

NISKOTEMPERATUROWA SUSZARNIA ZBOŻA Z WYKORZYSTANIEM ENERGII SOLARNEJ

Część I

KONWENCJONALNE SUSZARNIE ZBOŻA

mgr inż. Aleksandra KOPEĆ

Wydz. Mechaniczny, Politechnika Gdańska



Zboża są jednym z najważniejszych składników żywienia ludności świata, a produkty powstające z ich przemiału stanowią podstawę piramidy żywieniowej człowieka. Jednym z zasadniczych problemów w produkcji zbóż jest proces ich szybkiego wysuszenia zaraz po zbiorze. W świeżo zebranym, wilgotnym ziarnie szybko przebiegają procesy życiowe, w wyniku których następuje dalsze zawilgocenie i zgrzewanie masy zbożowej oraz nieodwracalne straty suchej substancji. Równolegle następuje obniżenie jakości ziarna. Aby zapobiec tym zmianom, należy bezpośrednio po zbiorze wysuszyć ziarno do wilgotności, przy której nasilenie procesów biologicznych samego ziarna i innych składników masy zbożowej jest nieznaczne.

Zmechanizowane suszarnie ziarna wykorzystujące konwencjonalne źródła energii w celu podwyższenia temperatury powietrza suszącego, jest kosztowne i wymagające znacznych ilości paliwa lub energii elektrycznej. W przypadku spalania paliw występuje również emisja CO₂ do atmosfery, powodująca zanieczyszczenie środowiska naturalnego.

Ziarna zbóż wymagają tzw. nisko- lub średniotemperaturowego konwekcyjnego procesu suszenia, z temperaturą powietrza suszącego nie przekraczającą 40°C, co stwarza dogodne warunki do wykorzystania energii słonecznej. Zastosowanie kolektorów słonecznych w suszarnictwie płodów rolnych prowadzi do ograniczenia zużycia paliw, czego konsekwencją jest obniżenie kosztów produkcji oraz redukcja emisji gazów

spalinowych [8].

WPLYW ZAWILGOCENIA ZIARNA NA PROCES JEGO PRZECHOWYWANIA W MASIE ZBOŻOWEJ

Produkcja zbóż jest podstawowym kierunkiem w produkcji roślinnej polskich gospodarstw rolnych. W strukturze zasiewów zajmują one 74 – 75%, a w 2002 roku przekroczyły 77%. Mimo, że stanowią one aż 75% ogólnego poziomu produkcji roślinnej, rolnicy nie przykładają zbyt dużej wagi do ich dokładnego suszenia, czyszczenia i przechowywania. W zależności od pory zbioru i warunków atmosferycznych, wilgotność ziarna zbóż może dochodzić nawet do dwudziestu kilku procent. W celu zapewnienia bezpiecznego przechowywania zebranego ziarna, jego wilgotność w zależności od sposobu i okresu przechowywania powinna zawierać się w przedziale od 13 do 17%. Zbyt duża wilgotność ziarna oraz brak jego czyszczenia prowadzi do wystąpienia szkodników, porażenia pleśniami i skażenia miktotoksynami pasz oraz produktów żywnościowych (za co odpowiedzialność ponosi rolnik), a wtedy nie można ich wprowadzić do obrotu. Ziarno zawilgocone narażone jest ponadto na wystąpienie zjawiska zagrzewania ziarna w złożu [7].

Ziarna zbóż i nasion, podobnie jak inne produkty rolno-spożywcze, łatwo ulegają zepsuciu i dlatego wymagają określonych form przygotowania do przechowywania oraz warunków pozwalających na dłuższy okres ich składowania bez większych zmian

jakościowych i strat ilościowych [1]. Zboże do przechowywania należy odpowiednio przygotować, stąd też właściwe jego czyszczenie i suszenie powinno być czynnością podstawową. Jeżeli gospodarstwo dysponuje silosem zbożowym, wówczas sytuacja jest łatwiejsza, natomiast jeżeli przechowywanie odbywa się w systemie podłogowym, wymaga to znacznie większej uwagi i większego nakładu pracy. Czyszczenie ziarna polega na oddzieleniu od niego piachu, nasion chwastów, nasion niedorozwiniętych i uszkodzonych oraz resztek słomy, niedomłotów, itp. Następnie ziarno należy osuszyć i dopiero tak przygotowany plon może być przechowywany. Do przechowywania zboża w krótkim okresie można zastosować warunki hermetyczne (brak dostępu powietrza powoduje wzrost stężenia dwutlenku węgla). Przy jednoczesnym utrzymaniu odpowiednio niskiej temperatury, zahamowany zostaje m.in. rozwój grzybów. Ma to jednak ujemny wpływ na jakość ziarna [9].

