

Włodzimierz CIESIELCZYK, Anita KAMIŃSKA-PĘKALA, Aleksandra SMOLSKA

e-mail: wlodek@chemia.pk.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Porównanie suszenia pszenicy w aparatach fluidyzacyjnym i silosowym

Wstęp

Suszenia odgrywa szczególnie ważną rolę w przemyśle spożywczym, szczególnie w odniesieniu do technologii dotyczących przygotowania produktów rolnych do przechowywania. Ocenia się, że w przetwórstwie spożywczym proces suszenia zużywa 20-25% całkowitej energii całego cyklu technologicznego [Mujumdar, 2014]. W przetwórstwie rolniczym najliczniejszą grupą materiałów wymagającą procesu suszenia są ziarna zbóż. Pszenica jest najpowszechniej uprawianym zbożem na świecie. W 2013 roku Polska zajęła 5 miejsce w produkcji pszenicy spośród krajów Unii Europejskiej. W warunkach klimatycznych Polski około 40-60% ziarna zbieranego kombajnami wymaga obróbki poźniwej, a zwłaszcza suszenia. Ziarno po zbiorach jest wilgotne – zawiera średnio od 18 do 22%, a nawet 25% wody [Lisowski, 2017]. Ziarno stanowi materiał biologiczny, bardzo wrażliwy zarówno na działanie termiczne (skurcz, pęknięcie, spadek zdolności kiełkowania, ubytek lizyny w białku), jak i długie przechowywanie przy dużej wilgotności (rozwój pleśni i mikroorganizmów). W zależności od dalszego zastosowania czy przeznaczenia ziarna stosuje się różne parametry i metody suszenia [Strumillo, 1975]. Podczas procesu istotne jest, aby zostały zachowane i polepszone te właściwości, które są niezbędne przy dalszym wykorzystaniu produktów. W przypadku ziarna pszenicy przeznaczonego do celów spożywczych parametry suszenia powinny zapewnić między innymi zachowanie glutenu, tak pod względem jakości jak i ilości tego składnika. Obniżenie wilgotności ziarna do tzw. granicznej zawartości wilgoci (dla pszenicy 14-16%) minimalizuje, a nawet hamuje zarówno procesy życiowe ziarna, jak również rozwój mikroorganizmów i szkodników. W procesie suszenia ziarno nie może być nadmiernie nagrzewane, zatem nie powinno się przekraczać temperatury 50-60°C, powyżej której zachodzą w ziarnie nieodwracalne, niekorzystne jakościowo procesy [Kamińska-Pękala i Ciesielczyk, 2017].

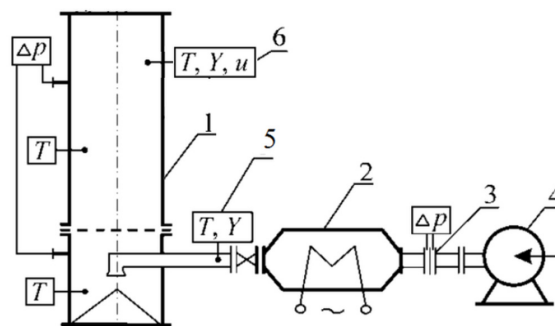
W pracy zaprezentowano wyniki eksperymentów dotyczących suszenia ziarna pszenicy w różnych warunkach hydrodynamicznych: w złożu stacjonarnym (suszarka silosowa) oraz w układzie fluidalnym (suszarka fluidyzacyjna).

Badania doświadczalne

Stanowisko badawcze

Badania zostały przeprowadzone w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Krakowskiej, z wykorzystaniem stanowiska badawczego, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Powietrze tłoczone było wentylatorem – 4 poprzez przepływomierz – 3 do nagrzewnicy elektrycznej – 2, a następnie do kolumny suszarki – 1. Średnica wewnętrzna kolumny wynosiła $D = 74$ mm. Suszarka zaopatrzona była w dystrybutor gazu o oryginalnej konstrukcji, generujący intensywne warunki hydrodynamiczne w układzie. Istotą rozwiązania polegała na zainstalowaniu specjalnego rusztu ze stożkiem na styku komory suszenia i komory dystrybutora.

