

## PORÓWNANIE MOŻLIWOŚCI ODZYSKANIA NADWYŻEK CIEPŁA W PROCESIE KOMPOSTOWANIA WYBRANYCH ODPADÓW Z PRZETWÓRSTWA OWOCOWO-WARZYWNEGO

*Piotr Sołowiej, Maciej Neugebauer, Janusz Piechocki  
Katedra Elektrotechniki Energetyki Elektroniki i Automatyki  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań procesu kompostowania dla trzech rodzajów odpadów biologicznych: pulpy pomidorowej, pulpy marchwiowej i pulpy jabłkowej. Badania przeprowadzono w specjalnie skonstruowanych adiabatycznych bioreaktorach wyposażonych w odpowiednie czujniki oraz sterowany system napowietrzania. W celu uzyskania odpowiedniej porowatości wymieszano wymienione odpady z żytnią słomą w tych samych proporcjach. Dokonano także obliczeń energetycznych obrazujących możliwość odzyskania nadwyżek energii, bez wpływu na jakość procesu kompostowania. Najlepszy wynik otrzymano przy kompostowaniu mieszaniny z pulpą pomidorową –  $3386,1 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

**Słowa kluczowe:** kompostowanie, utylizacja odpadów, odzysk energii, bioodpady

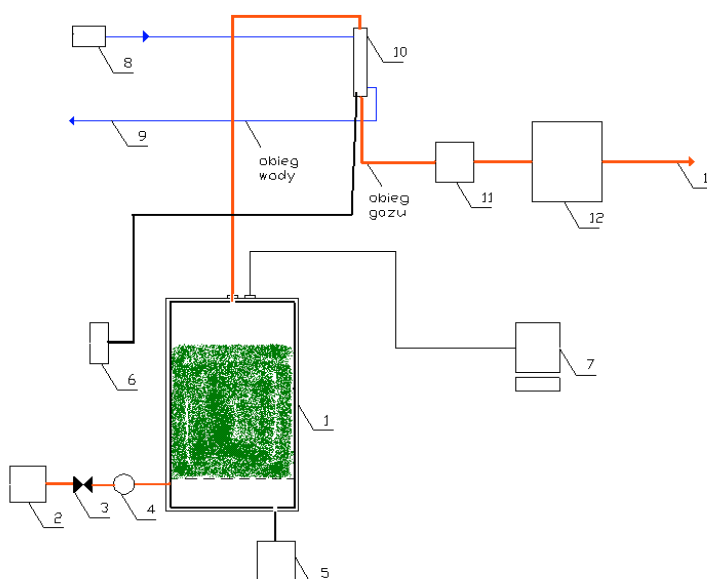
### Wprowadzenie

Zakłady przetwórstwa owocowo-warzywnego wytwarzają znaczne ilości odpadów w postaci wilgotnej pulpy, która w pewnych warunkach nie nadaje się na paszę i musi być poddana utylizacji. Znanym od wieków sposobem przekształcania odpadów biologicznych w przydatny, wysokowartościowy nawóz jest kompostowanie [Buchanan i Gilesman, 1991; Garcia i in, 1992; Schlegel, 1992; Negro i inni., 1999; Sołowiej i in. 2010]. W Katedrze Elektrotechniki Energetyki Elektroniki i Automatyki Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego prowadzone są badania mające na celu opracowanie metod utylizacji pozostałości poprodukcyjnych powstających w zakładach przetwórstwa owocowo-warzywnego. Odpady te występują jako pulpa marchwi, buraków, jabłek, pomidorów i innych owoców o wilgotności około 80%. Ponieważ skład fizyko-chemiczny odpadów i ich postać nie gwarantuje prawidłowego przebiegu procesu kompostowania należy je wzbogacić o dodatki uzupełniające brakujące substraty i regulujące stosunek węgla do azotu (C/N), oraz poprawiające strukturę kompostowanego materiału. W systemach kompostowania z napo-

wietrzaniem struktura kompostowanego materiału ma niebagatelny wpływ na przebieg procesu, zwłaszcza w jego pierwszej, termofilnej fazie. O prawidłowym przebiegu procesu kompostowania i ilości wytworzonej energii cieplnej decydują dodatki, oraz intensywność napowietrzania [Dach i in. 2007; Sołowiej i in. 2010a; Sołowiej i in. 2010b]. Charakter pierwszej fazy kompostowania oraz ilość wydzielanej tam energii cieplnej pozwalają sądzić iż nadwyżki tej energii mogą być odprowadzone i wykorzystane w innych procesach [Sołowiej 2007].