Magazynowane ziarno oddycha zużywając tlen i wytwarzając dwutlenek węgla, wodę i ciepło. Ponieważ w wyniku oddychania zboże traci suchą masę, proces ten powinien przebiegać jak najwolniej. Głównymi czynnikami powodującymi straty suchej masy i obniżenie jakości ziarna są jego wilgotność i temperatura (tab. 1). Większe straty ponosi się z powodu przechowywania ziarna mokrego niż suchego niedostatecznie schłodzonego, dlatego tyle uwagi poświęca się wszelkim formom suszenia ziarna, od czyszczenia w celu usunięcia wilgotniejszych od ziarna i łatwo psujących się zanieczyszczeń,

Tabela. 1. Ilość wydzielonego dwutlenku węgla i ubytek suchej masy ziarna [1]: A) o różnej wilgotności przechowywanego w temperaturze 18°C, B) o wilgotności 14 – 15 % przechowywanego w różnej temperaturze

Parametry		Ilość CO ₂ w [mg] wydzielonego przez 1 kg ziarna w ciągu 24 godzin	Ubytek suchej masy ziarna w ciągu 10 dni	
			g/100kg	%
A. Wilgotność ziarna przechowywanego w temperaturze 18°C	11,0%	0,3 – 0,4	0,21	0,0002
	30,0%	2000,0	1364,00	1,36
B. Temperatura ziarna o wilgotności 14 – 15%	18°C	1,4	0,96	0,001
	52°C	249,0	169,80	0,170

przez aktywne wietrzenie, aż do suszenia cieplnego w suszarkach zbożowych [1]. Wiadomo, że intensywność oddychania rośnie wraz ze wzrostem temperatury i wilgotności ziarna. Mają też na to wpływ mikroorganizmy znajdujące się na powierzchni ziarna (ich różnorodność i ilość zmienia się w czasie w zależności od warunków składowania).

Wraz ze wzrostem temperatury i wilgotności przekraczającej 12-13%, zwiększa się ryzyko wystąpienia szkodników oraz porażenia pleśniami i - co najważniejsze - ryzyko utraty zdolności kiełkowania. Często efekt ten potęgowany jest przez zjawisko zagrzewania ziarna, które powstaje w wyniku naturalnej cyrkulacji powietrza i wilgotności w tak dużej masie. Jeżeli nie będzie się odpowiednio kontrolować tego procesu, wówczas dojdzie do poważnych zniszczeń. Sytuacja taka może się zdarzyć nawet wtedy, gdy temperatura ziarna wynosi 15°C, a jego początkowa wilgotność 12%.

Rozróżnia się dwa rodzaje tego procesu: grzanie mokre i grzanie su-

che.

- Z grzaniem mokrym mamy do czynienia wtedy, gdy wilgotność ziarna jest większa niż 15%, wówczas zostaje ono wzmocnione przez wzrost aktywności grzybów bytujących na ziarnie, które wytwarzają dodatkowe ciepło i wilgoć.
- Grzanie suche występuje w przypadku wilgotności poniżej 15% i powodowane jest przez owady i roztocza, których nagromadzenie powoduje wzrost wilgotności i aktywności grzybów, co z kolei stwarza warunki do rozmnażania szkodników.

Jeżeli procesy samozagrzewania nie zostaną powstrzymane, wówczas nastąpi systematyczne podnoszenie wilgotności materiału do 18-20%. Zjawisko grzania można zminimalizować przez wentylację suchym i zimnym powietrzem lub przez przemieszanie ziarna. Jeżeli jednak ono wystąpi, wtedy najlepiej zboże przeczścić i podsuszyć, a w przypadku pojawienia się insektów – zastosować tzw.

fumiganty.

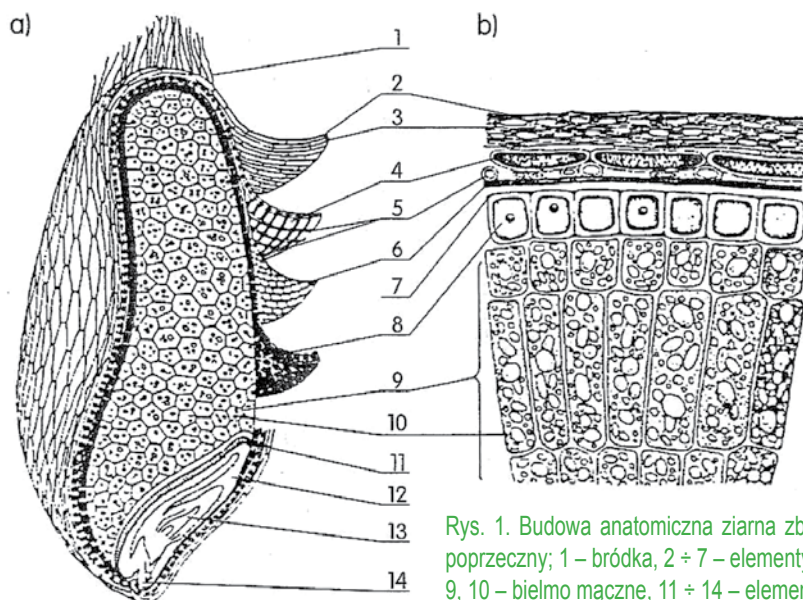
Suszac ziarno w suszarkach osiąga się korzyści wynikające z unicestwienia w wyższych temperaturach szeregu szkodników zbożowo-mącznych i drobnoustrojów (bakterii i grzybów) oraz usuwania z ziarna niektórych obcych zapachów.

2 WŁAŚCIWOŚCI ZIARNA I MASY ZBOŻOWEJ

2.1. Budowa i skład chemiczny ziarna

Ziarno zbóż składa się z zarodka, bielma i okrywy nazywanej potocznie łuską. Budowę anatomiczną ziarna zbożowego pokazano na rysunku 1.