Wyposażenie stanowiska w odpowiednią aparaturę kontrolno-pomiarową umożliwiało uzyskanie danych do sporządzenia oczekiwanych charakterystyk procesowych. Aparatura kontrolno-pomiarowa wysokiej jakości firmy TESTO GmbH & Co. (Hamburg) zapewniała wysoką dokładność pomiarów badanych wielkości procesowych. Przyrząd Testo 452 umożliwiał jednoczesny (w miejscu zainstalowania) pomiar temperatury, prędkości przepływu oraz wilgotności względnej (T, Y, u) powietrza. Dodatkowa sonda umożliwiała także pomiar spadków ciśnienia (Δp). Temperatury (T) mierzono wykorzystując przyrząd Testo 112. Kontrolowano również



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – kolumna suszarki, 2 – nagrzewnica, 3 – przepływomierz (przyrząd Testo 452 z odpowiednią przystawką), 4 – wentylator, 5, 6 – przyrządy: Testo 452 i Testo 112

temperaturę i wilgotność względną otoczenia stosując przyrząd Testo 1360. Zawór umożliwiał regulację i pomiar natężenia przepływu doprowadzanego gazu. Dodatkowo dla weryfikacji wyników zamontowano anemometr Testo 416. Zawartość wilgoci w materiale wyznaczano na podstawie wyników pomiarów parametrów procesowych charakteryzujących czynnik suszący i otoczenie. Wyniki sprawdzano stosując klasyczną metodę polegającą na pobieraniu próbek materiału co określony czas t s. Istniała możliwość regulacji wartości temperatury powietrza wlotowego.

Eksperymenty prowadzone były przy prędkościach powietrza odniesionych do swobodnego przekroju kolumny suszarki 0,3-3,0 m/s, przy wysokościach początkowych złoża H_0 równych D , $1,5 D$ i $2 D$ oraz w temperaturach powietrza wlotowego 45-60°C. W przypadku suszenia fluidalnego testy prowadzono przy różnych wartościach liczb fluidyzacji określanych jako stosunek aktualnej prędkości gazu w kolumnie do prędkości minimum fluidyzacji [Ciesielczyk, 2016, Kamińska-Pękala i Ciesielczyk, 2017].

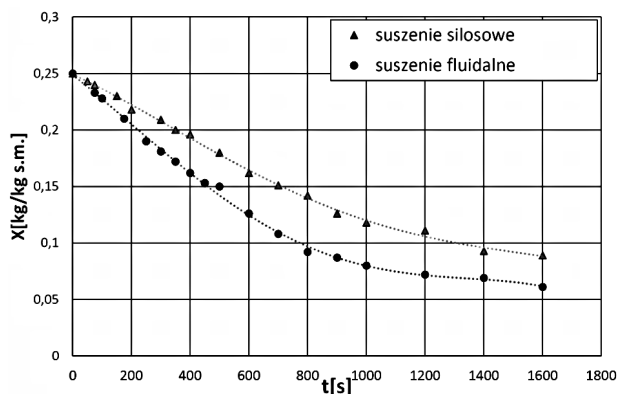
Materiał badawczy

Suszono ziarna pszenicy ozimej Artist uzyskane z prywatnego gospodarstwa rolniczego ze zbiorów w roku 2016 (średnica zastępcza $d_z = 3,67 \cdot 10^{-3}$ m, $\rho_s =$ gęstość 1360 kg/m³, początkowa zawartość wilgoci $X = 25\%$). Prędkość minimum fluidyzacji wyznaczono eksperymentalnie [Smolska, 2018]. Jako czynnik fluidyzujący stosowano powietrze z otoczenia. Ziarna pszenicy zaliczane są do grupy D wg klasyfikacji Geldarta [Kamińska-Pękala i Ciesielczyk, 2017].

Wyniki i dyskusja

Badania testowe realizowano z pszenicą o początkowej zawartości wilgoci $X = 0,25$ kg/kg s. m. Przed przystąpieniem do badań przygotowano materiał badawczy, nawilżając go do założonej początkowej zawartości wilgoci. Do określenia stopnia nawilżenia stosowano termowagę (RADWAG WPS 30S, Polska). Wyniki sprawdzano także w klasycznej suszarce komorowej susząc próbki do stałej masy. Suszenie fluidalne realizowano przy różnych wartościach liczb fluidyzacji, zaś suszenie silosowe przy prędkościach powietrza zapewniających uzyskanie złoża stacjonarnego. Na rys. 2 zaprezentowano przykładowe krzywe suszenia fluidalnego i silosowego uzyskane dla temperatury powietrza wlotowego 50°C, przy zastosowaniu początkowej warstwy złoża równej średnicy kolumny suszarki. W przypadku suszenia silosowego prędkość powietrza wynosiła 0,4 m/s, a suszenie fluidalne realizowano przy wartości liczb flu-

