

## Wpływ grubości otoczki gęstwy drożdżowej na kulach inerty na proces jej suszenia w suszarce fontannowej

### Streszczenie

Doświadczenie przeprowadzono w laboratoryjnej suszarce fontannowej. Mierzono zmiany zawartości wody w otoczkach gęstwy drożdżowej suszonej na szklanych kulach. Suszenie przeprowadzono przy temperaturze czynnika suszącego  $t = 90^{\circ}\text{C}$  i jego prędkości  $v = 4,2 \text{ m/s}$ . Grubość otoczki na kulach wahała się od 0,08 do 0,25 mm. Początkowa zawartość wody w gęstwie wynosiła  $3,5 \text{ kg H}_2\text{O/kg s.m.}$ , a końcowa  $0,1 \text{ kg H}_2\text{O/kg s.m.}$  Wpływ grubości otoczki na kinetykę suszenia przedstawiono w postaci wykresów.

**Słowa kluczowe:** gęstwa drożdżowa, suszenie, kule inerty.

### Wykaz oznaczeń:

|   |  |
|---|--|
| A – współczynnik równania (1)                                   | [ - ]                                    |
| b – grubość otoczki na kulach                                   | [mm]                                     |
| $u_{(\tau)}$ - bieżąca zawartość wody w suszonym materiale      | [kg/kg]                                  |
| $u_0$ – początkowa zawartość wody w materiale                   | [kg/kg]                                  |
| $u_r$ – równowagowa zawartość wody w materiale                  | [kg/kg]                                  |
| $u_t$ – zawartość wody obliczona z równania (1)                 | [kg/kg]                                  |
| $u_{\text{ex}}$ – zawartość wody wynikająca z pomiaru           | [kg/kg]                                  |
| $\tau$ - czas   | [s]                                      |
| $du/d\tau$ – szybkość suszenia                                  | [kg H <sub>2</sub> O/(kg s.s. min)]      |
| v – prędkość czynnika suszącego w komorze suszenia              | [m/s]                                    |
| t – temperatura czynnika suszącego                              | [°C]                                     |
| k – współczynnik szybkości suszenia                             | [1/min]                                  |
| $q_p$ – średni strumień wody z 1 m <sup>2</sup> powierzchni kul | [kg H <sub>2</sub> O/(m <sup>2</sup> h)] |
| $Fom = De \tau / R^2$ – masowa liczba Fouriera                  | [ - ]                                    |
| De – efektywny współczynnik dyfuzji wody                        | [m <sup>2</sup> /s]                      |
| R – zewnętrzny promień kuli z otoczką                           | [m]                                      |

### Wstęp i cel pracy

Gęstwa drożdżowa powstająca (jako produkt uboczny) m.in. w przemyśle browarniczym stanowi osad o wilgotności ok. 80% - zawierający żywe drożdże. Główną metodą jej konserwacji jest suszenie.

Analiza literatury [Luna – Solano G. i in.1998, Mujumdar S. A. i in. 1995, Szentmarjay J. i in. 1991] oraz własne obserwacje pozwalają przypuszczać, że odpowiednim sposobem (ze względu na jakość i ekonomikę procesu) byłoby suszenie gęstwy w suszarce z fontannowym złożem materiału inertynego. Celem pracy było zbadanie przebiegu procesu suszenia browarniczej gęstwy drożdżowej na fontannowym złożu materiału inertynego w zależności od grubości jej otoczki na kulach.

## Stanowisko pomiarowe i metodyka badań

Pomiary wykonano na stanowisku pokazanym na rysunku 1. Zasadniczą część stanowiska stanowiła przezroczysta komora suszenia o średnicy części cylindrycznej 0,094 m, wysokości 0,3 m i pojemności ok. 0,002 m<sup>3</sup>. Komora w części stożkowej z dnem sitowym zawierała 380 sztuk szklanych kul (jako inert) o średnicy 0,007 m. Surowiec stanowiła gęstwa drożdżowa o zawartości wody ok. 3,5 kg H<sub>2</sub>O/kg s.s. pochodząca z Browarów Dolnośląskich „Piaś” we Wrocławiu. Po wstępnym nagraniu kul w komorze do temperatury suszenia podawano porcję gęstwy drożdżowej na złożę fontannujących kul strzykawką. Dzięki fontannowaniu następowało szybkie otaczanie się kul surowcem. Masę gęstwy drożdżowej podawanej na złożę inerty regulowano w zakresie 5 – 17g – co dawało teoretyczną grubość otoczki na każdej z kul od ok. 0,08 do 0,25 mm. Suszenie prowadzono do wilgotności końcowej ok. 10%, przy temperaturze powietrza 90°C, oraz przy jego prędkości w części cylindrycznej – 4,2 m/s. Pomiarów ubytku masy suszonej gęstwy dokonywano co 1 minutę na wadze elektronicznej WPE 300 z dokładnością  $\pm 0,01$  g – ważąc komorę (wcześniej wytarowaną) wraz z zawartością. Prędkość przepływu powietrza w komorze mierzono anemometrem skrzydełkowym AA 2113 z dokładnością  $\pm 0,1$  m/s. Wilgotności surowca i suszu określano metodą suszarkową. Wilgotność względną i temperaturę otoczenia mierzono psychrometrem Assmanna z dokładnością  $\pm 2\%$  oraz termometrem rtęciowym z dokładnością  $\pm 0,2\%$ .

