jest stałą kinetyczną opisaną zależnością:

$$\lambda = \frac{1}{Y_{XS}} \frac{\mu_{\max}}{K_S} X \quad (9)$$

Po scałkowaniu równania (8) uzyskano równanie kinetyczne zużycia substratu:

$$S = S_0 e^{-\lambda t} \quad (10)$$

W opisie kinetyki wytwarzania produktu przyjęto, że współczynnik  $Y_{SP}$  konwersji substratu w produkt ma postać następującą:

$$Y_{SP} = \frac{S_0 - S}{P - P_0} \quad (11)$$

gdzie:

- $P_0$  – początkowe stężenie produktu,
- $S_0$  – początkowe stężenie substratu.

Przy założeniu, że  $P_0 = 0$  oraz uwzględniając równanie (10) uzyskano z równania (11) następującą zależność, opisującą zmianę stężenia produktu w czasie:

$$P = P_m (1 - e^{-\lambda t}) \quad (12)$$

gdzie

- $P_m$  – maksymalne stężenie produktu opisane zależnością:

$$P_m = \frac{S_0}{Y_{SP}} \quad (13)$$

Powyższy model poszerzono o wpływ temperatury  $T$ , uwzględniając następujące zależności:

1. Zmienność stałej kinetycznej  $\lambda$  w funkcji temperatury:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (14)$$

gdzie:

- $E$  – energia aktywacji,
- $R$  – stała Rydberga,
- $T$  – temperatura.

2. Wielkości przyrostu biomasy i wytwarzania biogazu zmieniają się wraz z temperaturą, przy czym zjawiska te są trudne do opisu matematycznego. Na podstawie dostępnych danych doświadczalnych [7] została opracowana następująca zależność maksymalnego stężenia produktu  $P_m$  od temperatury  $T$ :

$$P_m = P_{m0} e^{kT} \quad (15)$$

gdzie  $k$  to stała temperaturowa.

Tak więc opracowany model wytwarzania biogazu w funkcji temperatury ma postać następującą:

$$P = P_m (1 - e^{-\lambda t}) \quad (16)$$

$$P_m = P_{m0} e^{kT} \quad (17)$$

$$\lambda = \lambda_0 e^{\frac{-E}{RT}} \quad (18)$$

### Wyznaczenie parametrów modelu

Wyznaczenie wartości parametrów opracowanego modelu zostało przeprowadzone dla dostępnej bazy danych doświad-

czalnych, dotyczących badań BZT<sub>5</sub> ścieków i osadów w przemysłowych KFM [7]. Przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów określono wartości parametrów modelu (Tablica 1).

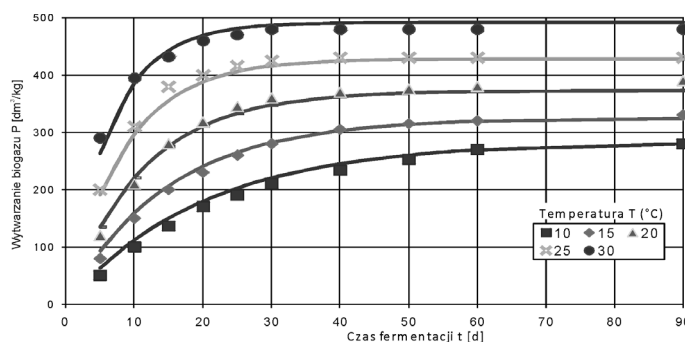
Tablica 1

Wyznaczone wartości parametrów modelu

| $\lambda_0$ | $E$       | $R$       | $P_{m0}$              | $k$   |
|-------------|-----------|-----------|-----------------------|-------|
| [1/d]       | [J / mol] | [J/mol K] | [dm <sup>3</sup> /kg] | [1/K] |
| 1077902     | 39716     | 8,3144    | 0,112                 | 0,028 |

### Weryfikacja modelu

W celu weryfikacji modelu przeprowadzono modelowanie wytwarzania biogazu w warunkach zróżnicowanych temperatur fermentacji. Na rys. 1 porównano uzyskane wyniki modelowania z danymi doświadczalnymi (linie – wartości obliczone, punkty – wartości doświadczalne).



Rys. 1. Porównanie wyników modelowania wytwarzania biogazu z danymi doświadczalnymi

### Podsumowanie

Opracowano poszerzony model wytwarzania biogazu w warunkach zróżnicowanych temperatur fermentacji metanowej. Przeprowadzono modelowanie wytwarzania biogazu uzyskując zgodność wyników modelowania z danymi eksploatacyjnymi. Model i wyniki modelowania stanowiąc będą bazę dla realizacji drugiego etapu pracy oraz mogą być wykorzystane przy opracowywaniu systemu sterowania pracą węzła fermentacji metanowej w oczyszczalni ścieków.

### LITERATURA

1. W. Wiechecki, R. Wiśniewski: Inż. Ap. Chem. **42**, nr 4s, 86 (2003).
2. W. Wiechecki, R. Wiśniewski: Inż. Ap. Chem. **43**, nr 3s, 167 (2004).
3. W. Wiechecki, R. Wiśniewski: Inż. Ap. Chem. **44**, nr 4s, 115 (2005).
4. W. Wiechecki, R. Wiśniewski: Inż. Ap. Chem. **45**, nr 5s, 137 (2006).
5. W. Wiechecki, R. Wiśniewski: Inż. Ap. Chem. **46**, nr 4–5, 133 (2007).
6. J. Bailey, D. Ollis: Biochemical engineering fundamentals, McGraw-Hill, 1986.
7. K. i K. R. Imhoff, Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków, Bydgoszcz, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, 1996.