



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



WYKONAWCA



innotech
4life

Innovations that change lives.



Aparatura i technologia w inżynierii żywności

Instrukcje do ćwiczeń z wprowadzeniem teoretycznym

Część 1

Autorzy:

dr hab. Jarosław Wyrwisz, prof. SGGW
prof. dr hab. Marcin Kurek

Projekt

*Modyfikacja programu studiów II stopnia na kierunku Dietetyka w Wyższej Szkole Inżynierii i Zdrowia
dofinansowany ze środków Unii Europejskiej z Programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju
Społecznego 2021-2027 (FERS)*



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Spis treści

BLOK 1. Rozdrabnianie i klasyfikacja cząstek.....	3
BLOK 2. Mieszanie i kształtowanie układów rozdrobnionych.....	11
BLOK 3. Operacje cieplne – suszenie i obróbka cieplna.....	19



BLOK 1. Rozdrabnianie i klasyfikacja cząstek

Rozdrabnianie jest jednym z podstawowych procesów jednostkowych stosowanych w technologii żywności, mającym na celu zwiększenie powierzchni właściwej materiału oraz uzyskanie pożądanej struktury produktu. Proces ten polega na mechanicznym podziale ciał stałych lub kropelek cieczy na mniejsze fragmenty, przy wykorzystaniu różnych mechanizmów – ściskania, uderzania, tarcia, ścinania czy rozrywania.

Rozdrobnienie surowca zachodzi zawsze wtedy, gdy działające na niego siły zewnętrzne przekroczą jego odporność mechaniczną, czyli wytrzymałość na pękanie, ściskanie, ścinanie lub rozciąganie. Materiał ulega rozdrobnieniu, gdy energia dostarczona z zewnątrz jest większa niż energia potrzebna do zniszczenia jego struktury. Przykładane siły powodują inicjację mikropęknięć, a następnie ich propagację przez całą cząstkę. Gdy suma tych obciążeń przekroczy wytrzymałość danego surowca – następuje jego dezintegracja. Naturalne niedoskonałości materiału (pęcherzyki powietrza, różnice gęstości, wiązań) są miejscem inicjacji pęknięć. Im więcej mikroporów i nieregularności, tym mniejszej energii potrzeba do rozdrobnienia. Na przebieg procesu rozdrabniania, a tym samym na dobór metody rozdrabniania mają wpływ różne czynniki, głównie wilgotność, temperatura, plastyczność i kruchość oraz w przypadku cieczy – lepkość.

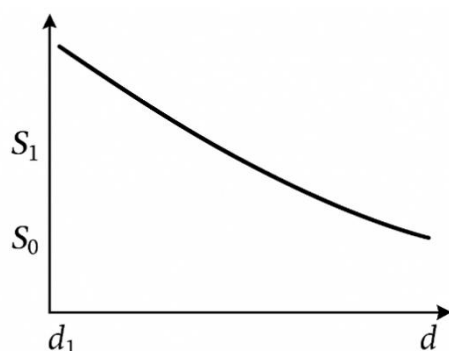
Procesy rozdrabniania wymagają użycia dużych nakładów energii. Energetyczny opis procesu rozdrabniania opiera się na trzech klasycznych prawach: Kicka, Rittingera i Bonda, które wiążą zapotrzebowanie energii z rozmiarem cząstek:

- prawo Rittingera zakłada, że energia jest proporcjonalna do nowo powstałej powierzchni właściwej (rys. 1).
- prawo Kicka – energia rozdrabniania (E_K) jest proporcjonalna do względnej zmiany wymiaru cząstki. Energia potrzebna do rozdrobnienia jest taka sama, jeśli materiał zmniejszy się o tę samą proporcję, niezależnie od wielkości cząstek.

$$E_K = C_K \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right); \text{ gdzie}$$

d_1 – początkowy rozmiar cząstek; d_2 – końcowy rozmiar cząstek; C_K – współczynnik Kicka zależny od materiału.

- prawo Bonda – energia zależy od zmiany odwrotności pierwiastka z rozmiarów cząstek. Bond uznał, że mielenie ma charakter przejściowy między kruszeniem a bardzo drobnym mieleniem.



$$E_R \propto (S_1 - S_0)$$

S_0 – powierzchnia początkową materiału przed rozdrabnianiem,

S_1 – powierzchnia po rozdrobnieniu (większą, bo cząstki są liczniejsze i mniejsze).

Punkt d_1 pokazuje większy rozmiar cząstek przed rozdrabnianiem, a w miarę przesuwania się po osi w prawo wielkość d maleje.

Rys. 1. Redukcja wielkości cząstek zgodnie z prawem Rittingera.

W zależności od rodzaju materiału i celu rozdrabniania stosuje się różne urządzenia: młyny kulowe, młyny młotkowe, młyny nożowe, rozdrabniacze walcowe oraz homogenizatory (dla cieczy):

- **młyn kulowy** – stosowany do bardzo drobnego rozdrabniania ciał stałych, np. zbóż, przypraw czy pigmentów. Zasada działania polega na obracaniu się bębna wypełnionego kulami stalowymi lub ceramicznymi. Podczas obrotu bębna kule unoszone są dzięki tarcia, a następnie spadają, uderzając i ścierając materiał znajdujący się między nimi. Energia kinetyczna kul powoduje zgniatanie i tarcie cząstek między sobą a ścianami bębna. Przy niższych prędkościach kule zsuwają się po sobie, dominują siły tarcia i ścierania. Przy wyższych prędkościach kule unoszą się wyżej i spadają z większą energią, zwiększając udział udaru. Na przebieg procesu ma wpływ:
 - czas mielenia – im dłuższy proces, tym mniejsza średnia wielkość cząstek (jednak po pewnym czasie tempo mielenia maleje).
 - udział kul w objętości bębna (najczęściej stosuje się 30–50% objętości zasypu),
 - zróżnicowanie wielkości kul (większe kule powodują wyzwolenie dużej ilości energii uderzeń – stosowane zazwyczaj do rozdrabniania wstępnego; mniejsze kule są stosowane do dokładnego mielenia i wygładzania),
 - prędkość obrotowa bębna - istnieje tzw. prędkość krytyczna, przy której kule „przyklejają się” do ścianek i nie mielą. Pracuje się zwykle na 60–85% tej wartości.
- **młyn młotkowy** - ich popularność wynika z prostej konstrukcji, dużej wydajności oraz zdolności do rozdrabniania szerokiej gamy surowców – od ziaren zbóż, przez suszone owoce, po tworzywa i minerały. Proces rozdrabniania zachodzi w wyniku trzech mechanizmów: 1) uderzenia – młotki poruszające się z dużą prędkością uderzają w cząstki materiału, powodując ich pękanie i kruszenie; 2) ścinanie – krawędzie młotków działają jak noże (zwłaszcza przy materiałach włóknistych); 3) tarcie – materiał ociera się o sito i elementy komory, co dodatkowo zmniejsza wielkość cząstek. Proces odbywa się w komorze roboczej z gładkimi ściankami lub z elementami żłobionymi, które zwiększają efektywność uderzeń. W komorze roboczej znajduje się wirnik z młotkami, które mogą być przymocowane do ramion wirnika w sposób ruchomy lub na sztywno. Na obwodzie



komory znajduje się sito (kosz sitowy), którego otwory decydują o wielkości powstających cząstek podczas rozdrabniania.

- **młyn nożowy** – wykorzystywany głównie do rozdrabniania produktów włóknistych lub elastycznych (warzywa, mięso, odpady organiczne). To maszyna służąca do rozdrabniania surowców poprzez cięcie, ścinanie i rozrywanie. Młyn nożowy wykorzystuje ostrza tnące umieszczone na wirniku w komorze roboczej, które obracając się z dużą prędkością, przecinają materiał podawany do komory rozdrabniania. Materiał jest cięty aż do momentu, gdy jego wymiar osiągnie wielkość umożliwiającą przejście przez sito wylotowe znajdujące się w dnie komory. Zazwyczaj stosowane są noże proste, zakrzywione, ząbkowane w ilości 2 – 4 sztuk. W dnie komory umieszczane jest sito decyduje o końcowej granulacji produktu.
- **młyn walcowy** – wykorzystywany w przemyśle spożywczym do rozdrabniania pszenicy i innych zbóż (system przemiałowy w młynach mąki), słodu w browarnictwie, kasz, płatków, nasion oleistych, cukru (walce cukrownicze), kakao. Materiał podawany jest grawitacyjnie między dwa walce obracające się w przeciwnych kierunkach. Do zmniejszenia wielkości cząstek materiału dochodzi w wyniku ściskania (kompresji), zgniatania między walcami, tarcia i ścierania (gdy walce mają różne prędkości lub powierzchnia jest rowkowana), łamania materiału kruchego, czasem również niewielkiego rozrywania (materiał włóknisty, ciągliwy). Stopień rozdrobnienia zależy od szczeliny między walcami (gap) oraz prędkości obrotowych walców.
- **homogenizator** – służy do ujednolodzenia układów wielofazowych, czyli rozdrabniania i równomiernego rozpraszania cząstek fazy rozproszonej (stałych, ciekłych lub gazowych) w fazie ciągłej. W efekcie powstaje stabilna, drobno zdyspergowana emulsja, zawiesina lub pasta o jednorodnej strukturze. Stabilizacja struktury produktu podczas homogenizacji wynika z ograniczenia sedymentacji, koalescencji, kremowania lub rozwarstwiania. Proces homogenizacji odbywa się poprzez działanie sił hydrodynamicznych, w tym:
 - silnych naprężeń ścinających,
 - kawitacji (pękania pęcherzyków),
 - turbulencji,
 - uderzeń strumieni.

