

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Suszenie fluidyzacyjne zboża – analiza obliczeniowa krzywej suszenia

ADAM RUCIŃSKI

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY ENERGETYKI I LOTNICTWA,
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ

Słowa kluczowe: fluidyzacja, suszenie fluidalne, suszenie zboża, krzywa suszenia

STRESZCZENIE

W pracy scharakteryzowano różne procesy suszenia. Zwrócono szczególną uwagę na proces fluidyzacyjnego suszenia zboża. Przedstawiono schemat stanowiska eksperymentalnego służącego do prowadzenia badania szybkości suszenia materiału wilgotnego. Zamieszczono wyniki pomiarów, a następnie wykonano krzywą suszenia za pomocą dostępnych w literaturze metod obliczeniowych opartych głównie o badania eksperymentalne. Stwierdzono potrzebę adaptacji dostępnych metod do suszenia ziarn pszenicy za pomocą prostej metody regresji. Ostatecznie przedstawiono model pół-empiryczny krzywej suszenia dostosowany do opisywanego procesu suszenia. We wnioskach podkreślono potrzebę dalszych prac nad opracowaniem dobrych modeli obliczeniowych krzywej suszenia.

Fluidized bed drying of seeds – drying curve analysis

Keywords: fluidization, fluidized bed drying, drying of seeds, drying curve

ABSTRACT

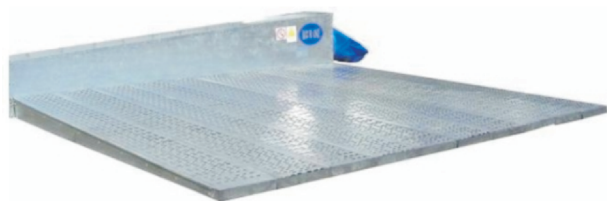
This paper deals with different ways of drying in general. The fluidized bed drying is underlined. The experimental stand is described, where the drying process is examined. The moisture content of wheat seeds versus drying time is presented. A few of calculation models were analyzed and regressive model is introduced to one of them. Then semi-empirical calculation model is presented, moisture content versus drying time curve is done which is devoted especially to drying of wheat seeds. The need of further work on specific fluidized drying bed process is underlined.

1. INFORMACJE OGÓLNE

Problem poprawnie przeprowadzonego procesu suszenia zboża jest bardziej skomplikowany niż wskazuje na to codzienna praktyka związana z powszechnie wykonywanym procesem. Ziarno zbóż to żywy materiał biologiczny wrażliwy na działanie temperatury i dużej wilgotności [1]. Nieodpowiednia temperatura i wilgotność mogą prowadzić m.in. do spadku siły kiełkowania, nadmiernego wyschnięcia ziarna, strat wartości odżywczych oraz nadmiernego wzrostu różnego typu szkodliwych mikroorganizmów, rozwoju grzybów i pleśni. Zatem proces suszenia powinien być dobrany tak, aby zapobiegać tego rodzaju nieprawidłowościom.

Dostępne obecnie rozwiązania to przede wszystkim suszarnie podłogowe i suszarnie kolumnowe o zabudowie daszkowej oraz suszarnie bębnowe. Istotną rolę odgrywają także coraz częściej urządzenia do suszenia fluidalnego.

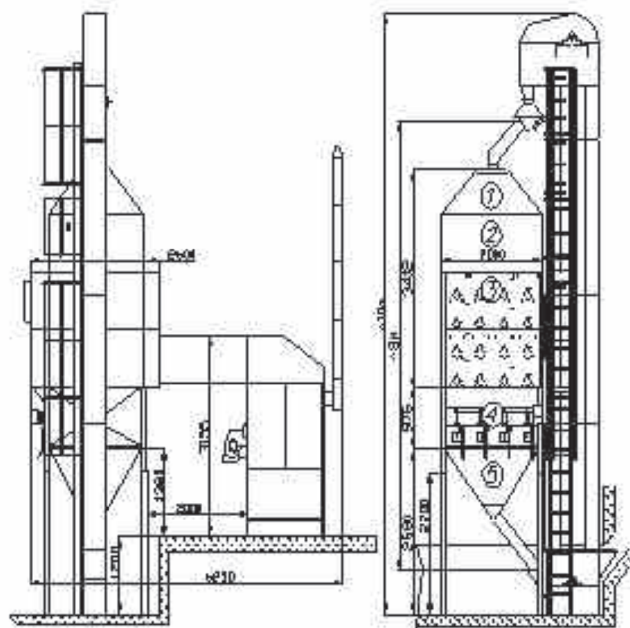
Pierwsze rozwiązanie dotyczy głównie suszenia zboża o małej wilgotności. Czynnikiem suszącym może być powietrze zewnętrzne bez obróbki cieplnej lub ogrzane w podgrzewaczach powietrza. Podawane jest ono za pomocą wentylatora i tłoczone przez perforowaną podłogę na nieruchome złożo ziarna. Grubość złoża może osiągać nawet 1,5 m.



