

ANALIZA WYMIAROWA CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA WYMIANĘ MASY PODCZAS SUSZENIA ROZPYŁOWEGO BRZECZKI SŁODOWEJ

Mariusz Surma, Stanisław Peroń

Inżynieria Rolniczej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. Celem pracy było określenie wpływu temperatury czynnika suszącego, średniej średnicy kropelek surowca, strumienia masy surowca i powietrza – na wielkość strumienia wody z jednostki objętości komory suszenia w suszarce rozpyłowej APV ANHYDRO LAB1. Wyniki pozwoliły na sformułowanie liczb podobieństwa modelowego opisujących wymianę masy w komorze suszenia.

Słowa kluczowe: suszenie rozpyłowe, brzeczka słodowa, analiza wymiarowa

Wstęp i cel pracy

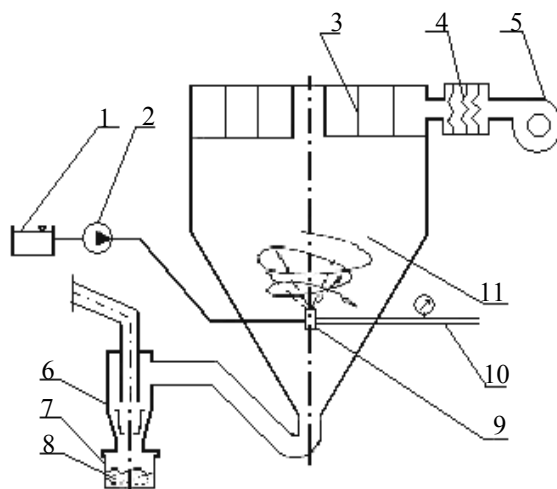
Brzeczka słodowa stanowi wodny wyciąg węglowodanów (glukozy, maltozy, dekstryn), substancji białkowych (aminokwasów i peptydów), enzymów z grupy hydrolaz (amylolitycznych, pektolitycznych, celulolitycznych i innych), składników mineralnych (sól, potas, wapń, fosfor, żelazo), witamin (B₁, B₂, B₆, PP). Koncentrat brzeczki słodowej (zwany również ekstraktem słodowym) otrzymujemy na drodze zagęszczania brzeczki w wyparce próżniowej do zawartości suchej substancji 70-80%. Oprócz powszechnego stosowania w piwowarstwie ekstrakty słodowe znajdują zastosowanie w piekarnictwie, cukiernictwie, przemyśle koncentratów spożywczych, farmacji [Błażewicz i Borek 1999; Bogdański 1966]. Czynnikiem limitującym szerokie stosowanie koncentratów słodowych w Polsce jest ich ograniczona trwałość wynikająca z 20-30% zawartości wody, co wymusza konieczność stosowania środków konserwujących (np. benzoianu sodu) [Fraj, Świądek 1984]. Jednym ze sposobów zwiększania trwałości ekstraktów słodowych jest ich suszenie rozpyłowe. Do chwili obecnej ekstrakt słodowy w formie sypkiej jest importowany. W kraju odczuwa się brak informacji na temat suszenia koncentratu brzeczki słodowej. Jak dotychczas brak ścisłych zależności pozwalających na obliczanie procesu suszenia rozpyłowego jedynie o rozważania teoretyczne. Dla ustalenia odpowiednich warunków prowadzenia procesu w dalszym ciągu niezbędne są badania doświadczalne.

Celem pracy było uzyskanie (w oparciu o eksperyment i analizę wymiarową) opisu transportu wody między czynnikiem suszącym a rozpylonym roztworem brzeczki słodowej – dla wybranych parametrów procesu.

Metodyka badań

Na rysunku 1 przedstawiono schemat suszarki rozpyłowej APV ANHYDRO LAB1 wyposażonej w oryginalną dysze rozpylającą SU4 (Fluid Cap 60100 + Air Cap 120).

