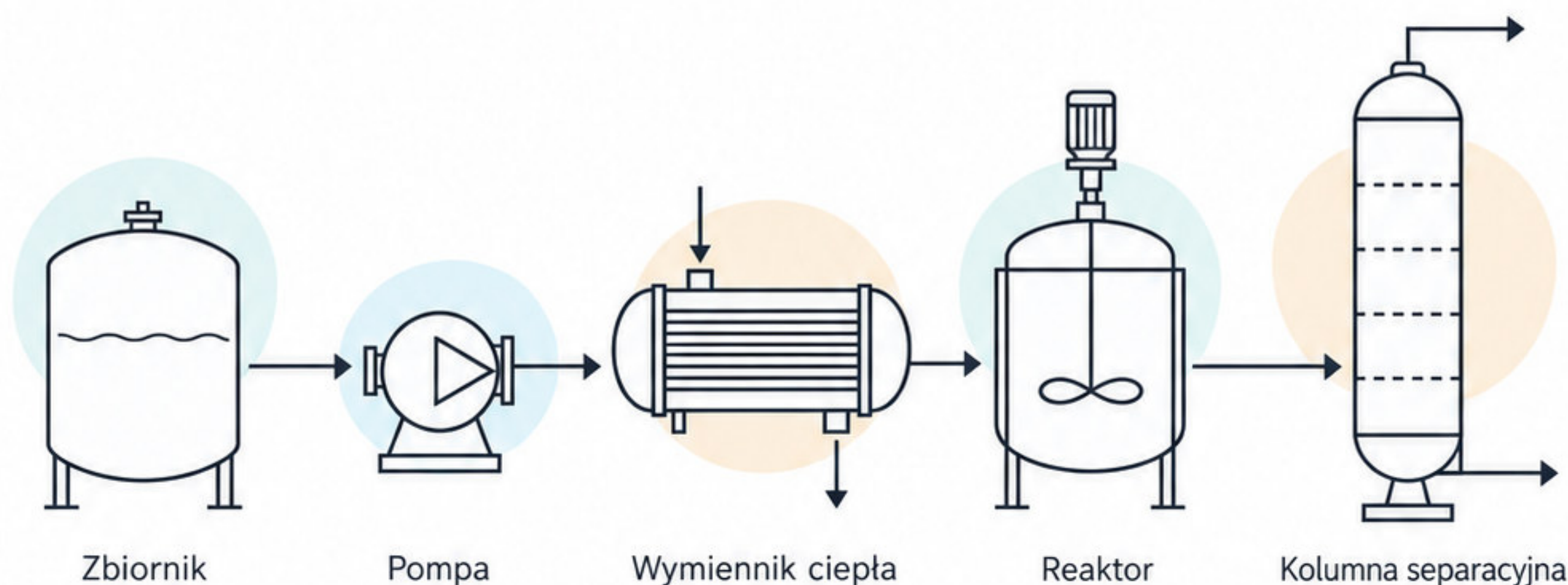


Przewodnik powtórkowy przed egzaminami z inżynierii



Checklista najważniejszych tematów
z inżynierii chemicznej przed zaliczeniami
i egzaminami

Sprawdź, co już umiesz. Wykryj luki. Powtórz to, co naprawdę ważne.



Informacje o materiale

© 2026 Przewodnik powtórkowy przed egzaminami z inżynierii
Wszelkie prawa zastrzeżone.

Niniejszy materiał został przygotowany jako pomoc
w organizowaniu powtórek z zagadnień związanych
z inżynierią chemiczną.

Nie zastępuje wykładów, ćwiczeń, laboratoriów,
podręczników akademickich ani wymagań określonych
przez prowadzącego dany przedmiot.

Programy studiów i zakres egzaminów mogą różnić się
między uczelniami. Przed egzaminem zawsze porównaj
checklistę z oficjalnym zakresem materiału przekazanym
przez prowadzącego.

Materiał przeznaczony jest wyłącznie do użytku osobistego.
Kopiowanie, rozpowszechnianie lub odsprzedaż bez zgody
właściciela praw autorskich jest zabroniona.



Spis treści

START

Informacje o materiale	01
Spis treści	02
Jak przygotować się do skutecznej powtórki	03

MODUŁ 01 — PLAN POWTÓRKI I DIAGNOZA GOTOWOŚCI

Plan powtórki i diagnoza gotowości	04
Jak korzystać z przewodnika	05
Mapa priorytetów przed egzaminem	06
Diagnostyczna checklista startowa	07
Plan powtórki: 7 dni i ostatnie 24 godziny	08

MODUŁ 02 — PODSTAWY I BILANSE

Podstawy i bilanse	09
Wielkości procesowe, jednostki i analiza wymiarowa	10
Bilans masy	11
Bilanse składników, recyrkulacja, obejście i purge	12
Bilans energii	13
Checklista i autotest: podstawy i bilanse	14

MODUŁ 03 — TERMODYNAMIKA

Termodynamika	15
Stan układu i zasady termodynamiki	16
Właściwości termodynamiczne i przemiany	17
Równowaga fazowa i mieszaniny	18
Entalpia, ciepło i obliczenia energetyczne	19
Checklista i autotest: termodynamika	20

MODUŁ 04 — WYMIANA CIEPŁA

Wymiana ciepła	21
Przewodzenie ciepła	22
Konwekcja i liczby bezwymiarowe	23
Promieniowanie ciepłe	24
Wymienniki ciepła	25
Checklista i autotest: wymiana ciepła	26

MODUŁ 05 — WYMIANA MASY I PROCESY ROZDZIELANIA

Wymiana masy i procesy rozdzielania	27
Dyfuzja i prawo Ficka	28
Współczynniki wnikania i przenikania masy	29
Destylacja	30
Absorpcja, ekstrakcja i suszenie	31
Checklista i autotest: wymiana masy	32

MODUŁ 06 — PRZEPŁYW PŁYNÓW I OPERACJE JEDNOSTKOWE

Przepływ płynów i operacje jednostkowe	33
Ciśnienie, przepływ, równanie Bernoulliego i Reynolds	34
Straty ciśnienia, rurociągi i pompy	35
Sedymentacja i filtracja	36
Mieszanie, rozdrabnianie i operacje mechaniczne	37
Checklista i autotest: operacje jednostkowe	38

MODUŁ 07 — KINETYKA I REAKTORY

Kinetyka i reaktory	39
Szybkość reakcji i równania kinetyczne	40
Arrhenius, konwersja, selektywność i wydajność	41
Reaktor okresowy, CSTR i PFR	42
Porównanie i dobór reaktorów	43
Checklista i autotest: kinetyka i reaktory	44

MODUŁ 08 — PROCESY PRZEMYSŁOWE I FINAŁOWA KONTROLA

Procesy przemysłowe i finałowa kontrola	45
Schemat procesu, aparaty i przepływy	46
Proces przemysłowy, media pomocnicze i bezpieczeństwo	47
Zadanie integracyjne: od bilansu do aparatu	48
Ostateczna checklista przed egzaminem	49



Nie musisz powtarzać wszystkiego od początku

Przed egzaminem najważniejsze nie jest przeczytanie największej liczby stron. Najważniejsze jest ustalenie, co naprawdę umiesz, gdzie masz luki i które zagadnienia wymagają jeszcze jednej powtórki.

Ten przewodnik ma trzy funkcje:

1. pomaga sprawdzić zakres najważniejszych zagadnień;
2. pozwala szybko oznaczyć poziom pewności;
3. kieruje uwagę na obszary wymagające powtórki.

Twój cel

Po przejściu całego przewodnika powinieneś być w stanie spojrzeć na każde kluczowe zagadnienie i odpowiedzieć na trzy pytania:

- Czy potrafię wyjaśnić je własnymi słowami?
- Czy potrafię rozpoznać właściwe równanie lub metodę?
- Czy potrafię zastosować je w prostym zadaniu?



Rozpoznaj



Wyjaśnij



Oblicz



Zastosuj



Nie zaznaczaj ✓ tylko dlatego, że temat wygląda znajomo. Zaznacz go dopiero wtedy, gdy potrafisz go odtworzyć bez patrzenia do notatek.

Zacznij od diagnozy, a dopiero potem otwieraj notatki.