idyzacji równej ok. 2. Zastosowane w tym przypadku warunki realizacji suszenia w układzie fluidalnym są zgodne z rekomendacją wynikającą z kompleksowej analizy zagadnienia [Ciesielczyk, 2016]. Zmiany zawartości wilgoci w materiale badawczym wyznaczano w oparciu o bezpośredni pomiar zmian parametrów procesowych czynnika suszącego. Zastosowana metoda pozwala na uniknięcie zmian masy materiału suszonego w kolumnie. W stosunku do klasycznej metody suszenia pobieranych z kolumny próbek do stałej masy błąd wynosi poniżej 7% [Smolska, 2018].



Rys. 2. Przykładowe krzywe suszenia fluidalnego i silosowego pszenicy: temperatura początkowa czynnika suszącego 50 °C, prędkość gazu przy suszeniu silosowym wynosiła 0,4 m/s, a liczba fluidyzacji przy suszeniu fluidalnym – ok. 2

Zgodnie z oczekiwaniami suszenie fluidalne okazało się znacznie bardziej efektywne niż suszenie silosowe. Intensywne warunki hydrodynamiczne w układzie fluidalnym [Mujumdar, 2014, Strumiłło, 1975] sprzyjają procesowi suszenia. Z analizy wyników dotyczących pomiaru temperatury wynika, że w złożu fluidalnym temperatura praktycznie jest wyrównana. W suszarce silosowej (złożo stacjonarne) występują różnice temperatur w zależności od wysokości warstwy materiału suszonego.

Należy podkreślić, że wybranie do analizy suszenia silosowego nie było przypadkowe. Zboża składowane są w silosach gdzie podlegają zmianom jakościowym. Do takich cech można zaliczyć: wskaźnik sedimentacji, strukturę glutenu, właściwości kiełkowania, oraz aktywność wodną. Te właściwości podczas składowania mogą ulec pogorszeniu, ponieważ parametrami jakie mają wpływ na ich wielkość jest wilgotność i temperatura ziarna. Intensywność procesów biologicznych, jakie zachodzą w ziarnie zależy głównie od wilgotności i temperatury [Kamińska-Pękala i Ciesielczyk 2017]. Do najważniejszych procesów należy oddychanie ziarna, które jest połączone ze spalaniem substancji organicznych. Dodatkowo, wraz z wzrostem temperatury następuje rozwijanie się drobnoustrojów, bakterii i pleśni, co prowadzi do samozagrzewania się ziarna. Pleśnie powodują powstawanie charakterystycznego stęchłego zapachu. Tlen z powietrza zużywany jest na oddychanie ziarna i rozwój pleśni. Prowadzić to może do rozpoczęcia procesu fermentacji alkoholowej. Wpływ wilgotności i temperatury można zmniejszyć przez przewietrzanie i podsuszanie ziarna w silosach. To zagadnienie jest przedmiotem aktualnych prac realizowanych w Katedrze Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Krakowskiej.

Dotychczas większość badań dotyczących fluidyzacji gaz-ciało stałe dotyczyła cząstek z grup A i B klasyfikacji Geldarta. Ostatnio rozszerza się badania na materiały z grupy D, do której zaliczane są ziarna pszenicy [Ciesielczyk, 2016].

W celu określenia jakości zboża z ziarna otrzymanego po suszeniu różnymi metodami przygotowano mąkę, dla której, zgodnie z opisem zawartym w normie [PN-77/A-74041], prowadzono stosowne oznaczenia otrzymując gluten. Im wyższa jest zawartość glutenu i lepsza jego jakość (niższa rozplywalność), tym ziarno stanowi lepszy surowiec na mąkę do wypieku piekarniczego. Rozplywalność jest cechą fizyczną glutenu, a określenie tej cechy polegało na ozna-

czeniu zwiększenia się średnicy kulki glutenu o masie 5 g po termostatowaniu w temperaturze 30 °C, w czasie 1 h. Ważne jest, aby jednocześnie oceniać zawartość oraz jakość glutenu, gdyż dla większości odmian uprawianej w Polsce pszenicy obserwuje się najczęściej zjawisko pogarszania jakości glutenu wraz ze wzrostem jego zawartości w ziarnie.