- **Zarodek** jest zaczątkiem przyszłej rośliny. Zbudowany jest on z żywych komórek zdolnych do wzrostu i rozwoju. Zarodek mieści się w dolnej części ziarna. U poszczególnych zbóż masa zarodka w stosunku procentowym do masy całego ziarna jest różna, i wynosi od 2,5% dla pszenicy do 8,4% dla kukurydzy.
- **Bielmo** składa się z dwóch części, zewnętrznej i wewnętrznej. W warstwie zewnętrznej jako substancje zapasowe występują głównie białka, natomiast warstwę wewnętrzną tworzy bielmo właściwe zbudowane z komórek gromadzących głównie skrobię.
- **Okrywa owocowo-nasienna** zbudowana jest z komórek obumarłych o silnie zdrewniałych i zgrubiałych błonach komórkowych. Okrywa chroni bielmo i zarodek przed szkodnikami, uszkodzeniami me-



Rys. 1. Budowa anatomiczna ziarna zbożowego [3]: a) przekrój podłużny ziarna, b) przekrój poprzeczny; 1 – bródka, 2 + 7 – elementy okrywy owocowo-nasiennej, 8 – warstwa aleuronowa, 9, 10 – bielmo mączne, 11 + 14 – elementy zarodka.

chanicznymi oraz przed wylugowaniem substancji zapasowych.

Woda w ziarnie zawarta jest w postaci:

- wody wolnej, która znajduje się w kapilarach ziarna i na jego powierzchni;
- wody związanej, która może być związana fizycznie siłami adsorpcji przez substancje koloidalne oraz chemicznie.

W czasie suszenia ziarna wyparowuje woda wolna i częściowo woda związana fizycznie, natomiast wody związanej chemicznie nie można usunąć przez proces suszenia.

2.2. Właściwości fizyczne ziarna

Właściwości fizyczne ziarna, a są to: kształt, wielkość, objętość i wilgotność, oraz właściwości aerodynamiczne, mają istotne znaczenie przy zabiegach i procesach związanych z jego przechowywaniem, oczyszczaniem, sortowaniem i suszeniem [1].

Kształt ziarna pszenicy, żyta, jęczmienia i owsa jest wydłużony. Każdy rodzaj zboża posiada charakterystyczną wielkość ziarna, która waha się jednak w dość znacznych granicach.

Wielkość i dorodność ziarna wyraża się również ich masą i ciężarem, a mianowicie masą 1000 ziarn, ciężarem właściwym i gęstością w stanie zasypaniu. Ziarno wilgotne ma ciężar właściwy mniejszy niż ziarno suche. Wraz ze zmianą wilgotności ziarna zmieniają się jego właściwości. W miarę sorbowania wody przez ziarno, białko, skrobia i błonnik pęcznieją, w wyniku czego wzrasta objętość całego ziarna, a maleje jego ciężar właściwy. Jednocześnie wzrasta kąt usypu ziarna i zmniejsza się jego sypkość. W wyniku tych zmian, w masie ziarna powstają większe wolne przestrzenie i maleje jego gęstość w stanie zsypanym.

W wyniku procesu suszenia w ziarnie następuje:

- obniżenie wilgotności oraz ubytków masy ziarna, i zwiększenie jego trwałości w przechowywa-

niu;

- wzrost ciężaru właściwego i gęstości w stanie zsypanym (ciężar objętościowy);
- zmniejszenie objętości ziarna i masy zbożowej, co pozwala na lepsze wykorzystanie pojemności spichrzowej;
- wzrost sypkości ziarna: mniejszy kąt usypu ułatwia przemieszczenie ziarna drogą samo zsypania.

Ziarno raz dosuszone, łatwo chłonie wilgoć z powietrza i zanieczyszczeń. Ziarno suche zawierające zanieczyszczenia wilgotne (części lodygi i nasion chwastów) przejmuje od nich wodę. Podobna wymiana wilgoci występuje pomiędzy poszczególnymi ziarnami, z tym że trzeba dość długiego czasu, aby nastąpiło całkowite wyrównanie wilgotności w całej masie ziarna [1].

2.3. Skład oraz właściwości masy zbożowej i nasion

W skład masy zbożowej i nasion wchodzi przede wszystkim ziarno i nasiona danej rośliny, jako główny składnik oraz różne zanieczyszczenia, np. części kłosów lub lodygi, plewy, nasiona chwastów itp. Ziarno może być również opanowane przez grzyby i szkodniki zbożowo-mączne. Wszystkie te zanieczyszczenia obniżają jakość i wartość użytkową masy zbożowej, zwiększają jej niejednorodność i stanowią balast w czasie transportu i przechowywania. Również balastem w wilgotnej masie zbożowej jest nadmiar wody w ziarnie, utrudniający przechowywanie i sprzyjający rozwojowi grzybów.

Do podstawowych właściwości masy zbożowej i nasion, ważnych ze względów technologii przechowywania, suszenia i przetwórstwa zalicza się [1]:

❖ **Porowatość**

W luźno usypanej masie zbożowej tworzą się wolne przestrzenie między ziarnowe wypełnione powietrzem. Wskutek tego objętość zajmowana przez masę zbożową jest większa od łącznej objętości wszystkich ziaren. Porowatość masy zbożowej wyraża się stosunkiem procentowym objętości przestrzeni między ziarnowej do przestrzeni całkowitej (objętości)

zajmowanej przez ziarna lub nasiona. Porowatość masy zbożowej jest różna, w zależności od rodzaju, kształtu, ciężaru i wielkości ziaren, ich wilgotności i stanu powierzchni oraz od ilości i rodzaju zanieczyszczeń. Większą porowatość ma masa o dużych i jednorodnych nasionach oraz o małej ilości zanieczyszczeń. Mokre ziarno pęcznieje, powiększa swoją objętość i tym samym zwiększa porowatość wilgotnej masy zbożowej. W miarę przedłużania składowania masy zbożowej porowatość zmniejsza się, a wzrasta zwartość na skutek „zleżenia”. Porowatość odgrywa ważną rolę przy przechowywaniu, wietrzeniu i suszeniu ziarna. Im większa jest porowatość, tym swobodniej świeże powietrze dochodzi do składowanego ziarna.