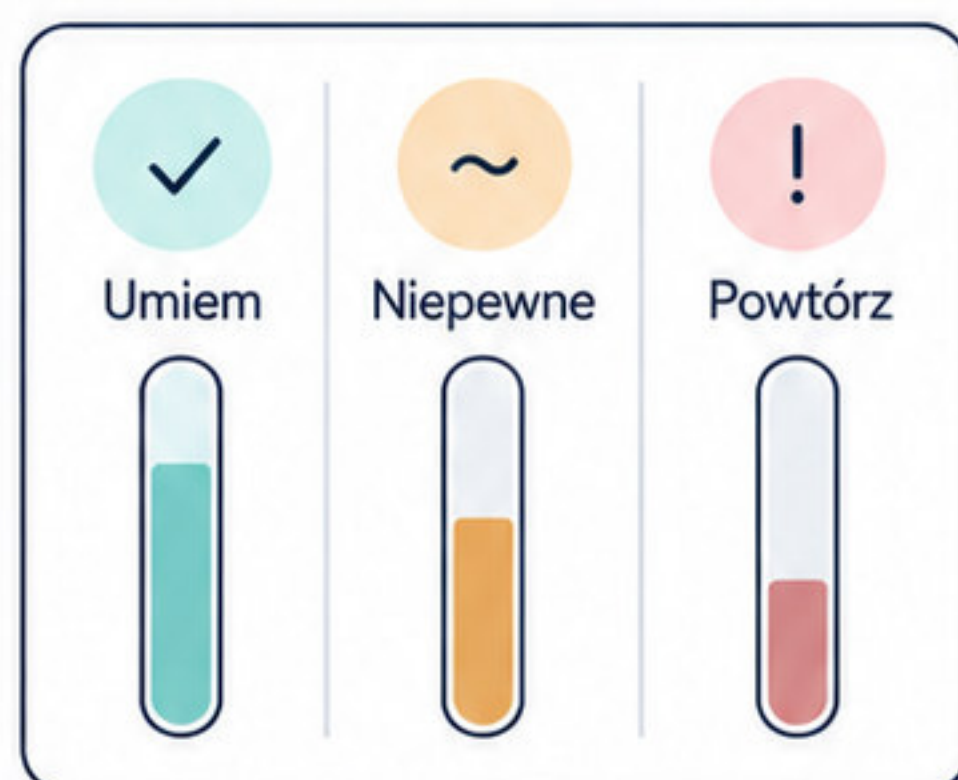


MODUŁ 01

Plan powtórki i diagnoza gotowości

Najpierw sprawdź, czego naprawdę potrzebujesz się uczyć.

Pomóc studentowi ocenić własny poziom przygotowania, uporządkować materiał według priorytetu oraz zaplanować końcową powtórkę.



Co zawiera moduł

-  Jak korzystać z checklisty
-  Jak ustalać priorytety
-  Szybka diagnoza wszystkich głównych obszarów
-  Plan działania na 7 dni i ostatnie 24 godziny





3 oznaczenia, które pokażą Ci, co powtarzać

Nie czytaj materiału biernie. Każdy temat powinien dostać jeden z trzech statusów – dzięki temu szybko zobaczysz, na czym się skupić.



✓ UMIEM

Potrafię wyjaśnić temat bez notatek i wykonać podstawowe zadanie.



~ NIEPEWNE

Rozpoznaję temat, ale mylę kroki, wzory, założenia albo jednostki.



! POWTÓRZ

Nie potrafię samodzielnie wyjaśnić zagadnienia lub nie wiem, od czego rozpocząć zadanie.

Przechodząc przez przewodnik:

- ☐ przeczytaj punkt checklisty;
- ☐ zakryj objaśnienie lub wzór;
- ☐ spróbuj wyjaśnić zagadnienie z pamięci;
- ☐ przypisz jeden z trzech statusów;
- ☐ wracaj przede wszystkim do pozycji ~ i !.



Zasada 60 sekund

Jeżeli przez około minutę nie potrafisz rozpocząć wyjaśnienia lub zadania, nie traktuj tematu jako opanowanego.

Przykład

Temat: bilans masy.

- ✓ = student potrafi zapisać „wejście – wyjście + generacja – zużycie = akumulacja” i wyjaśnić znaczenie składników.
- ~ = pamięta zasadę, ale nie wie, kiedy człon akumulacji wynosi zero.
- ! = nie potrafi zbudować równania bilansowego.



Nie każdy temat wymaga tyle samo czasu

Ten schemat łączy znaczenie tematu na egzaminie z Twoim aktualnym poziomem opanowania. Dzięki temu możesz skupić się na tym, co naprawdę przyniesie największy efekt.



Wpisz do macierzy zagadnienia z sylabusu, listy pytań, starych egzaminów i checklist z tego przewodnika.

Przykłady:

- Bilans masy → A
- Podstawowe prawo Fouriera → B
- Rzadko omawiana korelacja empiryczna → C
- Przeliczanie podstawowych jednostek → D



Priorytet ustalaj według swojego egzaminu. Ten przewodnik wskazuje fundamenty, ale prowadzący może akcentować inne zagadnienia.

Moje 3 najważniejsze tematy do powtórzenia dziś:

1. ---
2. ---
3. ---



Szybki skan: gdzie masz największe luki?

Nie rozwiązuj jeszcze zadań. Oceń każdy obszar na podstawie tego, czy potrafisz własnymi słowami powiedzieć, czego dotyczy i jakiego typu problemy się w nim rozwiązuje.

1 PODSTAWY I BILANSE

- ☐ Rozumiem podstawowe wielkości procesowe i jednostki.
- ☐ Potrafię wykonać bilans masy całkowitej i składnika.
- ☐ Rozumiem różnicę między stanem ustalonym i nieustalonym.
- ☐ Potrafię zapisać podstawowy bilans energii.

2 TERMODYNAMIKA

- ☐ Rozumiem pojęcia układu, stanu, pracy, ciepła i energii.
- ☐ Potrafię rozpoznać podstawowe przemiany termodynamiczne.
- ☐ Rozumiem sens entalpii i równowagi fazowej.

3 WYMIANA CIEPŁA

- ☐ Rozróżniam przewodzenie, konwekcję i promieniowanie.
- ☐ Potrafię wskazać siłę napędową wymiany ciepła.
- ☐ Rozumiem zasadę działania wymiennika ciepła.

4 WYMIANA MASY

- ☐ Rozumiem, czym jest dyfuzja i gradient stężenia.
- ☐ Potrafię rozpoznać podstawowe procesy rozdzielania.
- ☐ Rozumiem ideę destylacji, absorpcji i ekstrakcji.

5 PRZEPŁYW I OPERACJE JEDNOSTKOWE

- ☐ Rozumiem zależność między ciśnieniem, prędkością i przepływem.
- ☐ Wiem, do czego służą liczba Reynoldsa i równanie Bernoulliego.
- ☐ Rozpoznaję podstawowe operacje jednostkowe i aparaty.

6 KINETYKA I REAKTORY

- ☐ Rozumiem szybkość reakcji i wpływ temperatury.
- ☐ Rozumiem pojęcia konwersji, selektywności i wydajności.
- ☐ Rozróżniam reaktor okresowy, CSTR i PFR.

7 PROCESY PRZEMYSŁOWE

- ☐ Potrafię czytać prosty schemat procesu.
- ☐ Rozpoznaję główne aparaty i strumienie.
- ☐ Potrafię połączyć bilanse, transport i reakcję w jednym procesie.

Policz pozycje oznaczone !

0–5: Dobra baza — skup się na detalach i zadaniach.

6–12: Masz kilka ważnych luk — pracuj według priorytetów.

13 lub więcej: Zacznij od fundamentów. Nie próbuj naprawiać wszystkiego jednocześnie.

Ocena ma służyć orientacji, nie stanowić pomiaru wiedzy akademickiej.



Od chaosu do planu: ostatni tydzień przed egzaminem

Niezależnie od tego, jak szeroki jest zakres egzaminu, dobrze zaplanowany tydzień pozwala uporządkować wiedzę, zidentyfikować braki i wejść na egzamin ze spokojem. Poniżej znajdziesz uniwersalny plan działania, który możesz dostosować do swoich potrzeb.

JEŚLI MASZ 7 DNI



JEŚLI ZOSTAŁY 24 GODZINY



Blok powtórkowy 45 minut



Najważniejsza zasada: powtarzaj aktywnie. Samo ponowne czytanie notatek może tworzyć złudzenie znajomości materiału.