Czas mierzono zegarem z sekundnikiem. Szybkość suszenia  $du/dt$  określano, dzieląc (obliczone na podstawie pomiarów) ubytki zawartości wody przez odstępy czasu między pomiarami, wynoszące 1 minutę. Średni powierzchniowy strumień wody obliczono odnosząc ubytki masy próbki surowca do 1 m<sup>2</sup> powierzchni kul inerty i do czasu 1 godz. Każdy cykl pomiarów powtarzano trzykrotnie.

## Ocena błędów pomiarów

W tabeli 1 podano bezwzględne i względne błędy systematyczne mierzonych i obliczanych na podstawie pomiarów wielkości. W przypadku pomiarów bezpośrednich błąd bezwzględny wyznaczano z klasy miernika lub na podstawie wartości najmniejszej działki skali przyrządu. Błędy pomiarów złożonych wyznaczono metodą różniczki zupełnej.

## Wyniki badań

Na rysunku 2 przedstawiono (przy prędkości czynnika suszącego  $v = 4,2$  m/s i jego temperaturze 90°C) spadki zawartości wody w funkcji czasu, dla 3 różnych grubości otoczek gęstwy drożdżowej na kulach. Każdy z punktów pomiarowych na rys.2. jest średnią z trzech powtórzeń. Jak wynika z wykresu w zależności od grubości otoczki, czas suszenia gęstwy od zawartości wody 3,44 do ok. 0,1 kg H<sub>2</sub>O/kg s.m. wahał się w granicach 4 – 8 minut. Przebieg punktów pomiarowych wskazuje na występowanie dwóch okresów o różnej intensywności suszenia. Okres o wyższej intensywności przypada w przybliżeniu na pierwsze 2 minuty procesu. Jest to szczególnie wyraźne dla otoczki o

najmniejszej grubości (0,08 mm). Okres ten w przypadku suszenia fontannowego niekoniecznie musi być utożsamiany z klasycznym (wg literatury) I okresem, gdy temperatura powierzchni surowca i szybkość suszenia są stałe. Ze względu na brak możliwości pomiaru w sposób ciągły ubytków masy wody na kulach oraz temperatury otoczek w fontannującym złożu-trudno było precyzyjnie określić granicę między I i II okresem suszenia. Po pominięciu pierwszego punktu pomiarowego pozostałe punkty dla poszczególnych grubości otoczek, można przybliżyć równaniem wykładniczym:

$$u_{(\tau)} = A e^{-k\tau} \quad (1)$$

- charakterystycznym dla II okresu suszenia większości materiałów roślinnych [Pabis S., 1982]. Wartości współczynników  $A$  i  $k$  oraz korelacji  $r$  dla różnych grubości otoczki  $b$  na kulach przedstawiono na rys.2.

Wpływ grubości otoczki  $b$  na dynamikę ubytków wody potwierdzają wykresy szybkości suszenia, przedstawione na rys.3. Jak wynika z rys.3. szybkość suszenia otoczki gęstwy o grubości  $b=0,08$  mm przez większość czasu trwania procesu była o ok. 50 % wyższa w porównaniu z szybkością suszenia otoczki o grubości  $b=0,25$  mm. Szybsze wysychanie cieńszej otoczki na kulach (czyli skrócenie czasu suszenia) można wyjaśnić w oparciu o istniejące rozwiązanie równania konwekcyjnego suszenia ciała stałego o kształcie kuli [Pabis S., 1982]. Z rozwiązania tego m.in. wynika związek, który symbolicznie można przedstawić jako:

$$\frac{u_{(\tau)} - u_r}{u_0 - u_r} = f(\text{Fom}) \quad (2)$$

, gdzie  $\text{Fom}$  stanowi masową liczbę Fouriera

Jak wynika z jej zapisu – czas suszenia  $\tau$  otoczki gęstwy drożdżowej będzie malał w miarę zmniejszania zewnętrznego promienia  $R$  dwuwarstwowej granuli (a więc i grubości otoczki).