❖ **Sypkość**

Jest to zdolność przemieszczania się ziarna i nasion w czasie przesypania i przesuwania się po pochylej powierzchni ustawionej pod kątem do poziomu. Stopień sypkości zależy od rodzaju ziarna zbóż i nasion, ich kształtu, wielkości i charakteru okrywy, wilgotności, rodzaju i stopnia zanieczyszczenia oraz od czasu przechowywania. Ziarno mokre i wilgotne ma mniejszą sypkość niż ziarno suche.

❖ **Samosortowanie**

Następuje w czasie przemieszczania lub swobodnego opadania i wstrząsania ziarna lub nasion według ich ciężaru właściwego, wielkości i kształtu.

❖ **Przewodność cieplna masy zbożowej i nasion**

Właściwość tę określa się współczynnikiem przewodności cieplnej, który podaje ilość ciepła jaka przechodzi w ciągu 1 godziny przez warstwę zboża lub nasion o grubości 1 m i powierzchni 1 m² przy różnicy temperatur obu powierzchni warstwy wynoszącej 1 K. Ciepło przenosi się głównie na drodze przewodzenia między stykającymi się ziarnami i przez konwekcję za pośrednictwem powietrza znajdującego się w przestrzeniach międzyziarnowych, w kierunku pionowym. Przewodność cieplna masy zbożowej wzrasta wraz z podwyższe-

niem jej wilgotności i temperatury, natomiast maleje w miarę wzrostu jej porowatości.

❖ *Właściwości absorpcyjne masy zbożowej i nasion*

Zarówno ziarna pojedyncze, jak i cała masa zbożowa mają zdolność do pochłaniania, jak również wydzielania gazów i par różnych substancji w określonych warunkach. Dzieje się tak wskutek kapilarno-porowatej i koloidalnej struktury ziaren i nasion oraz porowatości masy zbożowej.

❖ *Higroskopijność ziarna*

Higroskopijność polega na zdolności pochłaniania i wydzielania pary wodnej. Na skutek właściwości higroskopijnych i różnej prężności pary wodnej w ziarnie i otaczającym powietrzu, odbywa się stała wymiana wilgoci między składowaną masą zbożową a powietrzem. Powietrze suche (o niskiej wilgotności względnej) stykając się z mokrym ziarnem chłonie z niego wilgoć i osusza je. Natomiast ziarno suche w zetknięciu z powietrzem wilgotnym (o wysokiej wilgotności względnej) wchłania wilgoć. Wymiana wilgoci ustaje, gdy ziarno osiągnie stan wilgotności równowagowej. **Wilgotnością równowagową** nazywa się ustaloną wilgotność ziarna przy określonej wilgotności i temperaturze powietrza. Wpływa na nią budowa ziarna, skład chemiczny, wilgotność i temperatura powietrza. Ze wzrostem wilgotności względnej powietrza w otoczeniu ziarna, wzrasta odpowiednio jego wilgotność równowagowa, osiągając wartość ok. 32-36% przy wilgotności względnej powietrza 100%. Krytyczną wartością wilgotności względnej powietrza dla przechowywania zboża jest wilgotność na poziomie 80%. Wówczas równowagowa wilgotność ziarna wynosi 16-17%, przy której wzrastają procesy życiowe i rozwijają się pleśnie. W naszych warunkach klimatycznych wilgotność względna powietrza w magazynie nie powinna przekraczać **70-75%**.

2.4. Granice dopuszczalnej wilgotności ziarna i nasion

W zależności od miejsca przechowywania i warunków w nim panujących

wilgotność ziarna należy ograniczyć do pewnego stopnia. Dla zapewnienia bezpiecznego przechowywania, wilgotność ziarna nie powinna przekraczać [1]:

- 16 – 17% dla zboża przechowywanego w spichrzach podłogowych w niskich pryzmach często wietrzonych i ochładzanych;
- 13 – 13,5% dla zboża przeznaczonego do długookresowego przechowywania we wszystkich spichrzach.

Wilgotność ziarna jest podstawowym parametrem jego jakości i wartości, która pozwala na podjęcie decyzji, czy ziarno nadaje się do przechowywania i do przetwórstwa, czy też wymaga konserwacji i suszenia.

3 CHARAKTERYSTYKA PROCESU SUSZENIA

Suszenie jest jedną z najstarszych metod utrwalania żywności, która polega na usunięciu części wody z produktu przez jej odparowanie. Ciepło jej przemiany fazowej najczęściej doprowadzane jest z zewnątrz. Obniżenie zawartości wody w materiale suszonym obniża jej aktywność, przez co produkt może być przechowywany przez długi okres bez wyraźnych objawów zepsucia. Ciepło może być doprowadzone do materiału suszonego na drodze przewodzenia, konwekcji lub promieniowania. Najczęściej stosuje się ogrzewanie konwekcyjne, w którym czynnik grzejny omywa materiał lub przepływa przez warstwę suszonego produktu. Rzadziej stosuje się ogrzewanie przez przewodzenie, w którym materiał suszony spoczywa bezpośrednio na powierzchni grzejnej. Nagrzewanie materiału promieniami podczerwonymi stosuje się tylko w szczególnych przypadkach.

