

MONIKA GWADERA, WŁODZIMIERZ CIESIELCZYK\*

## ASPEKTY ENERGETYCZNE SUSZENIA WYBRANYCH RODZAJÓW BIOMASY

---

### ENERGY ASPECTS OF DRYING OF SELECTED TYPES OF BIOMASS

---

#### Streszczenie

Prezentowano zasady bilansowania egzergetycznego instalacji suszarniczej. Zaprezentowano wstępne wyniki analizy egzergetycznej w odniesieniu do suszenia wybranych rodzajów biomasy w suszarce fluidyzacyjnej i mikrofalowej.

*Słowa kluczowe: suszenie, analiza egzergetyczna, analiza energetyczna, biomasa*

#### Abstract

Rules of making exergy balances of a drying installation are presented. Preliminary results of exergy analysis of drying of selected types of biomass in a fluidized bed and microwave dryer are depicted.

*Keywords: drying, exergy analysis, energy analysis, biomass*

---

\* Mgr inż. Monika Gwadera, dr hab. inż. Włodzimierz Ciesielczyk, prof. PK, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Krakowska.

### Oznaczenia

$b$	–	egzergia właściwa [kJ/kg]
$B$	–	egzergia [kJ]
$c$	–	ciepło właściwe [kJ/(kg · K)]
$E$	–	energia [kJ]
$I$	–	natężenie prądu elektrycznego [A]
$m$	–	masa [kg]
$p$	–	ciśnienie [Pa]
$Q$	–	ciepło [kJ]
$r$	–	ciepło parowania [kJ/kg]
$R$	–	stała gazowa [kJ/(kmol · K)]
$t$	–	czas [s]
$T$	–	temperatura [°C]
$u$	–	prędkość [m/s]
$U$	–	napięcie prądu elektrycznego [V]
$X$	–	zawartość wilgoci w materiale [kg wilgoci/kg suchego materiału]

### Symbole greckie

$\delta$	–	symbol straty [–]
$\Delta$	–	symbol przyrostu [–]
$\eta$	–	sprawność [%]
$\mu$	–	wskaźnik jednostkowego zużycia egzergii [kJ/kg wilgoci]
$\varphi$	–	wilgotność względna [%]

### Indeksy dolne

$B$	–	dotyczy egzergii
cal	–	całkowity
el	–	elektryczny
$H_2O$	–	dotyczy pary wodnej
$m$	–	dotyczy materiału
$p$	–	dotyczy ciśnienia
pow	–	dotyczy powietrza suchego
pow wilg	–	dotyczy powietrza wilgotnego
$s$	–	dotyczy suszenia
str	–	dotyczy straty
m such	–	dotyczy suchego materiału
$T$	–	termiczny
$u$	–	użyteczny
$w$	–	wewnętrzny
$z$	–	zewewnętrzny
0	–	dotyczy stanu odniesienia (stanu otoczenia)
1	–	dotyczy wielkości doprowadzonej
2	–	dotyczy wielkości wyprowadzonej

## 1. Wstęp

Aktualne kłopoty z tradycyjnymi surowcami energetycznymi i obowiązujące przepisy Unii Europejskiej, dotyczące odnawialnych źródeł energii, zmuszają do podjęcia działań w zakresie kompleksowego zagospodarowania biomasy [1–3]. Jest to zagadnienie ważne zarówno z uwagi na zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego, ochronę środowiska, jak i zapewnienie zrównoważonego rozwoju [1, 2, 4].

Biomasa może okazać się kluczem do rozwiązania problemu: jak pogodzić rosnące zapotrzebowanie na energię z potrzebą zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Jest to tym bardziej prawdopodobne, że biomasa występuje w wystarczającej ilości na terenie kraju [3, 5] i staje się pożądanym surowcem energetycznym, przeżywając swoisty renesans.

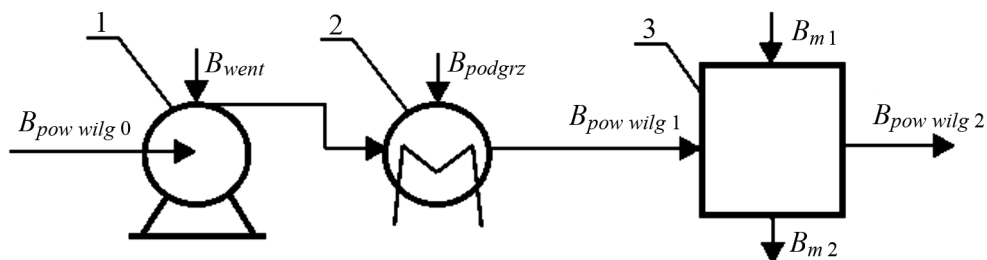
Biomasa pozyskiwana z lasów, zakładów pielęgnacji zieleni miejskiej, czy plantacji roślin energetycznych może charakteryzować się wysoką wilgotnością – do 60% [1, 3]. Zawartość wilgoci jest kluczowa dla oceny potencjału energetycznego biomasy drzewnej. Dlatego też istotnym etapem przy produkcji i przetwarzaniu biomasy (np. peletyzacja, brykietowanie) dla celów energetycznych jest suszenie pozyskiwanego produktu przy minimalizacji kosztów tego procesu [1–3]. Ważnym celem współczesnego suszarnictwa jest minimalizacja zużycia energii przy usuwaniu wilgoci do oczekiwanej wartości [1–3].

