

Michał Krempski-Smejda, Jan Stawczyk

e-mail: krempski@o2.pl

Katedra Procesów Ciepłych i Dyfuzyjnych, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Instalacja procesu suszenia niskotemperaturowego w złożu fluidalnym

Wstęp

Suszenie jest niezbędnym procesem w wielu gałęziach przemysłu m.in. spożywczego, farmaceutycznego i chemicznego. Wzrastające możliwości techniczne, konieczność zmniejszania zużycia energii, uwarunkowania dotyczące ochrony środowiska oraz coraz większe wymagania jakościowe powodują, że istnieje potrzeba prowadzenia badań nad możliwością zastosowania nowych sposobów usuwania wody. Suszenie liofilizacyjne uważane jest za najlepszą metodę suszenia żywności z punktu widzenia jakości produktu. Natomiast głębokie zamrażanie i stosowanie niskich ciśnień powoduje wysoki koszt procesu w wyniku czego istnieje duża grupa produktów, dla których stosowanie typowego suszenia sublimacyjnego nie jest uzasadnione ekonomicznie [1].

W przypadku suszenia konwekcyjnego w wyższych temperaturach, mamy do czynienia z procesem stosunkowo szybkim o niskich kosztach eksploatacyjnych. Gdy najistotniejszym parametrem produktu jest jego jakość, metoda ta nie znajduje zastosowania ponieważ [2] wzrost temperatury powoduje zwiększenie prędkości suszenia oraz wzrost naprężeń w materiale suszonym. Naprężenia te przyczyniają się do znacznej degradacji materiału pod względem kształtu i koloru. Często substancja taka charakteryzuje się niską zawartością witamin i innych składników odżywczych.

Suszenie niskotemperaturowe pod ciśnieniem atmosferycznym łączy zalety obu metod tj. wysoką jakość wysuszonego materiału (pozwalającą zachować składniki odżywcze i inne funkcjonalne elementy termolabilnych produktów biologicznych, farmaceutycznych i produktów spożywczych) i niskie koszty procesu z wykorzystaniem pomp ciepła. Dodatkowo koszt budowy i utrzymania instalacji jest dużo niższy w porównaniu z liofilizacją.

Czynnikiem ograniczającym szeroki zakres stosowania dla ww. metody suszenia jest np. długi czas prowadzenia procesu. Czas suszenia dla sześcianów foremnych z jabłka o boku 1 cm wynosił w zależności od temperatury procesu ($-4 \div -16^{\circ}\text{C}$) od 180 do 450 godzin [3].

Jedną z metod intensyfikacji procesu jest zastosowanie fluidyzacji, która poprzez zwiększenie powierzchni kontaktu międzyfazowego daje doskonale warunki wnikania ciepła i masy, umożliwiające skrócenie czasu suszenia. Dokładne, szybkie wymieszanie materiału w złożu, umożliwia uzyskanie jednakowych warunków obróbki cieplnej wszystkich cząstek i w rezultacie otrzymanie równomiernie wysuszonego produktu.

Jednak oprócz wielu zalet zastosowanie fluidyzacji wprowadza pewne ograniczenia dotyczące stosowanych materiałów [4]:

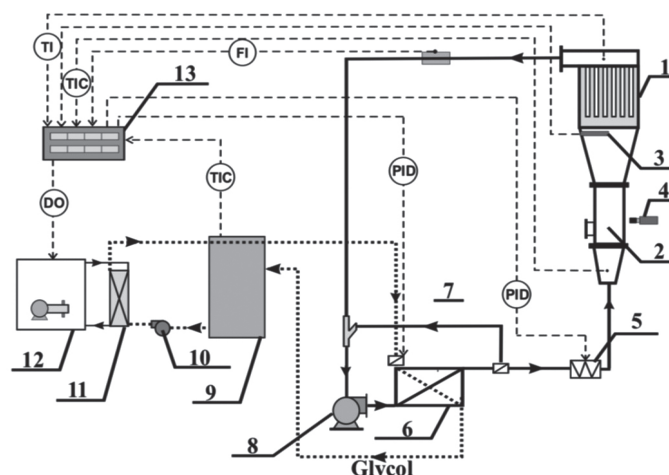
- średnica cząstek powinna mieścić się w przedziale 0,01–20 mm
- w przypadku materiałów polidispersyjnych zakres średnic powinien być dostatecznie wąski (stopień polidispersyjności 8–10),
- kształt cząstek powinien być izometryczny, ponieważ igły i płatki źle fluidyzują,
- materiał wprowadzany do suszarki nie powinien zawierać trudnych do rozbicia brył,
- materiał suszony nie powinien sklejać się w temperaturze suszenia [4].