Najczęściej stosowane w przemyśle spożywczym homogenizatory to:

- homogenizatory nożowe (typu rotor–stator) – obracający się rotor (ostrza) wciąga produkt w szczelinę między statorem a rotorem, w szczelinie wywoływane są bardzo duże naprężenia ścinające, które powodują, że produkt jest rozrywany, cięty i mieszany. Stosowany do rozdrabniania tkanki roślinnej/zwierzęcej, przygotowanie próbek do analiz, tworzenia emulsji typu O/W lub W/O,
- homogenizatory wysokociśnieniowe – produkt podawany przez pompę przechodzi przez zawór homogenizujący pod bardzo wysokim ciśnieniem (10–250 MPa), w którym cząstki są intensywnie rozdrabniane na wielkości od 0,1 do 10 μm w wyniku gwałtownego rozprężenia następuje kawitacja, uderzenie i ścinanie cząstek. Główne zastosowanie w przemyśle spożywczym: rozdrabnianie kuleczek tłuszczu w mleku, produkcja sosów, koncentratów, emulsji spożywczych, nanodyspersji.



- homogenizatory ultradźwiękowe (sonikatory) – końcówka ultradźwiękowa generuje fale o wysokiej częstotliwości (20–40 kHz), które w cieczach powodują tworzenie się i zapadanie pęcherzyków kawitacyjnych, a gwałtowne implozje prowadzą do silnych naprężeń ścinających i rozdrabniania cząstek.

Analiza efektów rozdrabniania

Opiera się na pomiarze rozkładu wielkości cząstek, który określa udział poszczególnych frakcji w materiale. Do klasyfikacji i oceny rozdrobnienia stosuje się analizę sitową, polegającą na przesiewaniu materiału przez zestaw sit o malejącej średnicy oczek. Ilość materiału zatrzymanego na każdym sicie pozwala obliczyć udział procentowy danej frakcji i sporządzić krzywą rozkładu uziarnienia. Uzyskany rozkład ziarnowy umożliwia obliczenie parametrów takich jak: średnia średnica cząstek, wskaźnik rozdrobnienia, czy powierzchnia właściwa.

Instrumentalny pomiar wielkości i kształtu cząstek

W instrumentalnej analizie wielkości i kształtu cząstek, cząstka jest dyskretną częścią substancji, której wymiary rozpatrywane są w skali wielkości od nanometrów do kilku milimetrów. Wielkość cząstek i porowatość zależą od zastosowanych procesów technologicznych przede wszystkim procesu rozdrabniania oraz stopnia aglomeracji cząsteczek. Najczęstsze rodzaje materiałów składających się z cząstek to: proszki i granulaty, zawiesiny, emulsje, piany oraz aerozole i spraye.

W przypadku określania wielkości cząstek proszku najczęściej stosowane są metody:

- **analiza sitowa** – polega na przesiewaniu 100 g proszku przez zestaw sit (180 μm , 150 μm , 106 μm , 75 μm , 63 μm oraz 45 μm), a następnie określeniu mas i udziałów procentowych poszczególnych frakcji oraz wyznaczeniu histogramu, krzywej sumarycznej oraz histogramu zestandaryzowanego (PN-EN 24497, ISO4497),
- **analiza sedymentacyjna** – polega na określeniu wielkości cząstek w oparciu o wykorzystanie zjawiska opadania cząstek w cieczy – tzw. zjawisko sedymentacji. Proces sedymentacji charakteryzuje się tym, że cząstka w początkowym etapie opada ruchem przyspieszonym, a następnie wraz ze zwiększeniem prędkości opadania wzrastają opory ruchu cząstki do czasu ustalenia się równowagi pomiędzy siłą ciężkości a siłą oporu ośrodka – cząstka wówczas porusza się ruchem jednostajnym. Im większe (cięższe) cząstki proszku, tym szybciej opadają w cieczy sedymentacyjnej (ISO 10076),
- **metody dyfrakcyjne** – wykorzystują efekt dyfrakcji promieni świetlnych, rentgenowskich lub lasera na cząstkach proszku znajdujących się w zawiesinie cieczy lub gazu (np. sprężonego powietrza). W trakcie pomiaru rejestrowane jest natężenie oraz wielkość załamania promieni lasera, na podstawie, których określany jest udział i wielkość cząstek proszku. Zakres tej metody wynosi od 1,5 μm do 20 μm ,
- **metody wykorzystujące przepływ prądu** – pomiar polega na wykorzystaniu zmiany oporności cząstek układu zanurzonych w cieczy przewodzącej prąd elektryczny. Opadające cząstki pomiędzy elektrodami powodują zmianę oporności układu, co skutkuje powstaniem impulsu elektrycznego, który jest proporcjonalny do objętości cząstek.



Zakres tej metody wynosi od 0,4 µm do 1200 µm przy współczynniku cząstki małej do dużej w suspensji wynoszącej 1:30.

- **analiza obrazu mikroskopowego** – cząstki są rejestrowane przez mikroskop z automatycznym stolikiem, zintegrowany z komputerem z oprogramowaniem do rejestrowania i analizowania wielkości i kształtu cząstek oraz z modułem do dyspersji cząstek na szkiełku pomiarowym. Podczas skanowania cząstek zbierany jest obraz każdej cząstki, a następnie za pomocą odpowiednich algorytmów programowych separuje pojedyncze cząstki i mierzy ich parametry (długość, szerokość, promień itp.) oraz oblicza wielkości pochodne (zaokrąglenie, wypukłość, wydłużenie itp.). Do analizy wielkości i kształtu cząstek brany jest pod uwagę dwuwymiarowy (2D) obraz cząstki 3D.

W związku, że cząstki rzeczywiste mają nieregularny kształt (nie są idealnymi kulami), porównywanie ich bez sprowadzenia do jednej wielkości geometrycznej byłoby niemożliwe. Takim parametrem jest **średnica równoważnego koła** (CE – circularity equivalent diameter). Jest to średnica takiego koła, którego pole powierzchni jest równe polu powierzchni rzutowanej na płaszczyznę cząstki. Dzięki temu można porównywać wyniki między różnymi metodami, korzystać z tabel i norm granulometrycznych, przedstawiać rozkłady wielkości cząstek w sposób standardowy.

Do analizy wielkości cząstek populacji cząstek stosuje się:

- średnią arytmetyczną, medianę, modę,
- średnią powierzchniową (średnia Suter'a, $D[3,2]$),
- średnią objętościową (średnia De Broucker'a, $D[4,3]$).

$$D[3,2] = \frac{\sum d^3}{\sum d^2}$$

$$D[4,3] = \frac{\sum d^4}{\sum d^3}$$

W celu opisu rozkładu wielkości cząstek w populacji stosuje się następujące parametry:

- $D[0,1]$ - wielkość cząstek, poniżej której znajduje się 10% cząstek próbki,
- $D[0,5]$ - wielkość cząstek, poniżej i powyżej której znajduje się 50% cząstek próbki,
- $D[0,9]$ - wielkość cząstek, poniżej której znajduje się 90% cząstek próbki.

Kształt cząstek proszku może być wyznaczany za pomocą metod sensorycznych (metoda opisowa) lub matematycznych czy instrumentalnych. Dokładniejszym sposobem określenia kształtu cząstek są metody matematyczne, które opierają się na analizie konturów cząstki.

Do najważniejszych parametrów związanych z kształtem cząstek należą:

- kolistość (stosunek pola zarejestrowanego obrazu cząstki do kwadratu obwodu obiektu),
- wypukłość (stosunek obwodu napiętej nici opasającej cząstkę do obwodu obrazu cząstki),
- wydłużenie (1-iloraz szerokości i długości cząstki).

Rozdrabnianie i klasyfikacja cząstek mają kluczowe znaczenie dla jakości produktów spożywczych – wpływają m.in. na teksturę, smakowość, szybkość reakcji chemicznych, rozpuszczalność i stabilność produktów proszkowych. Właściwe dobranie warunków procesu pozwala zoptymalizować zarówno efektywność energetyczną, jak i pożądane właściwości fizyczne produktu końcowego.

Znajomość zasad rozdrabniania i klasyfikacji cząstek ma kluczowe znaczenie dla technologii żywności, gdyż wpływa na właściwości reologiczne, rozpuszczalność, smakowość, stabilność i wygląd produktu. Odpowiedni dobór urządzenia i parametrów procesu umożliwia



uzyskanie pożądanej struktury przy minimalnym nakładzie energii i utrzymaniu wysokiej jakości surowca.

Cel:

Celem ćwiczenia jest poznanie zasad rozdrabniania, metody analizy sitowej oraz oceny wielkości i kształtu cząstek z wykorzystaniem dynamicznej analizy obrazu mikroskopowego.

Sprzęt i materiały: młyn odśrodkowy nożowy, przesiewacz wibracyjny, waga, próbki materiału, naczynka do odważania, analizator wielkości i kształtu cząstek.

Przebieg ćwiczenia:

1. Rozdrabnianie materiału przy różnej prędkości obrotowej.

Należy po 50 g płatków owsianych rozdrobnić przy użyciu młyna odśrodkowego przy prędkości 5000 rpm (próba P1) i 15000 rpm (próba P2).

