

Ćwiczenie 12:

SUSZENIE CIAŁ STAŁYCH

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z przebiegiem suszenia ciał stałych wraz z określeniem kinetyki procesu.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

Suszenie jest procesem jednoczesnego przepływu ciepła i masy, polegającym na usunięciu z materiału suszonego wilgoci za pomocą czynnika suszącego. W przeważającej liczbie przypadków wilgoć zawartą w materiale suszonym stanowi woda, natomiast jako czynnik suszący wykorzystywane jest powietrze o określonych parametrach procesowych.

Prowadzenie suszenia wymaga dostarczania ciepła, a ze względu na jej pochodzenie proces przebiegać może w sposób:

- naturalny - gdy ciepło zużywane do suszenia pobierane jest bezpośrednio z powietrza atmosferycznego;
- sztuczny - gdy ciepło zużywane do suszenia wytwarzane jest w wyniku wykorzystania nośników energii.

Aparaty w których prowadzone jest suszenie (zwane suszarkami) można podzielić ze względu na sposób doprowadzenia w nich ciepła do materiału. Stosując to kryterium podziału, wyróżnia się suszarki:

- konwekcyjne - ciepło dostarczane jest wraz ze strugą czynnika suszącego omywającego materiał suszony;
- kontaktowe - ciepło dostarczane jest do materiału suszonego poprzez jego bezpośredni kontakt z powierzchnią grzejną;
- radiacyjne - ciepło dostarczane jest do materiału suszonego na drodze promieniowania cieplnego.

Jednym z bardzo ważnych parametrów określających stan czynnika suszącego lub materiału suszonego jest ich wilgotność. Dla określenia ilości wilgoci (zwykle pary wodnej) zawartej w czynniku suszącym (zwykle

powietrzu), wykorzystywane jest pojęcie wilgotności bezwzględnej czynnika suszącego. Wykorzystując symbolikę oznaczeń stosowaną w zagadnieniach wymiany masy, wilgotność bezwzględną powietrza zdefiniować można jako stosunek masowy

$$W_A = \frac{m_A}{m_{p.s.}}, \quad (1)$$

gdzie: W_A - wilgotność bezwzględna powietrza, kg H₂O/kg p.s.

m_A - masa wody, kg;

$m_{p.s.}$ - masa powietrza suchego (zupełnie pozbawionego wilgoci), kg.

W celu określenia stanu nasycenia czynnika suszącego wilgocią, dogodnie jest posługiwać się pojęciem wilgotności względnej

$$\varphi = \frac{p_A}{p_{A,n}} \Big|_{t=\text{const}}, \quad (2)$$

gdzie: p_A - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu o temperaturze t ,

$p_{A,n}$ - ciśnienie nasycenia pary wodnej w temperaturze t .

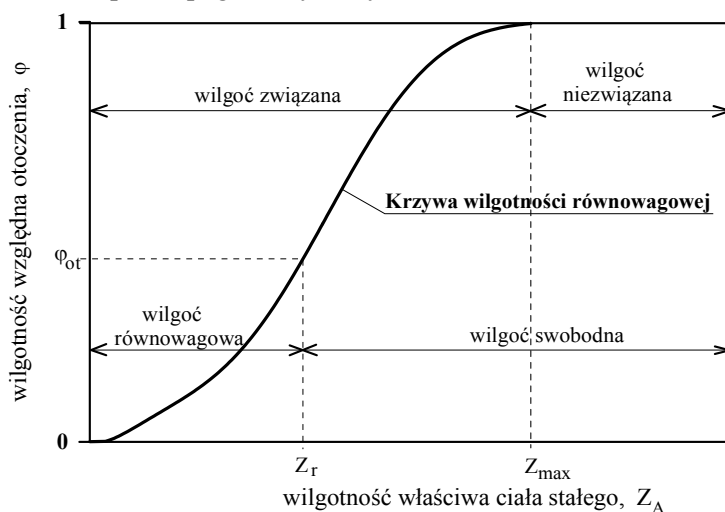
Dla powietrza suchego $\varphi = 0$, natomiast dla nasyconego wilgocią $\varphi = 1$. Powietrze przesycone wilgocią (zamglone lub zaszczone) nie ma praktycznego zastosowania w suszarnictwie. Warto w tym miejscu dodać, że działanie przyrządów pomiarowych określających wilgotność gazów opiera się na pomiarze stanu ich nasycenia parą wodną, a nie na pomiarze ilości tej pary w odniesieniu do ilości gazu, czyli wilgotności bezwzględnej.