Materiał z dużą ilością wilgoci niezwiązanej można wstępnie zamrozić na tacach, a dopiero po uzyskaniu odpowiedniej sztywności materiału przenieść do suszarki i wprowadzić go w stan fluidyzacji. Działanie takie pozwala na uniknięcie powstawania aglomeratów w początkowym stadium procesu, które są trudne do rozbicia i mogą nie podlegać fluidyzacji, a w konsekwencji wydłużają czas suszenia i pogarszają jakość materiału końcowego (nierównomierność wysuszenia).

Instalacja doświadczalna

Na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej zbudowana została instalacja badawcza do okresowego suszenia materiałów biologicznych w stanie zamrożenia w stałym złożu. W celu umożliwienia prowadzenia procesu w złożu fluidalnym przebudowana została komora suszarnicza. Instalacja ta pracuje w układzie zamkniętym, co pozwala na zwiększenie zakresu stosowanych materiałów doświadczalnych poprzez eliminację wpływu zapachu i pylenia na otoczenie.

Instalacja została wyposażona w oprzyrządowanie pomiarowe i oprogramowanie kontrolne. Główną zaletą tej instalacji jest możliwość dokładnego określenia zmiany masy w trakcie prowadzenia procesu bez konieczności wyjmowania materiału suszonego. Dodatkowo istnieje możliwość rejestracji i podglądu prowadzonego procesu. Oprogramowanie kontrolne pozwala na zmienność parametrów w czasie (temperatura przepływającego gazu). Schemat instalacji przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat instalacji suszarniczej: 1 – komora suszarnicza, 2 – właściwa komora (opisana na rys. 2), 3 – waga tensometryczna, 4 – kamera IP, 5 – grzałki, 6 – wymrażacz, 7 – zawór trójdrożny, 8 – wentylator, 9 – zbiornik z glikolem, 10 – pompa tłocząca, 11 – wymiennik ciepła, 12 – kompresor, 13 – moduły sterujące

Głównym elementem instalacji jest komora suszarnicza o wysokości 1700 mm zbudowana w kształcie 2 walców o różnych średnicach. Większa komora ma średnicę 400 mm, a komora właściwa – 250 mm i znajduje się w niej koszyk z materiałem suszonym, a także wziernik, mechanizm podwieszający koszyk na wadze i sama waga tensometryczna. Komory o różnych średnicach połączone są stożkowym reduktorem, wlot do suszarki również zbudowany jest za pomocą reduktora od średnicy 100 mm do średnicy komory suszarniczej.

Powietrze po przejściu przez koszyk z materiałem suszonym zostaje skierowane do wymrażacza, gdzie jest schładzane, a wilgoć jest usuwana poprzez wymrożenie na powierzchni chłodnicy. Została ona zaprojektowana w sposób umożliwiający długie okresy pracy bez przerw na rozmrażanie. Wymiennik ciepła (chłodnica) pracuje w układzie glikol/powietrze. Temperatura w wymrażaczu regulowana jest poprzez temperaturę glikolu. Osuszony i oziębiony gaz kierowany jest przez 3 grzałki elektryczne, pierwsza o mocy 100 W i kolejne dwa razy mocniejsze od poprzedniej, które pozwalają ogrzać i zmniejszyć wilgotność gazu. Następnie powietrze przepływa do komory suszenia.

