

WARUNKI SUSZENIA WYBRANYCH MATERIAŁÓW POCHODZENIA
ROLNICZEGO W SUSZARCE WIBROFLUIDYZACYJNEJ

Czesław Strumiłko, Janusz Adamiec, Stefan Grabowski,
Tadeusz Kudra, Zdzisław Pakowski

Instytut Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej

WSTĘP

Znane od dłuższego czasu i dość szeroko rozpowszechnione suszarki fluidyzacyjne do suszenia produktów spożywczych i chemicznych posiadają szereg cech, które częściowo ograniczają korzyści płynące z dobrego kontaktu fazy gazowej i stałej. Kontakt ten nie zachodzi bowiem w całej objętości materiału a częstym zjawiskiem jest kanałowanie i pęcherzowy przepływ gazu przez złożo. Ponadto w narożach lub kątach aparatu, gdzie przepływ czynnika suszącego nie jest w stanie fluidyzować materiału, powstają strefy stagnacji. Odbija się to niekorzystnie na strukturze złoża i w efekcie na końcowej jednorodności i jakości otrzymywanego materiału. Pogarsza to również sprawność suszarki oraz utrudnia eksploatację i sterowanie prowadzonego procesu.

Ze względu na przedstawione niedogodności suszenia fluidalnego niektórych materiałów, zwrócono uwagę na możliwość modyfikacji tej metody suszenia drogą dodatkowej wibracji złoża materiału na sicie aparatu. Przy odpowiednio dobranych parametrach pracy suszarki złożo takie przybiera formę przypominającą płyn. Czastki materiału, które w normalnych warunkach stykają się ze sobą odrywają się od siebie przez co rozluźnia się struktura złoża umożliwiając dobrą penetrację złoża przez gaz.

Tak uzyskane złożo może być "fluidyzowane" nawet przy bardzo małych prędkościach gazu gdyż stan jego rozluźnienia utrzymywany jest głównie przez siły wibracji. W literaturze tematu rozróżnia się trzy następujące stany złoża materiału suszonego umieszczonego na drgającym sicie:

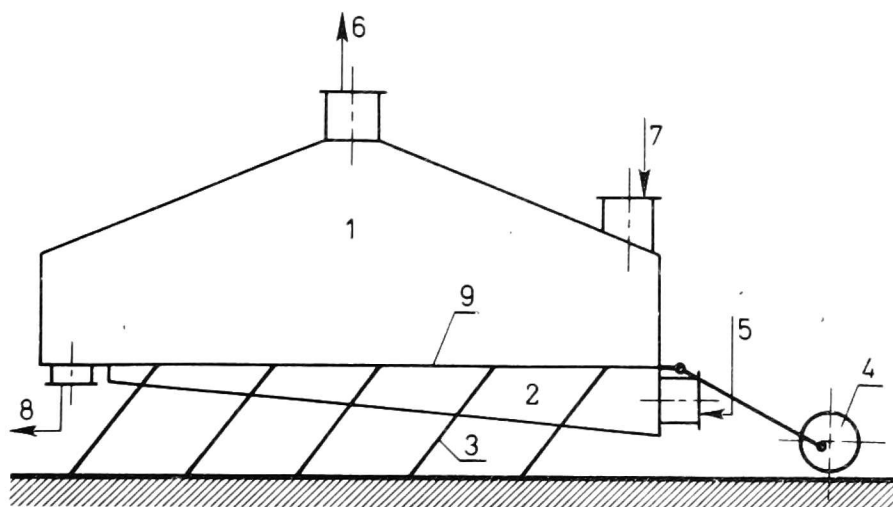
1. Złożo wibrofluidalne, w którym gaz płynie poprzez złożo z prędkością mniejszą od prędkości początku fluidyzacji bez wibracji;

2. Złoże fluidalne wibrowane - złoże wibrowane, w którym prędkość gazu przekracza prędkość początku fluidyzacji;

3. Złoże wibracyjne - złoże, które utrzymywane jest w stanie płynnym poprzez drgania sita i w którym siły unoszenia cząstek przez strumień powietrza są nieistotne w porównaniu z innymi siłami działającymi na cząstki.