## Cel i opis doświadczenia

Celem badań było porównanie ilości ciepła wydzielonego w pierwszej fazie kompostowania trzech rodzajów odpadów (pulpa z jabłek, pomidorów i marchwi), oraz ocena ilości energii możliwej do pozyskania bez negatywnego wpływu na przebieg procesu oraz jakość otrzymanego produktu. Doświadczenie prowadzono w bioreaktorach (schemat stanowiska przedstawia rys.1) wypełnionych odpadami dokładnie wymieszanymi ze słomą.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego. 1 – bioreaktor, 2 – pompa powietrza, 3 – zawór regulacyjny, 4 – rotametr, 5 – zbiornik na odcieki, 6 – zbiornik na skropliny, 7 – komputer, 8 – źródło wody, 9 – odpływ wody, 10 – chłodnica, 11 – zbiornik pomiarowy, 12 – analizator gazu, 13 – wylot gazu

Fig. 1. Diagram of the measurement stand: 1 – bioreactor, 2 – air pump, 3 – control valve, 4 – rotameter, 5 – leachate container, 6 – condensate container, 7 – computer, 8 – water source, 9 – water outlet, 10 – condenser, 11 – measurement container, 12 – gas analyser, 13 – gas outlet

Bioreaktory wyposażone były w system regulowanego napowietrzania i rejestracji wybranych parametrów procesu [Sołowiej 2008]. W przebiegu doświadczenia w obu bioreaktorach rejestrowane były co 15 minut: temperatura i wilgotność powietrza wejściowego, temperatura i wilgotność powietrza wyjściowego, temperatury z czujników umieszczonych w kompostowanej biomase, temperatura zewnętrzna i ilość przepływającego przez bioreaktor powietrza. Wybrane właściwości oraz skład mieszanek przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Właściwości i skład poszczególnych mieszanek.  
Table 1. Properties and composition of particular mixtures.

	Składnik	Masa [kg]	Wilgotność [%]	Wilgotność mieszanki [%]	C/N mieszanki	Zaw. C [g·kg <sup>-1</sup> ]	Zaw. N [g·kg <sup>-1</sup> ]
B1	Pomidor	30	82	74,5	23,4	549	32
	Słoma	3,6	12			420	3,37
B2	Marchew	30	80	72,6	37,0	436	16
	Słoma	3,6	12			420	3,37
B3	Jabłka	30	78	69,4	66,4	437	8
	Słoma	3,6	12			420	3,37

Źródło: obliczenia własne autorów

Stopień napowietżenia z uwzględnieniem stosunku C/N został dobrany na podstawie literatury [Keer i in. 2001; Wiley i Pierce 1995]. We wszystkich doświadczeniach zastosowano ten sam – 5 dm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>. Ze względu na bardzo podobną postać odpadów (pulpa o wysokiej wilgotności we wszystkich trzech przypadkach) udało się stworzyć mieszanki o podobnych właściwościach fizycznych. Skład mieszanek dobrany był w sposób mający zapewnić odpowiednie warunki napowietżenia w jak najdłuższym okresie kompostowania. Chodzi tu zwłaszcza o odpowiednią porowatość mieszanki, a także zróżnicowany stosunek C/N.

## Metodyka i wyniki badań

Obliczenia ilości energii dokonano posługując się metodyką zaproponowaną przez Kaiser'a [Kaiser 1996]. Ogólne równanie dynamiki zmian energetycznych dla bioreaktora ma postać:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{bio}}{dt} + \frac{dQ_{wej}}{dt} - \frac{dQ_{stat}}{dt} - \frac{dQ_{wyj}}{dt} \quad (1)$$

gdzie:

- $Q$  – energia cieplna bioreaktora [kJ],
- $Q_{bio}$  – energia cieplna wytworzona przez mikroorganizmy w procesie kompostowania [kJ],
- $Q_{wej}$  – energia cieplna dostarczona przez napowietrzanie [kJ],
- $Q_{stat}$  – energia cieplna stracona przez ściany bioreaktora [kJ],
- $Q_{wyj}$  – energia cieplna w wychodzącym powietrzu [kJ].