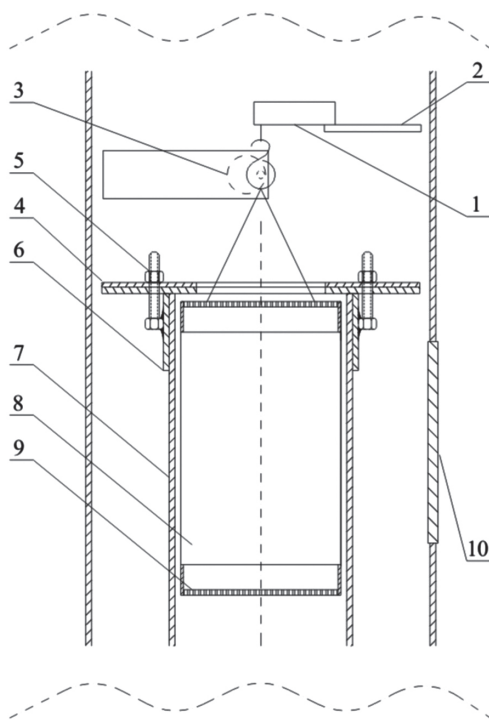
Jak wspomniano na wstępie, w instalacji wykorzystuje się pompę ciepła, której czynnik chłodniczy oziębia gaz suszący w wymrażaczu.

Układ chłodząco-osuszający powietrze składa się ze sprężarki, wymrażacza, skraplacza, parownika, zbiornika cieczy roboczej oraz zaworu trójdrożnego, który kontroluje temperaturę powietrza chłodnicy oraz poziom chłodzenia i osuszania gazu. Cykl przemian termodynamicznych czynnika roboczego, czyli freonu w pompach ciepła jest typowy dla cyklu *Lindego*.

W celu podglądu i kontroli wizualnej zainstalowano w komorze suszenia wziernik, a kamera internetowa z odpowiednim oprogramowaniem pozwala na cykliczną rejestrację badanego materiału. W trakcie nagrywania następuje włączenie oświetlenia wewnątrz komory suszarniczej. Czas rejestracji ustawia się na tyle krótki, by ciepło dostarczane przez promieniowanie z oświetlenia komory nie miało wpływu na sam proces suszenia. Zgromadzone nagrania można wykorzystać w celu określenia skurczu i zmiany barwy w zależności od zadanych parametrów procesowych.

W czasie trwania procesu zgodnie z założeniem obsługującego instalację odbywa się automatyczne ważenie, bez konieczności otwierania instalacji, czy pobierania próbek. Zrealizowano to przez użycie skokowego siłownika podwieszającego koszyk z próbką na wadze tensometrycznej. Urządzenie to, po otrzymaniu sygnału z programu sterującego, obraca pierścień z zaczepem koszyka o 90° i po osiągnięciu połowy obrotu następuje zawieszenie próbki na ciężnie. Podczas pomiaru następuje czterokrotne odczytanie masy a użytkownik dostaje informacje o średniej z tych pomiarów. Powtórny sygnał cyfrowy powoduje ponowne podniesienie koszyka czyli zdjęcie masy z wagi.

Schemat uszczelnienia i systemu ważenia został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Schemat systemu ważenia i uszczelnienia: 1 – waga tensometryczna, 2 – ramię wagi, 3 – siłownik podwieszający, 4 – uszczelnienie kołnierzowe, 5 – śruby mocujące, 6 – obejma, 7 – rura wewnętrzna, 8 – koszyk z materiałem suszonym, 9 – dno sitowe, 10 – wziernik

Podczas przepływu gazu koszyk dociągany jest przez siłownik – 3 do uszczelnienia kołnierzowego gumowego tak, aby cały strumień powietrza przepływał przez złożę. Dodatkowo jest to realizowane przez przepływający strumień powietrza (unoszący i dociska koszyk). Uszczelnienie wykonane jako pierścień metalowy z podklejoną gumą, zamocowane jest za pomocą czterech śrub – 5 przyspawanych do obręczy – 6 przymocowanej do rury wewnętrznej – 7.