Tab. 1. Zestawienie wyników dotyczących ilości i rozplywalności glutenu

| Suszenie fluidalne | | Suszenie silosowe | |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| Zawartość glutenu [%] | Rozplywalność [mm] | Zawartość glutenu [%] | Rozplywalność [mm] |
| 21,5 | 3,0 | 19,7 | 4,0 |

Jakość i ilość glutenu w mąkach uzyskanych z pszenicy suszonej fluidalnie i silosowo (Tab. 1) jest w zasadzie porównywalna. Uzyskane wyniki nie są zadowalające, ponieważ gluten powinien stanowić co najmniej 26% składu uzyskanej mąki [Kamińska-Pękala i Ciesielczyk, 2017], aby pszenica nadawała się do pełnego wykorzystania w klasycznym przemyśle piekarniczym. Wyniki badań rozplywalności glutenu świadczą o możliwości przetworzenia uzyskanego ziarna na mąkę, ponieważ rozplywalność nie przekracza 9 mm. Powodem takich wyników jest zła jakość pszenicy użytej w badaniach.

Suszenie wymaga dużych nakładów energetycznych, co przy względnie niskiej sprawności cieplnej suszarek stosowanych w praktyce przemysłowej [Mujumdar, 2014], wymusza wręcz innowacyjne działania w kierunkach doskonalenia rozwiązań konstrukcji suszarek zapewniających wzrost efektywności energetycznej i sprawności aparatury. W oparciu o wyniki eksperymentów określono zapotrzebowanie ciepła niezbędnego do usunięcia 1 kg wilgoci przy stosowanych metodach suszenia. Obliczono stosowne wartości dotyczące zmiany zawartości wilgoci od zawartości początkowej 25% do wartości 15%. W przypadku suszenia fluidalnego otrzymano wynik 206,5 kJ/kg wilgoci, a dla suszenia silosowego 481,7 kJ/kg wilgoci.

Wnioski

Analiza eksperymentalna suszenia ziarna pszenicy w suszarkach fluidyzacyjnej i silosowej wskazuje, że korzystniejsze jest realizowanie procesu w układzie fluidalnym. Dla zapewnienia najkorzystniejszych warunków suszenia rekomenduje się zastosowanie temperatury początkowej czynnika fluidyzującego-suszącego ok. 50 °C i wartości liczby fluidyzacji ok. 2.

Zastosowana w badaniach metoda oznaczenia zawartości wilgoci w złożu oparta na bezpośrednim pomiarze zmian w czasie parametrów charakteryzujących czynnika suszący jest wygodniejsza od klasycznego sposobu polegającego na suszeniu pobranych okresowo próbek materiału w suszarce komorowej. Jednocześnie unika się zmiany masy materiału suszonego w aparacie.

Nie stwierdzono zasadniczego wpływu analizowanych metod suszenia ziarna pszenicy na ilość i jakość glutenu.

LITERATURA

- Ciesielczyk W., (2016). Zastosowanie modelu złoża pęcherzykowego do projektowania procesowego suszenia fluidalnego. *Przem. Chem.*, 95(10), 1980-1984. DOI: 10.15199/62.2016.10.26
- Kamińska-Pękala A., Ciesielczyk W., (2017). Efektywne suszenie fluidalne materiałów z grupy D wg Geldarta. *Przem. Chem.*, 96(4), 884-890. DOI: 10.15199/62.2017.4.31
- Lisowski A., (2016). *Suszenie ziarna po zbiorach* (11.2017): <http://docplayer.pl?2033509-Suszenie-ziarna-po-zbiorach.html>
- Mujumdar A.S., (2014). *Handbook of industrial drying*, CRC Press, N. York PN-77/A-74041 (1977), *Ziarno zbóż i przetwory zbożowe. Oznaczenie ilości i jakości glutenu*
- Smolska A., (2018). *Porównanie kinetyki suszenia silosowego i fluidalnego ziarna pszenicy*. Praca inżynierska. Pol. Krakowska, Kraków
- Strumiłło Cz., (1975). *Podstawy teorii i techniki suszenia*. WNT, Warszawa