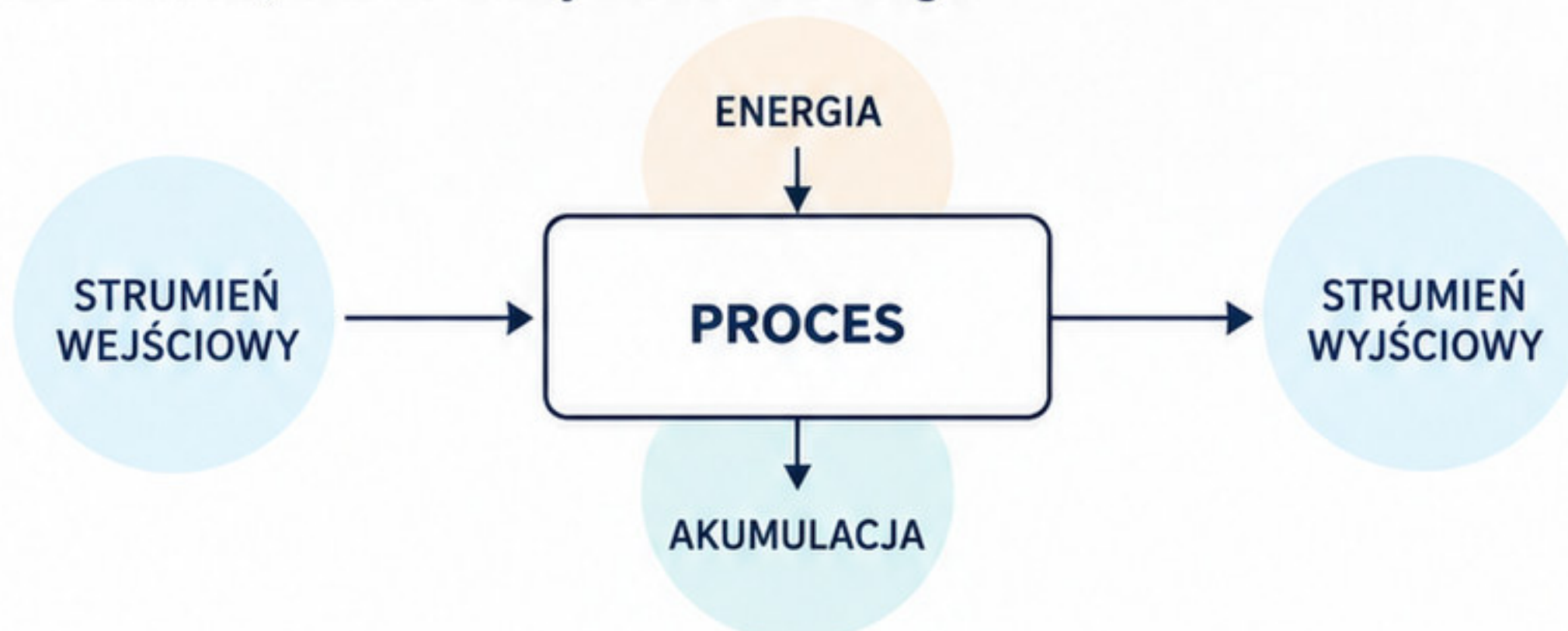


MODUŁ 02

Podstawy i bilanse

Zanim policzysz proces, ustal system, strumienie i to, co musi się zachować.

Przypomnieć fundamenty wykorzystywane później w niemal wszystkich obliczeniach procesowych: wielkości fizyczne, jednostki, granice układu, bilans masy i bilans energii.



$$\text{WEJŚCIE} - \text{WYJŚCIE} + \text{GENERACJA} - \text{ZUŻYCIE} = \text{AKUMULACJA}$$

Treści modułu

- Wielkości procesowe i analiza wymiarowa
- Bilans całkowitej masy
- Bilans składnika
- Stan ustalony i nieustalony
- Recyrkulacja, obejście i purge
- Bilans energii
- Autotest

Najpierw narysuj granice układu. Dopiero potem zapisuj równania.



Najpierw jednostki. Potem równania.

Wiele błędów na egzaminie nie wynika z braku znajomości wzoru, lecz z nieuważnego używania jednostek, niepoprawnych przeliczeń albo mieszania wielkości masowych i molowych.

Najważniejsze wielkości, które musisz rozpoznawać

Wielkość	Symbol przykładowy	Typowa jednostka SI
Masa	m	kg
Ilość substancji	n	mol lub kmol
Czas	t	s
Temperatura	T	K
Ciśnienie	p	Pa
Objętość	V	m^3
Gęstość	ρ	kg/m^3
Strumień masy	$\dot{m}$	kg/s
Strumień molowy	$\dot{n}$	mol/s
Strumień objętości	$\dot{V}$	m^3/s
Stężenie molowe	c	mol/m^3
Ułamek masowy	w_i	bezwymiarowy
Ułamek molowy	x_i lub y_i	bezwymiarowy

Trzy pytania kontrolne

- ☐ Czy wszystkie wielkości są wyrażone w spójnych jednostkach?
- ☐ Czy wynik ma jednostkę oczekiwaną dla szukanej wielkości?
- ☐ Czy rząd wielkości wyniku jest fizycznie rozsądny?

Analiza wymiarowa w 20 sekund

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$$

$$kg/s = kg/m^3 \cdot m^3/s$$

$$\text{Po skróceniu } m^3: kg/s = kg/s$$

Jeżeli jednostki obu stron równania się nie zgadzają, równanie albo podstawienie jest błędne.

Najczęstsze pułapki

- ! $^{\circ}C$ i K nie są wymienne w równaniach zawierających temperaturę bezwzględną.
- ! $1 \text{ bar} \neq 1 \text{ Pa}$.
- ! Ułamek procentowy 25% w obliczeniach często zapisujemy jako 0,25.
- ! kg/h i kg/s nie można podstawiać do jednego równania bez przeliczenia.
- ! Strumień masowy i molowy opisują różne wielkości.

Przykład: Strumień 3600 kg/h to: $3600 \text{ kg/h} \div 3600 \text{ s/h} = 1 \text{ kg/s}$



Egzaminacyjny nawyk:

przed wstawieniem liczb do wzoru zapisz przy każdej z nich jednostkę.





Bilans masy: fundament obliczeń procesowych

Bilans masy wynika z zasady zachowania masy. Pozwala powiązać strumienie materii w procesie i stanowi podstawę większości obliczeń inżynierskich.

$$\text{WEJŚCIE} - \text{WYJŚCIE} + \text{GENERACJA} - \text{ZUŻYCIE} = \text{AKUMULACJA}$$

- **Wejście** — masa doptywająca do analizowanego układu.
- ← **Wyjście** — masa opuszczająca układ.
- + **Generacja** — powstawanie danej substancji wewnątrz układu.
- − **Zużycie** — zanikanie danej substancji, np. w reakcji.
- ~ **Akumulacja** — zmiana ilości danej substancji wewnątrz układu w czasie.



Dla bilansu całkowitej masy w zwykłych procesach chemicznych masa nie jest generowana ani zużywana.

$$\text{WEJŚCIE} - \text{WYJŚCIE} = \text{AKUMULACJA}$$

Dla stanu ustalonego (brak akumulacji):

$$\begin{aligned}\text{AKUMULACJA} &= 0 \\ \text{WEJŚCIE} &= \text{WYJŚCIE}\end{aligned}$$

Przykład: mieszanie dwóch strumieni



Granica bilansowa określa, co traktujesz jako analizowany układ.

Algorytm bilansu masy

- 1 Narysuj układ.
- 2 Zaznacz granice bilansowe.
- 3 Oznacz wszystkie strumienie wejściowe i wyjściowe.
- 4 Zapisz znane przepływy i składy.
- 5 Określ, czy proces jest w stanie ustalonym.
- 6 Zapisz bilans całkowity.
- 7 Jeżeli potrzeba, zapisz osobne bilanse składników.
- 8 Rozwiąż układ równań.
- 9 Sprawdź jednostki i sens wyniku.



Typowy błąd

Student zapisuje równanie przed narysowaniem procesu.
Efekt: pominięty strumień, zły znak albo niepotrzebne równanie.