Proces suszenia wymaga, aby odparowana woda była w sposób ciągły usuwana z otoczenia produktu. Najczęściej usuwanie wilgoci odbywa się w wyniku konwekcji, co powoduje, że ten sam czynnik może być użyty do dostarczania ciepła i odprowadzania odparowanej wody.

Suszenie jest procesem równocze-

snej wymiany ciepła i masy. Podczas suszenia konwekcyjnego materiał suszony ogrzewa się od gorącego powietrza, a odparowana woda przemieszcza się z materiału do otaczającego gazu. Opory ruchu masy są znacznie większe od oporów ruchu ciepła i to one decydują o szybkości przebiegu procesu suszenia. Siłą napędową procesu jest więc różnica między prężnością pary wodnej na powierzchni materiału i prężnością pary wodnej w otaczającym gazie.

Usuwanie wody z produktu powoduje, że masa i wilgotność materiału suszonego zmieniają się w czasie, dlatego są parametrami niewygodnymi do użycia w opisie procesu suszenia. Z tego powodu w suszarnictwie wprowadza się pojęcie wilgotności właściwej (zawartości wody), która określa liczbę jednostek masy cieczy przypadających na jednostkę suchej substancji.

• **Ruch ciepła**

Podczas suszenia konwekcyjnego, ciepło dostarczane jest od strumienia gazu do powierzchni materiału, a następnie transportowane do jego wnętrza. W związku z tym występuje zewnętrzny i wewnętrzny ruch ciepła, a tym samym występują dwa opory cieplne.

Opory wnikania ciepła od gazu do ciała stałego są duże i przy niewielkich grubościach ciała są one porównywalne z oporami przewodzenia. Przewodność cieplna właściwa ciał stałych zależy od ich wilgotności. Jeżeli materiał zawiera mniej wody, jego zdolność do przewodzenia ciepła jest mniejsza, stąd też w czasie suszenia opory przewodzenia ciepła mogą się zwiększać wraz z obniżeniem zawartości wody w materiale [4].

• **Przenoszenie masy**

Woda zawarta w materiale jest transportowana do powierzchni w postaci cieczy lub pary, a następnie wnika ona do przepływającego strumienia gazu. Tak więc podobnie jak w przypadku transportu ciepła, występuje wewnętrzny i zewnętrzny ruch masy. Na początku procesu suszenia odparowana zostaje woda znajdująca się na powierzchni materiału i w kapilarach

kontaktujących się bezpośrednio z powierzchnią. W tym okresie ilość odparowanej wody w jednostce czasu jest stała (obserwuje się okres stałej szybkości suszenia). Stan taki trwa dopóty, dopóki strumień wody transportowany do powierzchni jest większy lub równy strumieniowi cieczy odprowadzonemu z powierzchni do otaczającego gazu. Oznacza to, że opory przenoszenia masy wewnątrz ciała stałego są mniejsze niż opory konwekcyjnego wnikiwania masy do otaczającego gazu [2,4].

W momencie, gdy opory wewnętrzznego ruchu masy zaczynają być większe od oporów konwekcyjnego przenoszenia masy, pierwszy okres suszenia się kończy, a szybkość procesu zaczyna maleć. O przebiegu procesu decyduje więc wewnętrzne przeniesienie masy. Im wilgotność materiału jest mniejsza, tym mniejsza jest jego zdolność do transportu masy. W rezultacie drugi okres suszenia (malejącej szybkości suszenia) trwa długo. W materiale powstają duże gradienty wilgotności i często jest osiągany stan pozornej równowagi. Obserwuje się brak ubytków masy materiału, czyli zakończenie procesu suszenia, chociaż wnętrze materiału może być jeszcze wilgotne. Transport wilgoci do powierzchni trwa tak długo, że w określonych przedziałach czasowych nie obserwuje się ubytków masy [4].

• **Intensyfikacja procesu suszenia**
Znajomość warunków wymiany ciepła i masy umożliwia zaprojektowanie procesu w taki sposób, aby usuwanie wody przebiegało możliwie szybko i efektywnie. W pierwszym okresie suszenia wymiana masy jest ograniczona oporami konwekcyjnego wnikiwania pary wodnej od powierzchni do otaczającego gazu. Opór ten może być zmniejszony głównie przez zmniejszenie grubości umownej warstwy zastępczej. Grubość tej warstwy zależy od hydrodynamicznych warunków przepływu gazu. Im liczba Reynoldsa jest większa, tym grubość podwarstwy laminarnej jest mniejsza. Wynika stąd, że zwiększenie prędkości przepływu gazu będzie intensyfikować proces suszenia w okresie stałej szybkości suszenia.

Podwyższenie temperatury gazu zwiększa współczynnik dyfuzji pary wodnej, a tym samym poprawia warunki konwekcyjnej wymiany masy. Prężność pary wodnej w otaczającym powietrzu również istotnie wpływa na proces usuwania wody z materiału. Im prężność pary wodnej w powietrzu suszącym jest mniejsza, tym siła napędowa procesu jest większa.

Podsumowując, proces usuwania wody z materiału w pierwszym okresie suszenia może być intensyfikowany zwiększeniem prędkości przepływu gazu, podwyższeniem jego temperatury i obniżeniem jego wilgotności.