Do opisu stanu zawilgocenia materiału suszonego stosowane są natomiast takie pojęcia jak:

- wilgotność bezwzględna (właściwa) - jest to stosunek masy wilgoci zawartej w materiale do masy materiału suchego;
- wilgotność równowagowa - jest to taka wilgotność właściwa materiału suszonego przy której zawarta w nim wilgoć jest w stanie równowagi z parą wodną zawartą w czynniku suszącym (otoczeniu). Jest to równocześnie minimalna wilgotność do której można wysuszyć materiał w danych warunkach prowadzenia procesu;
- wilgoć związana - ciecz zawarta w materiale wilgotnym dla której ciśnienie cząstkowe pary jest mniejsze niż ciśnienie cząstkowe pary nasyconej w danej temperaturze. Jest to tzw. wilgoć higroskopijna;
- wilgoć niezwiązana - jest to ciecz zawarta w materiale wilgotnym i stanowiąca nadmiar w stosunku do wilgoci związanej;

- wilgoć swobodna - jest to wilgoć w materiale, będąca w nadmiarze w stosunku do wilgotności równowagowej. Jest to zatem ta ilość wilgoci którą można usunąć z materiału w danych warunkach prowadzenia procesu suszenia.

Wzajemne relacje pomiędzy wymienionymi wyżej wielkościami, przedstawiono w sposób poglądowy na rys. 1.



Rys. 1. Ilustracja rodzajów wilgoci

Istotny wpływ na przebieg procesu suszenia ma budowa wewnętrzna ciał stałych poddawanych temu procesowi. Z tego względu materiały suszone dzieli się na 3 grupy:

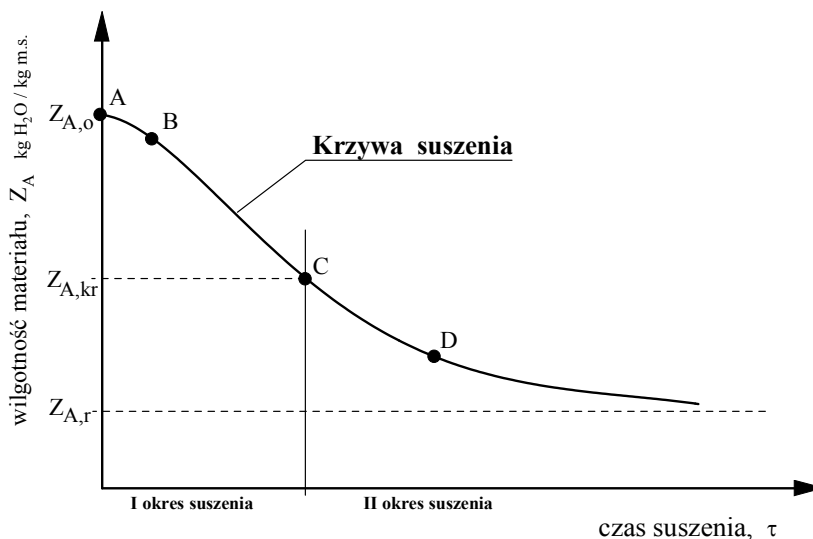
- ciała koloidalne - które w procesie suszenia wyraźnie zmieniają swoje wymiary liniowe (kurczą się) zachowując właściwości elastyczne (np. żelatyna);
- ciała kapilarno-porowate - które podczas suszenia stają się kruche i nieznacznie kurczą się (np. wilgotny piasek, niektóre materiały ceramiczne);
- ciała kapilarno-porowate koloidalne - które pęcznieją podczas pochłaniania wilgoci zachowując cechy elastyczności (np. drewno, karton, skóra).