W zastosowaniach praktycznych najczęstsze przypadki dotyczą suszenia w złożu wibrofluidalnym. Ze względu na znacznie mniejsze ilości czynnika suszącego potrzebnego przy suszeniu wibrofluidalnym niż fluidalnym znacznemu uproszczeniu ulega również problem odpylania gazów odlotowych z suszarki. Nachylenie kierunku drgań sita suszarki do poziomu pozwala ponadto na uzyskanie przemieszczającego się złoża wibrofluidalnego. Jest to podstawą do realizacji procesów suszenia w sposób ciągły przy czym prędkość przepływu materiału wzdłuż sita można łatwo regulować stosując odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych suszarki.

Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat poziomej suszarki wibrofluidyzacyjnej o działaniu ciągłym.



Rys. 1. Schemat poziomej suszarki wibrofluidyzacyjnej o działaniu ciągłym: 1 - komora suszenia, 2 - komora rozprowadzająca powietrze, 3 - sprężyny płaskie, 4 - wibrator, 5 - dopływ powietrza, 6 - odpływ powietrza, 7 - zasyp materiału, 8 - odprowadzenie materiału, 9 - ruszt perforowany

Materiał suszony doprowadzany przez zasyp (7) przemieszcza się wzdłuż komory suszenia (1) i jest odprowadzany z suszarki wysypem (8). Materiał suszony podtrzymywany jest przez perforowane dno (9) oddzielające komorę suszenia (1) od komory rozprowadzającej powietrze suszące (2). Powietrze suszące dopływa poprzez króciec (5) i po przejściu przez komorę (2), dno sitowe (9), złoże materiału suszonego i komorę (1) odpływa z suszarki króćcem (6). Suszarka jest zawieszona na sprężynach (3) umożliwiającą

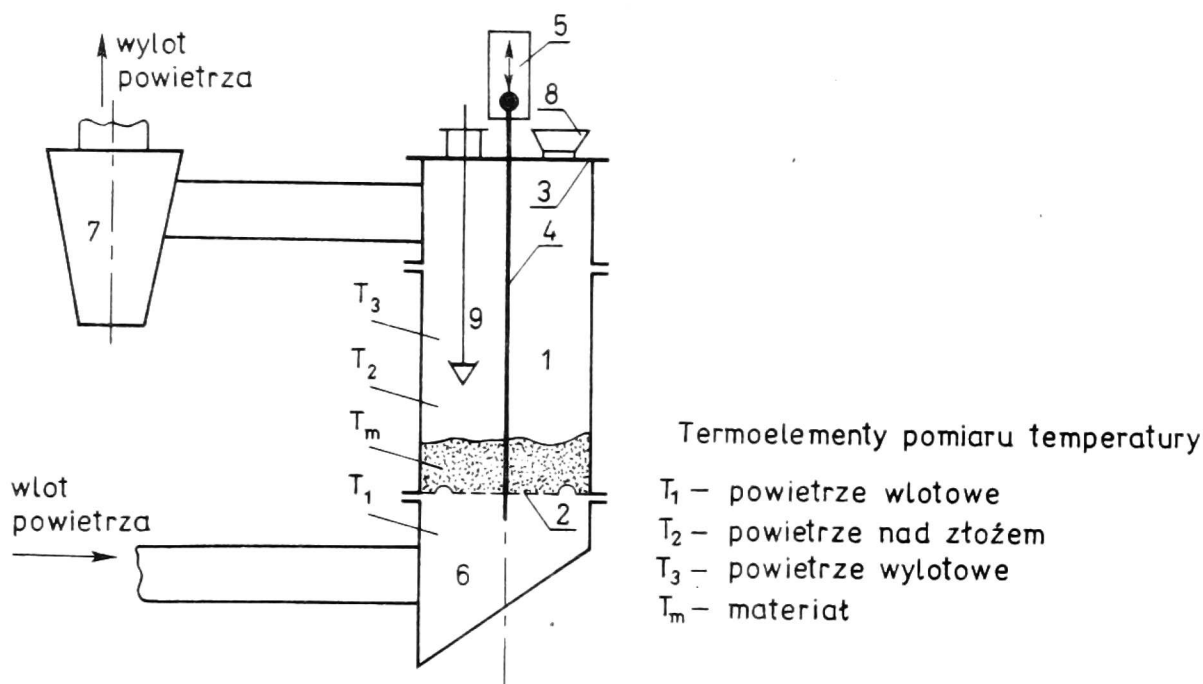
cych drgający ruch aparatu na skutek pracy wibratora mimośrodowego (4). Przedstawiony ogólny schemat suszarki prezentuje jedynie podstawowe części aparatury w celu dokładniejszego wyjaśnienia zasady działania, natomiast poszczególne elementy mogą posiadać odmienne rozwiązania konstrukcyjne. Należy nadmienić, iż w takim aparacie możliwe jest także chłodzenie materiału suszonego, co realizuje się poprzez odprowadzenie do wyodrębnionej, końcowej części komory (2) powietrza zimnego [2]. Ponadto przez zastosowanie jako wysypu (8) układu sit segregacyjnych możliwe jest przeprowadzanie rozdziału wysuszonego produktu na poszczególne frakcje.