Materiałem wyjściowym był koncentrat brzożki słodowej o zawartości suchej substancji ok. 75% otrzymany ze Słodowni w Wolsztynie. Koncentrat zawierał 18,2% maltozy, 4,97% glukozy łącznie z fruktozą, 6,28% dekstryn, 2,5% białka oraz 0,3% tłuszczu. Po rozcieńczeniu koncentratu wodą odpowiednio do zawartości wody $u_1=1; 1,5; 2,33; 4 \text{ kg H}_2\text{O kg}^{-1} \text{ s.s.}$ tłoczono go pompą perystaltyczną do dyszy rozpylającej. Strumień masy surowca podawanego do rozpylacza regulowano w zakresie $0,77\text{-}3,73 \text{ kg h}^{-1}$. Zmianę strumienia masy powietrza suszącego przypadającego na 1 m^3 komory suszenia w zakresie $102,9\text{-}150,4 \text{ kg m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ uzyskiwano przesłoną na wlocie do wentylatora. Surowiec suszono w przeciwprądzie. Stopień rozpylenia koncentratu brzożki słodowej regulowano wysokością ciśnienia w przewodzie 10 (zaworem redukcyjnym) w zakresie $0,5\text{-}3,0 \text{ bar}$. Rozkład średnic rozpylonego materiału określono następująco: Próbkę rozpylonego materiału pobierano (w odległości $0,5 \text{ m}$ od wyloty dyszy) na płytkę Petriego – na powierzchni której rozprowadzono ciekłą warstwę oleju silikonowego „Silform”. Obraz kropeł (na powierzchni 1 cm^2) przekazywany przez mikroskop BIOLAR B 2308 sprzężony z kamerą (Color CCD Camera VCC-3770P) i komputerem był rejestrowany i analizowany.



Rys. 1. Schemat suszarki rozpyłowej APV ANHYDRO LAB1: 1 – pojemnik z brzożką, 2 – pompa, 3 – kierownica strug powietrza, 4 – nagrzewnica, 5 – wentylator, 6 – cyklon, 7 – odbieralnik, 8 – susz, 9 – rozpylacz, 10 – przewód doprowadzający sprężone powietrze, 11 – komora suszenia

Fig. 1. Schematic representation of APV ANHYDRO LAB1 spray drier: 1–container with wort, 2– pump, 3– air stream guide, 4– heater, 5– fan, 6– cyclone, 7– receiver, 8– dried material, 9– sprayer, 10– conduit supplying compressed air, 11– drying chamber

W oparciu o krzywe rozkładu ich średnic określano średnią średnicę objętościową kropeł dla każdej z prób. Podobną technikę analizy rozkładu kropeł opisano w pracy Orzechowski i Prywer [1991] oraz Filkovej i Cedika [1984]. Nagrzewnica pozwoliła na regulację temperatury czynnika suszącego na wlocie w granicach 130-220°C. Temperaturę powietrza na wlocie i wylocie z suszarki oraz suszu osadzającego się w cyklonie mierzono termoparami CuKo ($\pm 1^\circ\text{C}$). Strumień masy powietrza określano w oparciu o pomiar jego prędkości w rurze wylotowej cyklonu anemometrem skrzydełkowym AA 2113 ($\pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Zawartość ekstraktu (suchej masy) w surowcu określano refraktometrem RL 1. Wilgotność suszu określano metodą suszarkową. Masę surowca i suszu mierzono na wadze elektronicznej WPT 3/6 ($\pm 0,1 \text{ g}$). Strumień masy odparowanej wody obliczano na podstawie znajomości masy podawanego surowca oraz wilgotności początkowej i końcowej suszonego materiału.

Dynamiczny współczynnik dyfuzji wody δ_A z kropeł surowca do powietrza (jak dla wody) według zależności [Hobler, 1986]:

$$\delta_A = 0,05441\sqrt{T \cdot 273^{-1}} \quad (1)$$

gdzie:

T – oznacza średnią temperaturę między temperaturą powierzchni kropli a temperaturą powietrza wlotowego.

Lepkość dynamiczna czynnika suszącego odczytano z tablic dla średniej temperatury między wlotem i wylotem z suszarki. Wilgotność względną i temperaturę otoczenia mierzono psychrometrem Assmanna z dokładnością $\pm 2\%$ oraz termometrem rtęciowym z dokładnością $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Czas trwania doświadczenia określano zegarem z sekundnikiem. Każdy cykl powtarzano trzykrotnie.

