



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



WYKONAWCY



innotech
4life

Innovations that change lives.



Aparatura i technologia w inżynierii żywności

Instrukcje do ćwiczeń z wprowadzeniem teoretycznym

Część 2

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 4. Separacja układów niejednorodnych	3
BLOK 5. Operacje separacyjne ciecz–para	16
BLOK 6. Operacje niskotemperaturowe	23



BLOK 4. Separacja układów niejednorodnych

Operacje separacyjne to fundamentalne procesy jednostkowe wykorzystywane w technologii żywności, których celem jest **rozdzielenie układów wielofazowych** – zawiesin, emulsji, mieszanin ciecz–ciało stałe lub układów o zróżnicowanej gęstości. Ich rozdzielanie wymagają znajomości zjawisk przepływu i sił działających na cząstki.

Wyróżnia się następujące metody separacji układów niejednorodnych:

- metody mechaniczne separacji – sedymentacja, filtracja, wirowanie.
- metody membranowe separacji – mikrofiltracja, ultrafiltracja, nanofiltracja, odwrócona osmoza,
- metody termiczne separacji – destylacja, odparowanie, suszenie.

Mechaniczne metody separacji pozwalają na rozdział bez udziału wysokich temperatur, dzięki czemu znajdują szerokie zastosowanie przy surowcach wrażliwych na ciepło, np. mleku, sokach czy napojach fermentowanych. Ich działanie opiera się na różnicach w **gęstości, wielkości i kształcie cząstek**, a także na właściwościach przepływowych i reologicznych medium. Do najważniejszych metod należą **osadzanie (sedymentacja), filtracja i wirowanie**, z których każda wykorzystuje inne zjawiska fizyczne. W przemyśle spożywczym metody te odgrywają kluczową rolę w przygotowaniu surowców, oczyszczaniu i klarowaniu produktów, a także odzysku wartościowych frakcji. Optymalizacja warunków separacji ma bezpośrednie przełożenie na **jakość produktu, wydajność linii technologicznej oraz energochłonność** całego procesu.

Osadzanie (sedymentacja)

Sedymentacja polega na **opadaniu cząstek stałych** zawieszonych w cieczy pod wpływem **siły grawitacji**. Prędkość opadania zależy od różnicy gęstości między fazą stałą i ciekłą, lepkości cieczy oraz wymiaru i kształtu cząstek. Podstawą teoretyczną sedymentacji jest **prawo Stokesa**, które opisuje prędkość opadania sferycznych cząstek o małych rozmiarach poruszających się w zakresie laminarnym przepływu:

$$v = \frac{2r^2(\rho_s - \rho_c) \cdot g}{9\eta}$$

gdzie: r – promień cząstki, ρ_s , ρ_c – gęstość cząstki i cieczy, η – lepkość cieczy.

Z równania wynika, że **im większa cząstka i im większa różnica gęstości między fazami oraz im mniejsza lepkość cieczy, tym szybsza separacja**.

Wyróżniamy sedymentację:

1. Wolną (indywidualną), podczas której cząstki nie oddziałują ze sobą, sedymentują samodzielnie. Występuje w klarowaniu soków, piwa, wstępnym odsączaniu zawiesin.
2. Utrudnioną – cząstki opadają wolniej z powodu zwiększonej koncentracji i ograniczenia ruchu. Często obserwowana w pulpach warzywnych i owocowych.



3. Zbiorowa (strefowa), w której cała warstwa cząstek opada jako „blok”. Typowa w wysokich koncentracjach włókien po ekstrakcji.
4. Zagęszczanie osadu – dotyczy przypadku, gdzie dolna część osadu ulega kompresji, np. w produkcji skrobi.

Sedymentacja w technologii żywności jest stosowana do:

- klarowania soków owocowych przed filtracją,
- sedymentacji osadu w piwie lub winie,
- oddzielania włókien, cząstek roślinnych, ziaren skrobi,
- oczyszczania wody technologicznej i ścieków przemysłowych.

Sedymentacja jest procesem tanim i prostym, ale powolnym – dlatego często stanowi **etap wstępny** przed filtracją lub wirowaniem.

Filtracja

Filtracja polega na mechanicznym oddzieleniu cząstek stałych od cieczy poprzez **przepływ przez medium porowate** (filtr, membranę, złożę filtracyjne). W procesie tym cząstki są zatrzymywane mechanicznie na powierzchni lub wewnątrz medium, tworząc tzw. **osad filtracyjny**, który dodatkowo wpływa na opory przepływu. Równania opisujące filtrację wyprowadza się z prawa Darcy'ego:

$$v = \frac{\Delta P}{\mu R}$$

gdzie: ΔP – różnica ciśnień, μ – lepkość cieczy, R – opór całkowity filtracji (filtra + osadu).

Wyróżniamy filtrację:

- **grawitacyjna** – jest najprostszą i najstarszą formą filtracji, w której siłą napędową przepływu cieczy przez materiał filtracyjny jest **ciśnienie hydrostatyczne wynikające z działania siły ciężkości**. Proces ten przebiega wolno i charakteryzuje się ograniczoną wydajnością, jednak nie wymaga stosowania dodatkowych urządzeń ani energii mechanicznej. W technologii żywności filtracja grawitacyjna znajduje zastosowanie głównie w małoskalowych procesach, takich jak domowa filtracja soków owocowych, klarowanie nalewek, miodów czy odcedzanie wywarów. Ze względu na niską skuteczność w przypadku drobnych cząstek nie jest powszechnie stosowana w przemyśle.
- **próżniowa** – polega na obniżeniu ciśnienia po stronie filtratu, co powoduje zwiększenie różnicy ciśnień po obu stronach przegrody filtracyjnej i przyspieszenie przepływu cieczy. W porównaniu z filtracją grawitacyjną proces ten jest znacznie szybszy i bardziej efektywny. W przemyśle spożywczym filtracja próżniowa jest stosowana jest m.in. do klarowania soków, win, piwa, syropów cukrowych oraz przy oddzielaniu osadów po procesach fermentacyjnych. Umożliwia skuteczne usuwanie zawiesin przy jednoczesnym zachowaniu względnie łagodnych warunków procesu.



- **ciśnieniowa** – ciecz jest wymuszana przez przegrodę filtracyjną przy użyciu nadciśnienia, co pozwala na osiągnięcie bardzo dużej wydajności procesu. Metoda ta umożliwia separację drobnych cząstek oraz prowadzenie filtracji cieczy o dużej lepkości (np. oleje). W technologii żywności filtracja ciśnieniowa znajduje zastosowanie m.in. w produkcji koncentratów białkowych, klarowaniu mleka, serwatki, soków owocowych oraz w procesach oczyszczania wody technologicznej. Ze względu na wysokie ciśnienia robocze wymaga stosowania wytrzymałych materiałów filtracyjnych i precyzyjnej kontroli parametrów procesu.
- **membranowa** – w technologii żywności i inżynierii procesowej filtrację membranową traktuje się jako **odrębną, bardziej zaawansowaną grupę filtracji**, dlatego jest szczegółowiej omówiona jako membranowe metody separacji układów niejednorodnych.

Wirowanie

Wirowanie (*centrifugation*) wykorzystuje **siłę odśrodkową**, która w wirówkach może być nawet **kilka tysięcy razy większa niż siła grawitacji** - przyspiesza to separację cząstek. Dzięki temu możliwe jest szybkie i skuteczne oddzielanie cząstek nawet o bardzo małych rozmiarach.

Siła działająca na cząstkę w polu odśrodkowym:

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

gdzie: m – masa cząstki, ω – prędkość kątowa, r – promień rotora.

W rezultacie cząstki o większej gęstości przemieszczają się ku obrzeżom wirówki.