W drugim okresie suszenia intensyfikacja procesu usuwania wody jest znacznie trudniejsza, ponieważ główny opór ruchu masy znajduje się wewnątrz materiału. Dlatego poprawa zewnętrznych warunków wymiany masy przez zmianę prędkości powietrza nie ma większego wpływu na przebieg suszenia. Podwyższenie temperatury materiału, przez zwiększenie efektywnego współczynnika dyfuzji, ma nieznaczny wpływ na szybkość usuwania wody. W praktyce proces wymiany masy w drugim okresie suszenia może być intensyfikowany przez odpowiednie przygotowanie materiału. Polega ono na zastosowaniu takich procesów, które częściowo niszczą wewnętrzną strukturę materiału lub ograniczają skurcz materiału w czasie suszenia, a tym samym zwiększają efektywność współczynnika dyfuzji wody. Ponadto, grubość materiału, a więc droga dyfuzji, bardzo istotnie wpływa na wartość oporów molekularnego ruchu masy. Z liczby Fouriera dla wymiany masy wynika, że zmniejszenie grubości materiału o połowę powoduje czterokrotne skrócenie czasu suszenia. Również kształt materiału decyduje o intensywności nieustalonej wymiany masy [4].

4 PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONWENCjonalNYCH SUSZARNI ZBÓŻ I ICH OCENA TECHNICZNA

4.1. Sposoby suszenia

Suszenie materiału wilgotnego odbywa się w urządzeniach zwanych

suszarkami. Zwykle suszarka składa się z trzech elementów: *podgrzewacza* (w którym czynnik suszący doprowadza się do wymaganej temperatury), *komory suszenia* (w której czynnik suszący kontaktuje się z materiałem wilgotnym), oraz urządzenia wywołującego ruch czynnika suszącego. Materiał osuszany w komorze może być nieruchomy lub wprawiony w ruch. Jego ruch skraca czas procesu suszenia, ponieważ umożliwia kontakt całej jego powierzchni z gorącym powietrzem.

Materiał i czynnik suszący mogą poruszać się współ- lub przeciwnieprądowo. Stosuje się również suszarki o prądach skrzyżowanych i zmiennoprądowe.

W **suszeniu współprądowym** ruch czynnika suszącego jest zgodny z ruchem materiału. Takie suszenie stosuje się wtedy, gdy suszony materiał po zetknięciu z gorącym powietrzem może ulec zniszczeniu. Wymianę ciepła i masy intensyfikuje duża różnica temperatur na początku komory suszenia. Temperatura czynnika suszącego obniża się w miarę przepływu przez suszarkę, natomiast jego wilgotność wzrasta. Jednocześnie maleje wilgotność suszonego materiału. Ze względu na dużą wilgotność powietrza opuszczającego suszarkę, suszenie współprądowe ogranicza stopień wysuszenia materiału.

W trakcie **suszenia przeciwnieprądowego** materiał suszony kontaktuje się z gorącym i suchym powietrzem. Dzięki temu uzyskuje się wyższy stopień wysuszenia materiału w porównaniu z suszeniem współprądowym. Ten sposób może być jednak stosowany w przypadku materiałów mało wrażliwych na temperaturę i nie ulegających zaskorupieniu.

Suszenie zmiennoprądowe jest połączeniem suszenia współ- i przeciwnieprądowego. Polega ono na przemienicznym stosowaniu współ- i przeciwnieprądu lub na sukcesywnym stosowaniu np. najpierw współprądu, a następnie przeciwnieprądu.

W **suszeniu o prądach skrzyżowanych** ruch materiału jest prostopadły do kierunku czynnika suszącego.

W celu uniknięcia przegrzania

materiału oraz zaskorupiania się powierzchni i tworzenia się tzw. **skorupki**, należy zmniejszyć szybkość procesu suszenia do poziomu, przy którym gradienty wilgotności w materiale są małe. Warunki te można osiągnąć przez zastosowanie recyrkulacji czynnika suszącego. Polega to na tym, że część tego czynnika opuszczającego suszarkę o dużej wilgotności, mieszana jest z powietrzem świeżym, a następnie ponownie wprowadzana do komory suszenia [4].

4.2. Podstawowe typy i konstrukcje suszarek

4.2.1. Suszarki konwekcyjne

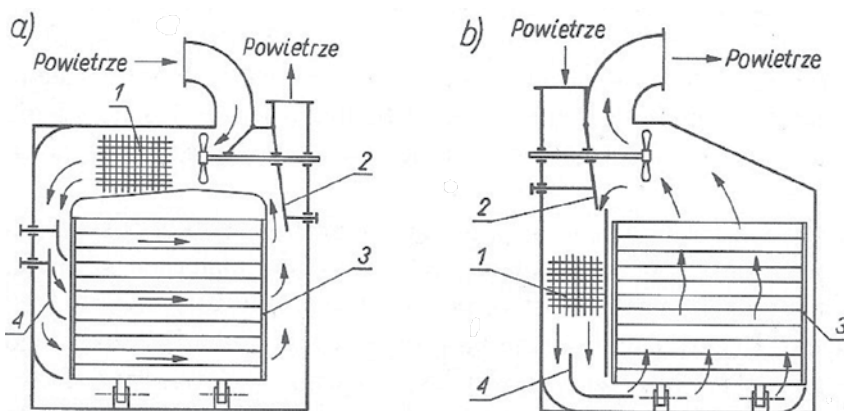
Suszarki konwekcyjne najszersze zastosowanie znalazły w przemyśle spożywczym. Są one wykorzystywane zarówno do suszenia produktów spożywczych, jak i odpadów przeznaczonych na pasze. Suszarki te mogą pracować w sposób okresowy lub ciągły. Do grupy tych suszarek należą:

❖ Suszarki komorowe

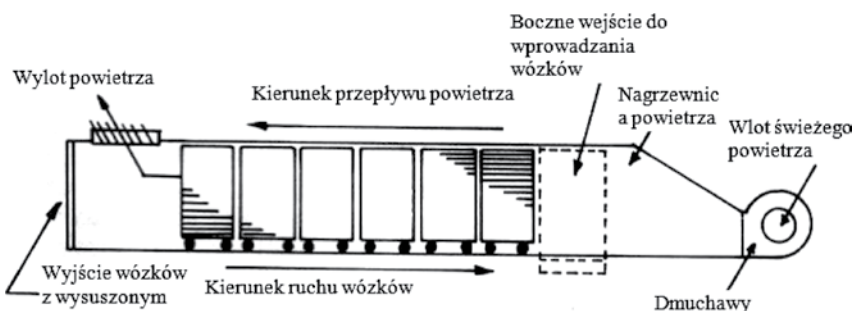
Składają się one z jednej lub kilku komór, wewnątrz których materiał suszony umieszczony jest na odpowiednich tacach lub sitach. Powietrze może przepływać nad materiałem (wzdłuż tac) lub prostopadłe w stosunku do sit (rys. 2). Przepływ poprzeczny często wymaga podgrzewaczy międzystopniowych. Powietrze przechodząc przez kilka kolejnych sit z materiałem wilgotnym obniża swoją temperaturę i nasycy się parą wodną tak, aby w następnych sitach nie następowało usuwanie wody. Należy więc dogrzać powietrze, aby umożliwić dalsze usuwanie wilgoci z materiału.

Suszarki komorowe pracują okresowo, a suszony materiał jest nieruchomy w odniesieniu do strumienia gazu. Niektóre rozwiązania konstrukcyjne suszarek komorowych umożliwiają okresowe przemieszczanie się sit wewnątrz komory suszenia, dzięki czemu uzyskuje się warunki zbliżone do ciągłego suszenia przeciwnądowego.

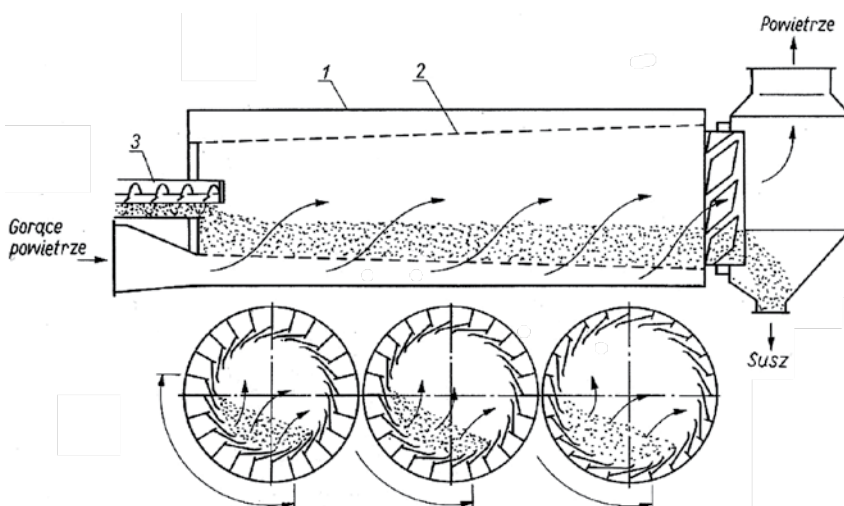
Suszarki te mają małą powierzchnię, zdolność odparowania wody i wysokie całkowite zużycie ciepła.



Rys. 2. Suszarka komorowa [6]: a) z podłużnym przepływem powietrza, b) z poprzecznym przepływem powietrza; 1 – podgrzewacz zewnętrzny, 2- przesłona regulacyjna cyrkulacji, 3 – wózek, 4 - prowadnica powietrza



Rys. 3. Suszarka tunelowa przeciwnądowa [5]



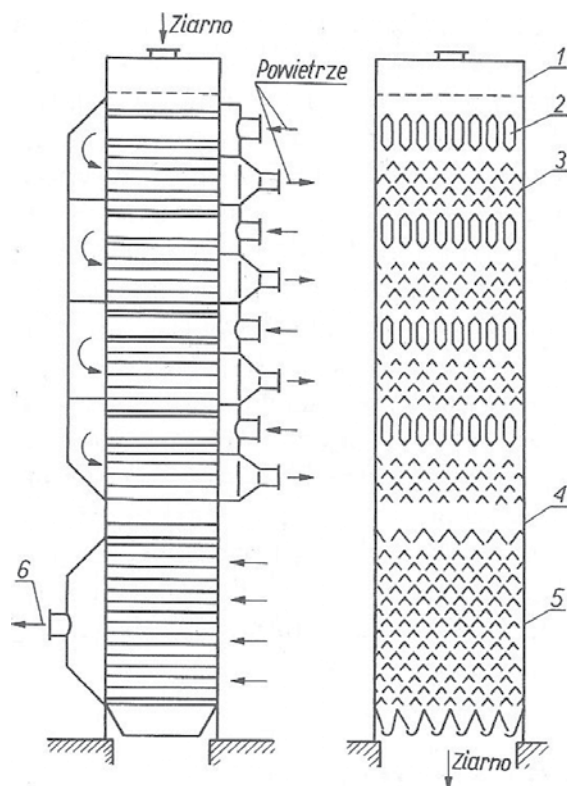
Rys. 4. Suszarka bębnowa [4]: 1 – bęben zewnętrzny, 2 – bęben wewnętrzny, 3 – doprowadzenie suszonego materiału

Osiągany w nich czas suszenia zależy od rodzaju suszonego materiału.