2. Przesiewanie na zestawie sit.

Pobrać 20 g proszku próby P1 i przeprowadzić przesiewanie na stosie trzech sit ułożonych w następujący sposób: góra – 300 μm , środek – 200 μm i dół 100 μm . Proces przesiewania prowadzić przez 3 minuty. Po dokładnym wyczyszczeniu sit przeprowadzić przesiewanie dla próby P2.

3. Ważenie frakcji.

Po przesianiu zebrać poszczególne frakcje do indywidualnych naczynek z pokrywkami (uprzednio zważonych). Zważyć każdą frakcję, wynik zanotować w tabeli.

4. Pomiar wielkości i kształtu cząstek z użyciem aparatu Morpology G3S.

Wybrać minimum 2 takie same frakcje dla próby P1 i P2 i dokonać pomiaru wielkości i kształtu cząstek na aparacie Morpology G3S.

Parametry pomiaru:

- minimalna liczba cząstek – 5000,
- włączona jednostka dyspersji próbki SDU (ciśnienie – 2 bar, czas – 20 ms, czas osiadania – 120 s),
- natężenie oświetlenia 80%,
- powiększenie na obiektywie 5x,
- załączona funkcja Z-stacking,
- wstępne ustawienie threshold na wartość 170,
- zaznaczyć centralne obszar skanowania.

**Opracowanie wyników:**

1. Wyniki odnotowanej masy frakcji wpisać do tabeli poniżej.
2. Policzyc udział poszczególnych frakcji (U).

$$U = \frac{m_{\text{frakcji}}}{m_{\text{próby na wejściu}}} \cdot 100\%$$

3. Wykonać wykres krzywej przesiewu jako zależność przejścia skumulowanego (PS) od wielkości cząstek.

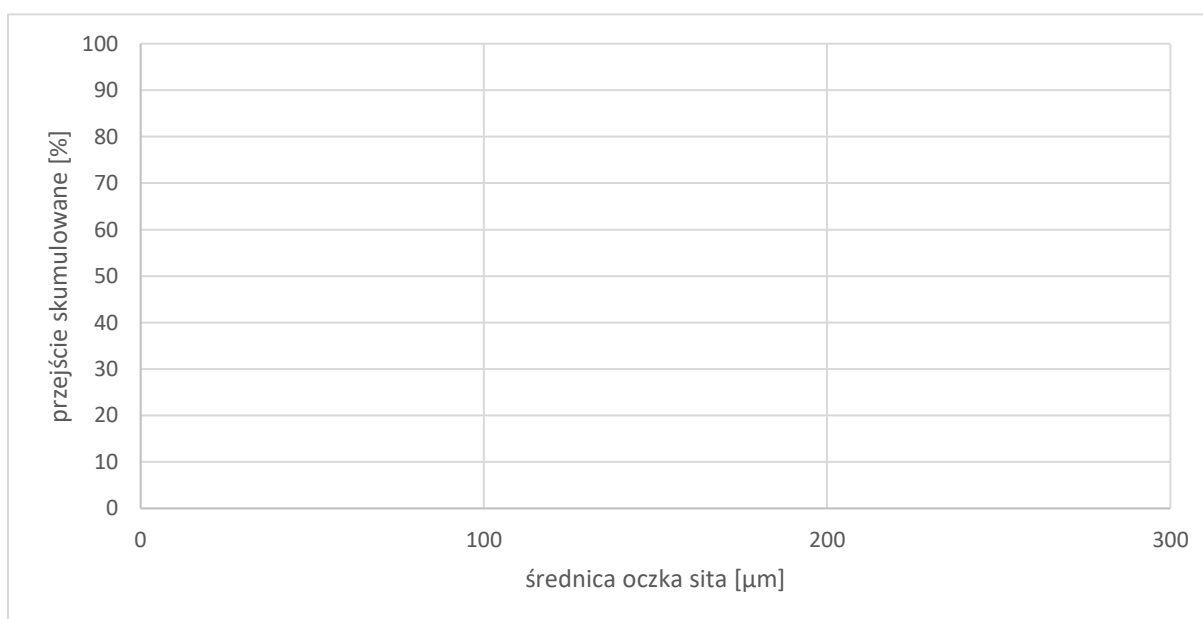
$$PS = 100 - \text{udział frakcji zatrzymanej na sicie / sitach}$$

Np. dla sita 200 μm

$$PS_{200} = 100 - (U_{>300} + U_{>200})$$

Tabela – masa frakcji, udział frakcji i przejście skumulowane

	Próba P1			Próba P2		
	Masa [g]	U [%]	PS [%]	Masa [g]	U [%]	PS [%]
Próba na wejściu		-	-		-	-
Frakcja > 300						
Frakcja > 200						
Frakcja > 100						
Frakcja < 100						



4. Zestawić wyniki z analizy instrumentalnej

Projekt

Modyfikacja programu studiów II stopnia na kierunku Dietetyka w Wyższej Szkole Inżynierii i Zdrowia
dofinansowany ze środków Unii Europejskiej z Programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju
Społecznego 2021-2027 (FERS)



Tabela – wielkość i kształt cząstek

	<i>Próba P1</i>			<i>Próba P2</i>		
	<i>D[3,2]</i>	<i>D[4,3]</i>	<i>Kolistość</i>	<i>D[3,2]</i>	<i>D[4,3]</i>	<i>Kolistość</i>
Fracja > 300						
Fracja > 200						
Fracja > 100						
Fracja < 100						

Podsumowanie – należy wykazać, które frakcje najbardziej różnią się między metodami, jak zmiana prędkości obrotowej wpłynęła na rozdrobnienie, czy analiza sitowa pokrywa się z Morfology G3S pod względem trendów, jak wygląda skuteczność analizy sitowej w odniesieniu do wyników analizy instrumentalnej.

Pytania kontrolne:

1. Prawa energetyczne rozdrabniania?
2. Czym różni się mielenie od homogenizacji?
3. Jak oblicza się średnią średnicę cząstek?



BLOK 2. Mieszanie i kształtowanie układów rozdrobnionych

Mieszanie jest jednym z podstawowych procesów jednostkowych stosowanych w technologii żywności, którego celem jest uzyskanie jednorodnej mieszaniny z dwóch lub większej liczby składników. Jednorodność ta może dotyczyć zarówno układów sypkich (proszków, granulatów), jak i układów ciekłych oraz półpłynnych. Osiągnięcie pożądanej jakości mieszanki wymaga odpowiedniego doboru typu mieszalnika, parametrów pracy oraz czasu mieszania, a także właściwej organizacji procesu technologicznego.

W technologii żywności najczęściej stosuje się **mieszanie mechaniczne**, które polega na wykorzystaniu elementów mieszających – łopatek, ślimaków, mieszadeł wstęgowych, bębnow obrotowych czy mieszadeł planetarnych. Mechaniczne działanie urządzeń powoduje przemieszczanie, rozdzielanie i ponowne łączenie cząstek lub warstw materiału. W przypadku cieczy wpływa na konwekcję oraz turbulencje, które przyspieszają wyrównywanie stężeń. Proces ten jest kluczowy przy produkcji ciast, jogurtów, sosów, mieszanek przyprawowych, suplementów diety oraz wielu innych produktów.

Drugim rodzajem mieszania jest **mieszanie pneumatyczne**, wykorzystujące strumień gazu (zwykle powietrza), który powoduje unoszenie i mieszanie cząstek materiału sypkiego. Stosuje się je w przypadku surowców lekkich, podatnych na zbrylanie oraz wymagających delikatnego traktowania, np. w mleku w proszku czy mieszankach napojów instant. Zaletą tej metody jest brak ruchomych elementów mechanicznych, co ogranicza zużycie części oraz zanieczyszczenie produktu.

W przemyśle spotyka się również **mieszanie cieczy o różnej lepkości**, które wymaga właściwego doboru mieszadeł. Dla cieczy niskolepkich stosuje się mieszadła śmigłowe lub turbinowe, generujące intensywne zawirowania. Dla cieczy wysokolepkich – mieszadła kotwicowe, ramowe lub ślimakowe. Ich zadaniem jest minimalizowanie gradientów prędkości i zapewnienie ruchu całej masy produktu, co jest kluczowe przy produkcji kremów, farszów i emulsji spożywczych.

Do grupy procesów mieszania zalicza się również **homogenizację**, która polega na bardzo intensywnym rozdrabnianiu i równomiernym rozpraszaniu fazy zdyspergowanej w fazie ciągłej. Homogenizacja jest szczególnie ważna w produkcji emulsji (np. mleka, śmietanki, napojów roślinnych), gdzie wymagane jest uzyskanie bardzo małych, stabilnych kropli tłuszczu. Choć technicznie różni się od konwencjonalnego mieszania, jej głównym celem pozostaje uzyskanie trwałej, jednorodnej struktury produktu, co czyni ją jednym z kluczowych wariantów tego procesu jednostkowego.

Skuteczność mieszania ocenia się najczęściej na podstawie jednorodności mieszaniny, którą można ilościowo określić poprzez pomiar odchylenia standardowego stężenia składnika wskaźnikowego w pobranych próbkach. Im mniejsze odchylenie, tym proces uznaje się za bardziej efektywny. Wykorzystuje się również wskaźniki zmienności, równomierności oraz testy dyspersji. Ocena jednorodności jest kluczowa szczególnie w przypadku produktów o znaczeniu żywieniowym lub farmaceutycznym, gdzie równomierne rozmieszczenie składników aktywnych wpływa na bezpieczeństwo i jakość produktu.