Analiza wymiarowa czynników wpływających na wymianę masy podczas suszenia rozpyłowego brzożki słodowej

W literaturze źródłowej i monograficznej Manning i Gauvin [1960], Gauvini Katta [1976], Miura i Othani [1979], Crove [1980], Zbiciński [1989], Parti i Palancz [1974], Zbiciński [1994], Pazola [1965] można znaleźć szereg zależności empirycznych oraz prób teoretycznego ujęcia zagadnienia suszenia rozpyłowego. Ze względu na nieustalone warunki ruchu ciepła i masy oraz złożoną hydrodynamikę układu nie opracowano dotychczas ścisłych zależności, pozwalających na obliczanie procesu suszenia surowców w oparciu o rozważania teoretyczne. Dla ustalenia optymalnych parametrów prowadzenia procesu oraz stwierdzenia czy dany materiał może być suszony metodą rozpyłową w dalszym ciągu niezbędne są badania doświadczalne.

Celem praktycznego wykorzystania otrzymanych wyników wykorzystano analizę wymiarową pozwalającą transponować wyniki badań modelowych na obiekt rzeczywisty. Przedstawione były wcześniej doświadczenia Peroń i in. [2003, 2004] wykazały, że omawiany analizowany objętościowy strumień wilgoci W zależy głównie od następujących wielkości: temperatury czynnika suszącego na wlocie do suszarki t_1 , różnicy temperatur czynnika na wlocie i wylocie z komory suszenia Δt , strumienia masy surowca podawanego do suszarki m , średniej średnicy objętościowej kropeł rozpylonego surowca d_k , strumienia

masy czynnika suszącego przypadającego na 1 m³ objętości komory suszenia g_p , zawartości wody w surowcu u_1 . Wiadomo z literatury, że strumień ten zależy również m.in. od współczynnika dyfuzji wody δ_A od kropeł surowca do powietrza oraz od lepkości powietrza η . Współczynniki te dla warunków doświadczenia (jak wspomniano w metodyce) obliczono lub znajdowano w oparciu o literaturę.

Tak więc objętościowy strumień wilgoci W można ująć równaniem ogólnym:

$$W = t(\Delta t, t_1, \eta, \delta_A, d_k, g_p, m, u_1) \quad (2)$$

Stosując ogólne zasady analizy wymiarowej [Hobler 1986, Szücs 1977] funkcję tę można zapisać w postaci iloczynu potęgowego:

$$W = C \cdot \Delta t^a \cdot t_1^b \cdot \eta^c \cdot \delta_A^d \cdot d_k^e \cdot g_p^f \cdot m^g \cdot u_1^h \quad (3)$$

Równanie wymiarowe tej funkcji przyjmuje postać następującą:

$$[kg \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}] = [^{\circ}C]^a [^{\circ}C]^b [kg \cdot m \cdot h]^c [kg \cdot m \cdot h]^d [m]^e [kg \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}]^f [kg \cdot h^{-1}]^g [kg \cdot kg^{-1}]^h \quad (4)$$

Ze względu na fakt, że zawartość wody w surowcu u_1 – sama w sobie stanowi wielkość bezwymiarową [kg/kg] nie wzięto jej pod uwagę przy analizie wymiarów i występuje w końcowym równaniu bezwymiarowym na prawach odrębnego modułu.

Przeprowadzając analizę dla poszczególnych wymiarów można zapisać:

dla miana kg: $1 = c + d + f + g$, dla miana m: $-3 = -c - d + e - 3f$, dla miana h: $-1 = -c - d - f - g$, dla miana $^{\circ}C$: $0 = a + b$

Rozwiązanie tych czterech równań daje: $b = -a$; $c = 1 - d - f - g$; $e = -2 - g + 2f$.

Rozwiązanie z tym równanie (3) przyjmuje postać:

$$W = C \cdot \Delta t^a \cdot t_1^{-a} \cdot \eta^{1-d-f-g} \cdot \delta_A^d \cdot d_k^{-2-g+2f} \cdot g_p^f \cdot m^g \cdot u_1^h \quad (5)$$

Czyli:

$$[W \cdot d_k^2 \cdot \eta^{-1}] = C [\Delta t \cdot t_1^{-1}]^a [\delta_A \cdot \eta^{-1}]^d [g_p \cdot d_k^2 \cdot \eta^{-1}]^f [m \cdot d_k^{-1} \cdot u_1^{-1}]^g u_1^h \quad (6)$$

lub po wprowadzeniu symboli:

$$Sw = C \cdot G^a \cdot Sc_{in}^d \cdot Re_u^f \cdot M^g \cdot u_1^h \quad (7)$$

które są wielkościami bezwymiarowymi:

Moduł: $Sw = W \cdot d_k^2 \cdot \eta^{-1}$ - wyraża podobieństwo transportu masy odparowanej wody w suszarce, $G = (t_1 - t_2) t_1^{-1}$ - charakteryzuje podobieństwo intensywności wymiany ciepła w komorze suszenia, $Sc_{in} = \delta_A \cdot \eta^{-1}$ - jest odwrotnością liczby Schmidta i charakteryzuje podobieństw pól prędkości i stężenia wody w przepływającym powietrzu. Stanowi kryterium podobieństwa własności fizycznych substancji w zjawiskach przenoszenia masy, $Re_u = g_p \cdot d_k^2 \cdot \eta^{-1}$ - jest podobny do liczby Reynoldsa i charakteryzuje hydrodynamiczne podobieństwo przepływu czynnika suszącego, $M = m \cdot d_k^{-1} \cdot \eta^{-1}$ - wyraża podobieństwo

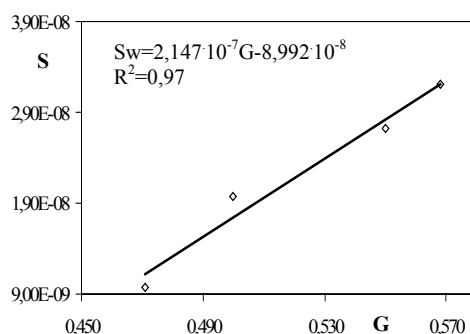
transportu masy surowca do suszarki, u_1 - traktowane jako odrębny moduł (z racji swojej definicji) – wyraża stopień nawilgocenia surowca.

Wartość wykładników potęgowych oraz stałej C w równaniu (7) określano znajdując zależności modułu Sw od każdego z pozostałych przy założeniu, że pozostałe moduły zachowują wartość stałą, ewentualnie przyjmując ich wartości średnie.

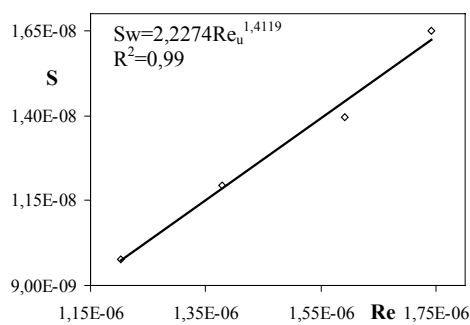
Rysunek 2 przedstawia wykres zmian zależności modułu Sw od modułu G dla stałych u_1 , Re_u oraz M . Jak wynika z wykresu jest to zależność liniowa stąd wartość wykładnika a przy module G przyjęto jako 1.

Ponieważ wartość modułu Sc_m w zakresie stosowanych parametrów doświadczenia wahała się w granicach 0,77-081 – nie wyznaczano zależności $Sw=f(Sc_m)$, lecz przyjęto jej średnią wartość jako 0,79 i ujęto w stałej równania C .

Na rysunku 3 pokazano zmiany zależności Sw od Re_u dla stałych u_1 , G , M . Z wykresu wynika, że zależność $Sw=f(Re_u)$ ma charakter potęgowy przy wykładniku wynoszącym ok. 1,4. Stąd f przy module Re_u przyjęto jako 1,4. Należy zauważyć, że jest to wykładnik wyższy niż wykładniki przy liczbie Re w równaniach Frosslinga czy Ranza i Marshalla [Strumiłło 1983] dotyczących suszenia pojedynczych kropeł – wynoszące ok. 0,5. Z drugiej strony w zależności Sjenitzera zawartej w materiałach Sympozjum JUFOST [1980] związanej z parowaniem rozprężonej kropli wody – hamowanej powietrzem – wartość wykładnika przy Re sięga 1,5.



Rys. 2. Wykres zmian zależności $Sw=f(G)$, $u_1=2,33$; $Re_u=1,15 \cdot 10^{-6}$, $M=1132404$
 Fig. 2. Graph presenting relation changes $Sw=f(G)$, $u_1=2.33$; $Re_u=1.15 \cdot 10^{-6}$, $M=1132404$