Bilans egzergetyczny może być skutecznym narzędziem obrazującym zużycie energii przy praktycznej realizacji procesu suszenia biomasy [2, 3, 6, 7]. Egzergia będąca miarą użyteczności energii [2, 3, 6, 8, 9] w sposób efektywny pozwala określić źródła strat energii i po ich eliminacji zredukować cenę wyrobu [2, 3, 8–10]. Literatura na temat egzergii jest bardzo szeroka. W pracy [2] dotyczącej bilansowania egzergetycznego zawarto 135 pozycji literaturowych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki analizy egzergetycznej w odniesieniu do suszenia fluidalnego i mikrofalowego wybranych rodzajów biomasy.

## 2. Bilans egzergetyczny instalacji suszarniczej

Analiza egzergetyczna pozwala na ocenę sprawności poszczególnych części instalacji suszarniczej: wentylatora, podgrzewacza i suszarki (rys. 1).



Rys. 1. Schemat układu suszarniczego: 1 – wentylator, 2 – podgrzewacz, 3 – suszarka

Fig. 5. Schematic of a drying system: 1 – air blower, 2 – electric heater, 3 – dryer

Bilans egzergetyczny analizowanej instalacji (rys. 1) można zapisać [11] w postaci

$$B_{\text{pow wilg0}} + B_{m1} + B_{\text{went}} + B_{\text{podgrz}} = B_{\text{pow wilg2}} + B_{m2} + \sum \delta B \quad (1)$$

Egzergia  $B_{\text{pow wilg0}}$  powietrza doprowadzonego wynosi 0, gdyż jego parametry są równe parametrom otoczenia. Egzergię  $B_{\text{pow wilg2}}$  obliczyć można z zależności

$$B_{\text{pow wilg2}} = \dot{m}_{\text{pow}} b_{\text{pow2}} \quad (2)$$

Egzergia właściwa  $b_{\text{pow2}}$  [kJ/kg powietrza suchego], która jest zależna od parametrów powietrza wilgotnego, może być wyznaczona z wykorzystaniem nomogramu Besa [12].

Egzergię fizyczną materiału suszonego [8, 13, 14] można obliczyć w oparciu o wzór (3)

$$B_m = \dot{m}_m c_m \left( T_m - T_0 - T_0 \ln \frac{T_m}{T_0} \right) \quad (3)$$

Ciepło właściwe badanego materiału [6, 15] określa wzór (4)

$$c_m = 1398,3 + 4090,2 \cdot \left( \frac{X_m}{1 + X_m} \right) \quad (4)$$

Wilgotność materiału  $X_m$  to stosunek masy usuniętej wody do suchej masy próbki

$$X_m = \frac{m_{\text{próbki wilg}} - m_{\text{próbki such}}}{m_{\text{próbki such}}} \quad (5)$$

Do wentylatora doprowadzana jest egzergia  $B_{\text{went}}$  [11, 16] w postaci energii elektrycznej

$$B_{\text{went}} = E_{\text{elwent}} = \frac{\dot{m}_{\text{pow wilg1}} \Delta p_{\text{pow went}}}{\rho_{\text{pow wilg1}} \eta_{\text{went}}} \quad (6)$$

Energia ta wykorzystywana jest na zwiększenie ciśnienia powietrza suszącego. W termodynamice zazwyczaj bierze się pod uwagę jedynie energię przenoszoną w formie ciepła i dlatego przyjmuje się, że egzergia powietrza za wentylatorem jest równa 0 [11].