Checklist przed zadaniami

- ☐ Potrafię wskazać granice układu.
- ☐ Wiem, kiedy akumulacja wynosi zero.
- ☐ Potrafię zapisać bilans całkowitej masy.
- ☐ Potrafię sprawdzić wynik za pomocą sumy wejść i wyjść.



Gdy jeden bilans nie wystarcza

W rzeczywistych procesach często występują recyrkulacja, obejścia, strumienie upustowe i wiele składników. Poznaj, jak sobie z nimi poradzić.

1 Bilans składnika

wejście składnika i – wyjście składnika i +
generacja i – zużycie i = akumulacja i

Dla układu bez reakcji i w stanie ustalonym:

wejście składnika i = wyjście składnika i

Przykład

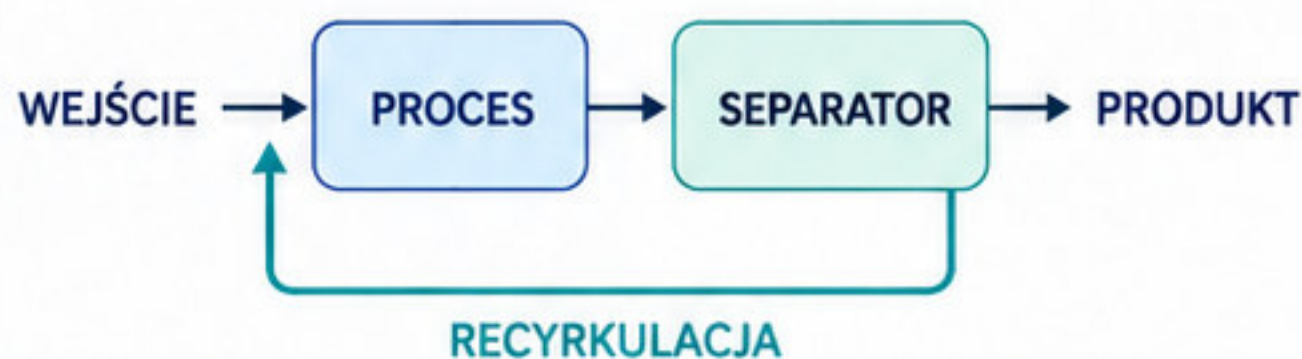
Strumień 100 kg/h mieszaniny zawierającej 20% masowych składnika A.

$$\dot{m}_A = 100 \cdot 0,20 = 20 \text{ kg/h}$$

Masa pozostałych składników: 80 kg/h.

2 Recyrkulacja

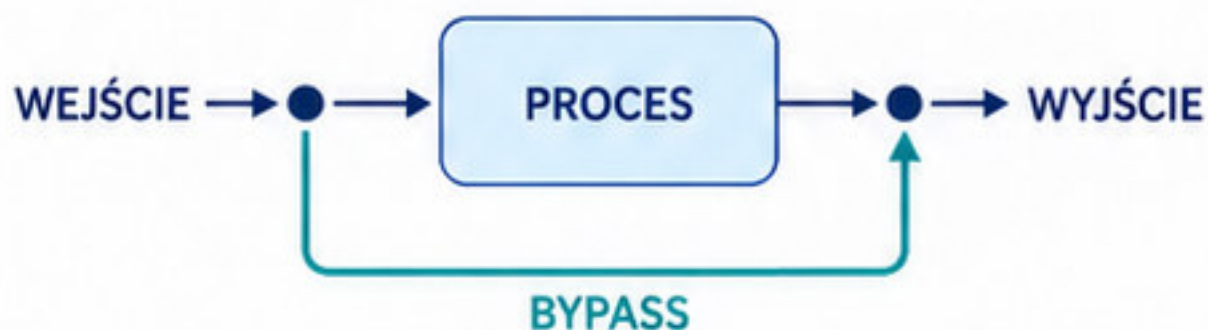
Część strumienia opuszczającego aparat wraca ponownie do wcześniejszego etapu procesu.



Recyrkulacja może zwiększać wykorzystanie surowca, poprawiać konwersję całkowitą lub stabilizować proces.

3 Obejście – bypass

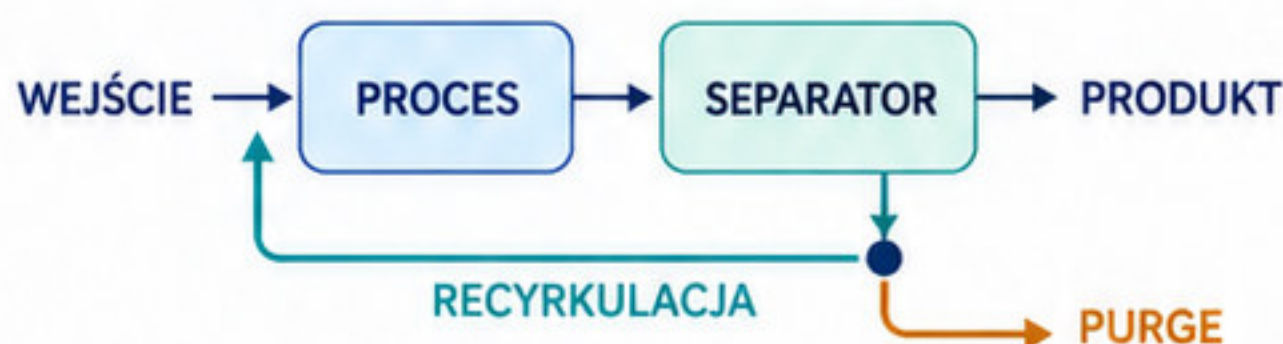
Część strumienia omija aparat i łączy się ponownie z głównym strumieniem później.



Kontrola temperatury, stężenia albo właściwości produktu.

4 Purge – strumień upustowy

Część strumienia recyrkulacyjnego jest usuwana, aby zapobiec nadmiernemu gromadzeniu się zanieczyszczeń lub składników obojętnych.



? Pytanie egzaminacyjne

Dlaczego purge może być potrzebny, jeśli układ ma recyrkulację?



Odpowiedź do samodzielnej weryfikacji:

Ponieważ składnik, który nie reaguje lub nie jest usuwany w separatorze, może stopniowo gromadzić się w pętli recyrkulacyjnej.



Kolejność rozwiązywania bardziej złożonych bilansów

- 1 Oznacz wszystkie strumienie numerami.
- 2 Zapisz skład każdego strumienia.
- 3 Wybierz najprostszą granicę bilansową.
- 4 Zapisz bilans całkowity.
- 5 Dodaj bilanse składników.
- 6 Dopiero potem analizuj lokalnie separator, mieszalnik lub punkt podziału.



Typowe błędy

- Mylenie przepływu całkowitego ze strumieniem danego składnika.
- Nieuwzględnienie składu strumienia recyrkulacyjnego.
- Założenie, że bypass ma inne stężenie niż strumień, z którego został wydzielony.
- Pominięcie purge w bilansie całego procesu.



Bilans energii: co wchodzi, co wychodzi i co się zmienia?

Energia nie znika. Może zmieniać formę, przepływać z masą, być przekazywana jako ciepło albo praca.

ENERGIA
DOPROWADZONA

—

ENERGIA
ODPROWADZONA

=

ZMIANA ENERGII
UKŁADU

$$\Delta E = Q - W + \text{energia wniesiona ze strumieniami} - \text{energia wyniesiona ze strumieniami}$$

Znaczenie symboli

- Q — ciepło przekazane do układu.
- W — praca wykonywana przez układ, zgodnie z przyjętą konwencją znaków.
- E — całkowita energia układu.



Uwaga: konwencje znaków mogą różnić się między podręcznikami. Na egzaminie stosuj konsekwentnie konwencję używaną przez prowadzącego.

Typowy uproszczony przypadek

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}h_{out} - \sum \dot{m}h_{in}$$

Podgrzewacz bez pracy mechanicznej:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_{out} - h_{in})$$

Dla stałego ciepła właściwego i braku przemiany fazowej:

$$\dot{Q} \approx \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$

Ta postać jest przybliżeniem. Nie należy jej automatycznie używać przy przemianach fazowych lub dużych zmianach temperatury.