LABORATORYJNE STANOWISKO DOŚWIADCZALNE

Jak wskazują opublikowane dane literaturowe obliczanie rzeczywistego przebiegu procesów suszenia, a co za tym idzie - określanie wielkości i parametrów pracy suszarki, nie jest jeszcze obecnie możliwe bez przeprowadzenia pewnej ilości badań eksperymentalnych. W ogólnym przypadku badania eksperymentalne prowadzi się początkowo w celu doboru właściwej metody suszenia a w dalszej kolejności rozpatruje się zagadnienia doboru właściwych parametrów pracy aparatu. Prace laboratoryjne obejmują więc najczęściej pomiary kinetyki suszenia konkretnych materiałów w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do warunków panujących w suszarce przemysłowej.

W przypadku badania kinetyki suszenia materiału w złożu wibrofluidalnym należy rozpatrywać następujące parametry: prędkość przepływu i temperaturę powietrza suszącego i ewentualnie chłodzącego w aparacie, wysokość statyczną złoża, amplitudę i częstotliwość drgań.

Stanowisko doświadczalne wykorzystywane w niniejszej pracy do badania kinetyki suszenia różnych materiałów przedstawiono schematycznie na rys. 2. Sekcja szklana (1) o średnicy 300 mm stanowi komorę suszenia. Od dołu jest ona ograniczona dnem sitowym (2) połączonym elastycznie z kołnierzami bocznymi. Dno sitowe jest połączone trzpieniem (4) z wibratorem (5). Praca wibratora powoduje pionowe drgania sita. W górnej części komory suszenia znajduje się odprowadzenie powietrza z elementem odpylającym (7) oraz pokrywa (3) z włazem (8) służącym do zasypywania materiału mokrego i z elementem do pobierania próbek (9). Stanowisko doświadczal-



Rys. 2. Schemat laboratoryjnej, okresowej suszarki wibrofluidyzacyjnej: 1 – sekcja szklana, 2 – dno sitowe, 3 – pokrywa, 4 – trzpień, 5 – wibrator, 6 – wlot powietrza, 7 – odprowadzenie powietrza (odpylanie), 8 – właz (zasyp materiału), 9 – pobieranie próbek

ne jest ponadto wyposażone w niezbędne oprzyrządowanie jak wentylatory, nagrzewnice, miernik prędkości przepływu gazu i jego temperatury, miernik częstotliwości wibracji itp. Suszarka posiada zamontowane termoelementy do pomiaru temperatury powietrza wlotowego, wylotowego i w komorze powyżej złoża oraz temperatury materiału w złożu.

Badania kinetyki suszenia w laboratoryjnej suszarce wibrofluidyzacyjnej dotyczyły kilkunastu materiałów w tym kilku materiałów pochodzenia rolniczego i spożywczego jak: kasza manna, zarodki pszenne, kostka ziemniaczana i cukier. Poniżej zostaną omówione wyniki badań kinetycznych pierwszych trzech materiałów. Wyniki badań kinetyki suszenia cukru były prezentowane wcześniej [3], a ponadto w przemyśle cukrowniczym znane są od kilku lat przemysłowe suszarki wibrofluidyzacyjne zaprojektowane w naszym Instytucie.