Z budową wewnętrzną materiałów suszonych związane są bezpośrednio formy występowania w nim wilgoci. Do form tych można zaliczyć:

- wilgoć związaną chemicznie - poprzez jony wodorotlenkowe (OH^-) lub w formie krystaloidów (związek chemiczny $\cdot n \text{H}_2\text{O}$);
- wilgoć związaną adhezyjnie - siłą adhezji (przylegania) pomiędzy cząstkami cieczi a cząstkami ciała stałego;
- wilgoć kapilarną - utrzymywaną w kapilarach siłą napięcia powierzchniowego;

- wilgoć osmotyczną - zawartą w zamkniętych porach materiału, do których przedostaje się ona na drodze osmozy.

Przebieg procesu suszenia dogodnie jest analizować na podstawie krzywych kinetycznych. Na rys. 2 przedstawiono krzywą suszenia, czyli obraz zmian wilgotności bezwzględnej materiału w trakcie trwania procesu usuwania z niego wilgoci. Z rysunku tego wynika, że po okresie wstępnym w którym ma

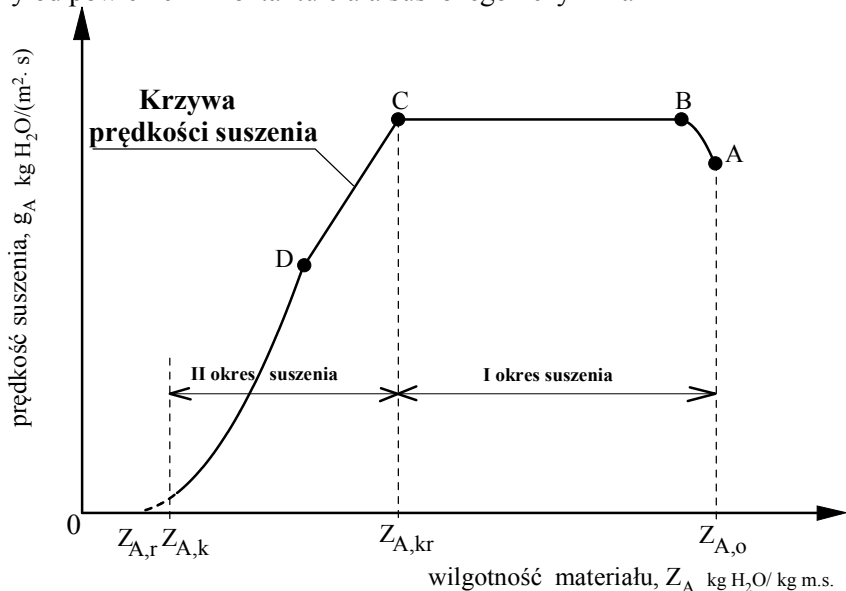


Rys. 2. Krzywa suszenia dla warunków ustalonych

miejsce podgrzewanie wprowadzonego do suszarki materiału o wilgotności początkowej $Z_{A,0}$ (odcinek AB), rozpoczyna się okres jednostajnego zmniejszania wilgotności materiału (odcinek BC). Po przekroczeniu punktu C na powierzchni materiału zaczynają pojawiać się „suche plamy” i zmiany wilgotności w czasie nie są już jednostajne. Punkt C nosi nazwę pierwszego punktu krytycznego, a odpowiadającą mu wilgotność nazywa się wilgotnością krytyczną. Wartości tej wilgotności, jako parametru charakterystycznego dla danego materiału, podaje literatura, np. [1]. Wraz z dalszym upływem czasu, zmiany wilgotności są coraz to mniejsze. Przekroczony zostaje na krzywej punkt D (drugi punkt krytyczny), który odpowiada całkowitemu usunięciu wilgoci z powierzchni, a dalej krzywa suszenia zbliża się asymptotycznie do wartości wilgotności równowagowej.

Druga z krzywych kinetycznych, to przedstawiona na rys. 3 krzywa prędkości suszenia. Prędkość suszenia definiowana jest jako ilość wilgoci odprowadzanej z materiału o określonej powierzchni w jednostce czasu, stanowi zatem gęstość strumienia masowego wody. Dla określenia ilości usuwanej wilgoci można

posłużyć się oceną zmian wilgotności bezwzględnej materiału w czasie. Pamiętając, że prędkość suszenia jest odnoszona do masy materiału suchego oraz, że zmniejsza się z upływem czasu, a także, że ilość usuwanej wilgoci zależy od powierzchni kontaktu ciała suszonego i czynnika



Rys. 3. Krzywa prędkości suszenia dla warunków ustalonych

suszącego, równanie opisujące prędkość suszenia można zapisać w postaci

$$g_A = - \frac{m dZ_A}{F dt} \quad (3)$$

gdzie: g_A - gęstość strumienia masy wilgoci (prędkość suszenia), $\text{kg H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

m - masa materiału suchego, kg m.s. ;

Z_A - wilgotność właściwa materiału, $\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg m.s.}$;

F - powierzchnia materiału suszonego, m^2 ;

τ - czas, s .