Przykład jakościowy



Jeżeli ciecz przepływa przez podgrzewacz i jej temperatura rośnie, układ musi otrzymać energię — chyba że ogrzewanie wynika z innego zjawiska obecnego w procesie.

Schemat bilansu energii dla aparatu



Co może składać się na energię?

- Energia wewnętrzna — U
- Energia kinetyczna — $v^2/2$
- Energia potencjalna — gz
- Entalpia — H

Dla wielu urządzeń przepływowych szczególnie ważna jest entalpia.

Najpierw określ aparat

Aparat	Co zwykle interesuje w bilansie?
Podgrzewacz	Q
Chłodnica	Q
Pompa	W
Sprężarka	W + zmiana entalpii
Turbina	produkowana praca
Wymiennik	wymiana energii między strumieniami
Reaktor	energia reakcji + entalpie strumieni

Checklist do powtórki

- ☐ Potrafię określić granice układu energetycznego.
- ☐ Rozróżniam ciepło i pracę.
- ☐ Rozumiem, dlaczego entalpia jest ważna w układach przepływowych.
- ☐ Potrafię rozpoznać, które człony bilansu można zaniedbać.



Sprawdź fundamenty, zanim przejdziesz dalej

Solidne podstawy to szybsze rozwiązywanie zadań i mniej błędów na egzaminie. Usuń luki teraz – to zaoszczędzi Ci czasu później.

1 CHECKLISTA — zaznacz ✓ tylko bez zaglądania do notatek

- ☐ Potrafię przeliczać podstawowe jednostki.
- ☐ Rozumiem różnicę między strumieniem masowym, molowym i objętościowym.
- ☐ Potrafię wykonać szybką analizę wymiarową równania.
- ☐ Potrafię wyznaczyć granice bilansowe układu.
- ☐ Rozumiem pojęcie akumulacji.
- ☐ Wiem, kiedy dla procesu można przyjąć stan ustalony.
- ☐ Potrafię zapisać całkowity bilans masy.
- ☐ Potrafię zapisać bilans konkretnego składnika.
- ☐ Rozumiem zasadę recyrkulacji.
- ☐ Rozumiem różnicę między recyrkulacją, bypass i purge.
- ☐ Potrafię wskazać podstawowe składniki bilansu energii.
- ☐ Rozumiem znaczenie entalpii w procesie przepływowym.

2 AUTOTEST – 6 pytań

- 1** Do mieszalnika wpływa 40 kg/h strumienia A i 60 kg/h strumienia B. Nie ma strat. Jaki jest strumień wyjściowy?

100 kg/h
- 2** Co oznacza stan ustalony w bilansie?

Właściwości analizowanego układu nie zmieniają się z czasem w danym punkcie, a człon akumulacji przyjmuje wartość zero.
- 3** Strumień 200 kg/h zawiera 30% masowych A. Ile A przepływa w ciągu godziny?

60 kg/h
- 4** Jaka jest funkcja strumienia purge?

Usuwanie części recyrkulowanego strumienia w celu ograniczenia gromadzenia się niepożądanych lub obojętnych składników.
- 5** Dlaczego warto sprawdzać jednostki po rozwiązaniu zadania?

Ponieważ niezgodność wymiarów często ujawnia błąd we wzorze, podstawieniu lub przeliczeniu.
- 6** W podgrzewaczu temperatura strumienia wzrasta. Jaki rodzaj transferu energii należy zwykle uwzględnić?

Dopływ ciepła do strumienia, a dokładniej zmianę jego entalpii.

3 WYNIK

6/6

Fundamenty wyglądają dobrze. Przejdź dalej.

4–5/6

Dobra baza, ale wróć do błędnych punktów.

0–3/6

Powtórz strony 10–13, zanim rozpoczniesz kolejne działy.



Nie zapamiętuj odpowiedzi.
Wyjaśnij, dlaczego są poprawne.

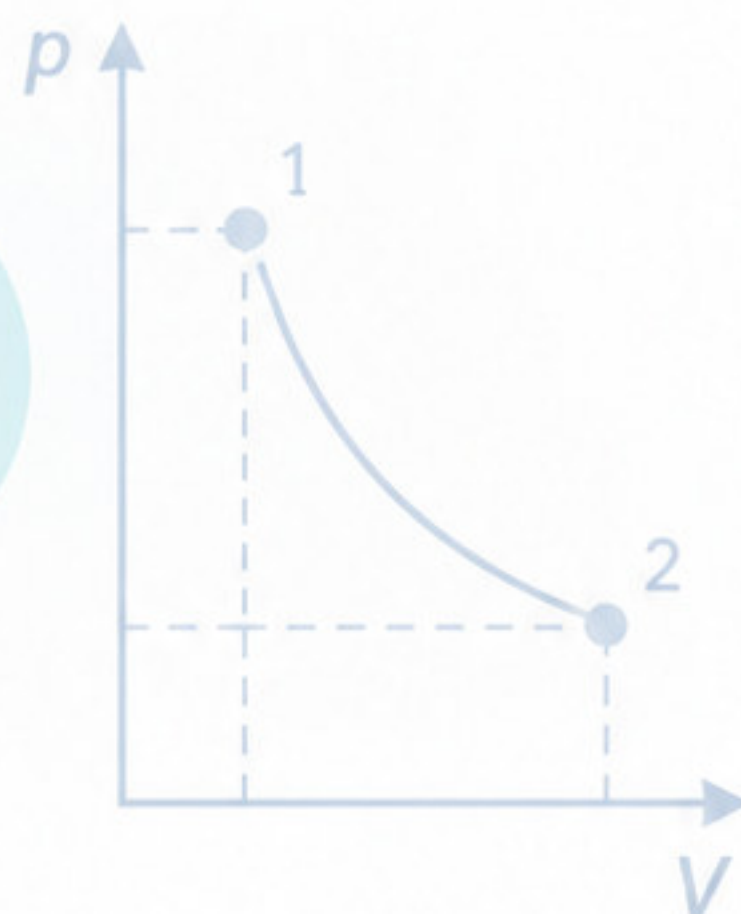


MODUŁ 03

Termodynamika

Nie ucz się wzorów w oderwaniu od fizycznego znaczenia.

Przypomnieć studentowi najważniejsze pojęcia termodynamiczne potrzebne do rozumienia przemian energetycznych, właściwości układów i równowagi fazowej.



Treści modułu

-  Stan i właściwości układu
-  Zasady termodynamiki
-  Energia wewnętrzna i entalpia
-  Przemiany gazów i cieczy
-  Równowaga fazowa
-  Mieszanki
-  Ciepło i obliczenia energetyczne

Termodynamika opisuje nie tylko wynik przemiany, ale również warunki, w których jest ona możliwa.



Termodynamika zaczyna się od zdefiniowania układu

Zrozumienie, co jest układem, jakie ma właściwości i jak wymienia energię oraz masę z otoczeniem, to podstawa do dalszej analizy procesów termodynamicznych.

1 Rodzaje układów

Układ otwarty

Może wymieniać z otoczeniem masę i energię.



Przykład: Turbina, pompa, wymiennik, reaktor przepływowy.

Układ zamknięty

Nie wymienia masy z otoczeniem, ale może wymieniać energię.



Przykład: Gaz w zamkniętym cylindrze z ruchomym tłokiem.

Układ izolowany

W idealizacji nie wymienia z otoczeniem ani masy, ani energii.



2 Właściwości stanu

Intensywne

Nie zależą od ilości materii.

Przykłady: temperatura, ciśnienie, gęstość.

Ekstensywne

Zależą od ilości materii.

Przykłady: masa, objętość, energia całkowita.



Właściwość właściwa, np. energia na jednostkę masy, jest wielkością intensywną.

3 Zasada zerowa

Jeżeli układ A jest w równowadze cieplnej z B, a B z C, to A jest w równowadze cieplnej z C.



Ta zasada pozwala sensownie definiować temperaturę.

4 Pierwsza zasada termodynamiki

Energia jest zachowana.

$$\Delta U = Q - W$$



Znaki Q i W zależą od przyjętej konwencji.

5 Druga zasada termodynamiki

Nie każda przemiana zgodna z bilansem energii może zachodzić samorzutnie.

Entropia S pomaga opisywać kierunek procesów i nieodwracalność.

Ciepło samorzutnie przepływa od ciała cieplejszego do chłodniejszego, nie odwrotnie.