Drugim ważnym procesem jednostkowym jest **aglomeracja**, polegająca na łączeniu drobnych, często pyłących lub trudno zwilżalnych cząstek w większe, stabilne struktury – aglomeraty. Proces ten odbywa się poprzez oddziaływanie sił adhezyjnych, wprowadzenie



niewielkiej ilości cieczy wiążącej (np. wody, roztworów cukrów), zastosowanie ciepła lub sił mechanicznych. W wyniku aglomeracji uzyskuje się produkt o większej porowatości, stabilności i znacząco lepszych właściwościach użytkowych.

W technologii żywności aglomeracja znajduje szerokie zastosowanie w produkcji proszków instant – takich jak mleko w proszku, kawa rozpuszczalna, kakao czy suplementy żywieniowe. Aglomeraty poprawiają rozpuszczalność, zwilżalność, sypkość i płynność produktów. Dzięki większej porowatości cząstek woda łatwiej wnika do ich wnętrza, co skraca czas rozpuszczania. Aglomeracja minimalizuje również pylenie i segregację cząstek w mieszankach proszkowych.

Proces ten można realizować różnymi metodami: aglomeracją fluidalną, bębnową, mieszarkową lub w granulacjach wysokiego ścinania. Dobór technologii zależy od właściwości surowca, jego wrażliwości na wilgoć i temperaturę, a także od oczekiwanych cech końcowego aglomeratu. Ważnymi parametrami procesu są: wilgotność, temperatura, czas zraszania, wielkość kropli cieczy wiążącej oraz intensywność mieszania.

Mieszanie i aglomeracja są procesami, które w sposób zasadniczy wpływają na jakość fizyczną, funkcjonalną i sensoryczną produktów spożywczych. Odpowiednio prowadzone zapewniają stabilność struktury, jednorodność składu, dobrą rozpuszczalność oraz właściwe właściwości reologiczne, dzięki czemu stanowią podstawę wielu operacji technologicznych w przemyśle żywnościowym.

Formowanie

Po procesach mieszania i wyrobienia masy, kolejnym etapem w wielu technologiach żywności jest **formowanie**, w którym ujednoliconą i uplastycznioną masę otrzymuje określony kształt.

Jednym z najważniejszych sposobów formowania jest **ekstrudowanie**, polegające na przepuszczaniu materiału plastycznego przez matrycę pod wpływem sił ścinających, ciśnienia oraz temperatury.

Formowanie i ekstrudowanie to kluczowe procesy jednostkowe wykorzystywane w technologii żywności, polegające na nadawaniu surowcom określonego kształtu poprzez działanie sił mechanicznych, ciśnienia oraz temperatury. Materiał podawany do ekstrudera jest zazwyczaj plastyczną masą, która pod wpływem kompresji ślimaka i warunków panujących w cylindrze ulega uplastycznieniu, intensywnemu mieszanu, częściowemu odparowaniu wody oraz formowaniu poprzez matrycę o odpowiednim kształcie. Ekstruzja pełni jednocześnie funkcję formowania, wstępnej obróbki cieplnej (*pre-heating*) oraz teksturowania produktu.

W ekstruderze zachodzą równocześnie trzy główne zjawiska: uplastycznienie masy, ogrzewanie (wynikające z tarcia i grzania elektrycznego cylindra) oraz częściowa dehydratacja. Strefy grzewcze cylindra oraz konstrukcja ślimaka są projektowane tak, aby sterować stopniem kompresji, czasem przebywania materiału oraz intensywnością mieszania. Materiał poddawany jest działaniu sił ścinających, które prowadzą do jego rozluźnienia strukturalnego, intensywnego mieszania oraz reorganizacji molekularnej. Zjawiska te są szczególnie istotne w przypadku produktów skrobiowych i białkowych, gdzie ekstruzja prowadzi do zapoczątkowania żelowania skrobi, denaturacji białek oraz powstawania nowych struktur teksturalnych. Parametry procesu – takie jak temperatura cylindra, prędkość obrotowa ślimaka, wilgotność wsadu, ciśnienie w komorze wytłaczania oraz geometria matrycy – decydują o cechach końcowych produktu.



Temperatura wpływa na stopień żelowania skrobi i zmianę struktury białek, co przekłada się na twardość, chrupkość i porowatość ekstrudatu. Prędkość obrotowa ślimaka reguluje intensywność ścinania oraz czas przebywania surowca w strefie uplastyczniania, a tym samym decyduje o poziomie ekspansji (puchnięcia) produktu po opuszczeniu matrycy. Wilgotność wsadu jest jednym z najważniejszych parametrów – zbyt niska powoduje nadmierne tarcie i możliwość przypalania masy, natomiast zbyt wysoka ogranicza ekspansję i prowadzi do powstawania twardych, zbitych ekstrudatów.

Ekstruzję stosuje się szeroko w produkcji płatków śniadaniowych, chrupek, produktów zbożowych ekspandowanych, wegańskich substytutów mięsa, batonów białkowych oraz pasz. Proces ten umożliwia uzyskanie produktów o wysokiej porowatości, chrupkości, trwałości mikrobiologicznej oraz atrakcyjnych właściwościach sensorycznych. Ponadto pozwala na wprowadzanie różnorodnych dodatków funkcjonalnych: witamin, minerałów, błonnika pokarmowego czy białek roślinnych.

Szczególnym przykładem zastosowania ekstruzji w technologii zbóż jest wytłaczanie makaronu. Ciasto makaronowe, przygotowane z semoliny lub mąki pszennej oraz wody, poddawane jest intensywnemu ugniataniu i kompresji wewnątrz cylindra wytłaczarki. W przypadku makaronów podstawowych temperatura procesu jest niższa niż w produkcji chrupek czy przekąsek, ponieważ celem nie jest ekspandowanie produktu, lecz uzyskanie zwartej, elastycznej struktury. Ciasto, o zwykle 28–32% wilgotności, jest doprowadzane do stanu uplastycznienia, co umożliwia nadanie mu formy przez przepuszczenie przez matrycę o określonym wzorze. Różne kształty otworów matrycy pozwalają uzyskać spaghetti, penne, rurki, świderki, muszelki, lasagne i wiele innych form.

Podczas wytłaczania makaronu ważną rolę odgrywa temperatura i kompresja – pozwalają na rozwinięcie struktury glutenowej oraz orientację molekuł skrobiowych, co warunkuje odpowiednią teksturę, sprężystość oraz odporność na rozgotowanie. Po opuszczeniu matrycy produkt jest cięty przez noże rotacyjne na odpowiednią długość, a następnie poddawany procesowi suszenia, który stabilizuje strukturę i wydłuża trwałość. Odpowiednio prowadzone suszenie zapobiega pękaniu i łamliwości makaronu, a także kształtuje jego cechy sensoryczne.

Walcowanie jest procesem jednostkowym polegającym na zmniejszaniu grubości i jednoczesnym zagęszczaniu materiału poprzez jego odkształcanie między obracającymi się w przeciwnym kierunku walcami. Operację tę stosuje się w przemyśle spożywczym głównie do obróbki ciast, mas cukierniczych oraz produktów skrobiowych, w tym ciasta na makarony. Walcowanie pozwala uzyskać jednorodną grubość arkusza, odpowiednią strukturę oraz właściwości mechaniczne materiału, co jest kluczowe dla dalszego formowania.

W przypadku ciasta makaronowego walcowanie pełni kilka istotnych funkcji technologicznych. Po pierwsze, zapewnia równomierne rozmieszczenie składników i dalsze rozwinięcie sieci glutenowej, co poprawia elastyczność i spoistość ciasta. Po drugie, stopniowe zmniejszanie szczeliny między walcami pozwala uniknąć pękania i rozrywania arkusza. Zmniejszenie grubości taśmy oraz kontrolowane zginięcie powodują reorganizację komponentów mąki i częściowe wyrównanie powierzchni, co sprzyja równomiernemu odparowywaniu wody i stabilnej strukturze po suszeniu. Walcowanie minimalizuje również obecność powietrza, co przekłada się na większą jednorodność i mniejsze ryzyko powstawania pęknięć podczas dalszego przetwarzania.



Nowoczesne walcarki stosowane w przemyśle makaronowym mogą być wyposażone w system automatycznej regulacji grubości, urządzenia do podsypywania mąki oraz czujniki kontroli naprężeń w taśmie. Zapewnia to powtarzalność parametrów oraz możliwość precyzyjnego dostosowania grubości wstęgi do wymagań danego typu makaronu.

Ponadto, formowanie produktu może odbywać się poprzez:

1. Formowanie przez odlewanie – płynna lub półpłynna masa (np. czekolada, karmel, żele) jest wlewana do form, gdzie zastyga i przyjmuje kształt matrycy.
2. Formowanie przez prasowanie - masa o odpowiedniej wilgotności i plastyczności jest umieszczana w matrycy i poddawana działaniu wysokiego nacisku.
3. Formowanie przez wycinanie (sztancowanie) – rozwałkowane ciasto lub arkusz masy przecina się wykrojnikami lub nożami, uzyskując powtarzalne kształty. Metoda jest typowa dla ciast kruchych, makaronów wstęgowych, chipsów i placków.
4. Formowanie przez granularki i peletyzację – drobne cząstki materiału są łączone w granulki o jednolitym kształcie i wielkości dzięki działaniu sił mechanicznych i wilgoci. Technika ta jest wykorzystywana w produkcji kasz instant, granulatów białkowych czy składników do mieszanek sypkich.
5. Formowanie przez spienianie ciśnieniowe (ekstrudowanie) – pod wpływem nagłego spadku ciśnienia materiał poddany wcześniej działaniu wysokiej temperatury gwałtownie zwiększa objętość. Stosuje się to w produkcji chrupek, płatków śniadaniowych i snacków ekspandowanych.

