

Ireneusz Białobrzewski\*, Jerzy Dziejowski\*\*

\*Katedra Inżynierii Procesów Rolniczych

\*\*Katedra Chemii

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

## SYMULACYJNY MODEL PROCESU WYTWARZANIA KOMPOSTU W BIOSTABILIZATORZE DANO

### Streszczenie

W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania matematycznego modelu, o parametrach skupionych, do symulacji kinetyki zmian temperatury odpadów w procesie ich kompostowania w biostabilizatorze DANO. Stwierdzono, że wyniki generowane przez zastosowany model oddają charakter zmian temperatury zgodny z danymi literaturowymi. Generalnie dokładność modelu była mała a powodem tego prawdopodobnie było przyjęcie założeń upraszczających do modelowania, oraz literaturowych wartości stałych, opisujących fizyczne właściwości złoża odpadów.

**Słowa kluczowe:** model matematyczny, biostabilizator, temperatura odpadów

### Wykaz oznaczeń

- c – Ciepło właściwe złoża odpadów [J/(kg K)]
- R – Promień biostabilizatora [m]
- s – Grubość płaszcza biostabilizatora [m]
- t – Czas [s]
- T – Temperatura [°C]
- q – Strumień strat ciepła [W/m<sup>3</sup>]
- X – Zawartość kompostu w odpadach [kg/kg]
- X<sub>m</sub> – Zawartość kompostu w produkcie [kg/kg]
- Y – Metaboliczny współczynnik wydzielania ciepła [J/kg]
- λ – Współczynnik przewodzenia ciepła płaszcza (stali) [W/(m K)]
- ε – Porowatość złoża [-]
- ρ – Gęstość [kg/m<sup>3</sup>]
- μ – Stała szybkości wzrostu mikroorganizmów [1/s]

#### Indeksy dolne

- max – wartość maksymalna
- o – otoczenie biostabilizatora
- p – powietrze
- opt – wartość optymalna
- s – substrat
- wer – weryfikacja
- z – złożo

### Wprowadzenie

Podczas procesu produkcji kompostu z materiałów biologicznych występuje tlenowy wzrost mikrobiologiczny, któremu towarzyszy wytwarzanie dużej ilości ciepła [Dziejowski, Kazanowska 2002; Zwietering i in. 1999; Weppen 2001]. Kinetyka mikrobiologicznego wzrostu może być opisana logistycznym, empirycznym równaniem (1) [Sangsurasak i Mitchell 1998]:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \left(1 - \frac{X}{X_{max}}\right). \quad (1)$$

W równaniu (1) stała szybkości wzrostu mikroorganizmów,  $\mu$ , jest zależna od temperatury biomasy. Zależność tą można opisać warunkami [Sangsurasak i Mitchell 1998]:

$$\mu = \mu_{opt}, \quad T \leq T_{opt}, \quad (2a)$$

$$\mu = \left(\frac{b + T_{max} - T_{opt}}{T_{max} - T_{opt}}\right) \left(\frac{\mu_{opt}(T_{max} - T_{opt})}{b + T_{max} - T_{opt}}\right), \quad T_{opt} \leq T \leq T_{max}, \quad (2b)$$

$$\mu = 0, \quad T \geq T_{max}. \quad (2c)$$

Makroskopowy bilans cieplny bioreaktora, uwzględniający zmianę temperatury wsadu biostabilizatora, generację ciepła wywołaną wzrostem mikroorganizmów oraz straty ciepła do otoczenia, można opisać równaniem (3) [Sangsurasak i Mitchell 1998]:

$$\rho_z c \left(\frac{dT}{dt}\right) = \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{dX}{dt} - q. \quad (3)$$

## Cel badań

Celem pracy było wykorzystanie matematycznego modelu, o parametrach skupionych, do symulacji kinetyki zmian temperatury odpadów biologicznych podczas procesu ich kompostowania w biostabilizatorze DANO.