W zależności od budowy urządzenia oraz mechanizmu odbioru osadu wyróżnia się kilka podstawowych typów wirówek:

- **sedymencyjne** (koszowe, talerzowe) działają na zasadzie swobodnej sedymentacji cząstek stałych w polu sił odśrodkowych. Zawiesina wprowadzana jest do obracającego się bębna, w którym cząstki o większej gęstości przemieszczają się ku jego ścianom, natomiast faza ciekła pozostaje bliżej osi obrotu:
 - wirówki koszowe wyposażone są w perforowany bęben (kosz), przez którego ścianki przesącza się ciecz, natomiast cząstki stałe zatrzymywane są na powierzchni kosza. Stosowane są głównie do odwadniania produktów krystalicznych i ziarnistych, takich jak cukier, sól czy skrobia. Charakteryzują się prostą budową, lecz często pracują w trybie okresowym,
 - wirówki talerzowe posiadają pakiet stożkowych talerzy, które zwiększają efektywną powierzchnię sedymentacji i skracają drogę opadania cząstek. Umożliwiają separację bardzo drobnych cząstek stałych z cieczy i pracują



w sposób ciągły. Znajdują zastosowanie m.in. w klarowaniu soków, piwa oraz w przetwórstwie mleka,

- **dekantacyjne** zwane również ślimakowymi, są urządzeniami o pracy ciągłej, w których osad oddzielony od cieczy jest mechanicznie transportowany wzdłuż bębna za pomocą obracającego się ślimaka. Różnica prędkości obrotowej między bębniem a ślimakiem umożliwia skuteczne odprowadzanie zagęszczonej fazy stałej. Ten typ wirówek stosowany jest do rozdzielania zawiesin o wysokim stężeniu fazy stałej, np. w przemyśle skrobiowym, cukrowniczym, przy odwadnianiu osadów pofermentacyjnych czy w przetwórstwie warzyw i owoców. Ich zaletą jest wysoka wydajność i możliwość pracy bez przerw technologicznych,
- **rurowe** charakteryzują się bardzo wysoką prędkością obrotową oraz smukłym, cylindrycznym bębniem. Dzięki temu wytwarzają ekstremalnie duże siły odśrodkowe, umożliwiające separację bardzo drobnych cząstek, a nawet mikroorganizmów. Stosowane są głównie w procesach wymagających wysokiej precyzji separacji, takich jak klarowanie soków, ekstraktów roślinnych, olejów czy zawiesin biologicznych. Ze względu na ograniczoną pojemność i trudności w usuwaniu osadu najczęściej pracują w trybie okresowym,
- **wirówki dyskowe** – są szczególnym rodzajem wirówek talerzowych i stanowią podstawowe wyposażenie zakładów mleczarskich. W ich wnętrzu znajduje się zestaw cienkich dysków (talerzy), które intensyfikują proces separacji poprzez zwiększenie powierzchni kontaktu faz. Urządzenia te wykorzystywane są do: odtłuszczania mleka (oddzielania śmietanki), standaryzacji zawartości tłuszczu, klarowania mleka i serwatki, usuwania zanieczyszczeń mechanicznych. Wirówki dyskowe mogą pracować w sposób ciągły, charakteryzują się wysoką skutecznością i możliwością automatycznego usuwania osadu.

Metody membranowe separacji stanowią szczególną, wysoko selektywną formę filtracji, w której rozdział składników zachodzi na półprzepuszczalnej membranie o ściśle kontrolowanej wielkości porów. Wykorzystują półprzepuszczalne membrany, które zatrzymują jedne składniki mieszaniny, a inne przepuszczają. Siłę napędową procesu stanowią ciśnienie, gradient stężeń lub różnica potencjału elektrycznego. W przemyśle spożywczym mają swoje zastosowanie głównie ze względu na niską temperaturę procesu (brak degradacji aromatów i witamin), energooszczędność, wysoką selektywność. Do metod membranowych zalicza się mikrofiltrację, ultrafiltrację, nanofiltrację, odwróconę osmozę.

Mikrofiltracja (MF)

Wykorzystuje membrany o stosunkowo dużych porach, mieszczących się w zakresie 0,1–10 µm. Mechanizm separacji opiera się głównie na zatrzymywaniu cząstek większych od średnicy porów, co sprawia, że MF działa analogicznie do bardzo precyzyjnego sita. Przez



membranę swobodnie przechodzą woda, sole mineralne, cukry i niskocząsteczkowe związki rozpuszczone, natomiast zatrzymywane są zawiesiny, cząstki koloidalne, drożdże oraz większość bakterii. Proces prowadzony jest zazwyczaj przy niskich ciśnieniach roboczych (0,1–2 bar), co ogranicza zużycie energii oraz ryzyko uszkodzenia struktury produktu. Mikrofiltracja nie powoduje zmian chemicznych, a jej skuteczność zależy od temperatury, prędkości przepływu oraz stopnia zanieczyszczenia membrany. Mikrofiltracja znajduje szerokie zastosowanie w: klarowaniu piwa, wina i soków owocowych, gdzie zastępuje tradycyjne środki klarujące, usuwaniu mikroorganizmów w produkcji mleka ESL (*Extended Shelf Life*), membranowym odtłuszczaniu mleka poprzez separację kuleczek tłuszczu, filtracji solanek, syropów cukrowych i roztworów technologicznych. Zaletą MF jest wysoka selektywność oraz możliwość prowadzenia procesu w sposób ciągły.

Ultrafiltracja (UF)

Wykorzystuje membrany o znacznie mniejszych porach, rzędu 1–100 nm, co umożliwia separację składników o masie cząsteczkowej od kilku do kilkuset tysięcy daltonów. Membrany UF zatrzymują białka, polisacharydy, część koloidów i makrocząsteczek, natomiast przepuszczają wodę, cukry proste, sole mineralne i niskocząsteczkowe metabolity. Proces zachodzi przy wyższych ciśnieniach niż MF (1–10 bar), a jego istotną cechą jest możliwość jednoczesnego zagęszczania i frakcjonowania surowców. Ultrafiltracja pozwala kontrolować skład produktu bez użycia wysokiej temperatury, co ogranicza denaturację białek i straty aromatów. Ultrafiltracja jest kluczową technologią w: produkcji koncentratów białek serwatkowych (WPC), standaryzacji zawartości białka w mleku serowarskim, zagęszczaniu soków i ekstraktów owocowych bez utraty lotnych związków aromatycznych, produkcji hydrolizatów białkowych i preparatów funkcjonalnych, oczyszczaniu ekstraktów roślinnych i fermentacyjnych.

Nanofiltracja (NF)

Stanowi pośredni etap pomiędzy ultrafiltracją a odwróconą osmozą. Membrany NF posiadają pory o średnicy 0,5–2 nm i zdolne są do zatrzymywania cząsteczek o masie 200–1000 Da, a także do częściowego usuwania jonów, zwłaszcza wielowartościowych. Z tego względu NF bywa określana jako metoda „miękkiego odsalania”. Proces prowadzony jest przy umiarkowanych ciśnieniach (5–30 bar) i umożliwia selektywne modyfikowanie składu chemicznego produktu. Nanofiltracja wykorzystywana jest m.in. do: częściowego odsalania serwatki i permeatów, usuwania goryczy, polifenoli i niepożądanych składników z soków i piwa, odzysku i koncentracji składników aromatycznych, zagęszczania naturalnych barwników i ekstraktów roślinnych.



Odwrócona osmoza (RO)

Odwrócona osmoza (*Reverse Osmosis*) wykorzystuje najgęstsze membrany, praktycznie nieprzepuszczalne dla jonów i większości rozpuszczonych substancji. Proces polega na wymuszeniu przepływu wody przez membranę wbrew naturalnemu gradientowi osmotycznemu, co wymaga stosowania wysokiego ciśnienia (20–80 bar). RO umożliwia niemal całkowite oddzielenie wody od składników rozpuszczonych, prowadząc do silnego zagęszczenia produktu. Odwrócona osmoza znajduje zastosowanie w: produkcji koncentratów soków i napojów bez obróbki cieplnej, wstępnym zagęszczaniu mleka i serwatki przed wyparkami, odzysku wody technologicznej i recyklingu ścieków, uzyskiwaniu bardzo czystej wody procesowej, szczególnie w browarnictwie. Metoda ta pozwala uzyskać produkty o wysokiej jakości sensorycznej i odżywczej, przy minimalnych stratach aromatów i niskich kosztach energetycznych związanych z ogrzewaniem.

Metody termiczne separacji oparte są na wykorzystaniu **różnic lotności, aktywności wody oraz właściwości cieplnych** składników mieszanin. Energia cieplna dostarczana do układu modyfikuje stan skupienia składników, co pozwala na ich rozdział lub zagęszczenie.

Do najważniejszych metod cieplnych należą **destylacja, odparowanie (evaporacja)** oraz **suszenie**.

Destylacja

Destylacja ze względu na mechanizm rozdziału wykorzystujący różnice lotności składników, czyli ich temperatur wrzenia i ciśnień par nasyconych, została omówiona w odrębnym bloku ćwiczeniowym (patrz Blok 5). Rozdział podczas destylacji zachodzi na poziomie fazowym (ciecz–para), a nie cząsteczkowym czy mechanicznym.

Odparowanie

Służy do zwiększania stężenia substancji rozpuszczonych (cukrów, soli, białek) poprzez usunięcie części wody w postaci pary. Od destylacji różni się tym, że nie rozdziela składników na frakcje lotne, ale prowadzi do zagęszczenia roztworu. Proces ten prowadzony jest w specjalistycznych aparatach – wyparkach, które umożliwiają kontrolowane dostarczanie ciepła, skuteczne oddzielanie pary od cieczy oraz minimalizację strat jakościowych produktu.