Techniki formowania są procesami wysokoenergetycznymi, lecz niezwykle efektywnymi pod względem wykorzystania surowców i kosztów produkcji. Umożliwiają tworzenie innowacyjnych produktów o zróżnicowanej strukturze i składzie odżywczym, przy jednoczesnej kontroli ich tekstury, porowatości i parametrów sensorycznych.

Cel

Zapoznanie się z procesami i efektywnością mieszania oraz z zasadami formowania materiałów plastycznych metodą walcowania i wytłaczania.

Sprzęt i materiały: homogenizator mechaniczny, wytrząsarka laboratoryjna - Vortex, łaźnia ultradźwiękowa, olej, lecytyna, wytłaczarka do makaronu, robot kuchenny z przystawką do makaronu, surowce, waga, termometr.

Przebieg ćwiczenia 1 (badanie efektywności mieszania):

1. Przygotowanie modelowych mieszanin do utworzenia emulsji.

Połączyć wodę destylowaną (z rozpuszczonym błękitem metylowym) z olejem w proporcji 70:30 w falkonie 50 ml tak, aby powstało 40 ml mieszaniny. Odmierzyć 28 ml wody destylowanej z barwnikiem oraz 12 ml oleju roślinnego. Przed właściwym mieszaniem delikatnie wstępnie wymieszać próbkę, aby ustalić jednakowy stan początkowy.



2. Przeprowadzić mieszanie z użyciem różnych metod:
 - A. Wytrząsarka vortex – przy 50% prędkości obrotowej przez 1 min.,
 - B. Wytrząsarka vortex – przy 50% prędkości obrotowej przez 2 min.,
 - C. Homogenizator – przy 5000 rpm przez 2 min.,
 - D. Homogenizator – przy 10000 rpm przez 2 min.,
 - E. Wytrząsarka vortex – przy 50% prędkości obrotowej przez 1 min. + 5 min sonikacji,
 - F. Wytrząsarka vortex – przy 50% prędkości obrotowej przez 2 min. + 5 min sonikacji.

Sonikację przeprowadzić w kąpeli ultradźwiękowej (20 kHz) przez 5 min. W razie wyraźnego ogrzewania próbki – stosować krótkie przerwy.

Po przygotowaniu emulsji pozostawiamy je w temperaturze pokojowej na 1 h. Po tym czasie poddajemy emulsje ocenie stabilności.

3. Ocena stabilności emulsji. Badamy stopień separacji fazy (SF) wodnej od olejowej mierząc wysokość słupa dolnej frakcji (H_{fd}) i odnosimy do wysokości słupa całej objętości emulsji (H). Wysokość słupa wodnej frakcji (H_{fd}) oraz całkowitą wysokość próbki (H) zmierzyć za pomocą linijki lub suwmiarki, przykładając ją do falconu. SF bliski 0% oznacza brak separacji = emulsja stabilna, a bliski 100% oznacza całkowitą separację.

$$SF = \frac{H_{fd}}{H} \cdot 100\%$$

Opracowanie wyników:

Tabela – wysokość słupa frakcji dolnej, całkowitej i stopień separacji faz

Próba	H_{fd}	H	SF
A			
B			
C			
D			
E			
F			

Podsumowanie – na podstawie otrzymanych wartości SF należy wskazać, która metoda mieszania prowadzi do powstania najbardziej stabilnej emulsji. Metoda o najniższym współczynniku SF (najmniejszy stopień separacji faz) uznawana jest za najbardziej efektywną. W podsumowaniu należy omówić wpływ czasu, intensywności mieszania oraz zastosowania sonikacji na stabilność emulsji.

Przebieg ćwiczenia 2 (badanie efektywności formowania poprzez wytłaczanie)

1. Obliczanie dolewki wody



Przygotowanie podstawowego ciasta makaronowego (premixu) polega na połączeniu mąki z wodą, tak aby utworzyć mieszaninę o wilgotności ok. 30 - 35% przygotowuje się mieszając mąkę z wodą i innymi składnikami w mieszarce przez ok. 0,5 h w celu wyrównania wilgotności mieszanki.

Należy obliczyć ilość wody potrzebnej do przygotowania ciasta do wytłoczenia lub wałkowania makaronu, w taki sposób, aby ogólna zawartość wody w całej masie ciasta do produkcji wynosiła:

- I próby 33%,
- II próby 35%,
- III próby 37%.

Poniżej wzór do obliczenia (należy obliczyć D – czyli dolewkę wody):

$$W_k = \frac{D + (W_m \cdot M_m)}{M_m + D}, \text{ gdzie}$$

W_k – zawartość wody końcowej, wskazana powyżej (np. 33% dla I próby wytłaczanego makaronu); W_m – zawartość wody w mące (dla semoliny 12%); M_m – masa semoliny – 1000 g.

Wytłaczanie	Dolewka wody / 1 kg semoliny
33%	ml
35%	ml
37%	ml

2. Przygotowanie ciasta makaronowego

Należy odważyć 1 kg semoliny, obliczoną w punkcie nr 1 dolewką wody oraz 1,5% soli w przeliczeniu na semolinę. Wsypać do wytłaczarki semolinę i sól włączyć mieszanie, następnie ciekim strumieniem wlać wodę i prowadzić proces mieszania przez 15 minut. Po tym czasie przełączyć maszynę w tryb ekstruzji i prowadzić proces wytłaczania z matrycą do świderków. Notować czasy i masy w tabeli.

3. Ocena produktu po obróbce cieplnej

a) Objętość specyficzna i wskaźnik pęcznienia

Należy pobrać dwa cylindry o pojemności 100 cm³. Jeden z nich napełnić 100 ml wody, natomiast do drugiego włożyć 10 g makaronu. Wlewać wodę powoli, aby uniknąć pęcherzyków powietrza, do momentu osiągnięcia poziomu 100 cm³. Obliczyć objętość specyficzną makaronu (V_s) posługując się wzorem, gdzie V_m oznacza objętość makaronu, natomiast M_m masę makaronu poddanego badaniu objętości:

$$V_s = \frac{V_m}{M_m} \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{g}} \right)$$

Makaron ugotować we wrzącej, nieosolonej wodzie przez 2 minuty. Następnie przeprowadzić pomiar objętości.

b) Wydajność procesu gotowania (W_g)

Projekt

Modyfikacja programu studiów II stopnia na kierunku Dietetyka w Wyższej Szkole Inżynierii i Zdrowia
dofinansowany ze środków Unii Europejskiej z Programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju
Społecznego 2021-2027 (FERS)



$$Wg = \frac{\text{Masa produktu po gotowaniu } (M_k)}{\text{Masa produktu przed gotowaniem } (M_p)} * 100\%$$

Opracowanie wyników:

Wyniki zestawień w tabeli

	Wilgotność ciasta		
Badane parametry	33%	35%	37%
Czas wytłaczania (liczymy od załączenia procesu ekstruzji do wykończenia ciasta) [min]			
Czas potrzebny na nagrzanie matrycy (do momentu uzyskiwania właściwego produktu) [min]			
Masa początkowa ciasta [g]			
Masa produktu uformowanego w czasie nagrzewania matrycy [g]			
Masa produktu z właściwego wytłaczania [g]			
Masa produktu z właściwego wytłaczania o odpowiedniej wielkości i formie [g]			
Wydajność procesu = (masa całkowita produktu po wytłoczeniu / masa początkowa ciasta * 100% [%])			
V_s [cm ³ /g]			
W_p [%]			

Podsumowanie – należy wykazać, która wilgotność ciasta dawała najlepsze rezultaty wydajności procesu i wyróżników technologicznych. Należy porównać ilość odpadu w fazie nagrzewania matrycy, objętość specyficzną po ugotowaniu, wydajność gotowania (Wp), stabilność procesu (łatwość wytłaczania przy różnych wilgotnościach).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Pytania kontrolne:

1. Jakie są mechanizmy mieszania?
2. Jak ocenić jednorodność mieszaniny?
3. Jakie parametry wpływają na proces wytłaczania?



BLOK 3. Operacje cieplne – suszenie i obróbka cieplna

Procesy cieplne odgrywają kluczową rolę w przetwórstwie żywności, wpływając zarówno na bezpieczeństwo mikrobiologiczne, trwałość, jak i właściwości sensoryczne gotowego produktu.

Procesy suszenia w technologii żywności

Jednym z najważniejszych procesów jest **suszenie**, które polega na usuwaniu wody z materiału w wyniku odparowania wody pod wpływem dostarczonego ciepła. Obniżenie zawartości wody powoduje spadek aktywności wody, a tym samym ogranicza rozwój drobnoustrojów i spowalnia reakcje chemiczne prowadzące do psucia żywności. Dzięki temu proces suszenia jest fundamentem w produkcji żywności o przedłużonej trwałości, takich jak suszone owoce i warzywa, zioła, mleko w proszku, makarony, mięso suszone czy przekąski ekstrudowane.