## Metodyka badań

Obiektem badań, na którym przeprowadzono weryfikację zaproponowanego modelu matematycznego, był przemysłowy biostabilizator DANO, którego schemat przedstawiono na rys. 1. W biostabilizatorze, w wyniku jego ruchu obrotowego i odpowiedniej wewnętrznej konstrukcji, zapewniono przesuwanie się odpadów od ściany czołowej w głąb walczaka. Średni czas przetrzymywania odpadów w biostabilizatorze wynosił około 44 h. Proces załadunku odpadów do biostabilizatora odbywał się codziennie pomiędzy godziną 8 a 14. Średnie, całkowite obciążenie biostabilizatora wynosiło ok. 160 t natomiast dzienne obciążenie wynosiło ok. 40 t. Przy danej geometrii biostabilizatora i znanym średnim jego wypełnieniu wynoszącym 0,5 całkowitej jego objętości średnia gęstość złoża odpadów wynosiła  $923 \text{ kg/m}^3$ . Na podstawie tak wyliczonej wartości  $\rho_z$  oraz przy przyjętej wartości  $\rho_p$  z równania (4):

$$\rho_z = \varepsilon \rho_p + (1 - \varepsilon) \rho_s \quad (4)$$

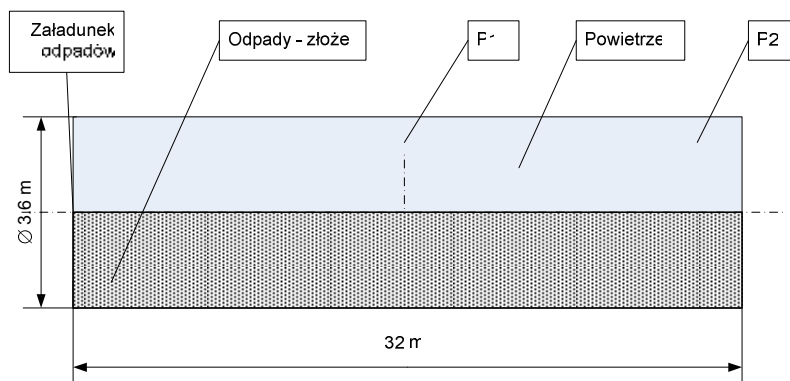
obliczono wartość  $\rho_s$ . Wszystkie wartości stałych występujących w wykorzystanych modelach matematycznych zestawiono w tabeli 1.

Przemieszczanie się odpadów wewnątrz biostabilizatora pozwala przyjąć założenia dotyczące złoża odpadów oraz powietrza nad złożem:

- złoże jest jednorodne,
- temperatura w całym poprzecznym przekroju walczaka jest stała,
- nie występuje strumienia ciepła w złożu odpadów w kierunku osi wzdłużnej biostabilizatora,
- ilość ciepła potrzebna na zmianę stanu skupienia wody jest pomijalnie mała w stosunku do całkowitej ilości ciepła wytwarzanej w biomasie,
- strumień strat ciepła występuje na całym obwodzie przekroju poprzecznego walczaka,
- temperatura w otoczeniu biostabilizatora jest stała.

Strumień strat ciepła, występujący w modelu (3), opisano zależnością (5):

$$q = \frac{2\lambda(T - T_o)}{\ln\left(\frac{R+s}{R}\right)R^2}. \quad (5)$$



Rys. 1. Schemat biostabilizatora DANO. P1 i P2 punkty pomiaru temperatury  
 Fig. 1. Schematic diagram of the biostabilizer where P1 and P2 - places of temperature measurement

Tabela 1. Wartości parametrów występujących w modelach matematycznych  
 Table 1. The value of parameters in the mathematical models

| Stała            | Wartość                    | Źródło                       |
|------------------|----------------------------|------------------------------|
| b                | 6,275                      | Sangsurasak i Mitchell, 1998 |
| c                | 2038 J/(kg K)              | Sangsurasak i Mitchell, 1998 |
| R                | 1,8 m                      | dokumentacja techniczna      |
| s                | 0,05m                      |                              |
| T <sub>opt</sub> | 45°C                       | Sharma i in., 1997           |
| T <sub>max</sub> | 70°C                       | Sharma i in., 1997           |
| X <sub>max</sub> | 0,4072                     | badania własne               |
| Y                | 8.366x10 <sup>6</sup> J/kg | Sangsurasak i Mitchell, 1998 |
| ε                | 0.35                       | Sangsurasak i Mitchell, 1998 |
| μ <sub>opt</sub> | 6.56x10 <sup>-5</sup> 1/s  | Sangsurasak i Mitchell, 1998 |
| ρ <sub>b</sub>   | 1,14 kg/m <sup>3</sup>     | tablice fizyczne             |
| ρ <sub>z</sub>   | 923 kg/m <sup>3</sup>      | w tekście                    |
| ρ <sub>s</sub>   | 1419 kg/m <sup>3</sup>     | w tekście                    |
| λ                | 58 W/(m K)                 | tablice fizyczne             |

Przyjęcie wyżej wymienionych założeń pozwala zastosować model matematyczny o parametrach skupionych, dany w postaci układu równań różniczkowych zwyczajnych (1) i (3), do symulacji kinetyki zmian temperatury złoża odpadów w procesie wytwarzania kompostu.