Jak wynika z przebiegu krzywej przedstawionej na rys. 3, po podgrzaniu materiału w komorze suszarki (odcinek AB), następuje okres stałej prędkości suszenia (odcinek BC), który kończy się w momencie osiągnięcia przez materiał wilgotności krytycznej $Z_{A,kr}$. Okres ten nosi nazwę I okresu suszenia, bądź też okresu stałej prędkości suszenia, a wilgoć usuwana jest jedynie z powierzchni materiału. Po utworzeniu się na powierzchni „suchych plam”, wilgoć transportowana jest w tych miejscach z głębszych warstw materiału, co powoduje zwiększenie oporów ruchu masy, a tym samym, zmniejszenie

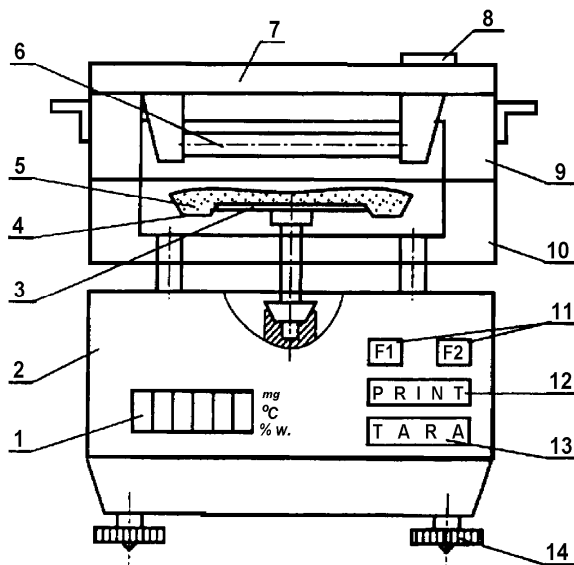
prędkości suszenia. Po przekroczeniu punktu D, wilgoć usuwana jest jedynie z wnętrza materiału. Okres w którym prędkość suszenia zmniejsza się nazywamy II okresem suszenia, a dokładny kształt krzywej w tym zakresie jest zależny w dużym stopniu od budowy wewnętrznej ciała suszonego. Punkt końcowy na krzywej prędkości suszenia odpowiada wilgotności równowagowej $Z_{A,r}$, lecz w praktyce proces kończy się po osiągnięciu przez materiał założonej wilgotności końcowej $Z_{A,k}$.

Trzecim typem krzywych kinetycznych są tzw. krzywe temperaturowe pozwalające na obserwację zmian temperatury powierzchni i wnętrza materiału suszonego w zależności od jego wilgotności właściwej.

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

W niniejszym ćwiczeniu, do badania przebiegu procesu suszenia wykorzystywana jest wagosuszarka. Jest to urządzenie składające się z ogrzewanej radiacyjnie komory suszarniczej, zamontowanej na elektronicznej wadze analitycznej. Takie rozwiązanie pozwala w sposób ciągły obserwować zmiany masy materiału suszonego w trakcie trwania procesu usuwania wilgoci.