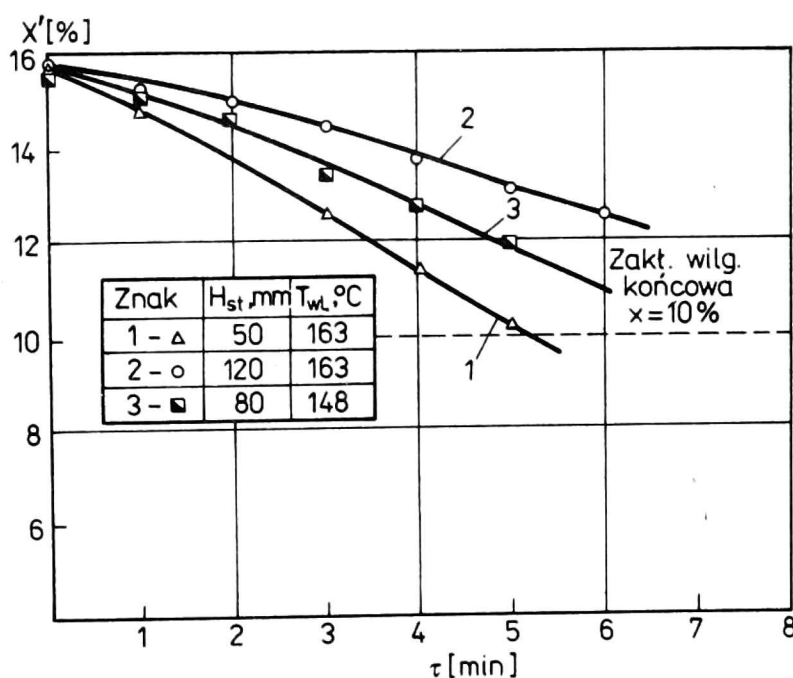
Należy dodatkowo zaznaczyć, iż w aparaturze doświadczalnej zmieniano dno sitowe w zależności od materiału suszonego. I tak podczas badań kaszy manny i zarodków pszennych stosowano dno sitowe o udziale powierzchni swobodnej 10%, które dodatkowo było pokryte tkaniną ograniczającą przesypywanie się materiału przez sito. Średnica otworów tego sita wynosiła 1 mm. Natomiast w przypadku badań kostki ziemniaczanej (w stanie surowym była to regu-

larna kostka sześcienna o długości krawędzie 10 mm) zastosowano sito o średnicy otworów 5 mm i udziale powierzchni swobodnej 6,7%.

INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań kinetyki suszenia kaszy manny

Przedmiotem badań była kasza manna o średniej początkowej zawartości wilgoci ok. 15,8%. W procesie suszenia powinna zachodzić zmiana wilgotności do średniej wilgotności końcowej ok. 10%. W badaniach uwzględniono zmianę dwóch najbardziej interesujących z punktu widzenia technologii parametrów suszenia tj. wysokości złoża materiału (od 60 do 120 mm) oraz zmianę temperatury powietrza suszącego (od ok. 148 °C do ok. 163 °C).



Rys. 3. Krzywe suszenia kaszy manny w laboratoryjnej suszarce wibrofluidyzacyjnej

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe krzywe kinetyczne suszenia kaszy manny. Krzywe 1 i 2 dotyczą złoża materiału o wysokości odpowiednio 80 i 120 mm suszonego w temperaturze powietrza wlotowego ok. 163 °C, zaś krzywe 1 i 3 uzyskano dla suszenia złoża materiału o wysokości 80 mm przy zmiennej wartości temperatury powietrza wlotowego odpowiednio 163 °C i 148 °C. Z przebiegu krzywych suszenia wynika, iż czas suszenia rośnie wraz ze wzrostem grubości warstwy materiału na sicie oraz z obniżeniem

temperatury czynnika suszącego doprowadzonego do suszarki. I tak osiągnięcie końcowej zawartości wilgoci ok. 10% możliwe było w przypadku wysokości złoża równej 80 mm po ok. 5 minutach, zaś w przypadku wysokości złoża równej 120 mm po ok. 10 minutach. Natomiast zmiana temperatury powietrza doprowadzanego do suszarki od 148 °C do 163 °C przy wysokości warstwy materiału 80 mm spowodowała skrócenie czasu suszenia kaszy manny z ok. 7 minut do ok. 5 minut.