W praktyce przemysłowej stosuje się kilka technik suszenia, różniących się sposobem dostarczania ciepła, intensywnością procesu oraz wpływem na produkt:

1. **Suszenie konwekcyjne** – polega na przekazywaniu ciepła z gorącego powietrza przepływającego wokół produktu. Jest najczęściej stosowaną metodą – występuje w suszarniach tunelowych, komorowych, taśmowych czy fluidalnych. Zalety to prostota i uniwersalność, jednak wadą może być dłuższy czas procesu i wyższa energochłonność.
2. **Suszenie kontaktowe (przewodowe)** – podgrzewanie produktu odbywa się przez bezpośredni kontakt materiału z gorącą powierzchnią, np. w suszarkach walcowych. Umożliwia szybkie odparowanie wody i jest powszechnie stosowane przy produkcji mleka zagęszczonego czy puree ziemniaczanego w postaci płatków.
3. **Suszenie próżniowe** – odbywa się przy obniżonym ciśnieniu, co redukuje temperaturę wrzenia wody i pozwala suszyć produkty w niższych temperaturach. Dzięki temu ogranicza się degradację składników wrażliwych na ciepło, takich jak witaminy, aromaty czy barwniki.
4. **Suszenie sublimacyjne (liofilizacja)** – najbardziej zaawansowana technologicznie metoda, polegająca na usuwaniu wody poprzez sublimację lodu. Proces wymaga zamrożenia produktu i prowadzenia odparowania w warunkach głębokiej próżni. Liofilizacja zachowuje strukturę, barwę i smak żywności w stopniu zdecydowanie lepszym niż inne metody, dlatego jest stosowana w produkcji owoców liofilizowanych, kawy instant, żywności funkcjonalnej i produktów dla astronautów.

Suszenie najczęściej przebiega w dwóch głównych okresach:

1. **Okres stałej szybkości suszenia** – woda odparowuje z powierzchni produktu, która jest cały czas wilgotna. Tempo suszenia zależy tu głównie od parametrów środowiska: temperatury, wilgotności i prędkości powietrza. W tym etapie transport wilgoci jest łatwy i szybki.
2. **Okres malejącej szybkości suszenia** – powierzchnia produktu wysycha, a dalsze odparowanie ograniczone jest do migracji wody z wnętrza cząstek. Mechanizmem kontrolującym jest dyfuzja wilgoci wewnątrz struktury, co znacząco spowalnia proces.

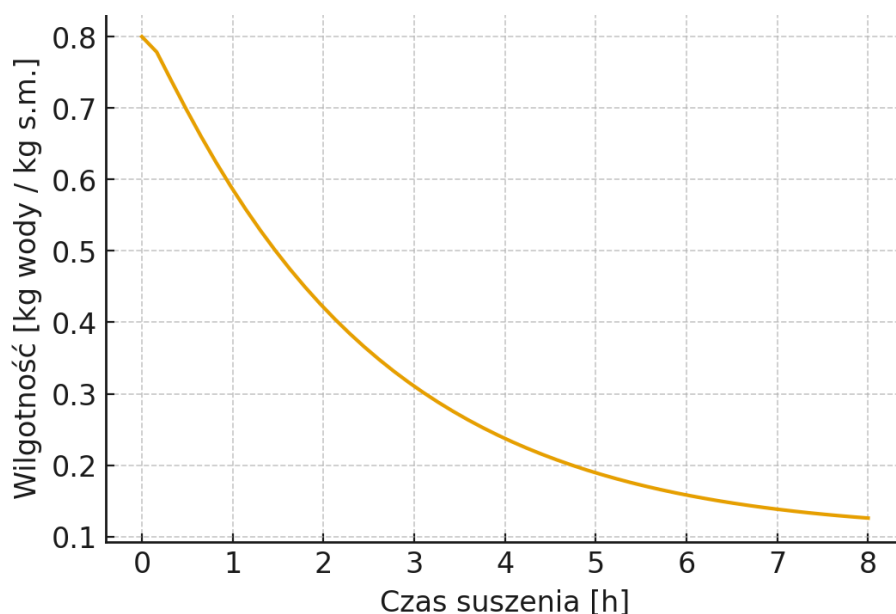


Etap ten decyduje o końcowym czasie suszenia, a jego przebieg silnie zależy od właściwości surowca (porowatość, skład chemiczny, obecność błonnika).

Dodatkowo w niektórych procesach występuje tzw. **okres początkowy**, charakteryzujący się nagrzewaniem materiału, zanim rozpocznie się intensywne parowanie.

Kinetykę suszenia opisuje zmiana zawartości wilgoci w funkcji czasu, co przedstawia się zwykle w formie krzywych suszenia lub zależności szybkości suszenia od wilgotności (rys. 2). Analiza kinetyczna pozwala na dobór optymalnych parametrów procesu, takich jak:

- temperatura i prędkość powietrza,
- wilgotność względna powietrza suszącego,
- ciśnienie (w przypadku suszenia próżniowego i liofilizacji),
- grubość warstwy materiału,
- sposób doprowadzania ciepła.



Rys. 2 Zmiana zawartości wody podczas suszenia

W przemyśle spożywczym kluczowe jest znalezienie kompromisu między **szybkością procesu, kosztem energetycznym a jakością produktu**. Zbyt wysokie temperatury mogą prowadzić do degradacji produktu, natomiast zbyt niskie – do nieefektywnego, wydłużonego suszenia.

Choć usunięcie wody pozwala znacząco wydłużyć trwałość, proces suszenia wiąże się również z szeregiem zmian jakościowych:

- **brunatnienie nieenzymatyczne (reakcje Maillarda)** – szczególnie intensywne przy wysokich temperaturach i w produktach bogatych w cukry i białka.
- **utrata aromatu** – lotne związki aromatyczne mogą ulegać ulatnianiu lub rozkładowi.
- **zmiany barwy** – wynikające z utleniania składników lub reakcji chemicznych.
- **kurczenie i twardnienie struktury** – szczególnie widoczne w suszonych owocach i warzywach.
- **spękania powierzchni** – efekty zbyt intensywnego lub nierównomiernego suszenia.



Dlatego kontrola parametrów procesu jest kluczowa dla uzyskania produktu o wysokiej jakości sensorycznej i odżywczej.

Procesy ogrzewania i wymiany ciepła w technologii żywności

Procesy cieplne stanowią fundament technologii żywności, ponieważ w sposób bezpośredni wpływają na bezpieczeństwo mikrobiologiczne, cechy jakościowe, właściwości reologiczne oraz trwałość produktów. Ogrzewanie jest jednym z najważniejszych procesów jednostkowych i obejmuje szeroką grupę operacji opartych na przekazywaniu energii cieplnej do produktu. Mechanizmy wymiany ciepła mogą zachodzić na drodze:

- przewodzenia (kondukcji),
- konwekcji,
- promieniowania,

a każda z tych metod charakteryzuje się innym przebiegiem szybkości nagrzewania oraz zróżnicowanym wpływem na strukturę i skład surowca.

Przewodzenie ciepła – zachodzi w materiałach będącymi dobrymi przewodnikami, o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła (głównie ciałach stałych). Dominuje w produktach o małej zawartości wolnej wody lub w materiałach gęstych strukturalnie, gdzie ruch masowy jest ograniczony, takich jak ciasta, masy mięsne, sery czy masy zagęszczone. Polega ono na przekazywaniu energii pomiędzy cząsteczkami pozostającymi w bezpośrednim kontakcie. W ciałach stałych przekazywana jest energia drgań atomów sieci krystalicznej i ruchu swobodnych elektronów, a w płynach energia kinetyczna atomów i cząsteczek. W obróbkach, gdzie materiał ma niską przewodność cieplną, konieczne jest stosowanie odpowiednio dłuższego czasu obróbki oraz dokładne dobranie profilu temperaturowego, aby zapewnić równomierne nagrzanie całego przekroju produktu.

Przykłady aparatów grzewczych i sprzęt, których działanie oparte jest głównie na przewodzeniu:

- autoklawy i retorty do sterylizacji konserw – ogrzewanie przenika przez ścianki opakowań,
- suszarki taśmowe kontaktowe – produkt suszony jest na gorących metalowych płytach,
- suszarki walcowe – cienka warstwa masy (np. puree, mleka) ogrzewana jest bezpośrednio na powierzchni gorącego walca,
- wymienniki płaszczowo-rurowe przy produkcji serów topionych i kremów – ciepło przekazywane jest przez ścianki rur,
- płyty grillowe i patelnie gastronomiczne, gdzie ciepło przechodzi bezpośrednio z powierzchni płyty do żywności,
- trzony, taborety elektryczne z płytą żeliwną, która oddaje ciepło do dna naczyń na niej ustawionych,
- kotły warzelne, w których ogrzewane dno i ścianki przenoszą ciepło do całej objętości potrawy,
- garnki, rondle, patelnie – ciepło z ogrzewanego dna przekazywane jest do potrawy.

Konwekcja ciepła występuje głównie w cieczach i półpłynnych układach żywnościowych. Ogrzewanie odbywa się tu dzięki ruchowi masowemu czynnika grzewczego, np. wody, pary



wodnej, powietrza, który otacza produkt. Konwekcja może być naturalna (wynikająca z różnicy gęstości) lub wymuszona, generowana przez systemy pompowania, mieszania lub przepływu turbulentnego (np. w wyniku działania wentylatora). W przypadku cieczy o niskiej lepkości szybkość wymiany ciepła jest bardzo wysoka, co pozwala skrócić czas obróbki i ograniczyć degradację składników wrażliwych na temperaturę, takich jak witaminy czy substancje aromatyczne.