Obliczenia ilości energii wydzielonej w badanym procesie dokonano wykorzystując zależności:

$$Q_{\text{bio}} = Q_{\text{wyj}} + Q_{\text{strat}} - Q_{\text{wej}} \quad [2]$$

$$Q_{\text{wyj}} = h_{\text{wyj}} \cdot V_{\text{wyj}} \quad [3]$$

$$Q_{\text{wej}} = h_{\text{wej}} \cdot V_{\text{wej}} \quad [4]$$

$$Q_{\text{strat}} = U \cdot A \cdot [T_w - T_z] \quad [5]$$

gdzie:

- $h_{\text{wyj}}, h_{\text{wej}}$  – entalpia strumieni powietrza: wyjściowego i wejściowego [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ],
- $V_{\text{wyj}}, V_{\text{wej}}$  – objętość powietrza wyjściowego i wejściowego [ $\text{m}^3$ ],
- $U$  – współczynnik przenikania ciepła przez ściany bioreaktora [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$ ],
- $A$  – powierzchnia ścian bioreaktora [ $\text{m}^2$ ],
- $T_w$  – temperatura wewnętrzna bioreaktora [ $\text{°C}$ ],
- $T_z$  – temperatura otoczenia [ $\text{°C}$ ].

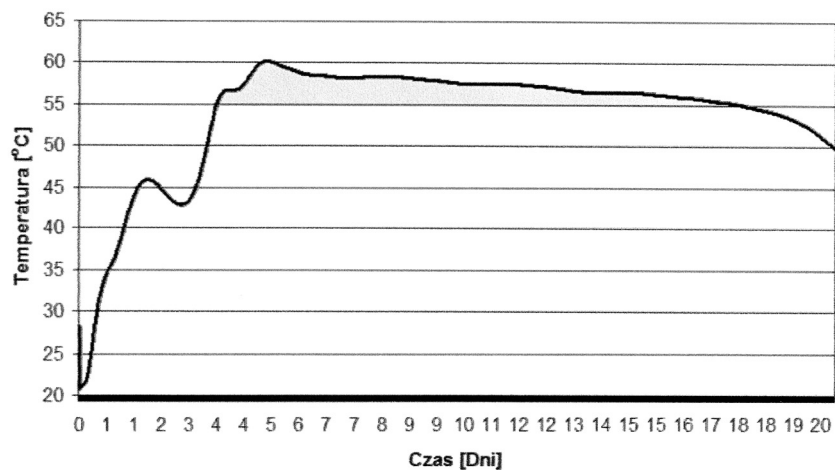
Entalpię strumieni powietrza wejściowego i wyjściowego obliczono korzystając z zależności proponowanych przez Kaiser'a [Kaiser 1996].

W prowadzonych badaniach przyjęto, że nadwyżki energii będą obliczane dla procesu kompostowania przebiegającego powyżej  $55\text{°C}$  zakładając, że odprowadzenie tej energii na zewnątrz nie spowoduje zakłóceń w procesie kompostowania i nie będzie miało wpływu na jakość otrzymanego nawozu. Wybór temperatury granicznej zdeterminowany został tym, iż optymalna temperatura dla rozwoju najbardziej aktywnych termofilnych mikroorganizmów wynosi  $50\text{--}55\text{°C}$ , oraz ze względu na stosowany w niektórych krajach wymóg utrzymania takiej temperatury w kompostowanym materiale przez trzy dni celem unieszkodliwienia patogenów [Kuok i in. 2012; Liu, Price 2011].

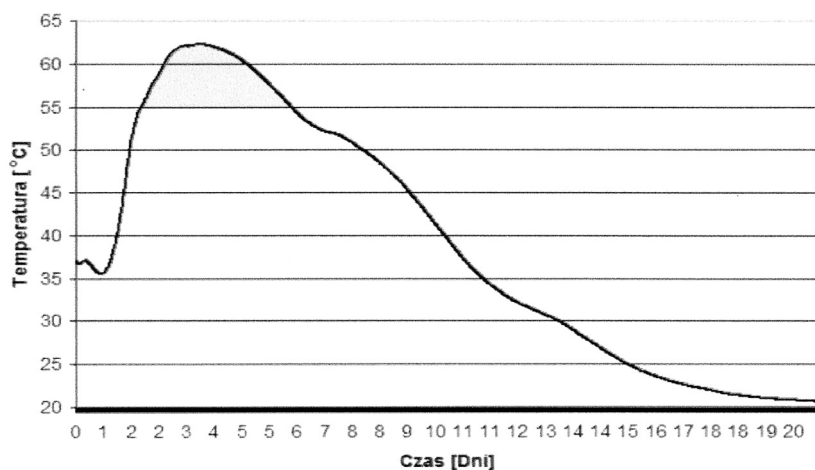
Przebiegi temperatur na podstawie powyższych założeń rejestrowano przez dwadzieścia dni (rys. 2-4). Na rysunkach kolorem szarym zostały zaznaczone obszary reprezentujące obliczone nadwyżki energii.