Rysunek 1 Przykład rozwiązania konstrukcyjnego suszarni podłogowej [2]

Figure 1 The example of floor drying machine construction [2]

Suszarnia kolumnowa daszkowa składa się natomiast z kolumny susząco-chłodzącej, podgrzewacza powietrza i wentylatorów. Odpowiednie umiejscowienie elementów prowadzących zasypywane ziarno (tzw. daszków) pozwala na dobry kontakt czynnika suszącego ze zbożem, co przyspiesza proces zmniejszania wilgotności ziarna. Konstrukcja ta jest natomiast bardzo wrażliwa na zanieczyszczenia w postaci pozostałości roślinnych, co powoduje potrzebę wstępnego czyszczenia ziarna.



Rysunek 2 Schemat ideowy suszarni daszkowej [3]

Figure 1 The scheme of drying machine with peaks [3]

Suszarnie bębnowe charakteryzują się prostą konstrukcją i dobrym kontaktem czynnika suszącego z ziarnem, ze względu na zamontowane w obracającym się bębnie półki, które zapewniają odpowiednie przesypywanie się zboża w strumieniu ogrzanego powietrza we współprądzie lub przeciwprądzie.

Suszenie fluidalne jest uznawane obecnie za najbardziej nowoczesną metodę usuwania wilgoci z materiałów ziarnistych.

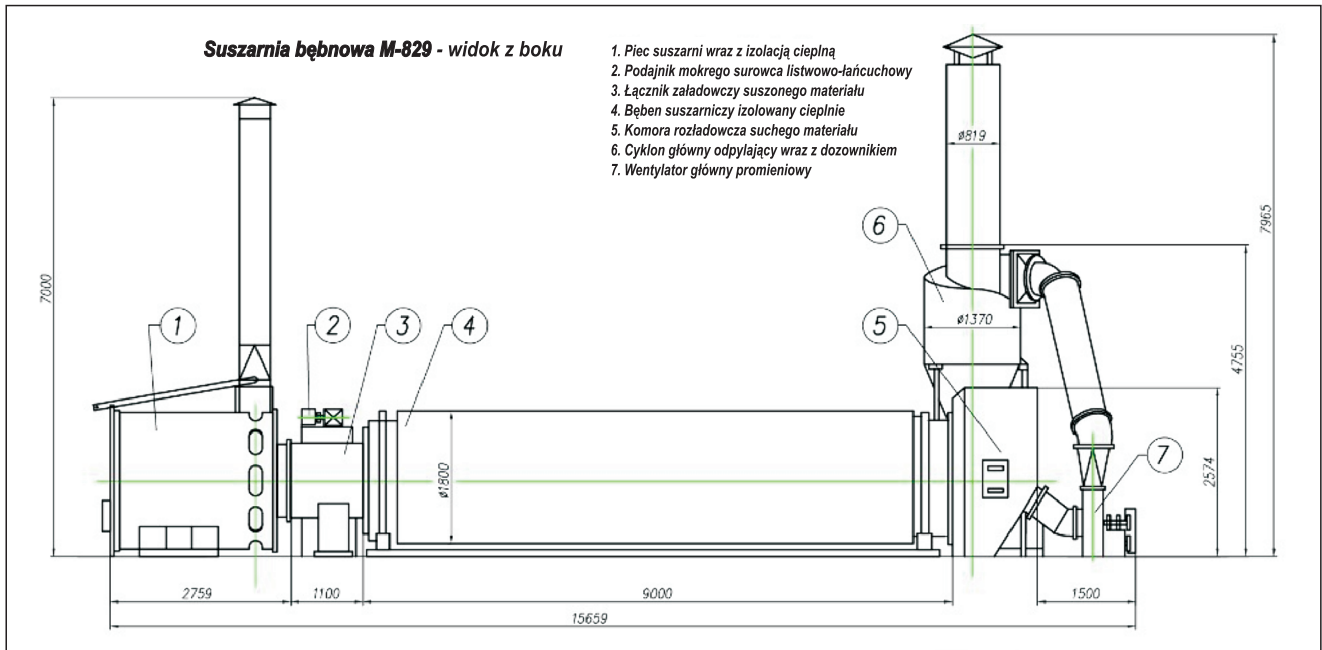
Podstawowe zalety to:

- cechy płynu warstwy fluidalnej umożliwiają obróbkę złoża w szerokim zakresie wydajności – nawet do kilkuset ton na dobę suszonego materiału,
- ze względu na wzajemny, rozwinięty kontakt między czynnikiem suszącym a materiałem suszonym występują bardzo dobre współczynniki jednoczesnej wymiany ciepła i masy,
- możliwość stosowania kilku źródeł ciepła,
- dobre wymieszanie złoża suszonego, co pozwala dobrze ujednoczyć parametry końcowe ziarna po procesie obróbki suszarniczej oraz kontrolować przebieg procesu i sterować jakością produktu końcowego.

2. STANOWISKO EKSPERYMENTALNE

Stanowisko eksperymentalne składa się z następujących podstawowych elementów:

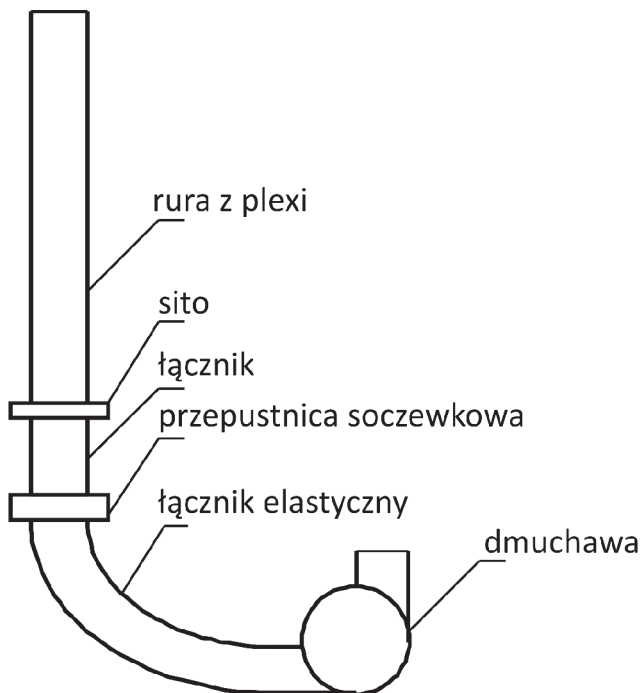
- dmuchawy o ciągłej regulacji wydatku powietrza,



Rysunek 3 Schemat poglądowy suszarni bębnowej [4]

Figure 3 The scheme of drum dryer [4]

- przepustnicy soczewkowej,
- sita będącego jednocześnie płytą nośną dla złoża fluidalnego,
- rury okrągłej o średnicy 200 mm,
- (opcjonalnie z ciśnieniomierza wskazującego spadek ciśnienia całkowitego na sicie i złożu fluidalnym).