Egzergia  $B_{\text{podgrz}}$ , doprowadzona do podgrzewacza w postaci energii elektrycznej, może być wyznaczona [11] z wyrażenia (7)

$$B_{\text{podgrz}} = E_{\text{elpodgrz}} = U \cdot I \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Bilans egzergetyczny wymiennika ciepła [16] można przedstawić w formie

$$B_{\text{podgrz}} = B_{\text{pow wilg1}} + \delta B_{wT} + \delta B_{wP} + \delta B_{z\text{podgrz}} \quad (8)$$

Straty egzergii  $\delta B_{wT}$  [kJ] w wyniku nieodwracalności transportu ciepła  $Q_z$  przy skończonej różnicy temperatur w podgrzewaczu [16] określane są z zależności

$$\delta B_{wT} = T_{\text{pow sr}} \left( \frac{T_{\text{grzałki}} - T_{\text{pow}}}{T_{\text{grzałki}} T_{\text{pow}}} \right) Q_z \quad (9)$$

Wzór na wewnętrzne straty egzergii  $\delta B_{wp}$  [11,16], wynikające z oporów hydraulicznych przepływu powietrza, jest następujący

$$\delta B_{wp} = m_{\text{pow wilg}} T_0 R_{\text{pow wilg}} \ln \left( 1 + \frac{\Delta p_{\text{pow wilg podgrz}}}{p_1} \right) \quad (10)$$

Zewnętrzną stratę egzergii  $\delta B_{z \text{ podgrz}}$  [6, 15, 16], będącą skutkiem transportu ciepła między powierzchnią wymiennika o temperaturze  $T_{\text{podgrz}}$  a otoczeniem, podaje zależność

$$\delta B_{z \text{ podgrz}} = \left( 1 - \frac{T_0}{T_{\text{podgrz}}} \right) Q_{\text{str podgrz}} \quad (11)$$

Do bilansu wymiennika ciepła [16] należy włączyć przychód egzergii wynikający z doprowadzenia energii elektrycznej do wentylatora  $B_{\text{went}}$

$$B_{\text{podgrz}} + B_{\text{went}} = B_{\text{pow wilg1}} + \delta B_{wT} + \delta B_{wp} + \delta B_{z \text{ podgrz}} \quad (12)$$

W ramach przeprowadzonych badań eksperymentalnych przyjęto [6, 15], że analizowana będzie jedynie przestrzeń bilansowa stanowiąca komory suszarek. Bilans egzergii komory suszarniczej [2, 3, 6, 7, 15, 17] można zapisać w postaci

$$B_{m1} + B_{\text{pow wilg1}} + B_s = B_{m2} + B_{\text{pow wilg2}} + \delta B_z + \delta B_w \quad (13)$$

Egzergia niezbędna do usunięcia wilgoci z ciała stałego  $B_s$  [6, 15] może być określona z równania (14)

$$B_s = \left( 1 - \frac{T_0}{T_m} \right) Q_s \quad (14)$$

Ciepło na usunięcie wilgoci [6, 15] określa wzór (15)

$$Q_s = m_{\text{H}_2\text{O}} r \quad (15)$$

Zewnętrzne straty egzergii  $\delta B_z$  [6,15] komory suszarniczej można obliczyć z wzoru analogicznego do zależności (11), a wewnętrzne straty  $\delta B_w$  – z równania (13).

Sprawność egzergetyczną procesu suszenia [6, 7, 15] określa wyrażenie (16)

$$\eta_B = \frac{B_s}{B_{\text{pow wilg1}}} \quad (16)$$

Zgodnie z propozycją Szarguta [8], oceny doskonałości procesu suszenia można dokonać również za pomocą jednostkowego zużycia egzergii

$$\mu_s = \frac{B_{\text{pow wilg1}}}{m_{\text{H}_2\text{O cal}}} \quad (17)$$

Ilość usuniętej wilgoci obliczana jest jako iloczyn suchej masy  $m_2$  i różnicy chwilowej  $X_m$  i końcowej  $X_{m2}$  wilgotności materiału

$$m_{\text{H}_2\text{O cal}} = m_2 (X_m - X_{m2}) \quad (18)$$

Dokonano także obliczeń sprawności termicznej [6, 18] z wyrażenia (19)

$$\eta_r = \frac{Q_u}{Q_{\text{cal}}} \quad (19)$$

Przyjęto [6, 15, 16], że ciepło użyteczne to ciepło zużywane na usunięcie wilgoci