1. **Wyparki jednostopniowe** są najprostszą formą aparatury do zagęszczania. Składają się z jednego aparatu, w którym ciecz jest ogrzewana, a powstająca para



wodna jest odprowadzana i skraplana poza układem. Proces wymaga zewnętrznego źródła energii cieplnej na każdym etapie odparowania.

2. **Wyparki wielostopniowe**, zwane również kaskadowymi, składają się z kilku stopni połączonych szeregowo. Kluczową cechą tych instalacji jest wykorzystanie pary powstającej w jednym stopniu jako czynnika grzewczego w kolejnym stopniu, pracującym przy niższym ciśnieniu. Wyparki wielostopniowe są powszechnie stosowane w przemyśle spożywczym, m.in. do zagęszczania mleka, serwatki, soków owocowych i ekstraktów roślinnych. Liczba stopni zależy od wymagań technologicznych oraz opłacalności ekonomicznej.
3. **Wyparki z obiegiem wymuszonym** – przepływ cieczy przez wymiennik ciepła realizowany jest za pomocą pompy obiegowej, co pozwala utrzymać wysoką prędkość przepływu i ograniczyć zjawisko osadzania się składników na ściankach aparatu. Ten typ wyparek jest szczególnie przydatny przy zagęszczaniu: cieczy lepkich, roztworów o skłonności do krystalizacji, produktów zawierających cząstki stałe. Zaletą tych wyparek jest dobra kontrola temperatury oraz mniejsze ryzyko przypalania produktu, co ma duże znaczenie w przemyśle spożywczym.
4. **Wyparki próżniowe** działają w warunkach obniżonego ciśnienia, co prowadzi do obniżenia temperatury wrzenia cieczy. Umożliwia to prowadzenie procesu zagęszczania w temperaturach znacznie niższych niż 100°C, co ogranicza degradację termiczną składników bioaktywnych, barwników i aromatów. Wyparki próżniowe są powszechnie stosowane w: przemyśle sokowniczym, mleczarskim, produkcji ekstraktów roślinnych, koncentracji surowców wrażliwych na wysoką temperaturę.

Suszenie

Proces polega na separacji wody w stanie pary od produktu stałego lub ciekłego przez dostarczenie ciepła. Proces obejmuje parowanie z powierzchni oraz transport wilgoci z wnętrza materiału. Z tego względu suszenie zostało omówione w odrębnym bloku ćwiczeniowym (patrz Blok 3).

Cel:

Celem ćwiczenia jest poznanie zasad mechanicznego rozdzielania faz poprzez filtrację grawitacyjną i próżniową, wirowanie i evaporację próżniową, spektrometr bliskiej podczerwieni.

Sprzęt i materiały: wirówka laboratoryjna, wirówka do mleka, filtry laboratoryjne, wyparka próżniowa, szkoło laboratoryjne, surowce.

Przebieg ćwiczenia:

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)

**Część I: Badanie efektywności filtracji grawitacyjnej i próżniowej soku jabłkowego****1. Przygotowanie soku**

Przygotować sok z jabłek poprzez użycie sokowirówki. Potrzebne będzie 500 ml soku. Przed użyciem dokładnie sok wymieszać w celu uzyskania jednorodnej zawiesiny.

2. Filtracja grawitacyjna (FG)

Umieścić bibułę filtracyjną w lejku i zwilżyć ją wodą destylowaną. Przelać **200 ml próbki** do lejka. Mierzyć czas potrzebny do uzyskania **100 ml filtratu (t_{100})**. Zanotować objętość filtratu po 5 (V_5) i objętość końcową (V_K) i czas pełnej filtracji (t_K). Policzyc szybkość i wydajność filtracji.

3. Filtracja próżniowa (FP)

Zamontować zestaw do filtracji próżniowej (lejek Büchnera + kolba ssawkowa). Ułożyć i zwilżyć bibułę filtracyjną. Przelać **200 ml próbki (V_P)** do lejka i włączyć podciśnienie. Zmierzyć czas filtracji **100 ml filtratu**. Zanotować objętość filtratu po 5 (V_5) i objętość końcową (V_K) i czas pełnej filtracji (t_K). Policzyc szybkość (v_f) i wydajność filtracji (W_f).

$$v_f = \frac{V_K}{t_K} \qquad W_f = \frac{V_K}{V_P}$$

Opracowanie wyników:

Tabela – wyniki filtracji grawitacyjnej i próżniowej

	FG	FP
t_{100} [s]		
V_5 [ml]		
V_K [ml]		
t_K [s]		
v_f [ml/s]		
W_f [ml]		

Podsumowanie – należy porównać czasy filtracji dla obu metod, wyjaśnić wpływ podciśnienia na szybkość i wydajność procesu.

**Część II: Badanie zdolności zatrzymania wody i stopnia synerезы różnych jogurtów****1. Zdolność zatrzymywania wody (WHC *Water-Holding Capacity*)**

Do falkonu odważyć 10 g jogurtu, po czym próbki wirować w wirówce laboratoryjnej w temperaturze 5°C przez 10 minut przy przyspieszeniu $640 \times g$. Po zakończeniu wirowania oddzieloną serwatkę zważyć. Oznaczenia wykonać w trzech powtórzeniach.

WHC obliczyć według wzoru:

$$WHC = \left(\frac{m_1}{m_2} \right) \times 100\%,$$

gdzie: m_1 - masa osadu po wirowaniu (g), m_2 - jest masą próbki jogurtu (g).

2. Stopień synerезы

Synerезę jogurtu oznaczyć metodą wirowania. 10 g jogurtu odważyć do plastikowych falkonów i wirować z prędkością 2500 obr./min przez 10 minut w temperaturze 4 °C. Klarowny supernatant zebrać i zważyć, a synerезę (S) obliczyć zgodnie z następującym równaniem:

$$S = \frac{m_s}{m_p} \times 100\%,$$

gdzie: m_s – masa supernatantu (g), m_p – masa próbki jogurtu (g)

Opracowanie wyników:

Tabela – WHC i stopień synerезы jogurtów

	m_1 [g]	m_2 [g]	WHC	m_s [g]	m_p [g]	S
Jogurt naturalny						
Jogurt naturalny typu greckiego						
Jogurt owocowy						
Jogurt pitny						

Podsumowanie – należy wykazać, który jogurt charakteryzował się najwyższą, a który najniższą wartością WHC i stopniem synerезы. Wyjaśnić wyniki w odniesieniu do składu i struktury produktu (zawartość białka, sposób produkcji, obecność dodatków). Wykazać zależność pomiędzy WHC i S.



Część III: Badanie efektywności rozdziału śmietanki od mleka

1. Przygotowanie próbki

Odmierzyć określoną objętość mleka (2 x 1000 ml). Jedna porcja mleka powinna mieć temperaturę 5°C (ML₅), a druga 35°C (ML₃₅).

2. Proces wirowania

Umieścić mleko w wirówce. Przeprowadzić separację przy ustalonych parametrach (prędkość obrotowa, czas). Zebrać oddzielnie: frakcję śmietanki, frakcję mleka odtłuszczonego.

3. Pomiar objętości, masy i zawartości tłuszczu

W cylindrze miarowym zmierzyć objętość poszczególnych frakcji, każdą frakcję zważyć. Zmierzyć zawartość tłuszczu przy wykorzystaniu spektrometru NIR (wg instrukcji prowadzącego).

4. Wydajność separacji śmietanki

Wydajność separacji (WS) śmietanki liczymy jako iloraz masy śmietanki (m_s) i masy początkowej mleka (m_p):

$$WS = \frac{m_s}{m_p} \cdot 100\%$$

Efektywność separacji tłuszczu (EST) liczymy jako stosunek masy tłuszczu w mleku odtłuszczonym (m_{odt}) do początkowej masy tłuszczu w mleku (m_{pt}):

$$EST = \frac{m_{odt}}{m_{pt}} \cdot 100\%$$

**Opracowanie wyników:**

Tabela – wskaźniki rozdziału mleka

	ML ₅	ML ₃₅
Masa początkowa mleka [g]		
Objętość śmietanki [ml]		
Masa śmietanki [g]		
Objętość mleka odtłuszczonego [ml]		
WS [%]		
Zawartość tłuszczu w mleku odtłuszczonego [%]		
Efektywność oddzielenia tłuszczu [%]		

Podsumowanie – należy ocenić skuteczność rozdziału mleka na śmietankę i mleko odtłuszczone, wskazać znaczenie temperatury dla efektywności separacji.

Część IV: Badanie efektywności stopnia odwodnienia mleka w wyparce próżniowej

1. Przygotowanie próbki

Odmierzyć 2 x po 250 ml mleka. Przebrać jedną porcję do kolby.