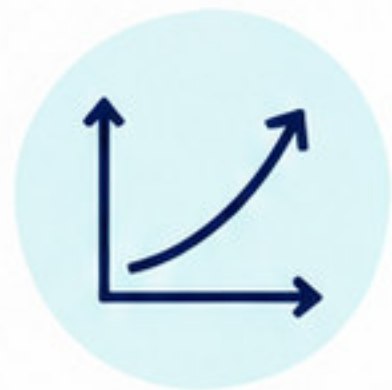
6 Trzecia zasada – wiedzieć, że istnieje

Entropia idealnego kryształu dąży do zera, gdy temperatura dąży do zera absolutnego.

Sprawdź, czy to umiesz:



- ☐ Rozróżniam układ otwarty, zamknięty i izolowany.
- ☐ Rozróżniam właściwości intensywne i ekstensywne.
- ☐ Potrafię wyjaśnić fizyczny sens pierwszej zasady.
- ☐ Potrafię opisać prostym językiem rolę drugiej zasady.



Rozpoznaj przemianę, zanim wybierzesz równanie

Właściwe rozpoznanie rodzaju przemiany pozwala dobrać odpowiednie równania i uniknąć najczęstszych błędów w obliczeniach.

1. Najważniejsze funkcje stanu

U

Energia wewnętrzna U

Energia związana z mikroskopowym stanem układu.

H

Entalpia H

$H = U + pV$. Entalpia jest szczególnie wygodna w analizie procesów przepływowych.

S

Entropia S

Wielkość związana z kierunkiem przemian i nieodwracalnością.

G

Energia swobodna Gibbsa G

Przydatna m.in. do oceny równowagi i samorzutności procesów przy stałych T i p .

3. Gaz doskonały

$$pV = nRT$$

$$pV = mR_sT$$

R — uniwersalna stała gazowa w zapisie molowym.

R_s — indywidualna stała gazowa dla konkretnego gazu w zapisie masowym.

~

T we wzorze gazu doskonałego musi być temperaturą bezwzględną.

6. Typowe pomyłki

!

użycie $^{\circ}\text{C}$ zamiast K

!

zastosowanie równania gazu doskonałego bez sprawdzenia założeń

!

mylenie U i H

!

nieuwzględnienie warunku przemiany

2. Najczęściej spotykane przemiany

Przemiana	Co pozostaje stałe?
 Izotermiczna	$T = \text{const}$
 Izobaryczna	$p = \text{const}$
 Izochoryczna	$V = \text{const}$
 Adiabaticzna	$Q = 0$

!

Nie myl przemiany adiabaticznej z izotermiczną.

Brak wymiany ciepła nie oznacza automatycznie stałej temperatury.

4. Jak podejść do zadania?

1. Zidentyfikuj substancję i model.
2. Określ stan początkowy i końcowy.
3. Sprawdź, co jest stałe.
4. Określ, jakie dane są znane.
5. Dopiero potem wybierz równanie.

5. Przykład



Gaz w sztywnym zbiorniku jest ogrzewany.

Sztywny zbiornik: $V = \text{const}$

Jeżeli gaz traktujemy jako doskonały:

$$\frac{p}{T} = \text{const} \text{ dla stałej liczby moli.}$$

Jeżeli T rośnie przy stałej V , rośnie również p .



Kiedy ciecz i para mogą istnieć jednocześnie?

1 Faza

Faza to jednorodna część układu o określonych właściwościach fizycznych i składzie.

Przykłady: ciecz, para, ciało stałe.

2 Równowaga fazowa

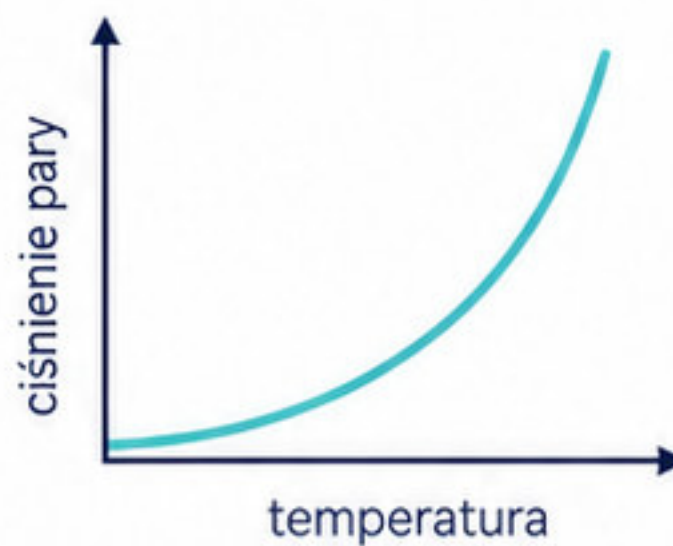
W stanie równowagi właściwości makroskopowe układu nie zmieniają się z czasem, mimo że na poziomie molekularnym cząsteczki mogą stale przechodzić między fazami.

Przykład: W zamkniętym naczyniu część cieczy paruje, a część pary skrapla się. W równowadze szybkości tych procesów są sobie równe.

3 Ciśnienie pary nasyconej

Ciśnienie pary nasyconej rośnie wraz z temperaturą.

Wniosek: Wrzenie występuje wtedy, gdy ciśnienie pary cieczy osiąga ciśnienie otoczenia.



4 Mieszanina ciecz–para

x_i — ułamek molowy składnika i w cieczy

y_i — ułamek molowy składnika i w parze

$$\sum x_i = 1$$

$$\sum y_i = 1$$



5 Prawo Raoult — model idealny

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

Prawo Raoult jest uproszczonym modelem dla mieszanin zachowujących się idealnie.

6 Prawo Daltona

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



Co oznacza większa lotność?

Bardziej lotny składnik łatwiej przechodzi do fazy parowej.

Jeżeli składnik A jest bardziej lotny niż B, para nad mieszaniną będzie zwykle bogatsza w A niż ciecz.

Przed egzaminem sprawdź, czy umiesz:

- ☐ Rozróżnić x i y .
- ☐ Wyjaśnić pojęcie ciśnienia pary nasyconej.
- ☐ Wytłumaczyć warunek wrzenia.
- ☐ Rozumieć, dlaczego para może mieć inny skład niż ciecz.



Entalpia łączy termodynamikę z bilansem energii

Ciepło, praca i zmiany fazy to różne przejawy tej samej energii. Zrozumienie entalpii ułatwia poprawne tworzenie bilansów energetycznych.

1 Ciepło jawne

Energia powodująca zmianę temperatury bez zmiany fazy.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

- m — masa
 $\dot{m}$ — strumień masowy
 c_p — ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu
 ΔT — różnica temperatur

Przykład:

2 kg wody ogrzewamy o 10 K.
Przy $c_p \approx 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$:

$$\dot{Q} \approx 2 \cdot 4,18 \cdot 10 = 83,6 \text{ kJ}$$

Przykład ma charakter orientacyjny i zakłada stałe c_p .

2 Ciepło utajone

Energia związana ze zmianą fazy bez konieczności zmiany temperatury podczas idealizowanej przemiany przy ustalonych warunkach.

$$Q = m \cdot \lambda$$

Przykłady:

topnienie, parowanie, skraplanie.

3 Entalpia

Entalpia łączy energię wewnętrzną układu z pracą objętościową przepływu.

$$H = U + pV$$

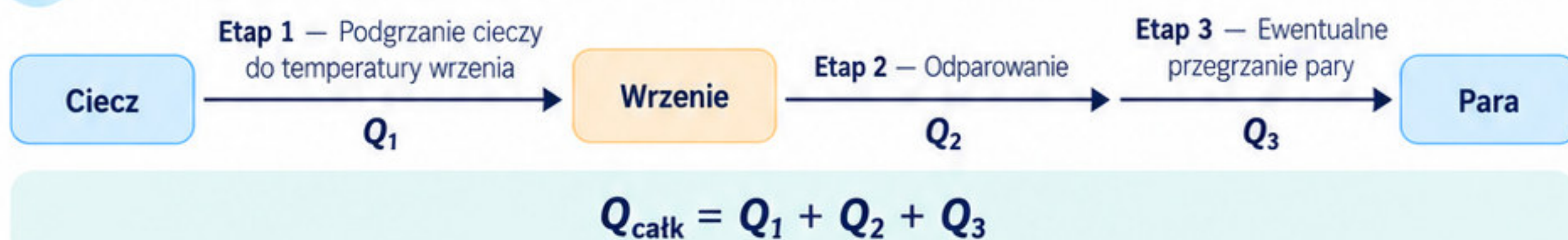
$$h = H/m$$

$$\Delta h = h_2 - h_1$$

4 Kiedy samo $c_p \Delta T$ nie wystarcza?

- ☐ gdy zachodzi zmiana fazy
- ☐ gdy c_p silnie zmienia się z temperaturą
- ☐ gdy układ obejmuje reakcję chemiczną
- ☐ gdy korzystamy z tabel lub wykresów entalpii
- ☐ gdy model procesu wymaga pełniejszego bilansu energetycznego.