$$Q_u = m_{\text{msuch}} r (X_{m1} - X_{m2}) \quad (20)$$

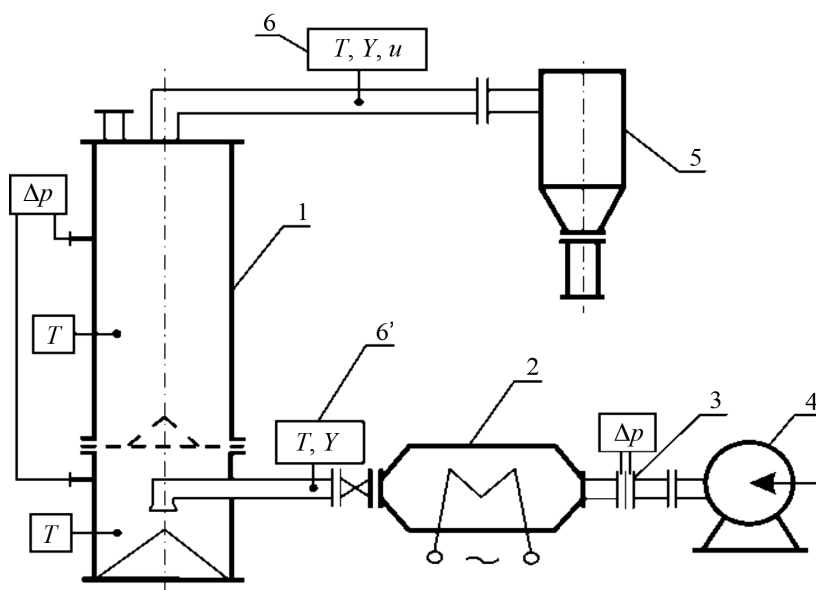
Całkowite ciepło wykorzystywane na prowadzenie procesu suszenia [2, 6, 17] wyznaczano z równania

$$Q_{\text{cal}} = m_{\text{pow wilg}} c_{\text{H}} (T_1 - T_0) \quad (21)$$

### 3. Badania testowe

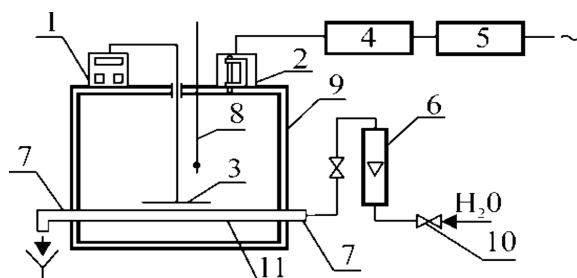
Jednym z celów kompleksowych badań suszenia ciał stałych, realizowanych w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Krakowskiej, jest opracowanie energooszczędnej metody suszenia rozdrobnionej biomasy.

Badania eksperymentalne realizowano na instalacjach wyposażonych w suszarkę fluidyzacyjną (rys. 2) i mikrofalową (rys. 3).



Rys. 2. Instalacja do badania suszenia fluidalnego 1 – suszarka fluidyzacyjna, 2 – nagrzewnica elektryczna, 3 – zestaw rotametrów, 4 – wentylator, 5 – cyklon, 6, 6' – przyrządy: TESTO 452 i TESTO 610 (firmy Testo GmbH & Co.)

Fig. 2. Experimental setup for fluidized bed drying 1 – fluidized bed dryer, 2 – electric heater, 3 – set of rotameters, 4 – air blower, 5 – cyclone, 6, 6' – appliances: TESTO 452 and TESTO 610 (made by Testo GmbH & Co.)



Rys. 3. Instalacja do badania suszenia mikrofalowego 1 – waga elektroniczna, 2 – magnetron, 3 – szalka wagi, 4 – watomierz, 5 – zasilacz, 6 – rotometr, 7 – termopary, 8 – termometr, 9 – komora suszarki, 10 – zawór, 11 – wężownica

Fig. 3. Experimental setup for microwave drying 1 – digital scales, 2 – magnetron, 3 – scale pan, 4 – wattmeter, 5 – power pack, 6 – rotameter, 7 – thermocouples, 8 – thermometer, 9 – drying chamber, 10 – valve, 11 – coil pipe

Oprzyrządowanie stanowisk badawczych zapewniało otrzymanie wszystkich parametrów niezbędnych do określenia charakterystyk kinetycznych realizowanych procesów oraz wyznaczenie danych do sporządzenia bilansów energetycznych.

Badano trzy rodzaje rozdrobnionej biomasy: mak, proso i zrębki drzewne. Właściwości fizykochemiczne tych bioproduktów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

#### Właściwości fizykochemiczne badanych materiałów

	Mak	Proso	Zrębki
Początkowa zawartość wilgoci $X_m$ [kg/kg]	0,8	0,4	0,5
Wartość opałowa suchego materiału [MJ/kg]	17	15	16,5
Gęstość usypowa [kg/m <sup>3</sup> ]	558,3	726,1	200
Zawartość popiołu [%]	6,3	5	5

W trakcie testów zmieniano parametry procesowe w następujących zakresach:

- suszarka fluidyzacyjna: temperatura powietrza wlotowego  $T_1$ : 50°C, 70°C; prędkość powietrza  $u$ : 0,78 m/s, 0,94 m/s; masa wprowadzanego materiału  $m_1$ : 95 g, 125 g;
  - suszarka mikrofalowa: moc promieniowania: 1 – Low, 2 – Warm, 3 – Defrost.
- Wyniki badań przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2