Pomiar temperatury materiału w złożu wykazał, iż nie ma wyraźnego wpływu wysokości złoża materiału na jego temperaturę końcową, natomiast w badanym zakresie zmian temperatury czynnika suszącego stwierdzono różnicę w stopniu nagrzania materiału wynoszącą ok. 5 °C. Średnio po upływie ok. 6 minut suszenia temperatura materiału osiągała wartość w zakresie od ok. 52 °C do ok. 60 °C. Schłodzenie materiału powietrzem o temperaturze ok. 28 - 30 °C uzyskiwano po ok. 5 minutach. Materiał osiągał temperaturę ok. 30 - 38 °C.

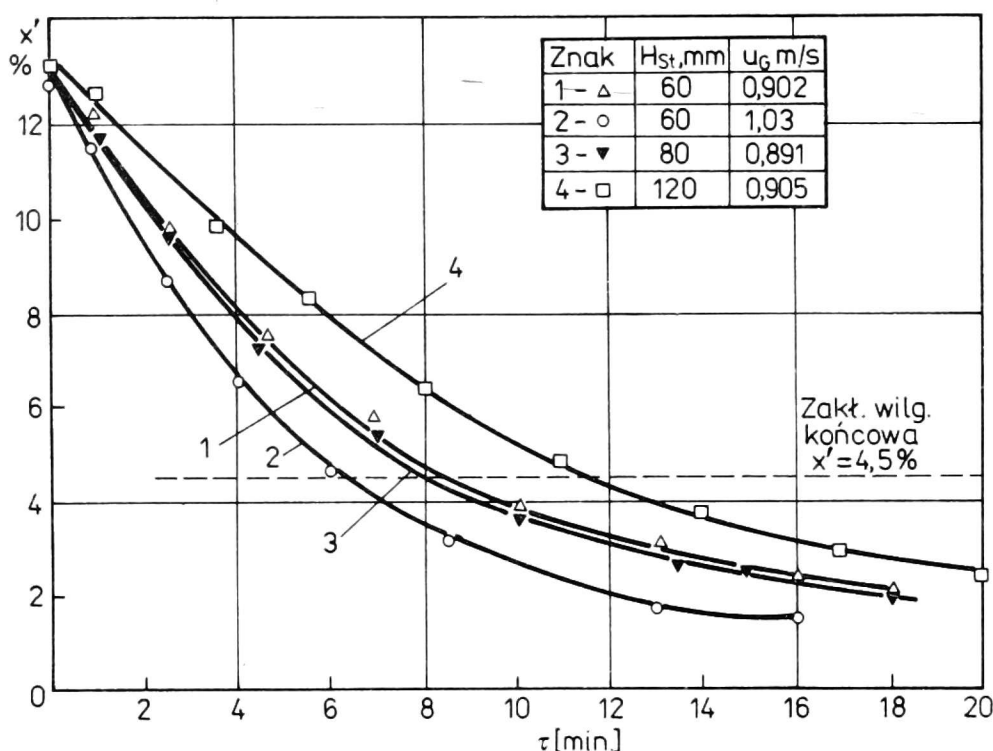
Tak więc podsumowując można stwierdzić, iż przy stosowanych w trakcie pomiarów parametrach wibracji i prędkości przepływu czynnika suszącego możliwe jest wysuszenie do ok. 10% wilgotności złoża kaszy manny o wysokości w granicach ok. 80 do 100 mm przy temperaturze doprowadzanego czynnika suszącego ok. 160 °C. Średni czas suszenia wyniesie wówczas ok. 5-6 minut, zaś temperatura materiału po suszeniu ok. 52 do 60 °C. Kasza manna zachowuje się przy tym jak typowy przedstawiciel ciał o złożonej kapilarno-koloidalno-porowatej strukturze.