5 Prosty schemat rozwiązywania



Najczęstszy błąd

Student używa tylko $Q = m c_p \Delta T$ w zadaniu, w którym część substancji zmienia fazę.



Mini lista kontrolna

- ☐ Rozumiem różnicę między ciepłem jawnym i utajonym.
- ☐ Potrafię obliczyć Q dla prostego ogrzewania.
- ☐ Rozumiem znaczenie Δh .
- ☐ Potrafię podzielić złożoną przemianę na kilka etapów energetycznych.



Pytanie kontrolne

Co będzie wymagało zwykle więcej energii: podgrzanie cieczy o kilka stopni czy całkowite jej odparowanie?

Często odparowanie wymaga znacznie większej ilości energii, ponieważ obejmuje ciepło przemiany fazowej.



Sprawdź, czy rozumiesz termodynamikę – nie tylko wzory

1 CHECKLISTA — zaznacz ✓ tylko wtedy, gdy potrafisz wyjaśnić punkt własnymi słowami

- | | |
|---|---|
| ☐ Rozróżniam układ otwarty, zamknięty i izolowany. | ☐ Wiem, dlaczego w równaniach gazowych używa się temperatury bezwzględnej. |
| ☐ Rozumiem różnicę między właściwością intensywną i ekstensywną. | ☐ Rozumiem pojęcie równowagi ciecz–para. |
| ☐ Potrafię wyjaśnić sens pierwszej zasady termodynamiki. | ☐ Rozróżniam x_i i y_i . |
| ☐ Rozumiem jakościowo rolę drugiej zasady termodynamiki. | ☐ Rozumiem znaczenie ciśnienia pary nasyconej. |
| ☐ Wiem, czym różnią się energia wewnętrzna U i entalpia H . | ☐ Potrafię wyjaśnić różnicę między ciepłem jawnym i utajonym. |
| ☐ Rozpoznaję przemianę izotermiczną, izobaryczną, izochoryczną i adiabatyczną. | ☐ Wiem, kiedy wzór $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ nie wystarcza. |
| ☐ Potrafię zastosować równanie gazu doskonałego w odpowiednich warunkach. | ☐ Potrafię podzielić przemianę złożoną na kilka etapów energetycznych. |

2 AUTOTEST — 7 PYTAŃ

- | | |
|--|---|
| 1 Gaz znajduje się w szczelnym cylindrze z ruchomym tłokiem. Czy analizowany układ jest otwarty czy zamknięty?
Zamknięty, jeśli przez granicę układu nie przepływa masa. Może natomiast zachodzić wymiana energii. | 5 Czy proces adiabatyczny musi być izotermiczny?
Nie. Temperatura może się zmieniać mimo braku wymiany ciepła. |
| 2 Która wielkość jest intensywna: masa czy temperatura?
Temperatura. Nie zależy od ilości substancji. | 6 Dlaczego bardziej lotny składnik mieszaniny jest często wzbogacony w fazie parowej?
Ponieważ ma większą tendencję do przechodzenia do fazy gazowej, związaną m.in. z wyższym ciśnieniem pary w danych warunkach. |
| 3 W sztywnym zbiorniku z gazem doskonałym temperatura rośnie, a liczba moli pozostaje stała. Co dzieje się z ciśnieniem?
Ciśnienie rośnie, ponieważ przy $V = \text{const}$ z równania gazu doskonałego wynika $p \propto T$. | 7 Ciecz jest podgrzewana do temperatury wrzenia, a następnie całkowicie odparowywana. Czy całe Q można policzyć jednym wyrażeniem $m \cdot c_p \cdot \Delta T$?
Nie. Należy uwzględnić co najmniej ogrzewanie cieczy i ciepło przemiany fazowej. |
| 4 Co oznacza $Q = 0$?
Brak wymiany ciepła przez granicę analizowanego układu. Taki proces nazywamy adiabatycznym. | |

3 MINI ZADANIE

1 kg cieczy o $c_p = 2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ogrzano o 30 K bez zmiany fazy. Oblicz dostarczone ciepło.

$$\begin{aligned} Q &= m \cdot c_p \cdot \Delta T \\ Q &= 1 \cdot 2 \cdot 30 \\ Q &= 60 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Co należałoby zmienić w rozwiązaniu, gdyby ciecz następnie odparowała?

Dodać energię potrzebną do przemiany fazowej, np. $m \cdot \lambda$.

4 WYNIK

6–7 Możesz przejść dalej. Zwróć uwagę głównie na zadania rachunkowe.

4–5 Podstawy są obecne, ale wróć do punktów, w których pomyliłeś założenia.

0–3 Powtórz strony 16–19 przed rozpoczęciem wymiany ciepła.



Na egzaminie najpierw nazwij proces fizyczny. Dopiero potem wybieraj wzór.



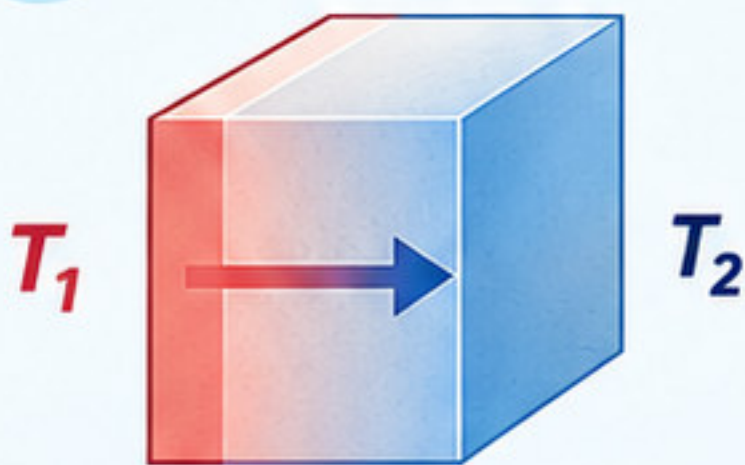
MODUŁ 04

Wymiana ciepła

Ciepło przepływa wtedy, gdy istnieje różnica temperatur.

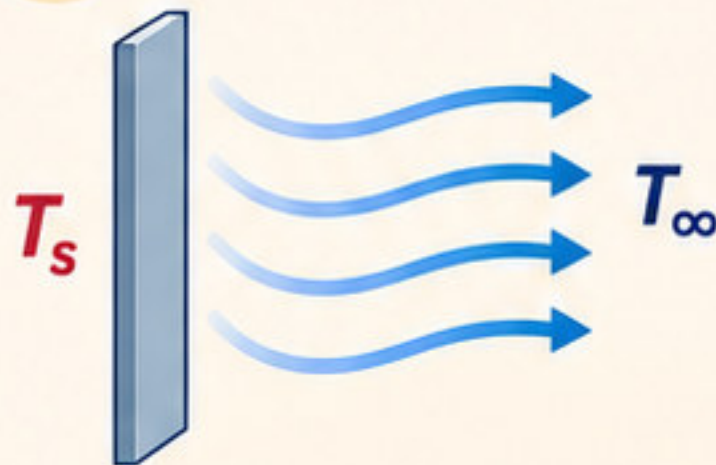
Przypomnieć trzy podstawowe mechanizmy transportu ciepła oraz pokazać, jak rozpoznać dominujący mechanizm i dobrać właściwą zależność do zadania.