2. Proces odwadniania

Ustawić łaźnię na 45°C, zamontować kolbę z próbą. Kolbę zanurzyć w wodzie łaźni. W bibliotece rozpuszczalników wybrać wodę, co umożliwia prawidłowe sterowanie temperaturą wrzenia w warunkach próżni. Włączyć proces. Zanotować ustalone ciśnienie robocze po stabilizacji próżni. Prowadzić proces przez 20 min, w tym czasie notować co 5 minut wskazania ilości wody skroplonej w odbieralniku. Po 20 minutach rozłączyć kolbę z próbą i zmierzyć gęstość mleka ważąc 50 ml mleka (d_{20}). Następnie odlane mleko po zmierzeniu gęstości powinno wrócić do kolby z resztą zagęszczanego mleka i być poddane odwadnianiu przez kolejne 20 minut. W tym czasie również notujemy co 5 minut wskazania ilości wody w odbieralniku. Po tym czasie zmierzyć ponownie gęstość (d_{40}).

Kolbę umyć przed następną próbą. Temperaturę łaźni przestawić na 60°C. Przeprowadzić pomiary, jak poprzednio, dla nowej temperatury.



3. Obliczenie stopnia zagęszczenia mleka

Stopień zagęszczenia (SZ) policzyć jako stosunek gęstości mleka po określonym czasie odwadniania (d_{20} dla SZ₂₀ lub (d_{40}) dla SZ₄₀ do gęstości początkowej mleka (d_0):

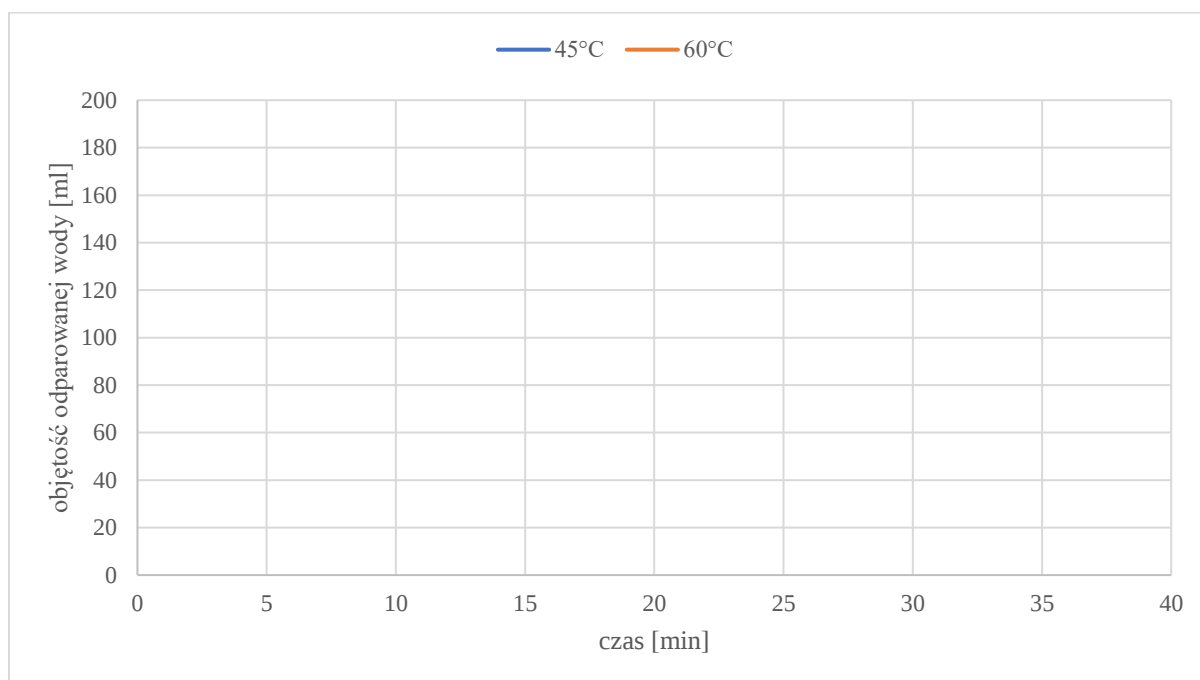
$$SZ_{20} = \frac{d_{20}}{d_0} \cdot 100\% \quad SZ_{40} = \frac{d_{40}}{d_0} \cdot 100\%$$

Opracowanie wyników:

Tabela – przebieg zagęszczania mleka w wyparce próżniowej:

		45°C	60°C
Objętość początkowa mleka [ml]		250	250
Gęstość początkowa mleka d_0 [ml/g]			
Ciśnienie pracy [mbar]			
Ilość wody w odbieralniku	0 min		
	5 min		
	10 min		
	15 min		
	20 min		
	25 min		
	30 min		
	35 min		
	40 min		
d_{20}			
d_{40}			
SZ ₂₀			
SZ ₄₀			

Wykonać wykres ewaporacji (na kolejnej stronie):



Podsumowanie – należy przeanalizować efektywność procesu odwadniania mleka w wyparce próżniowej oraz wpływ temperatury łaźni grzewczej na przebieg zagęszczania.

Pytania kontrolne:

1. Jakie cechy fizyczne mieszanki wpływają na skuteczność sedymentacji, filtracji i wirowania?
2. Czym różni się filtracja grawitacyjna od próżniowej pod względem szybkości i zastosowania?
3. Jak działa wirowanie i jak temperatura mleka wpływa na oddzielanie śmietanki?
4. Czym metody membranowe różnią się od zwykłej filtracji?

**BLOK 5. Operacje separacyjne ciecz–para**

Procesy separacyjne są kluczowym elementem technologii żywności, umożliwiając rozdzielanie mieszanin na składniki o odmiennych właściwościach fizykochemicznych. Jedną z najważniejszych metod rozdziału fazowego stanowią operacje oparte na równowadze ciecz – para, obejmujące destylację prostą oraz rektyfikację frakcyjną. Obie techniki wykorzystują zależność pomiędzy składem mieszaniny ciekłej a składem pary pozostającej z nią w równowadze. Równowaga ciecz – para opisana jest przez **prawo Raoult**a i **prawo Daltona**, które określają zależność pomiędzy składem fazy ciekłej i parowej. Znajomość tych zjawisk pozwala przewidywać efektywność separacji, sterować procesem oraz projektować aparaturę przemysłową, taką jak kolumny rektyfikacyjne.

Prawo Raoult'a opisuje zachowanie składników **idealnych mieszanin ciecz–para**. Mówi ono, że ciśnienie pary nasyconej składnika nad mieszaniną jest proporcjonalne do jego ułamka molowego w cieczy:

$$p_i = x_i \cdot p_i^{sat}$$

gdzie: p_i – ciśnienie parcjale składnika „i-tego” w fazie parowej, x_i – ułamek molowy składnika w fazie ciekłej, p_i^{sat} – ciśnienie pary nasyconej czystego składnika.

Prawo Raoult'a obowiązuje ściśle w przypadku **idealnych roztworów**, czyli takich, w których oddziaływania między cząsteczkami są podobne. Dla rzeczywistych układów stosuje się współczynniki aktywności, które korygują zachowanie roztworów nieidealnych.

Prawo Daltona jest uzupełnieniem prawa Raoult'a i dotyczy **mieszanin gazowych**. Stwierdza ono, że całkowite ciśnienie pary nad cieczą (P) jest sumą ciśnień parcjalnych poszczególnych składników (p_i):

$$P = \sum_i p_i$$

Połączenie obu praw pozwala opisać skład pary równowagowej, która jest podstawą działania destylacji. Skład pary dany jest równaniem:

$$y_i = \frac{p_i}{P}$$

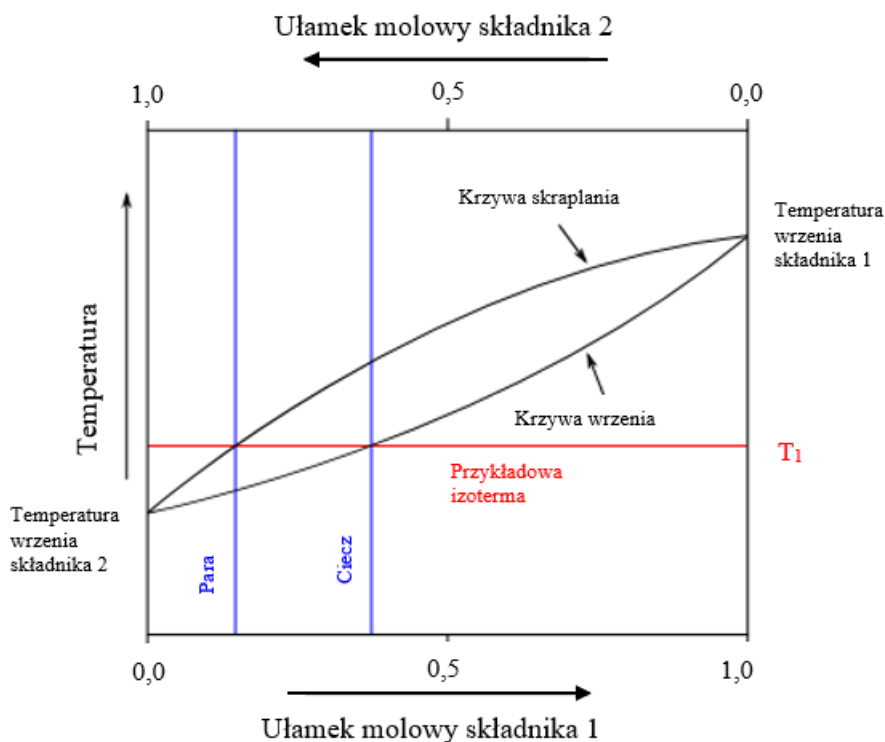
gdzie y_i to ułamek molowy składnika i w fazie parowej. Wynika z tego, że skład pary jest przesunięty w stronę komponentu bardziej lotnego, co umożliwia jego wzbogacanie w procesach destylacyjnych. Całkowite ciśnienie pary nad mieszaniną (P), zwykle równe ciśnieniu zewnętrznemu, np. 1013 hPa (1 atm) przy destylacji atmosferycznej.

Równowaga ciecz–para opisuje współistnienie dwóch faz w ustalonej temperaturze i ciśnieniu. Układ binarny (dwuskładnikowy) przedstawia się zwykle w postaci **diagramu temperatury wrzenia**. W warunkach stałego ciśnienia (najczęściej 1 atm) wykreśla się dwie krzywe:

- **krzywą wrzenia (*bubble point curve*)** – opisuje początek wrzenia mieszaniny i zależność między składem cieczy a temperaturą,



- **krzywą skraplania (*dew point curve*)** – opisuje skład pary zaczynającej kondensować.



Pomiędzy tymi krzywymi znajduje się obszar dwufazowy (mieszanina jednocześnie zawiera ciecz i parę). Odczytując z wykresu skład cieczy oraz odpowiadającej jej pary, można określić efektywność rozdzału jednego etapu destylacyjnego. Różnica między składem cieczy a pary decyduje o tym, jak bardzo wzbogacony zostanie składnik bardziej lotny.

Czerwona linia opisuje, co dzieje się z mieszaniną przy danej temperaturze (T_1). Punkt przecięcia izotermy z krzywą wrzenia (po lewej) to jest skład cieczy (x), w którym przy tej temperaturze mieszanina zaczyna wrzeć (pojawia się pierwsza para). Z punktu przecięcia się izotermy z krzywą wrzenia rysuje się pionową linię do góry, aż przetnie krzywą skraplania. Ten górny punkt odpowiada składowi pary (y), która jest w równowadze z tą cieczą. Para ma zawsze większą zawartość składnika bardziej lotnego niż ciecz.

Właściwości krzywych równowagi określają, czy możliwy jest rozdzał mieszaniny metodą destylacji. W układach wykazujących azeotropię, czyli punkt, w którym ciecz i para mają taki sam skład, rozdzał destylacyjny jest ograniczony lub niemożliwy.

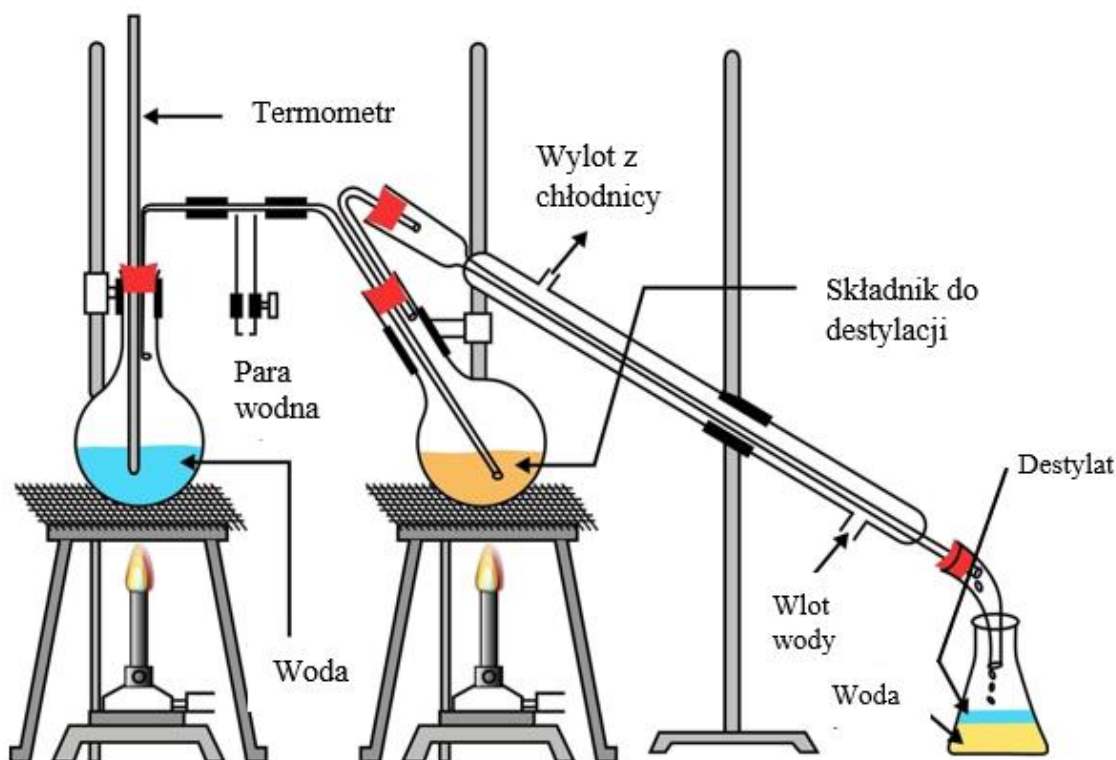
Destylacja prosta

Destylacja jest procesem rozdzielania mieszanin ciekłych na frakcje o różnym składzie na podstawie różnic w lotności ich składników. Destylacja prosta jest jednorazowym procesem separacyjnym polegającym na:

- ogrzewaniu mieszaniny ciekłej,
- doprowadzeniu do wrzenia,
- skraplaniu pary i odbiorze destylatu.

Destylacja prosta umożliwia rozdzielenie składników o znacznie różniących się temperaturami wrzenia, co sprawia, że destylacja prosta umożliwia tylko **niepełny** rozdział mieszaniny.

Krzywa destylacji prostej może być wykreślona jako zależność składu destylatu od składu cieczy pozostałej w kolbie destylacyjnej. Zależność ta pokazuje zmniejszającą się efektywność separacji wraz z postępem destylacji – ciecz staje się coraz mniej bogata w bardziej lotny składnik, przez co efektywność pogarsza się. Proces ten stosuje się głównie wtedy, gdy różnice lotności składników są duże lub gdy celem jest otrzymanie wstępnie wzbogaconego produktu.



Elementy zestawu do destylacji prostej (rysunek powyżej), to:

- Kolba destylacyjna – zwykle okrągłodenna, w której umieszcza się mieszaninę.
- Termometr z korkiem lub nasadka termometryczna.

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)



3. Odstojnik/zwężka (opcjonalnie), która zapobiega przenoszeniu cieczy do chłodnicy.
4. Chłodnica Liebiga, która służy do skraplania pary; przepływ wody: dół → góra.
5. Odbieralnik (kolba odbiorcza) służąca do zbierania destylatu.
6. Źródło ciepła – najczęściej płaszczy grzewczy.
7. Statyw i łączniki, które zapewniają stabilizację całego układu.

Rektyfikacja frakcyjna

Rektyfikacja jest wieloetapowym procesem destylacyjnym prowadzonym w kolumnie rektyfikacyjnej, w której wielokrotnie dochodzi do kontaktu pary i cieczy. Każdy taki kontakt można traktować jako jedno idealne „stadium równowagi” – tzw. **półkę teoretyczną**.

Typowa kolumna rektyfikacyjna składa się z:

- przegrzewacza / reboilera – źródło par dla kolumny,
- kolumny właściwej z półkami lub wypełnieniem,
- skraplacza – element skraplający parę u wylotu,
- odbieralnika destylatu,
- układu refluksu pozwalającego zawrócić część skroplonej pary na szczyt kolumny.

W kolumnie zachodzi przeciwprądowy kontakt faz: para wznosi się ku górze, a ciecz (refluks) spływa w dół. Powoduje to wielokrotne wzbogacanie pary w składnik bardziej lotny.