Rysunek 4 Schemat stanowiska eksperymentalnego

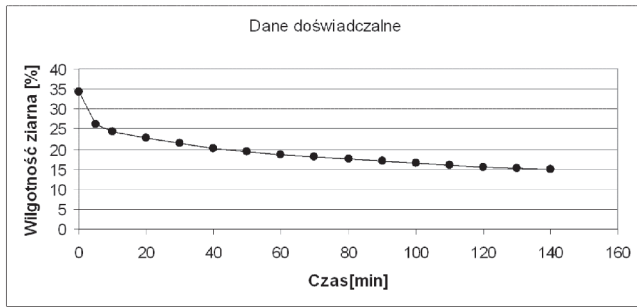
Figure 4 The experimental stand

3. PRZEBIEG EKSPERYMENTU

W pierwszym etapie dokonano pomiaru wilgotności zboża suchego (pszenicy) za pomocą przenośnego elektronicznego Testera Wilgotności do Ziarna jednej z polskich firm (niepewność pomiarowa to $\pm 1\%$). Uzyskano poziom około 13%, co jest wartością wystarczającą, gdyż wartość maksymalna zawartości wilgoci w skupie zboża zgodnie z wymogami Unii Europejskiej wynosi obecnie 14,5% [5]. W ten sposób znaleziono poziom odniesienia – wartość minimalną, którą należy uzyskać w wyniku procesu suszenia. Dokonano nawilgocenia zboża w warunkach obniżonej temperatury, aby zapobiec jego kiełkowaniu. Uzyskano wilgotność ziarna na poziomie około 35%. Następnie prowadzono proces suszenia za pomocą powietrza zewnętrznego o temperaturze 24,5°C i wilgotności względnej 29%. Prędkość powietrza nawiewanego wynosiła 11 m/s.

4. OPACOWANIE WYNIKÓW

W trakcie procesu suszenia systematycznie oznaczano wilgotność ziarna i na podstawie pomiarów otrzymano krzywą pokazaną na Rysunku 5. Do opisu matematycznego półempirycznego procesu suszenia stosuje się wiele korelacji [6, 7]. Najlepsze wyniki otrzymuje się jednakże za pomocą modeli Page'a (1) i Hendersona (2), które przedstawiono poniżej:



Rysunek 5 Wilgotność ziarna w funkcji czasu suszenia
Figure 5 The seed humidity versus the time of drying

$$\frac{X - X_{\min}}{X_p - X_{\min}} = \exp(-kt^n) \quad (1)$$

$$\frac{X - X_{\min}}{X_p - X_{\min}} = a \cdot \exp(-k_1 t) + b \cdot \exp(-k_2 t) \quad (2)$$

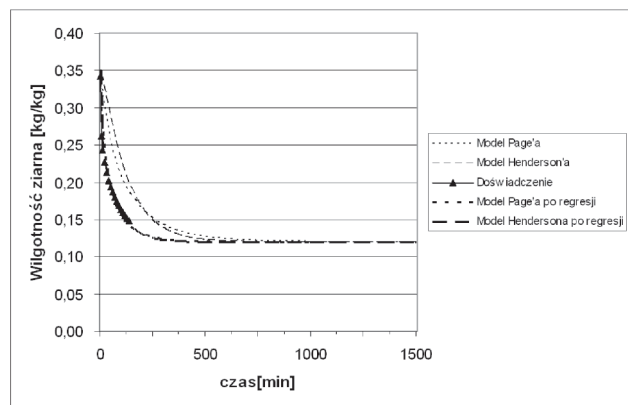
W powyższych wyrażeniach X_{\min} oznacza końcową wartość minimalną wilgotności ziarna, którą uzyskuje się po procesie suszenia, X_p to wilgotność początkowa, a k , n , a , k_1 , b , k_2 to stałe dobierane tak, aby uzyskana krzywa jak najlepiej odzwierciedlała zmierzone wartości wilgotności. Dodatkowo zmienna t wyraża czas suszenia.

Na podstawie danych eksperymentalnych przeprowadzono szacowanie wyżej przedstawionych stałych. Wynoszą one odpowiednio $k = 0,020$, $n = 0,613$, $a = 0,032 \cdot t_s [^{\circ}\text{C}] - 1,009$, $k_1 = -0,034$, $b = -0,032 \cdot t_s [^{\circ}\text{C}] + 1,992$, $k_2 = -0,009$ (zmienna t_s oznacza temperaturę medium suszącego napływającego na złożę) [8]. Dla modelu Page'a określono stałe wymagane na poziomie ufności około 98%, w przypadku modelu Hendersona średni poziom ufności jest na poziomie 92% (im wyższa temperatura suszenia, tym większy błąd przybliżenia). Poziomy ufności w tych modelach określono na podstawie badań statystycznych przedstawionych w literaturze przedmiotu.