#### Wyniki suszenia fluidalnego maku

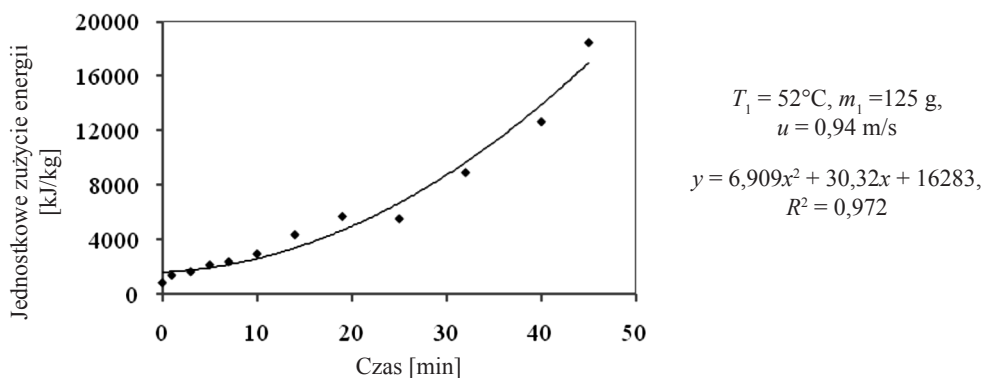
Nr testu	Wielkości zmieniane			Czas [min]	Zmiana parametrów materiału suszonego		Zmiana parametrów powietrza wylotowego	
	$T_1$ [°C]	$m_1$ [g]	$u$ [m/s]		$X_m$ [kg/kg]	$T_m$ [°C]	$\varphi_2$ [%]	$T_2$ [°C]
1	72	125	0,94	0–25	0,767–0,078	42–68	25–1,4	56–72
2	71	95	0,94	0–23	0,781–0,079	44–72	22–2,3	64–71
3	70	95	0,78	0–25	0,854–0,081	45–76	21–2,2	56–73
4	52	125	0,94	0–50	0,702–0,078	32–47	35–5,1	42–48

## Wyniki suszenia mikrofalowego

Nastawa	Czas [min]	Zmiana parametrów materiału suszonego		Parametry powietrza otoczenia	
		$X_m$ [kg/kg]	$T_m$ [°C]	$\varphi_{sr}$ [%]	$T_{sr}$ [°C]
Mak					
1	0–21	0,226–0,050	17–38	35	16
2	0–9	0,215–0,050	28–44	34	22
3	0–11	0,281–0,050	32–56	35	18
Proso					
1	0–17	0,402–0,050	19–47	36	19
2	0–22	0,314–0,050	19–45	39	16
3	0–18	0,444–0,050	35–53	34	23
Zrębki					
1	0–9,5	0,526–0,050	28–38	37	21
2	0–11,5	0,775–0,050	37–50	31	23
3	0–8	0,777–0,050	25–41	37	14

## 4. Dyskusja wyników

Dla przetestowania prawidłowości stosowanej metodyki badań i obliczeń [2] sporządzono wykres zależności  $\mu_z = f(T)$  (rys. 4). Podstawą do konstrukcji rysunku 4 były wyniki badań suszenia fluidalnego maku (eksperyment 4 – tabela 2) i wzór (17).

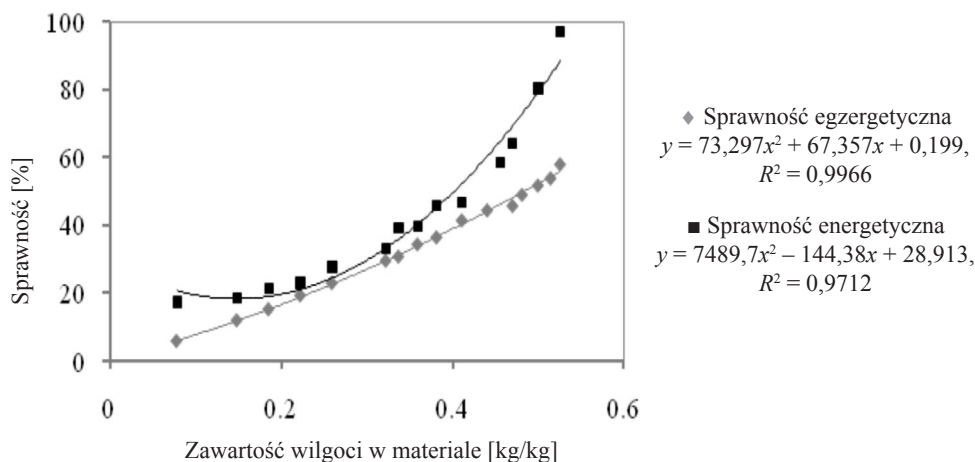


Rys. 4. Zależność jednostkowego zużycia energii od czasu suszenia dla maku

Fig. 4. Relation between unit exergy consumption and drying time for poppy seed

Celem porównania wyników otrzymywanych na podstawie analizy energetycznej i egzergicznej sporządzono wykres zależności sprawności suszenia mikrofalowego od wilgotności materiału (rys. 5). Sprawność energetyczna jest wyższa od egzergicznej, gdyż nie uwzględnia strat wynikających z nieodwracalności procesu [2, 3, 8, 9, 19].