Za każdym razem następuje lokalne wzbogacenie pary w składnik o większej lotności. W rezultacie: **szczyt kolumny** jest bogaty w składnik o najniższej temperaturze wrzenia, **dół kolumny** jest wzbogacony w składnik o wyższej temperaturze wrzenia.

Wysoka czystość produktu możliwa jest dzięki temu, że rektyfikacja nie jest procesem jednoetapowym, tak jak destylacja prosta, lecz składa się z wielu kolejnych „mini-destylacji”.

Destylacja próżniowa

Destylacja próżniowa polega na rozdzielaniu cieczy w warunkach **obniżonego ciśnienia**, co powoduje **spadek temperatury wrzenia** składników mieszaniny. Dzięki temu proces można prowadzić znacznie łagodniej, unikając degradacji termicznej wrażliwych związków, takich jak aromaty, olejki eteryczne czy tłuszcze. Układ destylacyjny jest podłączony do pompy próżniowej, która obniża ciśnienie w kolbie, a pary skraplane są w chłodnicy jak w klasycznej destylacji. Niższa temperatura wrzenia sprawia, że proces zachodzi szybciej i przy mniejszym zużyciu energii. Destylacja próżniowa jest szeroko stosowana w przemyśle spożywczym, perfumeryjnym i chemicznym do koncentracji, oczyszczania oraz odzyskiwania lotnych składników.



Znaczenie operacji separacyjnych ciecz–para w praktyce technologii żywności

Operacje separacyjne ciecz–para, takie jak destylacja prosta, destylacja próżniowa oraz rektyfikacja frakcyjna, mają bardzo szerokie zastosowanie w technologii żywności i należą do kluczowych procesów umożliwiających zarówno otrzymywanie składników, jak i kontrolę jakości produktów spożywczych.

Operacje separacyjne ciecz–para są podstawowymi metodami:

1. Separacji i oczyszczania związków lotnych z surowców roślinnych (zioł i przypraw (mięta, bazylija, oregano, tymianek), skórek cytrusów (citroloidy i limonen), kawy i herbaty (frakcje aromatyczne o niskiej masie cząsteczkowej)).
2. Podczas **produkcji alkoholu i napojów fermentowanych**:
 - koncentracji etanolu po fermentacji (spirytus, wódka, rum, whisky),
 - stabilizacji i oczyszczaniu destylatów,
 - usuwaniu niepożądanych frakcji (aldehydy, fuzle),
 - produkcji napojów niskoalkoholowych i bezalkoholowych poprzez **oddestylowanie etanolu**.
3. Koncentracja soków, ekstraktów i aromatów:
 - produkcji koncentratów soków (np. NFC vs. koncentraty aromatyczne),
 - odzyskiwania lotnych związków aromatycznych,
 - uzyskiwania ekstraktów smakowych (wanilia, jabłko, jagody).
4. Dezodoryzacja olejów i tłuszczów (destylację parową pod próżnią)
 - usuwanie niepożądanych substancji lotnych (aldehydy, ketony, kwasy tłuszczowe),
 - obniżenie poziomu wolnych kwasów tłuszczowych (FFA),
 - poprawę smaku i zapachu oleju.
5. Usuwanie substancji niepożądanych lub toksycznych, np.:
 - destylacyjne usuwanie pozostałości rozpuszczalników z ekstraktów roślinnych,
 - obniżanie zawartości metanolu w destylatach owocowych,
 - usuwanie związków aromatycznych zwanych „off-flavours”.

Cel:

Poznanie zasad rozdzielania mieszanin ciecz–para poprzez destylację prostą olejków eterycznych, wyznaczenie krzywej destylacji.

Aparatura: zestaw do destylacji prostej, termometry, chłodnica, kolba destylacyjna, cylinder miarowy.

**Przebieg ćwiczenia:**

1. Przygotowanie próbki

Umyć dokładnie pomarańcze, następnie zetrzeć skórkę (flavedo) w ilości 100 g. Przełożyć materiał do rezerwuaru. Napełnić kolbę 750 ml wody destylowanej, wrzucić do niej mieszadło magnetyczne.

2. Proces destylacji

Włączyć płaszcz grzewczy na pełną moc i mieszanie. Proces destylacji prowadzić przez 90 min.

3. Pomiar objętości destylatu w funkcji czasu

Należy notować wskazania objętości zebranych poszczególnych frakcji co 30 minut.

4. Obliczenie wydajności destylacji

Wydajność destylacji (W_d) olejków eterycznych z pomarańczy liczymy jako iloraz masy olejków (m_{ol}) i masy początkowej materiału badawczego (m_p):

$$W_d = \frac{m_{ol}}{m_p} \cdot 100\%$$

Opracowanie wyników:

Tabela – wyniki destylacji olejków eterycznych

Masa początkowa materiału badawczego [g]	
Objętość destylatu po 30 min [ml]	
Objętość destylatu po 60 min [ml]	
Objętość destylatu po 90 min [ml]	
Masa uzyskanych olejków eterycznych [g]	
W_d [%]	

Podsumowanie – należy ocenić skuteczność procesu destylacji, jaki wpływ czasu uzysk olejków, praktyczne spostrzeżenia (np. zmiany objętości, wygląd destylatu).



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Pytania kontrolne:

1. Na czym polega różnica między destylacją prostą a rektyfikacją frakcyjną i kiedy stosuje się każdą z tych metod?
2. Jak prawa Raoult'a i Daltona opisują równowagę ciecz–para i w jaki sposób wpływają na skład pary nad mieszaniną?
3. Dlaczego destylacja próżniowa jest stosowana w przemyśle spożywczym i jakie korzyści daje w porównaniu z destylacją atmosferyczną?



BLOK 6. Operacje niskotemperaturowe

Procesy chłodzenia i zamrażania należą do podstawowych metod utrwalania żywności stosowanych w przemyśle spożywczym. Ich głównym celem jest spowolnienie lub zahamowanie procesów biologicznych, biochemicznych i fizykochemicznych odpowiedzialnych za psucie się produktów, przy jednoczesnym zachowaniu jak najwyższej jakości sensorycznej i wartości odżywczej. W przeciwieństwie do metod termicznych opartych na wysokiej temperaturze, takich jak pasteryzacja czy sterylizacja, procesy chłodnicze charakteryzują się relatywnie niewielką ingerencją w strukturę i skład chemiczny żywności.

Chłodzenie

Chłodzenie polega na obniżeniu temperatury produktu spożywczego, zazwyczaj do zakresu

od 0 do 4°C, bez doprowadzania do zamarzania wody zawartej w materiale. Obniżenie temperatury powoduje spowolnienie:

- aktywności enzymów,
- wzrostu i rozmnażania mikroorganizmów,
- reakcji chemicznych, takich jak utlenianie lipidów czy brunatnienie enzymatyczne.

Skuteczność chłodzenia zależy od szybkości odbioru ciepła, która jest determinowana przez:

- różnicę temperatur pomiędzy produktem a czynnikiem chłodzącym,
- współczynnik przejmowania ciepła,
- właściwości termofizyczne produktu (ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne),
- wielkość i kształt produktu.

Chłodzenie znajduje zastosowanie m.in. w przechowywaniu mięsa, ryb, mleka, warzyw i owoców. Jest to jednak metoda krótkotrwała, ponieważ nie eliminuje mikroflory, a jedynie ogranicza jej rozwój.