Doprowadziło to do otrzymania równań krzywych mających przybliżyć dane eksperymentalne. Niestety odbiegały one wyraźnie od wartości zmierzonych eksperymentalnie. Było to związane z faktem, że modele Page'a i Hendersona analizowano w oparciu o proces suszenia ziarn soi. Mając na uwadze niedokładność prowadzonych przybliżeń stwierdzono potrzebę zastosowania regresji nieliniowej, która pozwala na taką korekcję współczynników krzywych, aby w większym stopniu przybliżyły wartości rzeczywiste spad-

ku wilgotności w funkcji czasu suszenia. Metoda regresji nieliniowej została wykonana na podstawie metody Levenberga-Marquardta. Otrzymane krzywe (modele Page'a i Hendersona przed i po regresji nieliniowej) pokazano na wykresie na Rysunku 6. Na rysunku widać, że linie po regresji dość dobrze odwzorowują dane eksperymentalne. Oszacowany błąd standardowy uzyskany za pomocą regresji nieliniowej dla modelu Page'a wynosi około 0,6%, natomiast w przypadku modelu Hendersona jest to poniżej 0,1%.

W powyżej przedstawionych modelach przyjęto minimalną wilgotność zboża suszonego na poziomie około 13%, co uwidoczniło na Rysunku 6 poniżej.



Rysunek 6 Krzywe przedstawiające spadek zawartości wilgoci w materiale suszonym [8]
Figure 6 The drying curves for dried seeds [8]

Należy pamiętać, że za pomocą regresji otrzymuje się równania krzywych, które potem można stosować do prognozowania spadku wilgotności, w trakcie procesu suszenia w podobnym zakresie wilgotności czy parametrów medium suszącego (temperatura, wilgotność względna). Ważne jest, że zmiana rodzaju zboża, wilgotności początkowej i końcowej ziarna oraz zmiana parametrów powietrza na skutek podgrzania go, powodują zmianę stałych przedstawionych w równaniach (1) i (2). Wskazuje to na trudność w tworzeniu uniwersalnych modeli suszenia.

5. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych pomiarów i analizy obliczeniowej stwierdzono, że stosowanie modeli półeksperymentalnych może stanowić pomoc w modelowaniu procesu suszenia. Nie jest to jednak metoda uniwersalna, gdyż stałe występujące w równaniach modelowych zależą silnie od rodzaju suszonego materiału i parametrów proce-

su suszenia. W celu określenia pewnych modelowych prawidłowości wymagane jest zastosowanie w dalszych pracach powietrza ogrzanego do różnego poziomu temperatury. Prowadzone wtedy przybliżenie modelowe pozwoli zbudować model suszenia danego rodzaju zboża w szerokim zakresie zmian parametrów. Należy tu pamiętać o konieczności uwzględnienia różnych prędkości powietrza fluidyzującego zboże, co dodatkowo

rozszerza ilość ważnych w procesie suszenia parametrów.

Można stwierdzić, że powyższe rozważania pokazują duży poziom trudności przy modelowaniu matematycznym procesu suszenia i bardzo silnie zależą od dokładnie prowadzonych badań eksperymentalnych i związanej z nimi dokładności pomiarów.

LITERATURA

- [1] Lisowski A., Suszenie ziarna po zbiorach. Opracowanie umieszczone na stronie internetowej www.dowagro.com.
- [2] Materiały promocyjne umieszczone na stronie internetowej [www. agroinstal.pl](http://www.agroinstal.pl).
- [3] Materiały promocyjne umieszczone na stronie internetowej www.agroterm.com.pl.
- [4] Materiały promocyjne umieszczone na stronie internetowej www.agromech.info.pl.
- [5] Norma PN-ISO 712:2002 Zboża i przetwory zbożowe – Oznaczanie wilgotności (rutynowa metoda odwoławcza).
- [6] Soponronnarit S., Swasdisevi T., Wetchacama S., Wutiwiwatchai W, Fluidized bed drying of soybeans, *Journal of Stored Products Research*, 37, 2001, 133-151.
- [7] Sinicio R., Muir W.E., Jayas D.S., Cenkowski S, Thin layer drying and wetting of wheat, *Postharvest Biology and Technology*, 5, 1995, 261-275.
- [8] Grabiński P, Suszenie fluidyzacyjne materiałów sypkich. Budowa stanowiska laboratoryjnego i obliczenia teoretyczne. Praca dyplomowa inżynierska, Warszawa 2009.