Obliczone nadwyżki energii dla poszczególnych mieszanin wyniosły:

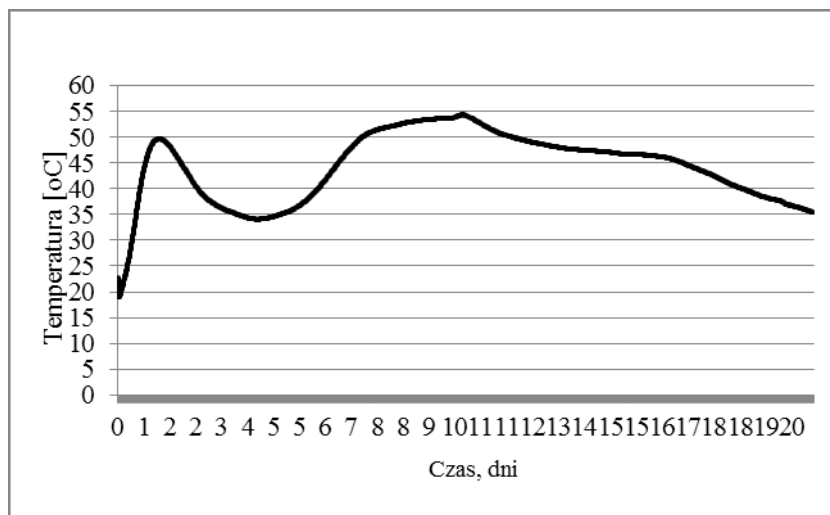
- dla pulpy pomidorowej  $113,773 \text{ MJ}$ , co w przeliczeniu na kilogram mieszanki wynosi  $3386,1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- dla pulpy marchwiowej  $20,510 \text{ MJ}$ , co w przeliczeniu na kilogram mieszanki wynosi  $610,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;
- dla pulpy jabłkowej nie dokonano obliczeń ze względu na to, iż temperatura procesu w tym przypadku nie przekroczyła  $55\text{°C}$  (rys. 4).



Rys. 2. Przebieg kompostowania pulpy pomidorowej  
Fig. 2. Course of composting tomato pulp

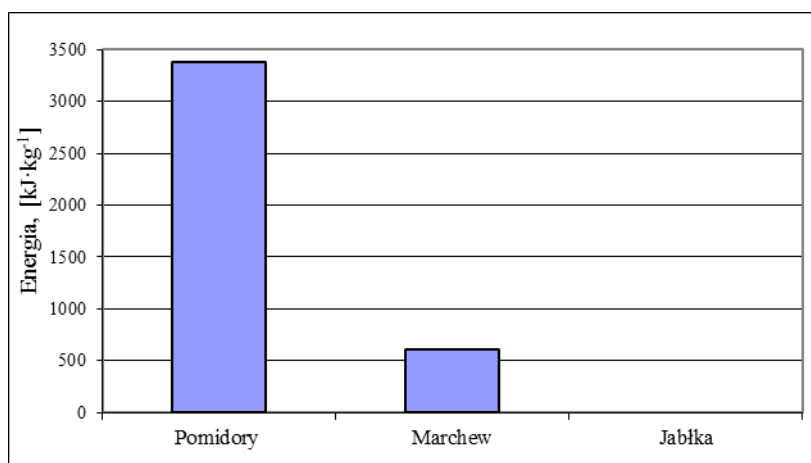


Rys. 3. Przebieg kompostowania pulpy marchwiowej  
Fig. 3. Course of composting carrot pulp



Rys. 4. Przebieg kompostowania pulpy jabłkowej  
Fig. 4. Course of composting apple pulp

Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na rys. 5.



Rys. 5. Obliczone nadwyżki energii w przeliczeniu na kilogram mieszanki  
Fig. 5. Calculated energy surpluses converted into one kilo of mixture

## Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość odzyskania pewnej ilości energii cieplnej powstałej w procesie kompostowania w wyniku biologicznej aktywności drobnoustrojów w fazie termofilnej. Przy zachowaniu wszystkich kluczowych wymagań stawianych procesowi kompostowania (jak podczas kompostowania pulpy pomidorowej) uzyskano ponad  $3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . W przypadku kompostowania pulpy marchwiowej widać wpływ zbyt wysokiego stosunku C/N=37 nieznacznie przecież przekraczającego zalecane wielkości. Mieszanina z pulpą jabłkową przy stosunku C/N=66,4 nie zagwarantowała mikroorganizmom termofilnym wystarczającej ilości azotu do rozwoju, stąd też tak niskie przyrosty temperatur. Zarówno w przypadku mieszaniny z pulpą marchwiową a zwłaszcza z jabłkową należałoby wprowadzić dodatek polepszający stosunek C/N z dużą zawartością azotu, na przykład gnojowicę lub końskie odchody.