Rura wewnętrzna w celu zminimalizowania drgań została przymocowana do obudowy instalacji przez obejmę z prowadnicami wprowadzonymi do połączenia kołnierzowego łączącego reduktor i komorę suszarniczą. Przestrzeń między stożkowym reduktorem a rurą wewnętrzną została dodatkowo zaizolowana i usztywniona za pomocą technicznej pianki poliuretanowej.

Sterowanie

Instalacja suszarnicza składa się z: układu chłodniczego wykorzystującego pompę ciepła, czujników pomiarowych temperatury, czujnika prędkości przepływu powietrza, zaworu trójdrożnego, dwustanowych elementów wykonawczych, wentylatora i wagi tensorowej.

Do dokładnego i precyzyjnego sterowania oraz kontroli procesu wymagana jest znajomość parametrów czynnika suszącego na wlocie i wylocie z komory suszarniczej, a także zmiana masy suszonego materiału w czasie. Zadania te realizowane są przez układ sterownika autonomicznego *FieldPoint 2000* z modułami wejścia/wyjścia firmy *National Instruments*, który zbiera dane z czujników/urządzeń i w zależności od zadanych parametrów reguluje cały układ suszarniczy.

Sterownik FP-2000 posiada wewnętrzną pamięć *flash* służącą do gromadzenia danych pomiarowych a po wgraniu oprogramowania możliwe jest uruchomienie procesu bez konieczności przesyłania instrukcji z komputera stacjonarnego. Można również używać oddzielnych hostów PC z systemem *Windows* do kontroli i nadzoru procesu poprzez połączenie *Ethernet* lub *RS-232*. Komunikację ze sprzętem PLC zapewnia program *SCADA*, który pozwala użytkownikowi na wprowadzenie zmian w programie znajdującym się na sterowniku. Możliwe jest to jedynie z komputerów posiadających publiczne IP zarejestrowane w programie sterownika. System ten dopełnia i rozszerza możliwości sterowników, realizując m.in.:

- zbieranie i przetwarzanie oraz archiwizację danych pochodzących bezpośrednio z systemów sterownikowych;
- opracowanie raportów dotyczących bieżącego stanu procesu;
- podsumowanie i wizualizację wartości zmiennych procesowych w różnych formach graficznych;
- kontrolę i nadzór nad prawidłowym przebiegiem procesu oraz regulację parametrów.

Wnioski

Wprowadzając odpowiednie modyfikacje uzyskano proces fluidyzacji pozwalający na pełniejsze wykorzystanie instalacji. Technologia ta promuje efektywne suszenie w zakresie podniesienia jakości produktu przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii. Szeroki zakres możliwych parametrów procesowych takich jak:

- prędkość przepływu powietrza w komorze suszenia, 0,5–3 m/s
- wydajność suszarnicza, 1 kg wody / 8 godzin
- całkowita moc pomp ciepła, 2,5 kW
- zakres temperatur pracy glikolu, -35–10°C
- zakres temperatur suszenia, -25–50°C
- maksymalne obciążenie wagi, 2 kg

pozwała na optymalizację parametrów pracy. Natomiast możliwość zastosowania gazów obojętnych jako środowiska suszenia (azot lub hel) może być wykorzystana do suszenia materiałów termolabilnych, podatnych na degradację produktów w wyniku utleniania.

LITERATURA

- [1] J. Stawczyk, Z. Modrzejewska, S. Li, A. Jankowska: XIX Polish Conference of Chemical and Process Engineering Rzeszów 2007.
- [2] S. J. Kowalski i in.: Problemy deformacji i destrukcji materiałów suszonych WPP Poznań 2000.
- [3] J. Stawczyk, Sheng Li, D. Witrowa-Rajchert, A. Fabisiak: Proceedings (on CD) of the 11th Polish Drying Symposium.
- [4] Cz. Strumillo: Podstawy teorii i techniki suszenia. WNT, Warszawa 1983.