Urządzenia konwekcyjne w przemyśle spożywczym to m. in.:

- pasteryzatory płytowe i rurowe stosowane przy mleku, sokach, piwie, napojach,
- kotły warzelne (z mieszadłem) do gotowania sosów, zup koncentratów i mas owocowych, gdzie para wodna w płaszczu grzewczym ogrzewa ścianki komory roboczej, a ciepło ze ścianek wnika do produktu / potrawy,
- suszarnie tunelowe i taśmowe wykorzystujące przepływ gorącego powietrza,
- suszarnie fluidyzacyjne – cząstki unoszone są przez strumień ciepłego powietrza,
- wyparki i wyparki próżniowe (koncentracja soków owocowych),
- piec konwekcyjno-parowy z funkcją cyrkulacji gorącego powietrza (najbardziej typowe wykorzystanie konwekcji),
- steamer (parownik) – surowiec ogrzewany jest gorącą parą wodną pod wysokim ciśnieniem,
- frytownice, gdzie gorący olej krąży konwekcyjnie wokół produktu.

Promieniowanie ciepłe – polega na wysyłaniu energii przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera absolutnego (ok. -273°C). Energia ta przenoszona jest w formie fal elektromagnetycznych o różnych długościach, choć największe natężenie przypada na zakres podczerwieni (IR), czyli fale o długości 0,78 – 1000 μm . W procesie tym energia wewnętrzna cząsteczek zostaje przekształcona w energię promieniowania, które po dotarciu do innego obiektu – lub do innej części tego samego obiektu – może zostać w całości lub częściowo zaabsorbowane. Pochłonięta energia ponownie zamienia się w energię wewnętrzną, powodując wzrost temperatury ogrzewanego materiału. Umożliwia szybki transfer energii do powierzchni produktu, często bez konieczności ogrzewania otoczenia.

Urządzenia przemysłu spożywczego wykorzystujące promieniowanie to m.in.:

- piece tunelowe IR do pieczenia pieczywa, pizzy, suszenia powierzchni przekąsek,
- opiekacze taśmowe IR w przetwórstwie mięsnym (zarumienianie i utrwalanie powierzchni),
- opiekacze i salamandry, które emitują promieniowanie podczerwone, intensywnie zapiekając powierzchnię potraw,
- grille elektryczne IR, stosowane do szybkiego opiekania i karmelizacji,
- piekarniki z funkcją grilla (grzałka górna pracująca jako źródło promieniowania).

Innym rodzajem promieniowania (nie cieplnym) wykorzystywanego w aparatach grzewczych jest **promieniowanie mikrofalowe**. Mikrofałe są to fale o długości około 1 mm – 1 m, mieszczące się między falami radiowymi a podczerwienią w widmie elektromagnetycznym. W komercyjnych piecach mikrofalowych wykorzystuje się mikrofałe o częstotliwości 2,45 GHz. Wygenerowane w magnetronie mikrofałe, kierowane są do komory mikrofalówki, gdzie przenikają do wnętrza żywności, oddziałują przede wszystkim na cząsteczki wody, które są dipolami elektrycznymi. Pole elektromagnetyczne zmienia biegunowość 2,45 miliarda razy na



sekundę, zmuszając cząsteczki wody, wolne jony do szybkich drgań i rotacji. Ten intensywny ruch powoduje tarcie na poziomie molekularnym, w efekcie czego wyzwala się ciepło bezpośrednio wewnątrz produktu w całej jego objętości.

W przemyśle spożywczym możemy spotkać się z wykorzystaniem właściwości mikrofal w:

- kuchenkach mikrofalowych, szeroko stosowanych w barach i kuchniach szybkiej obsługi,
- urządzeniach mikrofalowych do rozmrażania / temperingu bloków mięsa, mas rybnych czy półproduktów,
- kombinowanych suszarkach mikrofalowo-próżniowych, stosowanych np. przy suszeniu owoców i warzyw.

Kolejnym sposobem ogrzewania produktów jest wykorzystanie zjawiska **indukcji elektromagnetycznej**. Cewka indukcyjna, przez którą przepływa prąd o wysokiej częstotliwości, generuje zmienne pole elektromagnetyczne. Gdy w zasięgu tego pola znajdzie się materiał przewodzący, zwłaszcza o właściwościach ferromagnetycznych (np. garnek stalowy), w jego strukturze indukują się prądy wirowe. Przepływ tych prądów powoduje nagrzewanie materiału na skutek oporu elektrycznego. Proces zachodzi bardzo szybko, ponieważ energia jest dostarczana bezpośrednio do naczynia, a nie do otaczającego je powietrza, co czyni ogrzewanie indukcyjne wyjątkowo efektywnym energetycznie. Główne zastosowania tego typu ogrzewania to:

- gotowanie i podgrzewanie płynów w zbiornikach, reaktorach, mieszalnikach i kotłach warzelniczych (indukcyjnie ogrzewane płaszcze lub mieszadła),
- procesy pasteryzacji i sterylizacji – indukcyjnie ogrzewane elementy wymienników ciepła zapewniają błyskawiczne osiągnięcie wymaganej temperatury, co skraca czas przetrzymywania produktu w wysokiej temperaturze, ograniczając degradację termiczną,
- ogrzewanie cystern, rurociągów i przewodów transportowych olejów, tłuszczów, mas czekoladowych, syropów glukozowych czy melasy podczas transportu i magazynowania,
- indukcyjne uszczelnianie opakowań - folia aluminiowa zatopiona w nakrętce nagrzewana jest indukcyjnie, warstwa polimeru topi się i trwale przykleja do krawędzi butelki.
- trzony indukcyjne, patelnie gastronomiczne i grille indukcyjne.

W technologii żywności kluczową rolę odgrywają **wymienniki ciepła**, które umożliwiają precyzyjne sterowanie przepływem energii pomiędzy czynnikiem grzewczym (lub chłodzącym) a produktem. Wymienniki płytowe, rurowe i płaszczowo-rurowe stosowane są szeroko w przemyśle mleczarskim, sokowniczym, piwowarskim czy w produkcji sosów i przecierów. Ich konstrukcja pozwala na maksymalizację powierzchni wymiany ciepła, wprowadzenie turbulencji, zawirowań oraz przeciwprądowego kierunku przepływu mediów, co znacząco wpływa na wydajność energetyczną procesu. Procesy ogrzewania pełnią również rolę **inaktywacji mikroorganizmów** i enzymów, które powodują psucie się żywności. Pasteryzacja, działająca zazwyczaj w zakresie 60–100°C, umożliwia usunięcie większości drobnoustrojów patogennych przy jednoczesnym zachowaniu jakości sensorycznej. Sterylizacja, prowadzona w temperaturach powyżej 100°C (często 121°C), pozwala uzyskać produkt o trwałości wielomiesięcznej, jednak może prowadzić do większych zmian barwy, smaku i wartości odżywczej.

Po ogrzewaniu bardzo często następuje **etap chłodzenia**, który jest nieodłącznym elementem kontrolowanego procesu cieplnego. Szybkie obniżenie temperatury produktu ma



znaczenie dla ograniczenia rozwoju drobnoustrojów, zmniejszenia degradacji chemicznej oraz zachowania pożądanych właściwości sensorycznych. W przemyśle stosuje się chillery wodne, wymienniki regeneracyjne, tunele powietrzne i schładzanie kriogeniczne, które gwarantują szybki przepływ energii z produktu do otoczenia.

Zrozumienie mechanizmów wymiany ciepła i masy oraz ich wpływu na produkt końcowy jest kluczowe dla projektowania efektywnych, bezpiecznych i stabilnych procesów technologicznych. Dobrze zaprojektowane systemy ogrzewania pozwalają na minimalizację strat cennych składników odżywczych, redukcję zużycia energii oraz osiągnięcie powtarzalności produkcji, co jest podstawą funkcjonowania nowoczesnego przemysłu spożywczego.

Cel:

Celem ćwiczenia jest poznanie zasad działania wybranych aparatów do procesu suszenia i obróbki cieplnej, wyznaczenie krzywej suszenia i wskaźnika brązowienia chipsów jabłkowych, jak również ocena efektów zastosowania różnej obróbki cieplnej produktów na przykładzie muffinów.

Sprzęt i materiały: suszarka konwekcyjna, suszarka próżniowa, piec konwekcyjno-parowy, termopara, waga, kolorymetr, uniwersalna maszyna testująca, aparat do aktywności wody, surowce.

Przebieg ćwiczenia:

Część I: Wyznaczanie krzywej suszenia oraz indeksu brązowienia chipsów jabłkowych

1. Przygotowanie surowca do suszenia.

Jabłka (1 kg) umyć, wykroić rdzeń i pokroić na równe plasterki o grubości 2 mm. Plastry podzielić na 3 równe części (minimum 20 plasterków w danej grupie). Plasterki próby A i próby B należy zanurzyć w roztworze 0,1% kwasu cytrynowego na 2 min, następnie wyjąć i odsączyć i osuszyć ręcznikiem papierowym.