❖ Suszarki tunelowe

Stosowane są do suszenia dużych ilości materiału jednorodnego. Wózki, na których ułożone są sita lub tace z materiałem przesuwają się okresowo wzdłuż tunelu suszarki. Kierunek ich ruchu może być współ-

lub przeciwnądowy (rys. 3). Świeżo załadowane wózki wprowadzane są okresowo do tunelu suszarki. W tym samym czasie rozpoczyna się odbiór wózków z wysuszonym materiałem. W suszarkach tunelowych przepływające powietrze musi być dogrzewane, dlatego suszarki te wyposażone są w ogrzewanie międzystopniowe [5].



Rys. 5. Suszarka daszkowa [4]: 1 – zasobnik ziarna, 2 – ogrzewacz ziarna, 3 – sekcja suszenia, 4 – sekcja wyrównywania temperatury, 5 – sekcja chłodzenia ziarna, 6 – odprowadzenie powietrza do podgrzewacza

z tym powietrze przechodzi tylko przez warstwę ziarna zawartą pomiędzy dwoma rzędami daszków. Grubość tej warstwy nie przekracza 20 cm. Strefy suszenia z rzędami daszków mogą być rozdzielone podgrzewaczami materiału suszonego (rys. 5), [4].

cdn ...

LITERATURA

- [1] Biskupski M.: *Suszarnie zbożowe i urządzenia do aktywnego wietrzenia*. WNT Warszawa 1972
- [2] Boruch M., Nowakowska K.: *Technika spożywcza suszów ziemniaczanych*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1996
- [3] Encyklopedia techniki przemysłu spożywczego. WNT Warszawa 1978
- [4] Lewicki P.: *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*. WNT, Warszawa 2005
- [5] Singh P.R., Heldman D.R.: *Introduction to food engineering* Academic Press, INC. San Diego, California 1984
- [6] Strumiłło C.: *Podstawy teorii i techniki suszenia*. WNT, Warszawa 1975
- [7] Kaleta A.: *Bezpieczne przechowywanie ziarna – studium zagadnienia*. Inżynieria Rolnicza, 1(99)/2008, s. 137- 143
- [8] Sharma A.: *Solar-energy drying systems: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (2009) 1185–1210
- [9] Witryny internetowe: www.modr.mazowsze.pl
- [10] Kopeć A.: Projekt koncepcyjny oraz analiza techniczno-ekonomiczna wykorzystania energii solarnej w niskotemperaturowej suszarni zboża, przeznaczonej dla małych i średnich gospodarstw rolnych. Praca dyplomowa magisterska, Wydz. Mech., Politechnika Gdańska, 2013 (promotor: dr inż. Z. Bonca, doc. PG)

❖ Suszarki taśmowe

Suszarki tego typu stosowane są do suszenia materiału w kawałkach oraz materiałów pastowatych. Wykonane są w postaci tunelu, w którym porusza się jedna lub kilka taśm umieszczonych jedna nad drugą. Taśmy przeznaczone do suszenia materiału w kawałkach wykonane są z siatki drucianej, dzięki czemu przepływ powietrza odbywa się przez warstwę produktu. Konstrukcja suszarki taśmowej uwzględnia konieczność suszenia wielu materiałów spożywczych w dwóch okresach. W tym celu buduje się dwa tunele jeden nad drugim, przy czym górny tunel jest jednotaśmowy, a dolny – wielotaśmowy. W tunelu górnym taśma porusza się szybko, a temperatura powietrza suszącego jest wysoka. Następuje tu suszenie materiałów głównie w pierwszym okresie suszenia. W dolnym tunelu ruch taśm jest wolniejszy, a ich ilość decyduje o czasie pobytu materiału w suszarce. Tunel ten pracuje na zasadzie przeciwpądu [4].

❖ Suszarki bębnowe

Suszarki tego typu stosowane są do suszenia niektórych materiałów odpadowych oraz materiałów kry-

stalicznych i ziarnistych. Wykonane są one w postaci bębna z blachy litej, który obraca się wokół własnej osi z prędkością obrotową 1 – 15 obr/min, a jego oś pochylona jest o 0,5 do 6° w stosunku do poziomu w celu wywołania wzdłużnego ruchu materiału. Bardzo ważnym elementem w konstrukcji suszarki bębnowej są przegrody zainstalowane wewnątrz bębna. Kształt i ułożenie przegród umożliwiają przesypywanie się materiału, jego intensywne mieszanie oraz kontakt każdej cząsteczki z czynnikiem suszącym. Czynnikiem suszącym, którym jest powietrze doprowadzane się osiowo do wnętrza bębna (rys. 4), [4].

❖ Suszarki daszkowe

Suszarki daszkowe stosowane są do suszenia materiałów ziarnistych, najczęściej ziarna zbóż i nasion oleistych. Dzięki sile ciężkości materiał suszony przemieszcza się z góry do dołu i omywany jest przez gorące powietrze. Suszarki te wykonane są najczęściej w postaci komory prostopadłościowej, której wnętrze wypełniają przegrody (daszki) zapewniające dobry kontakt materiału z czynnikiem suszącym. Daszki ułożone są w rzędach, a w przestrzeni między nimi przesypuje się materiał ziarnisty. Czynnikiem suszącym doprowadzany jest do co drugiego rzędu daszków. Po przejściu przez warstwę ziarna, zużyte powietrze odprowadzane jest przez następny rząd daszków połączonych z kanałem wylotowym powietrza. W związku