Schemat wagosuszarki przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat budowy wagosuszarki WS 30

1 - wyświetlacz cyfrowy, 2 - waga WPE 300, 3 - szalka wagi, 4 - komora suszenia, 5 - materiał suszony, 6 - promiennik ciepła, 7 - pokrywa z otworem wentylacyjnym, 8 - wyłącznik zasilania, 9 - obudowa uchylna, 10 -

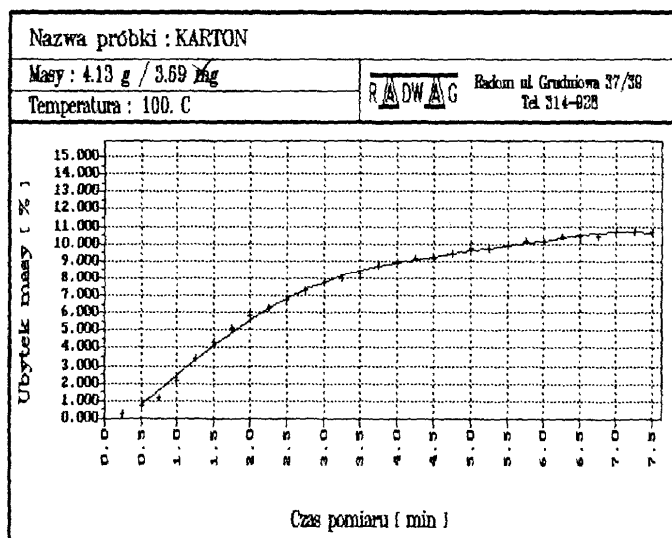
obudowa stała, 11 - przyciski funkcyjne, 12 - przycisk wydruku, 13 - przycisk tarowania, 14 - pokrętła poziomujące

Maksymalna masa próbki poddawanej suszeniu wynosi 30g, a temperaturę suszenia można regulować w zakresie (50÷140) °C. W trakcie pracy wagosuszarki, na wyświetlaczu cyfrowym odczytywać można procentowy ubytek masy materiału suszonego, a tym samym określać ilość usuwanej wilgoci, zgodnie z równaniem

$$m_A = m_{m.w.} \left(1 - \frac{\% \text{ mas}}{100} \right) \quad (4)$$

gdzie: $m_{m.w.}$ - początkowa masa materiału wilgotnego, kg.

Istnieje również możliwość współpracy wagosuszarki z drukarką (na którą wprowadzane są na bieżąco wyniki pomiarów) lub też z komputerem klasy PC. W przypadku współpracy z komputerem, na ekranie monitora kreślony jest wykres obrazujący ubytek masy badanej próbki materiału w funkcji czasu suszenia. Wykres uzupełnić można informacjami co do rodzaju materiału, początkowej i końcowej (po wysuszeniu) masy próbki, a także temperaturze procesu. Pomiar kończy się automatycznie, w chwili masa materiału suszonego przestaje ulegać zmianie. Program komputerowej obsługi wagosuszarki umożliwia przybliżenie uzyskanych wyników wielomianem aproksymacyjnym stopnia od 1 do 9. Przykładowy wykres uzyskany na ekranie monitora przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zmiana masy próbki kartonu w trakcie jej suszenia w wagosuszarce

Ponieważ wagosuszarka określa ubytek masy materiału suszonego a nie zmiany jego wilgotności właściwej, to dla sporządzenia krzywych kinetycznych suszenia należy dokonać przeliczenia

$$Z_A = \frac{m_{m.w.}}{m_{m.s.}} \left(1 - \frac{\% \text{ mas}}{100} \right) \approx \frac{m_p}{m_k} \left(1 - \frac{\% \text{ mas}}{100} \right) \quad (5)$$

gdzie: m_p , m_k - masa początkowa i końcowa badanej próbki.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

Wykorzystując wagosuszarkę w celu przeprowadzenia pomiarów zmian masy materiału suszonego w czasie, a tym samym określenia zmian jego wilgotności, należy:

- załączyć urządzenie wyłącznikiem sieciowym - na wyświetlaczu pojawi się liczba <15.00> malejąca do zera, oznaczająca czas stabilizacji termicznej wagi;
- po odliczeniu czasu stabilizacji termicznej (gdy na wyświetlaczu wagi pojawi się <dE1>), wcisnąć przycisk wyboru urządzenia współpracującego (F1 - drukarka, F2 - komputer) i zatwierdzić wybór przyciskiem F1. (wskazanie