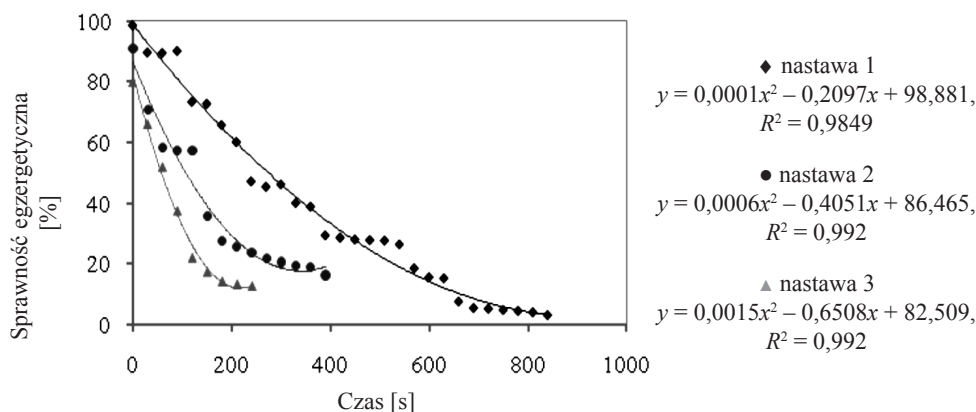




Rys. 5. Zależność sprawności od wilgotności materiału suszonego dla zrębków drzewnych

Fig. 5. Dependence between drying efficiency and humidity for wood chips

Aby zobrazować wpływ mocy promieniowania mikrofalowego na sprawność suszenia, sporządzono wykres zależności sprawności od czasu dla trzech nastaw suszarki (rys. 6). Z analizy wykresu wynika, że w przypadku stosowania nastawy 1 straty energetyczne do otoczenia są najmniejsze [3].



Rys. 6. Zależność sprawności energetycznej od czasu dla maku

Fig. 6. Relation between exergy efficiency and drying time for poppy seed

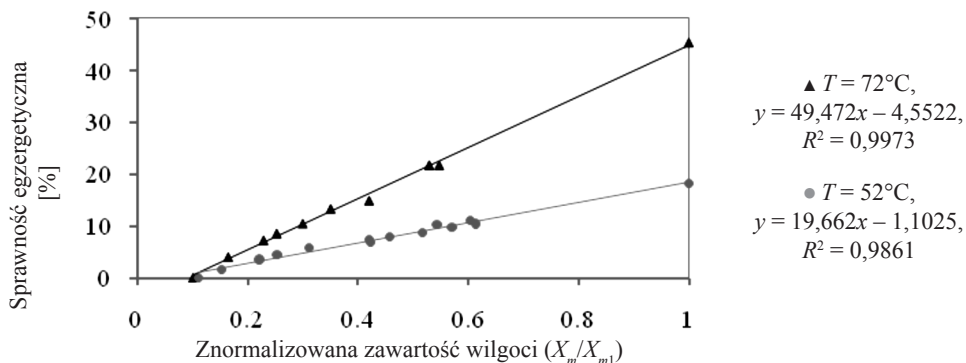
Przedmiotem testów było również ustalenie wpływu parametrów procesowych (tabela 2 oraz tabela 4) na sprawność suszenia fluidalnego. Do zwiększenia sprawności przyczynia się wzrost temperatury powietrza (rys. 7), obniżenie jego prędkości (rys. 8) oraz zwiększenie zapełnienia suszarki (rys. 9). Możliwości zmiany tych parametrów są ograniczone. Nadmierny wzrost temperatury może spowodować zniszczenie materiału [2, 6, 15]. Prędkość powietrza

nie może być niższa od minimalnej prędkości fluidyzacji [2,17]. Wysokość złoża ograniczona jest zjawiskiem sklejaniam ziaren oraz występowaniem intensywnego pylenia i klasycznych zakłóceń fluidyzacji, takich jak np. tłokowanie [2, 6].