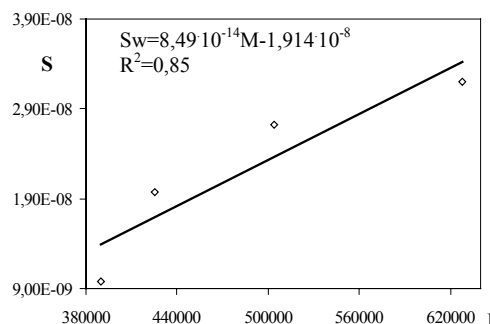


Rys. 3. Wykres zmian zależności $Sw=f(Re_u)$, $u_1=2,33$; $G=0,414$; $M=668311,5$
 Fig. 3. Graph presenting relation changes $Sw=f(Re_u)$, $u_1=2.33$; $G=0.414$; $M=668311.5$

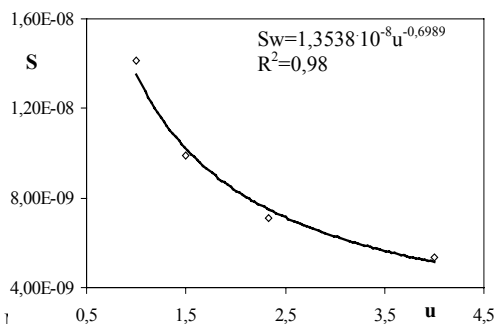
Jak już wyżej wspomniano – tak wysoka wartość wykładnika może być związana ze zwiększeniem (w miarę zwiększenia wydatku powietrza g_p) stopnia turbulencji wewnątrz komory wspomagającego proces wymiany masy.

Zależność modułu Sw od M dla stałych u_1 , Re_u , G pokazano na rysunku 4. Jak wynika z wykresu funkcja $Sw=f(M)$ ma przebieg liniowy stąd wartość wykładnika a przyjęto jako 1.

Zależność Sw od wielkości u_1 traktowanej jako osobny moduł dla stałych M , Re_u , G przedstawia rysunek 5. Jak wynika z wykresu zależność $Sw=f(u_1)$ przebiega potęgowo przy wykładniku wynoszącym ok. - 0,7, stąd wartość wykładnika $h = -0,7$.



Rys. 4. Wykres zmian zależności $Sw=f(M)$, $u_1=2,33$; $Re_u=1,2 \cdot 10^{-6}$, $G=0,494$
 Fig. 4. Graph presenting relation changes $Sw=f(M)$, $u_1=2,33$; $Re_u=1,2 \cdot 10^{-6}$, $G=0,494$



Rys. 5. Wykres zmian zależności $Sw=f(u_1)$, $M=486939,5$; $Re_u=1,2 \cdot 10^{-6}$, $G=0,494$
 Fig. 5. Graph presenting relation changes $Sw=f(u_1)$, $M=486939,5$; $Re_u=1,2 \cdot 10^{-6}$, $G=0,494$

Po określeniu wartości wykładników a, f, g, h stałą C obliczano z równania:

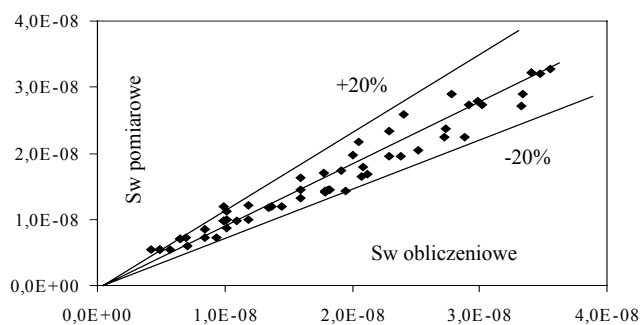
$$C = \frac{Sw}{G \cdot Re_u^{1,4} \cdot M \cdot u_1^{0,7}} \quad (8)$$

ustalając jej wartość średnią jako $C=4,51 \cdot 10^{-6}$.

Ostatecznie równanie (7) opisujące wymianę masy w komorze suszenia suszarki rozpyłowej w zależności od w/w parametrów przyjęło formę:

$$Sw = 4,51 \cdot 10^{-6} \cdot G \cdot Re_u^{1,4} \cdot M \cdot u_1^{0,7} \quad (9)$$

równanie to koreluje wyniki pomiarów z dokładnością $\pm 20\%$.