- <DE1> oznacza współpracę z komputerem). Wybrać współpracę z komputerem;
- c) po ukazaniu się na wyświetlaczu <LOAD> i po upewnieniu się, że wewnątrz komory suszarniczej znajduje się szalka wagi, wcisnąć przycisk **TARE**;
 - d) wyjąć z komory suszarniczej szalkę wagi, umieścić na niej badaną próbkę i ponownie umieścić w komorze suszarniczej - na wyświetlaczu pokaże się masa netto próbki;
 - e) w celu ustalenia temperatury suszenia wcisnąć przycisk F1. Na wyświetlaczu pokaże się <C50> - wartość temperatury można zmieniać w zakresie (50÷140) °C wciskając przycisk F2;
 - f) wciśnięcie F1 zatwierdza ostatni wybór temperatury oraz umożliwia ustawienie czasu próbkowania, na wyświetlaczu pojawi się <SEC5.0> - wciskając F2 można ustawić czas próbkowania co 5, 10, 15 oraz 20 sekund;
 - g) wciśnięcie F1 zatwierdza ostatni wybór czasu próbkowania, na wyświetlaczu pojawi się napis <READY>, wagosuszarka jest gotowa do pracy;
 - h) uruchomić program **WAGA.EXE**. (C:/WAGA/SUSZENIE/...) na współpracującym z wagosuszarką komputerze;
 - i) uruchomić program uaktywniając w nim opcję **Start**;
 - j) uruchomić wagosuszarkę wciskając **F1** (na panelu sterowania wagosuszarki);
 - k) po zakończeniu pomiaru wagosuszarka wyłącza się samoczynnie, a na wyświetlaczu wagi pojawi się masa końcowa próbki;
 - l) program komputerowy przechodzi do procedury analizy danych;
 - m) wykorzystując opcje programu obsługujące utworzony na ekranie monitora wykres, znaleźć postać wielomianu aproksymującego otrzymany zbiór punktów doświadczalnych;
 - n) na podstawie wielomianu i równania (5) wyznaczyć wilgotność właściwą badanej próbki w kolejnych odstępach czasu trwania suszenia.
 - o) wyniki zanotować w poniższej tabeli.

Suszenie ciała stałego

Materiał suszony:

Powierzchnia próbki materiału suszonego: $F = \dots \text{ m}^2$

Masa materiału przed suszeniem: $m_p = \dots \text{ g}$

Masa materiału wysuszonego: $m_k = \dots \text{ g}$

Temperatura suszenia: °C

Współczynniki wielomianu $\Delta m = A + B t + C t^2 + D t^3 + \dots$

A=..... B=..... C=..... D=.....

E=..... F=..... G=..... H=.....

czas suszenia próbki	ubytek masy próbki	wilgotność właściwa próbki
min	%	kg H ₂ O/kg m.s.
0,5		
1,0		
1,5		
....		

p) Dla przeprowadzenia powtórnych pomiarów należy powtórzyć czynności opisane w pkt. b) ÷ j).

Uwaga. W przypadku suszenia materiału rozdrobnionego (proszku lub granulatu), jako powierzchnię z której usuwana jest wilgoć można przyjąć pole zewnętrznej powierzchni całej warstwy próbki po stronie czynnika suszącego. Dogodnie jest zatem suszyć materiał rozdrobniony w specjalnie uformowanym płaskim naczyniu otwartym (pudełku) o znanych wymiarach, umieszczonym wraz z próbką na szalce wagi. Tarowanie wagi należy wtedy przeprowadzić wraz z umieszczonym na szalce naczyniem.

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

1. Zastępując różniczki w równaniu (3) różnicami, określić prędkość suszenia próbki w kolejnych odstępach czasu trwania procesu.
2. Wykreślić krzywą suszenia dla badanej próbki, jak na rys. 2.
3. Wykreślić krzywą prędkości suszenia dla badanej próbki, jak na rys. 3.
4. Na podstawie analizy powstałych wykresów określić wartość wilgotności krytycznej badanej próbki.
5. Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, skrypt PO nr 189, Opole 1996
 [2] STRUMIŁŁO CZ.: Podstawy teorii i techniki suszenia, WNT W-wa 1983

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Istota procesu suszenia i rodzaje suszarek.

2. Parametry charakteryzujące czynnik suszący.
3. Parametry charakteryzujące materiał suszony.
4. Charakterystyka pierwszego i drugiego okresu suszenia.
5. Związki pomiędzy budową wewnętrzną materiałów suszonych, sposobem wiązania w nich wilgoci a przebiegiem suszenia.