Nazwa próby	Przygotowanie
Kontrola	plastry suszone w suszarce konwekcyjnej w temperaturze 70°C
Próba A	plastry zanurzone w 0,1% roztworze kwasu cytrynowego (2 min), suszone w suszarce konwekcyjnej w temperaturze 70°C
Próba B	plastry zanurzone w 0,1% roztworze kwasu cytrynowego (2 min), suszone w suszarce próżniowej w temperaturze 70°C, ciśnienie 200 mbar
Próba C	plastry zanurzone w 0,1% roztworze kwasu cytrynowego (2 min), suszone sublimacyjnie (przygotowane wcześniej)



2. Wyznaczanie krzywej suszenia

Należy zważyć plastry każdej próby razem z tacką przed rozpoczęciem suszenia (należy znać masę samej tacki). Proces suszenia prowadzić na tacce perforowanej. Załadować próby do suszenia i notować zmiany masy co 10 min przez pierwsze 60 min, potem co 20–30 min do końca suszenia. Proces suszenia prowadzić do uzyskania stabilnej masy chipsów (masa nie będzie ulegała już zmianom - zmiana masy < 0,5 g w dwóch kolejnych pomiarach). Policzyc stosunek masowy (SM) jako masę po danym czasie suszenia (M_t) w odniesieniu do masy początkowej (M_0):

$$SM = \frac{M_t}{M_0} \cdot 100\%$$

3. Ocena zmian barwy chipsów, wyznaczenie indeksu brązowienia

Wykonać pomiar barwy chipsów (po ostudzeniu) z wykorzystaniem kolorymetru Minolta CR-400. Pomiar powinien być wykonany w sześciu powtórzeniach dla każdej próby. Składowe barwy L^* , a^* , b^* skopiować z oprogramowania kolorymetru i zapisać w Arkuszu kalkulacyjnym Excel, w którym należy policzyć wartości średnie i odchylenia standardowe z sześciu powtórzeń.

Obliczyć indeks brązowienia (BI) dla każdej próby:

$$BI = \frac{[100(x-0,31)]}{0,17}, \text{ gdzie}$$

$$x = \frac{(a^* + 1,75L^*)}{(5,645L^* + a^* - 3,012b^*)}$$

Opracowanie wyników:

Tabela – kinetyka suszenia

	Kontrola		Próba A	
	[g]	Stosunek masowy	[g]	Stosunek masowy
0 min		1		1
10 min				
20 min				
30 min				
40 min				
50 min				
60 min				
70 min				
80 min				
90 min				
120 min				
150 min				
.....				
.....				



Nakreślić krzywe suszenia prób

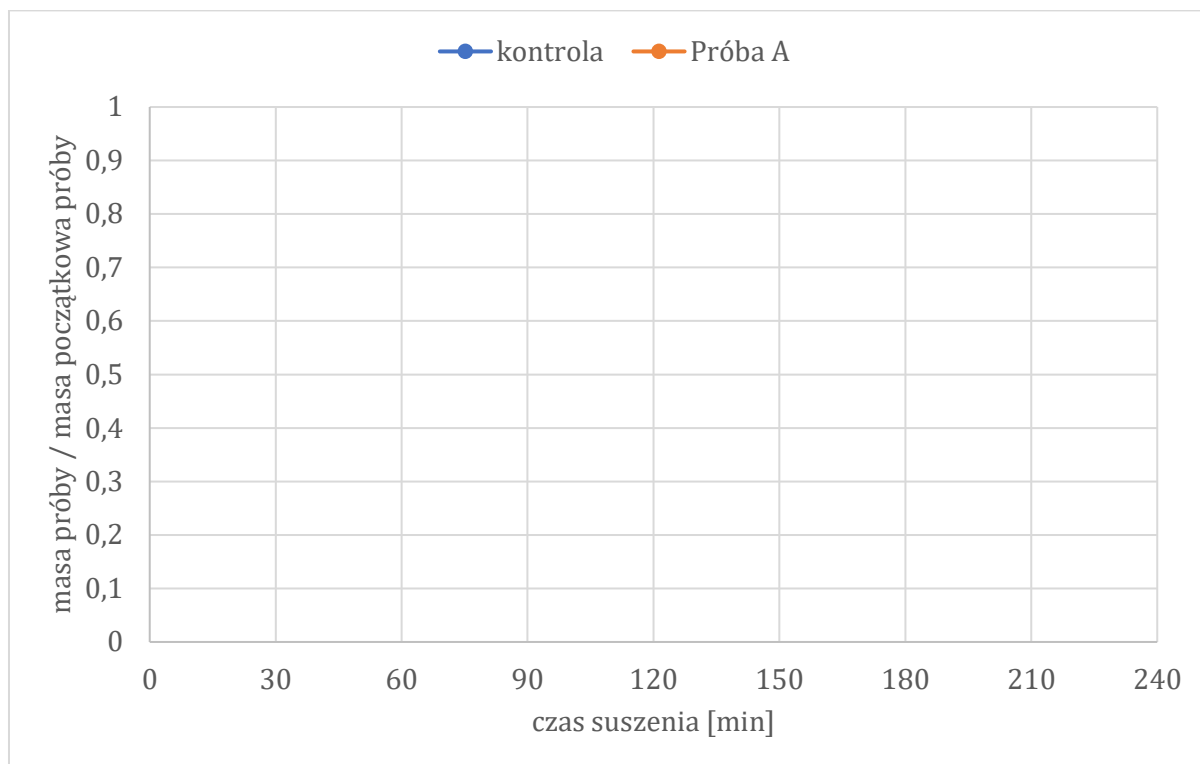


Tabela – parametry barwy

	Kontrola	Próba A	Próba B	Próba C
L*				
a*				
b*				
BI				

W podsumowaniu należy ocenić:

- wpływ rodzaju obróbki (konwekcja, próżnia, liofilizacja) na szybkość suszenia,
- różnice w końcowej wartości współczynnika BI,
- wpływ metody suszenia na barwę, chrupkość, aromat i ogólną jakość sensoryczną chipsów jabłkowych.

Część II: Ocena efektywności różnych metod obróbki cieplnej muffinów

1. Przygotowanie materiału badawczego.

Projekt

Modyfikacja programu studiów II stopnia na kierunku Dietetyka w Wyższej Szkole Inżynierii i Zdrowia
dofinansowany ze środków Unii Europejskiej z Programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju
Społecznego 2021-2027 (FERS)



Przygotować ciasto na muffiny wg następującej receptury:

- 600 g mąki pszennej
- 400 g cukru,
- 6 jaj,
- 350 g jogurtu naturalnego,
- 200 g oleju,
- 10 g proszku do pieczenia,
- 1 łyżeczka cukru wanilinowego.

Białka oddzielić od żółtek, białka ubić w robocie kuchennym KitchenAid, w trakcie dodać cukier, jak piana będzie sztywna, dodać kolejno żółtka, jogurt i olej. Ubijać jeszcze przez 5 minut. Do misy robota z masą jajeczną przesiać mąkę z proszkiem do pieczenia i wymieszać ręcznie łopatką do uzyskania jednorodnej konsystencji. Przełożyć ciasto do worka cukierniczego i dozować do papilotek umieszczonych w zagłębieniach formy do muffin. Dozujemy do $\frac{3}{4}$ wysokości papilotki. Każdą próbę należy przygotować w ilości co najmniej 10 muffinek (5 z nich należy oznaczyć i zważyć przed pieczeniem).

2. Obróbka cieplna muffinów

Muffiny powinny być pieczone w trzech różnych piecach:

Skrót	Metoda	Parametry
PKP	piec konwekcyjno-parowy	180°C, 12 min
PKM	piec konwekcyjno-mikrofalowy	180°C + 50% mocy mikrofal, 6 min
PM	piec mikrofalowy	600 W, 5 min

3. Badanie wydajności pieczenia

Każdą z 5 muffinek należy zważyć przed pieczeniem (M_p), a następnie po obróbce cieplnej (po wystudzeniu) (M_k). Wydajność pieczenia (W_p) należy obliczyć ze wzoru:

$$W_p = \frac{M_k}{M_p} \cdot 100\%$$

4. Badanie wybarwienia skórki i miękiszu muffinek

Wykonać pomiar barwy skórki i miękiszu z wykorzystaniem kolorymetru Minolta CR-400. Pomiar powinien być wykonany dla skórki (6 powtórzeń) i miękiszu (6 powtórzeń) każdej próby. Składowe barwy L^* , a^* , b^* skopiować z oprogramowania kolorymetru do Excela i policzyć wartości średnie i odchylenia standardowe.



5. Analiza tekstury produktów

Analizę tekstury produktu należy wykonać przy użyciu uniwersalnej maszyny testującej (UMT) za pomocą testu TPA:

- 1) Z 5 muffinek należy wyciąć równe kostki o boku 20 mm.
- 2) Uzyskany sześcian będzie poddawany podwójnej 50% kompresji.
- 3) Zanotować wartości średnie z oprogramowania UMT:
 - twardości,
 - sprężystości i
 - spoistości.

Opracowanie wyników:

Tabela – wydajność pieczenia, barwa skórki i miększu, tekstura muffinów

	Próba PKP	Próba PKM	Próba PM
W _p [%]			
L* skórka			
a* skórka			
b* skórka			
L* miększ			
a* miększ			
b* miększ			
Twardość [N]			
Sprężystość [-]			
Spoistość [-]			

Podsumowanie – należy porównać wszystkie trzy metody obróbki cieplnej i wskazać, która z nich daje najlepsze efekty w zakresie:

- wydajności procesu pieczenia,
- barwy skórki i miększu,
- tekstury (twardość, sprężystość, spoistość),
- ogólnej jakości sensorycznej.

Pytania kontrolne:

1. Jakie są etapy procesu suszenia?
2. Co wpływa na szybkość odparowania wody?
3. Jakie są różnice między suszeniem konwekcyjnym a kontaktowym?
4. Jakie są typy wymiany ciepła, sposoby ogrzewania żywności?



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



5. W jakich aparatach grzewczych wykorzystywany jest dany typ wymiany ciepła i sposoby ogrzewania?