Wyniki badań kinetyki suszenia zarodków pszennych

Badaniom poddano zarodki pszenne o średniej początkowej zawartości wilgoci ok. 13,5%. W wyniku procesu suszenia zarodki powinny obniżyć wilgotność do ok. 4,5%. Zmiennymi parametrami była wysokość złoża materiału suszonego od 60 do 120 mm oraz prędkość przepływu czynnika suszącego od 0,615 do 1,03 m/s, przy czym znaczną część badań wykonano przy prędkości powietrza gorącego ok. 0,9 m/s.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe krzywe kinetyczne suszenia zarodków pszennych. Krzywe 1 i 2 dotyczą złoża materiału o jednakowej wysokości równej 60 mm przy różnych prędkościach przepływu powietrza odpowiednio 0,902 m/s i 1,03 m/s. Z prze-

biegu krzywych wynika, iż wzrost prędkości przepływu czynnika suszącego powoduje wzrost intensywności procesu suszenia, czas suszenia materiału maleje (w prezentowanym przedziale o ok. 25%).



Rys. 4. Krzywe suszenia zarodków pszennych w laboratoryjnej suszarce wibrofluidyzacyjnej

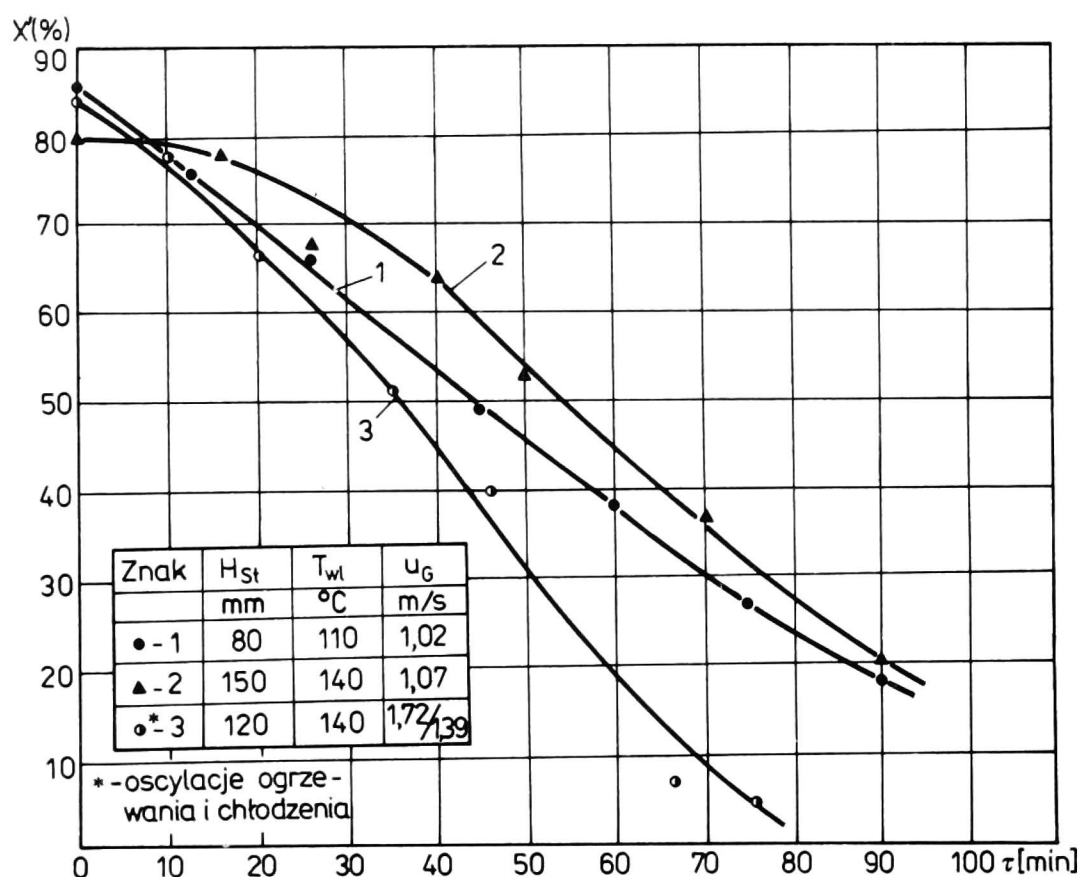
Krzywe 1, 3 i 4 uzyskano w warunkach zbliżonych prędkości przepływu powietrza (ok. 0,9 m/s) natomiast dla różnych wysokości statycznych materiału odpowiednio 60, 80 i 120 mm. Krzywe 1 i 3 leżą blisko siebie natomiast krzywa 4 wyraźnie powyżej krzywych 1 i 3. Z wykresu wynika zatem, iż zmiana wysokości złoża zarodków pszennych w zakresie 60-80 mm nie ma istotnego wpływu na kinetykę suszenia, natomiast wzrost wysokości złoża do wartości 120 mm powoduje wzrost czasu suszenia i obniżenie szybkości suszenia. Wszystkie pomiary kinetyki suszenia zarodków pszennych wykonywano przy temperaturze powietrza dopływającego ok. 111-113 °C określonej wstępnie jako optymalna temperatura dla tego procesu.