Zamrażanie

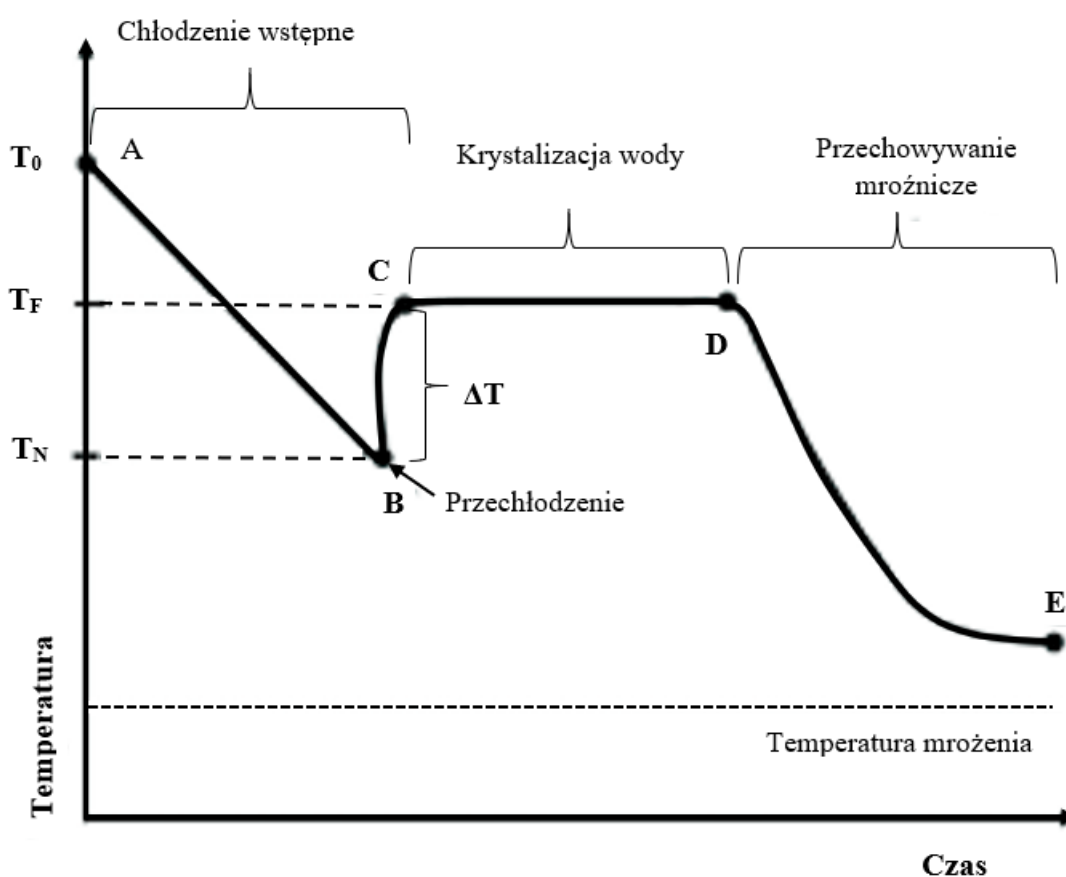
Zamrażanie jest procesem jednostkowym polegającym na obniżeniu temperatury produktu poniżej punktu zamarzania zawartej w nim wody, co prowadzi do jej krystalizacji. Woda stanowi główny składnik większości surowców spożywczych, dlatego jej przemiana fazowa odgrywa kluczową rolę w przebiegu zamrażania.

Proces zamrażania przebiega w czterech zasadniczych etapach (wykres poniżej):

1. Chłodzenie wstępne (A → B) – produkt oddaje ciepło jawne, a jego temperatura obniża się z temperatury początkowej (np. +20°C) do temperatury początku krystalizacji (ok. -1 do -2°C dla żywności). W tym etapie nie zachodzą jeszcze

przemiany fazowe, a szybkość chłodzenia zależy głównie od warunków wymiany ciepła. W punkcie B dochodzi do przechłodzenia, gdzie temperatura produktu może chwilowo spaść poniżej teoretycznego punktu zamarzania. Rozpoczyna się nukleacja lodu.

2. Początek krystalizacji wody ($B \rightarrow C$) – tworzenie kryształów lodu i wydzielanie ciepła krystalizacji, co powoduje wzrost temperatury do T_F .
3. Właściwa krystalizacja ($C \rightarrow D$) – temperatura produktu pozostaje niemal stała, ponieważ odbierane ciepło jest zużywane na ciepło przemiany fazowej (krystalizacji wody), a nie na dalsze obniżanie temperatury. Długość tego etapu decyduje o: wielkości kryształów lodu, stopniu uszkodzenia struktury komórkowej, jakości produktu po rozmrożeniu.
4. Dalsze wychładzanie ($D \rightarrow E$) – obniżenie temperatury zamrożonego produktu do temperatury magazynowania (najczęściej -18°C lub niższej). W tym etapie odbierane jest już tylko ciepło jawne lodu i suchej masy produktu.



W praktyce żywność nie zamarza w jednej, ściśle określonej temperaturze, ponieważ zawiera rozpuszczone substancje (cukry, sole, białka), które powodują obniżenie



temperatury krzepnięcia i rozciągnięcie procesu krystalizacji w pewnym zakresie temperatur (działanie krioprotekcyjne).

Jednym z najważniejszych parametrów procesu jest szybkość zamrażania, która decyduje o wielkości i rozmieszczeniu kryształów lodu w strukturze produktu:

- szybkie zamrażanie sprzyja powstawaniu licznych, drobnych kryształów lodu, równomiernie rozmieszczonych zarówno wewnątrz, jak i pomiędzy komórkami. Minimalizuje to uszkodzenia struktury komórkowej i pozwala zachować dobrą teksturę produktu po rozmrożeniu.
- wolne zamrażanie prowadzi do tworzenia dużych kryształów lodu, głównie w przestrzeniach międzykomórkowych, co powoduje mechaniczne uszkodzenie ścian komórkowych, wyciek soku komórkowego i pogorszenie jakości sensorycznej.

W zależności od rodzaju surowca, jego kształtu, zawartości wody oraz skali produkcji przemysłowej stosuje się różne metody zamrażania produktów spożywczych, które różnią się mechanizmem odbioru ciepła, szybkością procesu oraz wpływem na jakość końcową produktu:

1. **zamrażanie powietrzne** – jest najczęściej stosowaną i najbardziej uniwersalną metodą. Polega na przepływie zimnego powietrza o temperaturze od -20 do -40°C wokół produktu umieszczonego na tacach, taśmach lub w komorach zamrażalniczych. Wymiana ciepła zachodzi głównie na drodze konwekcji, dlatego intensywność procesu zależy od prędkości przepływu powietrza, jego temperatury oraz wielkości produktu. Metoda ta jest prosta w eksploatacji i umożliwia jednoczesne zamrażanie dużych ilości surowca, jednak charakteryzuje się stosunkowo wolnym tempem odbioru ciepła. W efekcie może prowadzić do tworzenia większych kryształów lodu, co niekiedy powoduje uszkodzenia struktury komórkowej i pogorszenie jakości produktu po rozmrożeniu. Zamrażanie powietrzne znajduje zastosowanie m.in. w zamrażaniu owoców, warzyw, mięsa oraz wyrobów piekarniczych.
2. **zamrażanie kontaktowe** – polega na bezpośrednim kontakcie produktu z intensywnie chłodzoną powierzchnią, np. metalowymi płytami zamrażalniczymi, taśmami lub formami. W tym przypadku dominującym mechanizmem wymiany ciepła jest przewodzenie, które jest znacznie efektywniejsze niż konwekcja powietrzna. Dzięki temu proces zamrażania przebiega szybciej i bardziej równomiernie. Metoda ta jest szczególnie korzystna dla produktów o regularnym kształcie i płaskiej formie, takich jak filety rybne, porcje mięsa, bloki szpinaku czy masło. Ograniczeniem zamrażania kontaktowego jest mniejsza elastyczność w odniesieniu do kształtu produktów oraz konieczność zapewnienia dobrego przylegania surowca do powierzchni chłodzącej.



3. **zamrażanie kriogeniczne** – wykorzystuje ekstremalnie niskie temperatury ciekłych gazów, najczęściej ciekłego azotu (-196°C) lub ciekłego dwutlenku węgla ($-78,5^{\circ}\text{C}$). Czynnik kriogeniczny odparowuje w kontakcie z produktem, odbierając bardzo duże ilości ciepła i umożliwiając niezwykle szybkie zamrażanie. Taka intensywność procesu sprzyja powstawaniu bardzo drobnych kryształów lodu, co pozwala zachować strukturę komórkową, teksturę, barwę i wartość sensoryczną produktu na bardzo wysokim poziomie. Zamrażanie kriogeniczne jest stosowane głównie do produktów wysokiej jakości, takich jak owoce jagodowe, dania gotowe, owoce morza czy produkty premium. Wadą tej metody są jednak wysokie koszty eksploatacyjne oraz konieczność stosowania specjalistycznej aparatury i zabezpieczeń.
4. **zamrażanie fluidyzacyjne** – znane również jako IQF (*Individually Quick Frozen*), polega na szybkim zamrażaniu pojedynczych cząstek produktu w strumieniu zimnego powietrza. Fluidyzacja polega na wprowadzeniu strumienia gazu (najczęściej zimnego powietrza) od dołu przez warstwę drobnych cząstek stałych w taki sposób, aby cząstki zostały uniesione i zaczęły zachowywać się jak ciecz. Stan fluidalny charakteryzuje się: intensywnym mieszaniem cząstek, bardzo dużą powierzchnią wymiany ciepła, równomiernym kontaktem produktu z czynnikiem chłodzącym. Metoda ta umożliwia uzyskanie produktów nieposklejanych, o jednolitej wielkości kryształów lodu, zachowujących naturalny kształt i strukturę. Technika IQF jest powszechnie stosowana do zamrażania: warzyw (groszek, kukurydza, fasolka), owoców (truskawki, maliny), drobnych elementów mięsnych i rybnych. Zaletą zamrażania fluidyzacyjnego jest wysoka jakość produktu końcowego oraz możliwość dozowania dokładnej ilości produktu po rozmrożeniu.