Rozbieżności pomiędzy zawartością wody  $u_t$  obliczoną z równania (1), a wynikającą z pomiarów  $u_{\text{ex}}$  oceniano obliczając błąd względny średnich kwadratów odchyłeń RMS wg formuły:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{u_{\text{ex}} - u_t}{u_{\text{ex}}} \right)^2}{n-1}} \cdot 100 \quad (3)$$

oraz względny błąd lokalny  $R_{\text{lok}}$  z zależności:

$$R_{lok} = \frac{u_{ex} - u_t}{u_{ex}} 100 \quad (4)$$

Wartości RMS dla różnych grubości otoczki przedstawiono poniżej.

| Warunki suszenia            | RMS [%] |
|-----------------------------|---------|
| 90 °C, 4,2 m/s, b = 0,08 mm | 21,5    |
| 90 °C, 4,2 m/s, b = 0,19 mm | 6,2     |
| 90 °C, 4,2 m/s, b = 0,25 mm | 7,0     |

Przebieg wielkości błędu lokalnego  $R_{lok}$  dla różnych wartości  $b$  w zależności od zawartości wody w suszonym surowcu pokazano na rysunku 4.

Wartości RMS i  $R_{lok}$  wskazują, że równanie (1) dostatecznie dokładnie przybliża wyniki eksperymentu. Maksymalna wartość RMS wyniosła ok. 21 %, ponad 80 % wyników  $R_{lok}$  mieściło się w przedziale  $\pm 10$  %. Zwiększenie teoretycznej grubości otoczki od 0,08 do 0,25 mm spowodowało wzrost wielkości strumienia wody z  $1 \text{ m}^2$  powierzchni kul od ok. 0,7 do ok. 1,3  $\text{kg H}_2\text{O}/\text{m}^2\text{h}$ .

## Wnioski

1. Pomijając pierwszą minutę procesu, pozostałe punkty na krzywych suszenia gęstwy drożdżowej na kulach inerty można przybliżyć równaniem wykładniczym:

$$u_{(\tau)} = A e^{-k\tau}$$

2. Zwiększenie grubości otoczek na kulach od ok. 0,08 do ok. 0,25 mm spowodowało spadek średniej szybkości suszenia ok. 50% oraz prawie dwukrotny wzrost wartości średniego powierzchniowego strumienia wody.

## Spis rysunków:

**Rys.1.** Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – wentylator, 2 – zasuwa regulacyjna, 3 – nagrzewnica z regulatorem temperatury, 4 – termopara, 5 – komora suszenia, 6 – fontannujące złożo, 7 – króciec pomiarowy, 8 – anemometr, 9 – manometr cieczowy, 10 – filtr workowy

**Fig.1.** Scheme of measuring stand: 1 –fan, 2 – damper, 3 – heater with temperature controller, 4 – thermoelement, 5 –drying chamber, 6 – spouted bed of inert spheres with envelopes of yeast slurry, 7 –measuring pipe, 8 –anemometer, 9 – liquid manometer, 10 – sack filter

**Rys.2.** Spadek zawartości wody  $u$  w czasie  $\tau$  dla różnych grubości otoczek na kulach,  $v = 4,2 \text{ m/s}$ ,  $t = 90 \text{ °C}$

**Fig.2.** Drop of water fraction  $u$  versus time  $\tau$  for various thickness of the envelope on the spheres,  $v = 4,2 \text{ m/s}$ ,  $t = 90 \text{ °C}$

**Rys.3.** Szybkość suszenia w zależności od zawartości wody dla różnych grubości otoczek na kulach,  $v = 4,2 \text{ m/s}$ ,  $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

**Fig.3.** Drying rate versus water content for various thickness of the envelope on the spheres,  $v = 4,2 \text{ m/s}$ ,  $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$