Weryfikację matematycznego modelu przeprowadzono w oparciu o średnie, miesięczne wyniki pomiarów temperatury przeprowadzonych w punktach P1 i P2 biostabilizatora (rys. 1) oraz w jego otoczeniu. Błąd pomiaru temperatury wynosił  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Biostabilizator usytuowany był w nie ogrzewanej hali. Przyjęto, że średni czas potrzebny do przemieszczania się porcji odpadów, znajdującej się o godzinie 14 blisko powierzchni czołowej biostabilizatora do punktu P1 wynosił 16 h natomiast do punktu P2 38 h. Badania przeprowadzono w lipcu i październiku 1999 oraz w styczniu 2000. W tabeli 2 zestawiono wartości temperatury początkowej odpadów równej temperaturze otoczenia biostabilizatora, początkowej zawartości kompostu w odpadach oraz wartości temperatury wykorzystanej do weryfikacji przyjętego matematycznego modelu. Do rozwiązania układu równań różniczkowych (1) i (3) wykorzystano metody numeryczne zaimplementowane w pakiecie MATLAB 7.1.

*Tabela 2. Wartości temperatury początkowej odpadów, początkowej zawartości kompostu w odpadach oraz wartości temperatur zmierzonych w punktach P1 i P2*

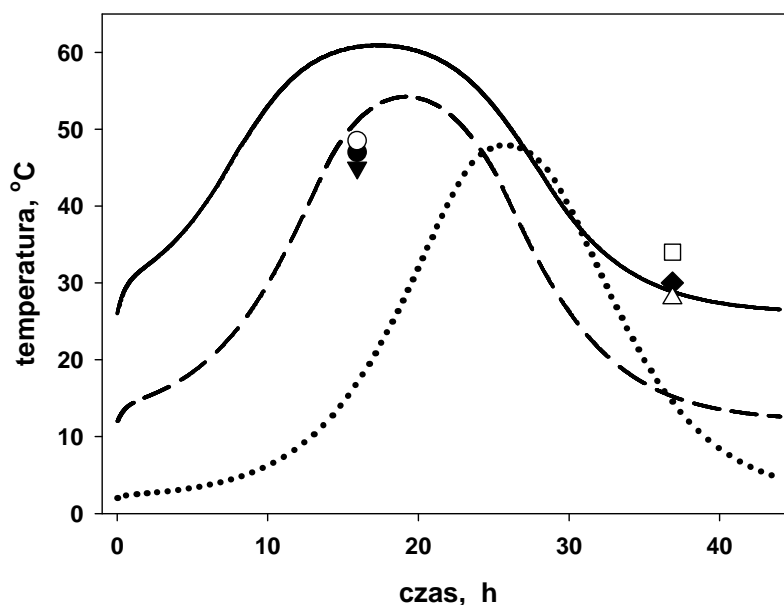
*Table 2. The values of: a initial waste temperature, a initial compost content in a waste and measurement temperature in P1 and P2 points*

|                       | Lipiec | Październik | Styczeń |
|-----------------------|--------|-------------|---------|
| $T_0$                 | 26     | 12          | 2       |
| $X_0$                 | 0.01   | 0.005       | 0.001   |
| $T_{\text{wer w P1}}$ | 47     | 48          | 45      |
| $T_{\text{wer w P2}}$ | 34     | 30          | 28      |

## Wyniki i ich analiza

Na rysunku 2 przedstawiono symulowane przebiegi zmiany temperatury odpadów komunalnych kompostowanych w biostabilizatorze uzyskane dla trzech analizowanych miesięcy. Charakter tych zmian, kształt opisany krzywą dzwonową, jest zgodny z danymi literaturowymi (Kaiser, 1996; Weppen, 2001; Nielsen i Berhelsen, 2002; Sangsurasak i Mitchell, 1998; Stombaugh i Nokes, 1996; Tuomela i in., 2000; Zwietering i in., 1999; Van Ginkel, 1996). Wartości temperatur zmierzone w punktach P1 i P2 pokazują, że symulacja przeprowadzona dla miesiąca stycznia była najmniej dokładna w całym symulowanym zakresie. Wyniki symulacji dla miesiąca lipca i stycznia były zweryfikowane (z akceptowalną dokładnością  $\pm 5^\circ\text{C}$ ) odpowiednio w punktach pomiarowych P2 i P1. Uzyskane duże błędy symulacji szczególnie w miesiącu styczniu mogą świadczyć o znacznym wpływie przyjętych