Obniżenie temperatury w procesach chłodzenia i zamrażania produktów spożywczych na skalę przemysłową jest wynikiem pracy układów chłodniczych na drodze kontrolowanego odbioru ciepła z chłodzonego materiału. Podstawą działania większości instalacji chłodniczych w przemyśle spożywczym jest obieg termodynamiczny czynnika chłodniczego, najczęściej realizowany jako obieg sprężarkowy.

W klasycznym układzie chłodniczym czynnik chłodniczy krąży w zamkniętym obiegu i przechodzi kolejno przez cztery podstawowe elementy:

- parownik – czynnik chłodniczy odparowuje, pobierając ciepło z chłodzonego produktu lub powietrza; to na tym etapie następuje faktyczne obniżenie temperatury,
- sprężarka – zasysa parę czynnika i spręża ją, powodując wzrost ciśnienia i temperatury,
- skraplacz – czynnik oddaje ciepło do otoczenia i ulega skropleniu,



- zawór rozprężny – obniża ciśnienie ciekłego czynnika, przygotowując go do ponownego odparowania w parowniku.

Niska temperatura w parowniku jest wynikiem niskiego ciśnienia parowania czynnika chłodniczego, co zgodnie z zasadami termodynamiki prowadzi do obniżenia jego temperatury wrzenia. Dzięki temu możliwy jest efektywny odbiór ciepła z produktu. W instalacjach chłodniczych przemysłu spożywczego stosuje się różne czynniki chłodnicze, dobierane pod kątem temperatury pracy, bezpieczeństwa i wpływu na środowisko. Najczęściej wykorzystywane są niektóre freony (np. R404A) i amoniak.

Urządzenia chłodnicze i mroźnicze stosowane w przemyśle spożywczym można klasyfikować według temperatury pracy, sposobu wymiany ciepła.

Urządzenia do schładzania (chłódnictwo dodatnie: 0 ÷ +10°C)	Urządzenia do zamrażania (chłódnictwo ujemne: poniżej -18°C)
• komory chłodnicze, • szafy chłodnicze, • schładzarki szokowe (blast chillers), • tunele chłodnicze, • wymienniki ciepła do szybkiego chłodzenia cieczy (płytowe, rurowe), • chłodnice zanurzeniowe (np. w browarnictwie), • stoły chłodnicze, • witryny chłodnicze, cukiernicze.	• zamrażarki komorowe, • zamrażarki tunelowe, • zamrażarki płytowe, • zamrażarki fluidyzacyjne, • zamrażarki kriogeniczne. • zamrażarki szokowe, • komory i szafy mroźnicze, • kostkarki i łuskarki do lodu, • maszyny do lodów, sorbetów, • stoły mroźnicze.
Zastosowanie: mleko, soki, gotowe potrawy, półprodukty, wyroby cukiernicze.	Zastosowanie: mięso, ryby, owoce, warzywa, dania gotowe, lody.

Cel:

Poznanie wpływu dodatków (cukru, soli, skrobi) na tempo zamrażania wody. Obserwacja różnic w zamrażaniu roztworów i żeli w warunkach chłodniczych. Zrozumienie pojęcia obniżenia temperatury zamrażania w roztworach (efekt krioprotekcyjny).

Sprzęt i materiały: zamrażarka laboratoryjna, termopary, rejestrator temperatury, pionowy frezer do lodów, próbki produktu.

**Przebieg ćwiczenia:**

1. Przygotowanie roztworów do badań:
 - woda destylowana (kontrola – **K**),
 - woda + 10% sacharozy (10 g cukru na 90 ml wody) (**W+C**),
 - woda + 3% soli (3 g NaCl na 97 ml wody) (**W+S**),
 - kleik/żel ze skrobi (5 g skrobi + 95 ml wody, podgrzany do uzyskania żelu) (**KL**).
2. Uruchomienie procesu zamrażania

Zanotuj temperaturę początkową roztworu po wlaniu do pojemnika mroźniczego. Pomiar czasu zamrażania rozpocząć od momentu załączenia się agregatu we frezerze (na panelu sterowania pojawi się symbol „❄”).

3. Pomiar temperatury zamrażania

Notować czas, w którym pojawia się pierwszy lód w każdej próbce (temperatura początku zamarzania). Co 5 minut zmiany temperatury za pomocą termopary. Proces zamrażania zakończyć po uzyskaniu stanu zamrożenia lub po 30 minutach. Obserwuj tempo zamarzania – zmniejszanie się objętości cieczy w stanie ciekłym, wygląd struktury kryształów lodu.

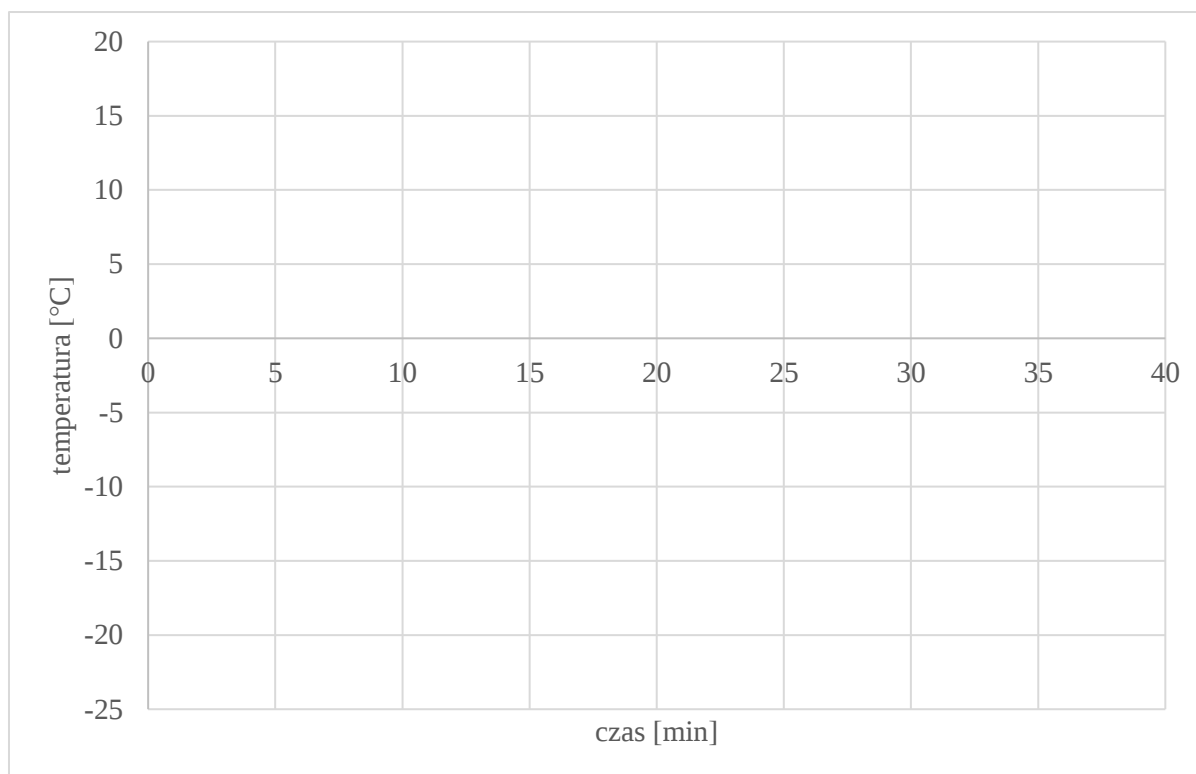
Opracowanie wyników:

Tabela – wyniki zmian temperatury i tempa zamrażania:

	K	W+C	W+S	KL
Temperatura początkowa roztworu				
Temperatura po 5 min				
Temperatura po 10 min				
Temperatura po 15 min				
Temperatura po 20 min				
Temperatura po 25 min				
Temperatura po 30 min				
Temperatura początku zamarzania				
Czas początku zamarzania				
Temperatura końca zamarzania				
Czas końca zamarzania				



Wykonać wykres przebiegu zamrażania dla każdego roztworu



Podsumowanie – należy wskazać, jak dodatki (cukier, sól, skrobia) wpłynęły na temperaturę i tempo zamarzania wody, jak zmieniał się przebieg krzywych zamarzania w czasie dla poszczególnych próbek (różnice w kształcie wykresów temperatury vs. czasu, moment początku i końca zamarzania), jak struktura próbki (roztwór vs. żel) wpływała na przebieg zamarzania.

Pytania kontrolne:

1. Jakie są etapy zamarzania produktu spożywczego?
2. Co wpływa na szybkość zamarzania?
3. Jakie skutki ma zbyt wolne zamarzanie dla jakości produktu?