Pomiar temperatury złoża zarodków pszennych wykazał, iż po okresie suszenia ok. 7 do 11 minut tzn. po czasie, gdy wilgotność zarodków spadła do zakładanej końcowej wartości ok. 4,5%, temperatura złoża materiału wynosiła od ok. 70 °C do ok. 80 °C. Schłodzenie tego materiału do temperatury ok. 35 °C uzyskiwano po upływie ok. 8 minut przedmuchiwania powietrzem o średniej temperaturze ok. 30 °C. Zmiana parametrów procesu powodowała wzrost temperatury złoża ze wzrostem prędkości powietrza suszącego oraz obniżenie temperatury złoża ze wzrostem jego wysokości statycznej.

Podsumowując uzyskane wyniki eksperymentalne można stwierdzić, iż w warunkach stosowanych parametrów vibracji, temperatury i prędkości przepływu powietrza możliwe jest uzyskanie zarodków pszennych o średniej pożądanej zawartości wilgoci ok. 4,5% po okresie suszenia ok. 8 minut. Materiał osiągnie wówczas temperaturę ok. 75 °C. Wysokość złoża materiału powinna wynosić ok. 80 mm.

WYNIKI BADAŃ KINETYKI SUSZENIA KOSTKI ZIEMNIACZANEJ

Badano kinetykę suszenia kostki ziemniaczanej o wymiarach 10 x 10 x 10 mm. Jest to materiał typu koloidalnego zawierający wilgoć związaną osmotycznie. Początkowa średnia zawartość wilgoci wynosi ok. 80% zaś wymagana końcowa zawartość wilgoci ok. 10%. Badania eksperymentalne zmierzały do stwierdzenia możliwości suszenia kostki ziemniaczanej w warunkach złoża wibrofluidalnego oraz do określenia czynników wpływających na skrócenie czasu suszenia.



Rys. 5. Krzywe suszenia kostki ziemniaczanej w laboratoryjnej suszarce wibrofluidyzacyjnej

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe krzywe kinetyczne suszenia kostki ziemniaczanej. Czas osiągnięcia założonej wilgotności materiału (ok. 10%) przekracza 70 minut, a więc jest to czas

przebywania materiału suszonego trudny do osiągnięcia w praktyce. Należałoby w tym przypadku zastosować dodatkowe, specjalne rozwiązania konstrukcyjne w suszarce. Analiza przebiegu krzywych suszenia na rysunku 5 wykazuje wpływ na kinetykę suszenia wysokości złoża, temperatury powietrza suszącego oraz jego prędkości. Krzywa 3 przedstawia zmianę wilgotności materiału w warunkach zastosowania przemiennego dopływu powietrza suszącego tj. powietrza gorącego i następnie zimnego. Ponadto po wstępnym podsuszeniu materiału zmniejszono prędkość przepływu powietrza z 1,72 m/s do 1,39 m/s.

Wzrost wysokości statycznej złoża powoduje zwiększenie czasu suszenia (krzywa 2 - $H_{st} = 150$ mm znajduje się powyżej krzywej 1 - $H_{st} = 80$ mm). Istotny wpływ na skrócenie czasu suszenia posiada prędkość czynnika suszącego oraz sposób prowadzenia procesu (wg krzywej 3 czas suszenia wyniósł 70 minut, zaś wg krzywej 2 czas suszenia wyniósł ok. 115 minut). Wzrost temperatury czynnika suszącego wpływa na zmniejszenie czasu suszenia - krzywa 2 - $T_{wl} = 140$ °C leży w pobliżu krzywej 1 - $T_{wl} = 110$ °C mimo niemal dwukrotnej różnicy wysokości złoża (150 mm i 80 mm).