do modelowania założeń upraszczających oraz przyjętych z literatury wartości stałych, opisujących fizyczne właściwości złoża odpadów. Prawdopodobnie największy wpływ na wyniki symulacji ma przyjęcie założenia o stałości temperatury powietrza na zewnątrz biostabilizatora oraz założenie o braku strumienia ciepła w złożu wzdłuż osi podłużnej tego urządzenia. Temperatura otoczenia walczaka wpływa w znacznym stopniu na temperaturę odpadów wprowadzanych do biostabilizatora jak i na wielkość strumienia strat ciepła. Natomiast strumień ciepła w złożu wzdłuż osi podłużnej wpływa na szybkość nagrzewania się nowej porcji odpadów. Ma to szczególne znaczenie, jeśli początkowa temperatura odpadów jest niska, co ma miejsce w miesiącu styczniu.



Rys. 2. Rozkłady temperatur symulowanych i zmierzonych w biostabilizatorze DANO. Temperatury symulowane: — lipiec; - - - październik; ..... styczeń. Temperatury zmierzone w punkcie P1: o lipiec; • październik; ▼ styczeń. Temperatury zmierzone w punkcie P2: lipiec; ◆ październik; Δ styczeń

Fig. 2. The value of simulated and measured temperature in biostabilizer DANO. The simulated temperature: — July; - - - October; ..... January. The measured temperature in P1 point: o July; • October; ▼ January. The measured temperature in P2 point: lipiec; ◆ October; Δ January

## **Wnioski**

Stwierdzono, że wyniki generowane przez zastosowany symulacyjny, matematyczny model, o parametrach skupionych, oddają charakter zmian temperatury w przemysłowym biostabilizatorze DANO, zgodny z danymi literaturowymi. Generalnie dokładność modelu jest mała a powodem tego prawdopodobnie jest przyjęcie założeń upraszczających do modelowania, oraz literaturowych wartości stałych, opisujących fizyczne właściwości złoża odpadów.

## **Bibliografia**

Dziejowski J.E., Kazanowska J. 2002. Heat production during thermophilic decomposition of municipal wastes in the Dano composting plant. In: *Microbiology of Composting*. (Eds) H. Insam, N. Riddech, S. Klammer . Springer -Verlag Berlin Heidelberg , pp. 111-118

Kaiser, J. 1996. Modelling composting as a microbial ecosystem: a simulation approach. *Ecological Modeling*, 91, 25-37.

Weppen, P. 2001. Process calorimetry on composting of municipal organic wastes. *Biomass and Bioenergy*, 21, 289-299.

Nielsen, H., Berhelsen, L. 2002. A model for temperature dependency of thermophilic composting process rate. *Compost Science & Utilization*, 10(3), 249-257.

Sangsurasak, P., Mitchell, D.A. 1998. Validation of a model describing two-dimensional heat transfer during solid-state fermentation in packed bed bioreactors. *Biotechnology and bioengineering*, (60), 6, 739-749.

Sharma, V.K., Caudatelli, M., Fortuna, F., Cornacchia, G. 1997. Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: review. *Energy Conversion and Management*, 38(5), 453-478.

Stombaugh, D.P., Nokes, S.E. 1996. Development of a biologically based aerobic composting simulation model. *Transaction of the ASAE*, 39(1), 239-250.

Tuomela, M., Vikman, M., Hatakka, A., Itävaara, M. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 72, 169-183.

Zwietering, M.H., De Koos, J.T., Hasenack, B.E., De Wit, J.C., Van't Riet, K. 1991. Modeling of bacterial growth as a function of temperature.

Van Ginkel, J.T. 1996. Physical and biochemical processes in composting material. CIP-data koninklijke bibliotheek, Haag.

## **THE SYMULATION MODEL OF COMPOSTING IN BIOSTABILIZER DANO**

### **Summary**

A relatively simple dynamic model based on microbiological process kinetics has been developed for composting in the biostabilizer DANO. Predicted results demonstrated the ability of the model to quantify in agreement with a literature results. The accuracy of the model was generally small. The reason of that probably was: the simplify assumptions for modeling and the assumptions for the physical value of bed waste material.

**Key words:** mathematical model, biostabilizer, temperature of waste