Tabela 4

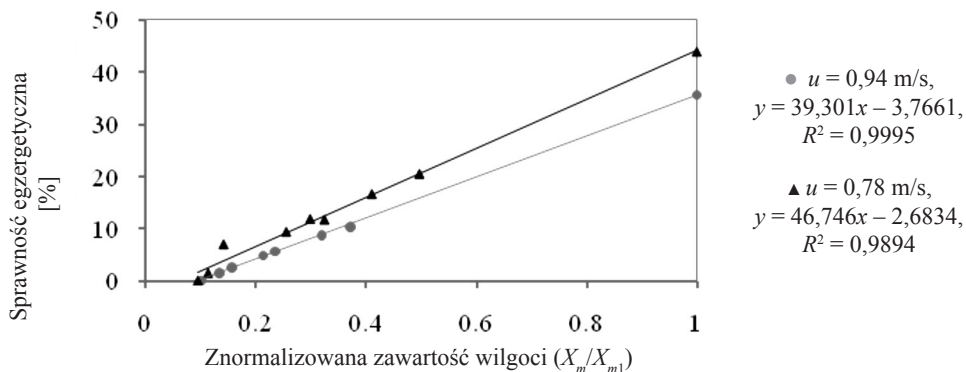
**Warunki testowania wpływu parametrów procesowych  
na sprawność suszenia fluidalnego**

Parametr	Numer testu (warunki wg tabeli 2)	
Temperatura powietrza wlotowego	1	4
Prędkość powietrza	2	3
Zapełnienie suszarki	1	2



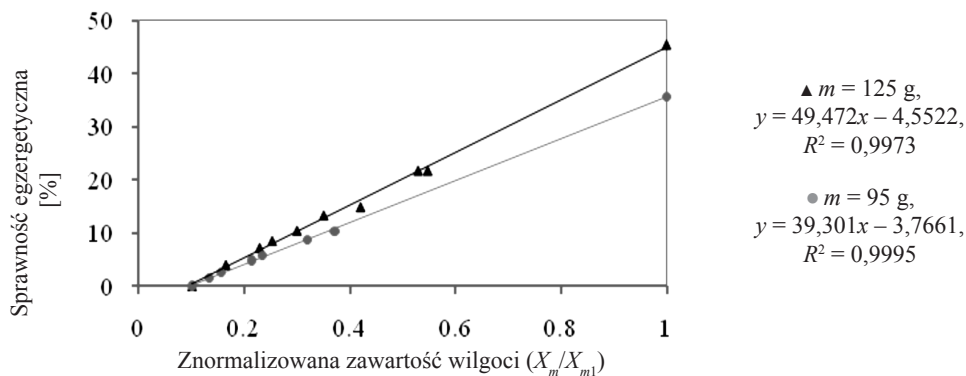
Rys. 7. Wpływ temperatury powietrza wlotowego na sprawność egzergetyczną suszenia fluidalnego

Fig. 7. Effect of inlet air temperature on exergy efficiency of fluidized bed drying



Rys. 8. Wpływ prędkości powietrza na sprawność egzergetyczną suszenia fluidalnego

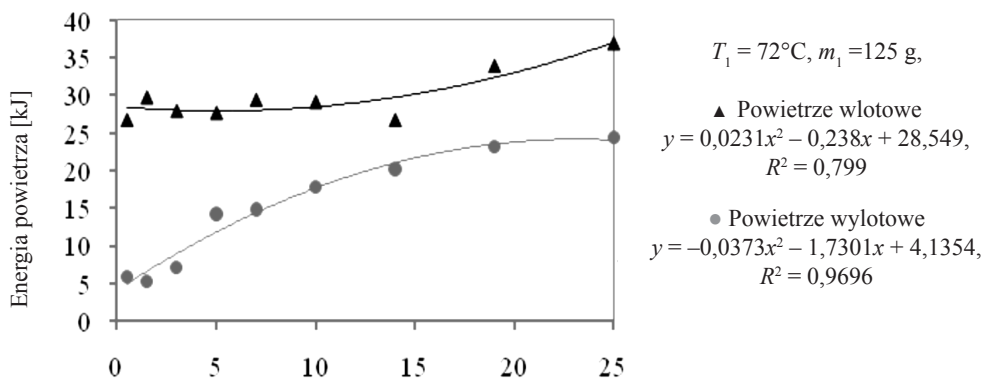
Fig. 8. Effect of air velocity on exergy efficiency of fluidized bed drying



Rys. 9. Wpływ zapelnienia suszarki na sprawność egzergetyczną suszenia fluidalnego

Fig. 9. Effect of the bed hold up on exergy efficiency of fluidized bed drying

Poprawę gospodarki cieplnej w węzle suszenia można uzyskać nie tylko poprzez odpowiedni dobór parametrów procesowych, ale również dzięki recyrkulacji czynnika suszącego [2, 17]. Pozwala ona na odzyskanie ciepła odpadowego, którego znaczne ilości zawarte są w strumieniu powietrza wylotowego (rys. 10: eksperyment 1 – tabela 2).