W przypadku kostki ziemniaczanej należy unikać zbyt wysokich temperatur przez dłuższy czas procesu ze względu na spiekanie i przypalanie materiału. Dlatego bardzo korzystnymi okazały się warunki zastosowania oscylacyjnego ogrzewania i chłodzenia materiału.

Podsumowując można stwierdzić wyższość i opłacalność suszenia kostki ziemniaczanej w złożu wibrofluidalnym w odniesieniu do innych sposobów suszenia (np. fluidalnego); należy jednak pamiętać o konieczności ścisłego określenia parametrów procesu oraz właściwych rozwiązań konstrukcyjnych suszarki.

WNIOSKI

W wyniku analizy uzyskanych danych doświadczalnych kinetyki suszenia kaszy manny, zarodków pszennych i kostki ziemniaczanej wyciągnięto następujące wnioski:

1. Wymienione powyżej materiały mogą być suszone w warunkach złoża wibrofluidalnego dając produkty odpowiadające wymaganym normom. Ze względu na istotne zalety suszenia wibrofluidalnego w stosunku do innych metod suszenia celowe jest praktyczne wykorzystanie tej metody w technologii produkcji badanych materiałów.

2. Z uwagi na niewielkie czasy suszenia możliwe jest suszenie tych materiałów w aparatach o działaniu ciągłym.

3. Możliwe jest ponadto szybkie schładzanie materiału po suszeniu oraz jego segregacja w tym samym urządzeniu, w którym zachodzi proces suszenia.

Przedstawione wyniki badań kinetyki suszenia stanowią pewien fragment kompleksowych i wielotematycznych problemów suszenia opracowywanych w Instytucie Inżynierii Chemicznej Politechniki Łódzkiej. W przypadku suszenia wibrofluidalnego aktualnie prowadzone są prace nad modelem matematycznym omawianego procesu oraz zagadnienia doboru i konstrukcji aparatów oraz optymalizacji przebiegu procesu suszenia.

OZNACZENIA

- H_{st} - wysokość statyczna złoża, [m]
 T_{wl} - temperatura powietrza wlotowego, [$^{\circ}C$]
 u_G - liniowa prędkość gazu w aparacie, [m/s]
 X - wilgotność materiału, [%]
 τ - czas, [min].

LITERATURA

1. Pakowski Z., Strumiłło Cz., Mat. III Symp. Susz., Łódź 1978.
2. Patent PRL Nr P-103950.
3. Strumiłło Cz., Grochowski J., Amanowicz J., Pakowski Z., Mat. II Symp. Susz., Warszawa 1975.

Ч. Струмило, Я. Адамец, С. Грабовски, Т. Кудра, Э. Паковски

УСЛОВИЯ СУШЕНИЯ ВЫБРАННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОДУКТОВ В СУШИЛКЕ ВИБРОКИПЯЩЕГО ТИПА

Р е з ю м е

Представлено результаты исследования кинетики сушки картофельных кубиков, зародышей пшеничных и ланной каши в периодической лабораторной сушилке и виброкипящего типа. На основе кривых сушки определено параметры при которых можно получить хорошее качество продуктов. При сушке картофеля целесообразно применять осциляционный режим сушки (подогревание и охлаждение).

Cz. Strumiłło, J. Adamiec, S. Grabowski, T. Kudra, Z. Pakowski

DRYING CONDITIONS OF SELECTED AGRICULTURAL
MATERIALS IN VIBROFLUIDIZED BED DRYER

S u m m a r y

The results of drying potatoes cubes, wheat germs and manna groats in laboratory scale batch vibrofluidized bed dryer were presented. The possibility of drying in vibrofluidized bed has been stated. Obtained dry materials met the requirements of standards for such products. For potatoes cubes the oscillating conditions of cooling and heating are suitable.