Rys. 6. Wykres korelacyjny równania 9
 Fig. 6. Correlation graph of equation 9

Wnioski

Uzyskane na drodze analizy wymiarowej równanie zawierające bezwymiarowe liczby podobieństwa modelowego w postaci:

$$Sw = 4,51 \cdot 10^{-6} \cdot G \cdot Re_u^{1,4} \cdot M \cdot u_1^{0,7}$$

ujmuje wpływ: temperatury czynnika suszącego na wlocie do suszarki, różnicę temperatur czynnika na wlocie i wylocie z komory suszenia, strumienia masy surowca podawanego do suszarki, średniej średnicy objętościowej kropeł rozpylonego surowca, strumienia masy czynnika suszącego przypadającego na $1m^3$ objętości komory suszenia, zawartości wody w surowcu na proces suszenia rozpyłowego roztworu koncentratu brzożki słodowej i może być użyteczny dla praktyki. Stwarza ono możliwości transponowania wyników badań laboratoryjnych na większe obiekty stosowane do suszenia koncentratu brzożki.

Bibliografia

- Bogdański K.** 1966. Zarys technologii koncentratów żywnościowych, witaminowych i odżywek. PWN, Warszawa. ISBN 83-01-11394-4.
- Crowe C.T.** 1980. Modeling Spray-Air Contact in Spray Drying Systems, *Advances in Drying*, Mujumdar A.S. (ed.), Vol. 1, Hemisphere, London, s. 64-99, ISBN 978-1-57444-668-5.
- Filkova I, Cedik P.** 1984. Nozzle Atomization in Spray Drying, *Advances in Drying*, Mujumdar A.S. (ed.), Vol. 3, Hemisphere, Washington. s. 181-214.
- Fraj A, Sąsiadek R.** 1984. Produkcja i zastosowanie ekstraktu słodowego. *Przegląd Piekarski i Cukierniczy* 2. s. 11-12.
- Gauvin W.H., Katta S.** 1976. Basic Concepts of Spray Drying Design, *AIChE Journal*. Vol. 22, No. 4. s. 713-72.
- Hobler T.** 1986. Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa, ISBN 83-204-0699-4.
- Manning W.P., Gauvin W.H.** 1960, Heat and Mass Transfer to Decelerating Finely Atomized Sprays, *AIChE Journal*, Vol. 6, No.2. s. 184-190.
- Miura T., Othani S., Maeda S.** 1980. Heat and Mass Transfer to and from Sprays, *Drying'80*, Mujumdar A.S., (ed.), Vol. 1, Hemisphere, Washington, s. 351-356.
- Orzechowski Z., Prywer J.** 1991. Rozpylanie Ciecży. WNT. Warszawa. ISBN 83-204-1378-8.
- Parti M., Palancz B.** 1974. Mathematical Model for Spray Drying, *Chem. Eng. Science*. Vol. 29. s. 355-362.
- Pazola Z.** 1965. Suszenie rozpyłowe w przemyśle spożywczym, Wydawnictwo Przemysłu Lekkiego i Spożywczego Warszawa. ISBN 83-02-00307-7.
- Peroń S., Kamiński E., Figiel A, Stępień B., Surma M.** 2003. Wpływ stopnia rozpylenia koncentratu brzożki słodowej na jej suszenie. *Inżynieria Rolnicza*. Nr 9(51). s. 137-145.
- Surma M. Peroń S.** 2004. Wpływ strumienia masy czynnika suszącego na suszenie rozpyłowe koncentratu brzożki słodowej. *Acta Sci.Pol., Technica Agraria* 3(1-2)2004. s. 97-104.
- Zbiciński I.** 1988. Analiza Wymiany Ciepła i Masy w Strefie Atomizacji, *Materiały VII Konferencji Mechaniki Płynów*. Białystok. Vol. 2. s. 421-429.
- Zbiciński I.** 1994. Modelowanie i weryfikacja wymiany pędu, ciepła i masy w strefie atomizacji. *Zeszyty naukowe. Politechnika Łódzka*, Z. 209.

DIMENSIONAL ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING MASS EXCHANGE DURING THE SPRAY DRYING PROCESS OF MALT WORT

Abstract. The purpose of the study was to determine the influence of drying factor temperature, average diameter of a material drop, material and air mass stream on the size of water stream out of a volume unit of drying chamber in the APV ANHYDRO LAB1 spray drier. The results allowed for determining model similarity numbers describing mass exchange in the drying chamber

Key words: spray drying, malt wort, dimensional analysis

Adres do korespondencji:

Mariusz Surma; e-mail: mariusz.surma@up.wroc.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
ul. Chełmońskiego 37/41
51-630 Wrocław