Stwierdza się potrzebę przeprowadzenia badań energetycznych dla pulpy marchwiowej i jabłkowej z dodatkami regulującymi stosunek C/N w mieszaninach tak, aby kształtował się on na poziomie 20 zapewniającymi jednocześnie odpowiednią porowatość mieszaniny w celu dostarczenia tlenu do całej objętości kompostowanego materiału.

## Bibliografia

- Buchanan M., Gilesman S.R.** (1991): How compost fertilization affects soil nitrogen and crop yield. *Biocycle* 32, 72-76.
- Dach J., Jędrus A., Kin K., Zbytek Z.** (2004): Wpływ intensywności napowietrzania na przebieg procesu kompostowania obornika w bioreaktorze. *Journal of Research and Applications in Agricultural Eng.* 49 (1), 40-43.
- Dach J., Nizewski P., Jędrus A., Boniecki P.** (2007): Badania wpływu aeracji na dynamikę procesu kompostowania osadów ściekowych w bioreaktorze. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. Vol. 52(1), 68-72.
- Garcia C., Hernandez T., Costa F.**, (1992): Composted vs. uncomposted organics. *Biocycle* 33, 70-72.
- Kaiser J.** (1996): Modelling composting as microbial ecosystem: a simulation approach. *Ecological Modelling* 91, 25-37.
- Keener H.M., Elwell D.M., Ekinci K., Hoitink H.A.J.** (2001): Composting and value-added utilization of manure from high rise swine finishing facility. *Compost Science and Utilization* 9(4), 312-321.
- Kuok F., Mimoto H., Nakasaki K.** (2012): Effects of turing on the microbial consortia and the *in situ* temperature of microorganisms in a laboratory- scale swine manure composting. *Bioresource Technology*, 116, 421-427.
- Liu K., Price G.W.** (2011): Evaluation of three composting systems for the management of spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, 102(17), 7966-7974.
- Negro M.J., Solano P.C., Carrasco J.** (1999): Composting of sweet sorghum bagasse with other wastes. *Bioresource Technology* 67, 89-92.
- Schlegel A.J.** (1992): Effect of composted manure on soil chemical properties and nitrogen use by gain sorghum. *Journal of Production Agriculture* 5, 153-157.
- Sołowiej P.** (2007): Przykład wykorzystania przyzmy kompostu jako niskotemperaturowego źródła ciepła. *Inżynieria Rolnicza*, 8(96), 247-253

- Sołowiej P.** (2008): Koncepcja budowy bioreaktora do kompostowania biomasy – stanowisko badawcze. *Inżynieria Rolnicza*, 11(109), 227-231
- Sołowiej P. Neugebauer M., Piechocki J.** (2010a): Wpływ dodatków i napowietrzania na dynamikę procesu kompostowania. *Inżynieria Rolnicza*, 5(123), 259-265.
- Sołowiej P. Piechocki J. Neugebauer M.** (2010b): Wpływ napowietrzania złoża na przebieg pierwszej fazy procesu kompostowania. *Inżynieria Rolnicza*, 3(121), 193-198.
- Wiley J.S Pierce G.W.** (1995): A preliminary study of high rate composting. *Proceedings of American Society of Civil Engineering*. Paper No:846.81, 1-28.

## **COMPARING THE POSSIBILITY OF RECOVERING SURPLUSES OF THERMAL ENERGY IN THE PROCESS OF COMPOSTING OF THE SELECTED WASTE FROM THE FRUIT AND VEGETABLES PROCESSING**

**Abstract.** This paper presents the results of the research process of composting for three types of biological waste: tomato pulp, carrot pulp and apple pulp. The test was conducted in a specially constructed adiabatic bioreactors with appropriate sensors and controlled system of aeration. In order to obtain adequate porosity the mentioned waste was mixed with rye straw in the same proportions. Energy calculations presenting the ability to recover surplus energy were carried out without effect on the quality of the composting process. The best result was obtained with composting the mixture with tomato pulp – 3386.1 kJ·kg<sup>-1</sup>.

**Key words:** composting, recycling, energy recovery, bio-waste

**Adres do korespondencji:**

Piotr Sołowiej; e-mail: pit@uwm.edu.pl  
Katedra Elektrotechniki i Energetyki  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski  
ul. Oczapowskiego 11  
10-736 Olsztyn