**Rys.4.** Wartości błędu lokalnego w funkcji zawartości wody dla różnych grubości otoczki

**Fig.4.** The value of the local error as a function of water content for various thickness of the envelope

### Spis tabel

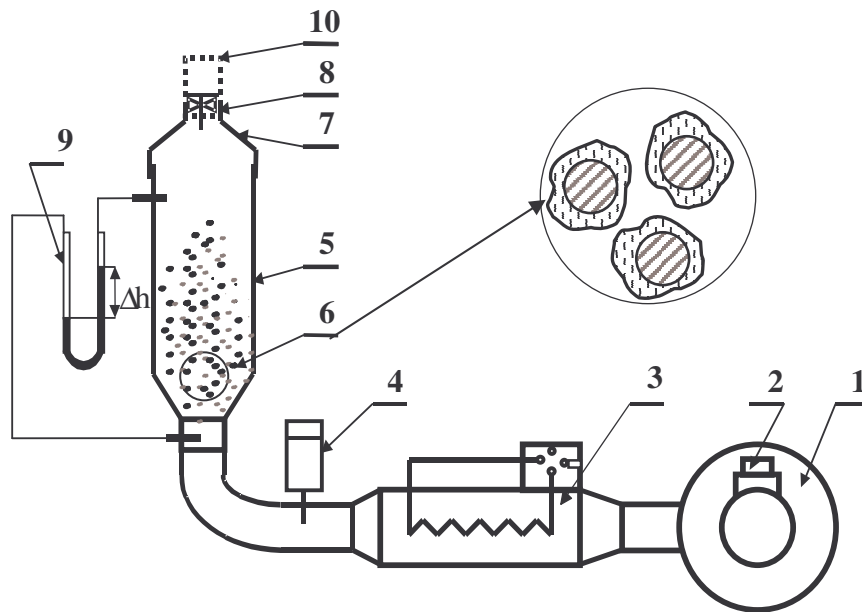
**Tabela 1.** Błędy systematyczne mierzonych wielkości.