Rys. 10. Zależność egzergii powietrza wprowadzanego i wyprowadzanego z komory suszarniczej od czasu suszenia fluidalnego

Fig. 10. Temporal variation of exergy of air entering and exiting the fluidized bed dryer

## 5. Podsumowanie

- Wobec panującego kryzysu energetycznego oraz postępującej degradacji środowiska naturalnego, dąży się do ograniczenia zużycia energii i zastąpienia paliw konwencjonalnych zasobami energii odnawialnej, w tym biomasą. Jednym z etapów przeróbki biomasy jest suszenie, charakteryzujące się wysoką energochłonnością i przez to przyczyniające do pogłębienia współczesnych problemów energetycznych.

- Użytecznym narzędziem projektowania procesu suszenia jest analiza egzergetyczna, uwzględniająca wszystkie straty wynikające z nieodwracalności procesów. Ograniczenie tych strat pozwala zwiększyć doskonałości procesu i efektywność wykorzystania zasobów energetycznych, a w rezultacie zmniejszyć zużycie energii.
- Wyniki analizy egzergetycznej suszenia fluidalnego biomasy wskazują, iż maksymalną sprawność uzyskuje się stosując jak największe zapełnienie suszarki, jak najmniejszą prędkość powietrza suszącego i jak najwyższą jego temperaturę. Zalecana jest także recyrkulacja czynnika suszącego, umożliwiającą wykorzystanie ciepła odpadowego.
- W oparciu o wyniki analizy egzergetycznej suszenia mikrofalowego można stwierdzić, że należy stosować najmniejszą moc promieniowania, a co za tym idzie najniższą temperaturę suszenia.
- Uzyskane wyniki zachęcają do kontynuowania pracy w kierunku opracowania wytycznych budowy instalacji suszarniczej biomasy, zapewniającej zminimalizowanie zużycia energii na realizację procesu suszenia rozdrobnionej biomasy.

#### Literatura

- [1] Niedziółka I., Zuchniarz A., *Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenia roślinnego*, MOTROL, 2006, Vol. 8A, 232-237.
- [2] Gwadera M., *Aspekty energetyczne suszenia wybranych rodzajów biomasy*, praca magisterska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Krakowska, Kraków 2009.
- [3] Bury M., *Bilansowanie energetyczne suszenia ciał stałych – analiza egzergii*, praca magisterska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Krakowska, Kraków 2009.
- [4] Grzybek A., *Przygotowanie i możliwości przetwórstwa biomasy na cele energetyczne*, Polskie Towarzystwo Biomasy, Warszawa 2008.
- [5] Długa A., *Spalanie różnych rodzajów biomasy*, praca magisterska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Politechnika Krakowska, Kraków 2009.
- [6] Sahrul S., Hamdullahpur F., Dincer I., *Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles*, Exergy, an International Journal, 2002, Vol. 2, 87-98.
- [7] Dincer I., Sahin A.Z., *A new model of thermodynamic analysis of a drying process*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, Vol. 47, 645-652.
- [8] Szargut J., Petela R., *Egzergia*, WNT, Warszawa 1965.
- [9] Szargut J., *Egzergia: Poradnik obliczania i stosowania*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [10] Talens L., Villalba G., Gabarrell X., *Exergy analysis applied to biodiesel production*, Resources, Conservation and Recycling, 2007, Vol. 51, 397-407.
- [11] Sazin B.S., *Osnowy techniki suszki*, Chemija, Moskwa 1984.
- [12] Bes T., *Egzergia w procesach ogrzewania, klimatyzacji i suszenia*, Energetyka przemysłowa, 1962, Vol. 10, 388-392.
- [13] Szargut J., *Termodynamika*, PWN, Warszawa 1985.
- [14] Kavak Akpinar E., Midilli A., Bicer Y., *The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process*, Journal of Food Engineering, 2006, Vol. 72, 320-331.

- [15]Syahrul S., Dincer I., Hamdullahpur F., *Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles*, International Journal of Thermal Sciences, 2003, Vol. 42, 691-701.
- [16]Zawłocki I., *Analiza egzergetyczna instalacji suszarniczych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Seria: Inżynieria Chemiczna, 1987, Vol. 14, 170-176.
- [17]Colak N., Hepbasli A., *Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer*, Journal of Food Engineering, 2007, Vol. 80, 1188-1193.
- [18]Strumiłło C., *Podstawy teorii i techniki suszenia*, WNT, Warszawa 1983.
- [19]Wall G., Gong M., *On exergy and sustainable development – Part 1: Conditions and Concepts*, Exergy, an International Journal, 2001, Vol. 1, 128-145.