**Table 1.** Systematical errors of the measured value.

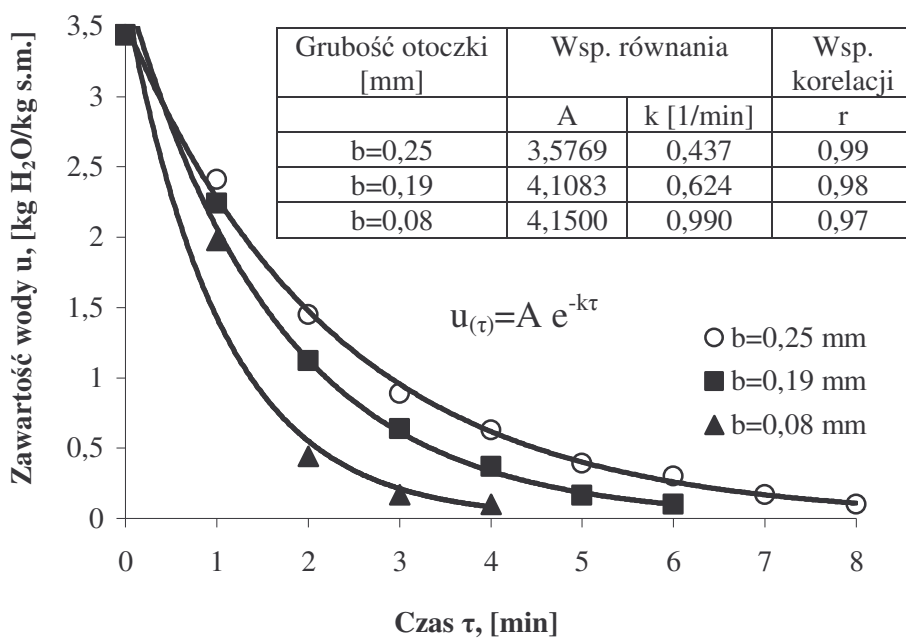
**Tabela 1.**

| Mierzona wielkość                              | Błąd bezwzględny<br>$\Delta$ | Błąd względny<br>$\delta$ [%] | Uwagi  |
|--|------------------------------|-------------------------------|--|
| Temperatura powietrza na wlocie do suszarki    | $\pm 1^\circ\text{C}$        | 1,5 – 2 %                     | Wahania błędu względnego dla temperatury $90^\circ\text{C}$  |
| Prędkość przepływu powietrza u wylotu suszarki | $\pm 0,1 \text{ m/s}$        | 2,2                           | Wahanie błędu względnego dla prędkości $v = 4,2 \text{ m/s}$ |
| Grubość otoczki gęstwy na kuli inerty          | $\pm 10\mu\text{m}$          | 9 – 15                        | Wahanie błędu względnego dla $b = 80 - 250 \mu\text{m}$      |
| Początkowa zawartość wody w gęstwie drożdżowej | 0,02 kg/kg                   | 2,5                           | Przeprowadzono trzy niezależne pomiary                       |
| Końcowa wilgotność suszu                       | $\pm 0,02 \text{ kg/kg}$     | 3,4                           | Przeprowadzono trzy niezależne pomiary                       |
| Temperatura otoczenia                          | $\pm 0,2^\circ\text{C}$      | 1,3 – 2,7                     | Przeprowadzono trzy niezależne pomiary                       |
| Wilgotność względna otoczenia                  | $\pm 2\%$                    | 3,4 – 4,2                     | Przeprowadzono trzy niezależne pomiary                       |

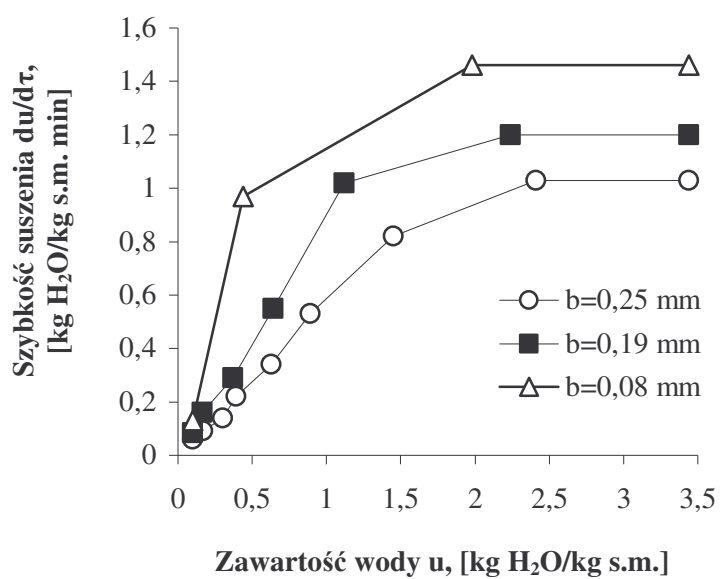
Rys.1.



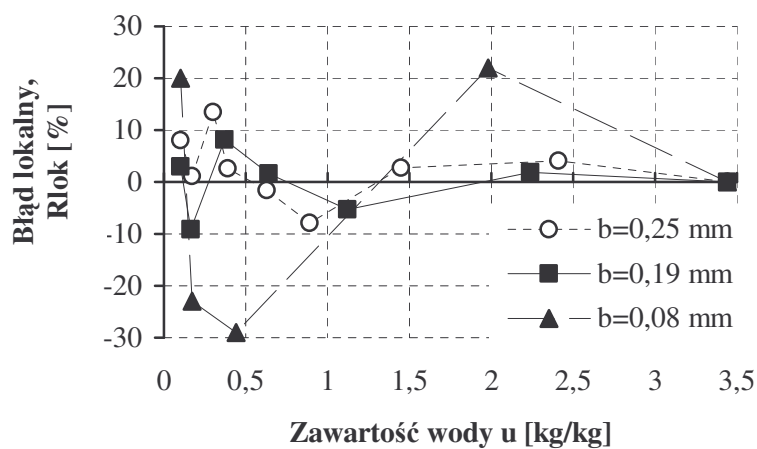
Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4



### Bibliografia:

- Luna- Solano G. i in. 1998. Yeast viability (*Saccharomyces cerevisiae*) dried by fluidized bed and spray drying, Drying '98, vol. C, pp. 1815 – 1821, Halkidiki, Greece.
- Pabis S. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolnych. PWRiL Warszawa.

## **Influence of the envelope thickness of yeast slurry on inert spheres on the drying process in a spouted bed drier**

### **Summary**

The trial were carried out in a lab spouted bed drier. Measurements of water content in the envelopes of yeast slurry dried on glass spheres were made. The drying was performed at the temperature of drying medium  $t = 90^{\circ}\text{C}$ , at air flow rates  $v = 4.2 \text{ m/s}$ . Thickness of the slurry envelopes on the spheres ranged from 0.08 to 0.25 mm. The initial water content in the slurry was 3.5 kg  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg d.m.}$  and the final one 0.1 kg  $\text{H}_2\text{O}/\text{kg d.m.}$  The effect of the envelope thickness on the drying kinetics was described by linear equations.

**Key words:** yeast slurry, drying, inert material