1 PRZEWODZENIE



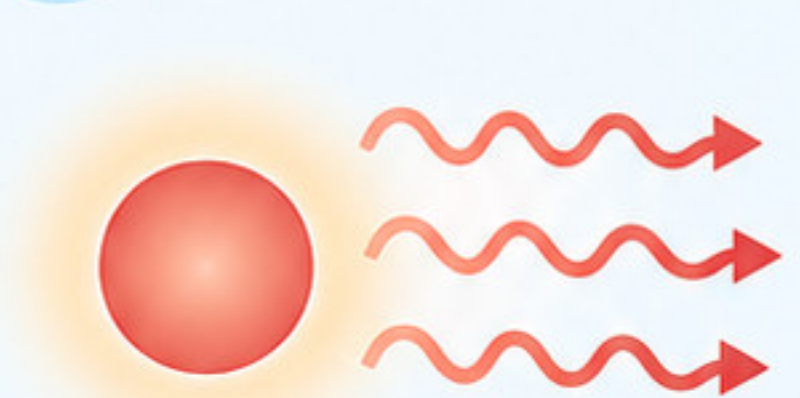
kontakt molekularny

2 KONWEKCYJA



ruch płynu + przewodzenie

3 PROMIENIOWANIE



promieniowanie
elektromagnetyczne

SIŁA NAPĘDOWA: RÓŻNICA TEMPERATUR

GORĄCE

$T_{\text{wyższe}}$

przepływ ciepła

ZIMNE

$T_{\text{niższe}}$



Treści modułu

- 1 Przewodzenie
- 2 Konwekcja
- 3 Liczby bezwymiarowe
- 4 Promieniowanie
- 5 Wymienniki ciepła
- 6 Opory cieplne
- 7 Różnica temperatur jako siła napędowa
- 8 Autotest



Najpierw odpowiedz:

gdzie jest wyższa temperatura
i jak energia może przemieścić się
między punktami?



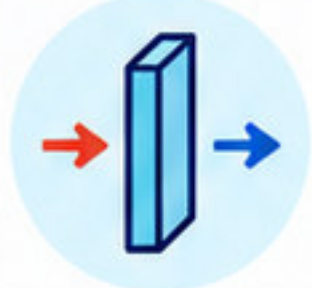
Rozpoznaj
dominujący
mechanizm



Dobierz
właściwą
zależność



Rozwiąż
zadanie



Przewodzenie: ciepło przez materiał

Jeżeli dwie strony materiału mają różne temperatury, energia może przepływać przez materiał na drodze przewodzenia.

1 Prawo Fouriera

Szybkość przepływu ciepła przez materiał opisuje prawo Fouriera.

$$\dot{q} = -kA \cdot \frac{dT}{dx}$$

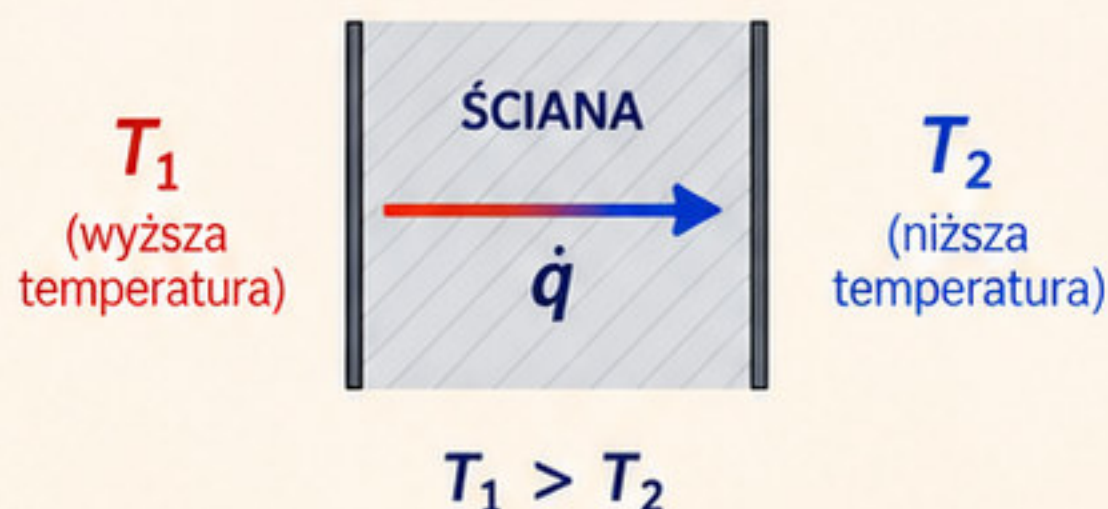
- $\dot{q}$ — szybkość przepływu ciepła [W]
 k — współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m·K)]
 A — powierzchnia prostopadła do kierunku przepływu [m²]
 $\frac{dT}{dx}$ — gradient temperatury [K/m]

Ciepło przepływa w kierunku spadku temperatury.

2 Płaska ściana — przypadek uproszczony

Dla jednorodnej, płaskiej ściany o stałym k przepływ ciepła opisuje wzór:

$$\dot{q} = kA \cdot \frac{T_1 - T_2}{L}$$



3 Co zwiększa przepływ ciepła?



ΔT

Większe ΔT
→ większy $\dot{q}$.



Większe A
→ większy $\dot{q}$.



k

Większe k
→ większy $\dot{q}$.



L

Większe L
→ mniejszy $\dot{q}$.

4 Opór cieplny

Przepływ ciepła można opisać za pomocą oporu cieplnego.

$$R_{cond} = \frac{L}{kA}$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{cond}}$$

Duży opór cieplny oznacza trudniejszy przepływ ciepła.

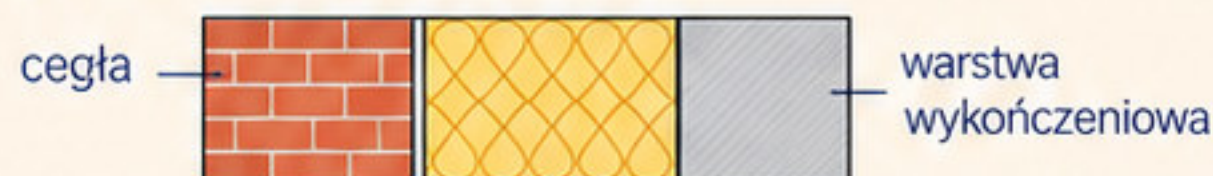
5 Warstwy materiałów

Dla kilku warstw opory cieplne sumują się.

$$R_{całk} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

$$\dot{q} = \frac{\Delta T_{całk}}{R_{całk}}$$

Przykład (ściana wielowarstwowa):



Mini zadanie

Ściana ma: $k = 0,5 \text{ W/(m·K)}$, $A = 2 \text{ m}^2$,
 $L = 0,1 \text{ m}$, $T_1 - T_2 = 20 \text{ K}$.
Oblicz przepływ ciepła.

$$\dot{q} = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 20}{0,1} = 200 \text{ W}$$



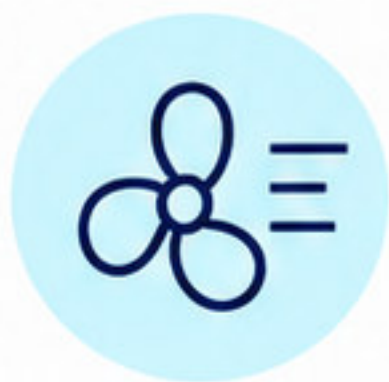
Typowe błędy

- ☐ Podstawienie grubości w cm zamiast m.
- ☐ Odwrócenie L i k w oporze cieplnym.
- ☐ Brak powierzchni A .
- ☐ Nieprawidłowy kierunek przepływu ciepła.
- ☐ Użycie jednej wartości k bez sprawdzenia, czy zadanie pozwala przyjąć ją jako stałą.



Mini lista kontrolna

- ☐ Potrafię wyjaśnić prawo Fouriera.
- ☐ Rozumiem znaczenie gradientu temperatury.
- ☐ Potrafię obliczyć przewodzenie przez płaską ścianę.
- ☐ Rozumiem pojęcie oporu cieplnego.



Konwekcja: gdy ciepło spotyka przepływ płynu

Ruch płynu może znacząco zwiększyć wymianę ciepła między powierzchnią a otoczeniem. Konwekcja jest kluczowa w wielu zastosowaniach inżynierskich.

1 Konwekcja

Konwekcja opisuje wymianę ciepła między powierzchnią a płynem znajdującym się w ruchu.

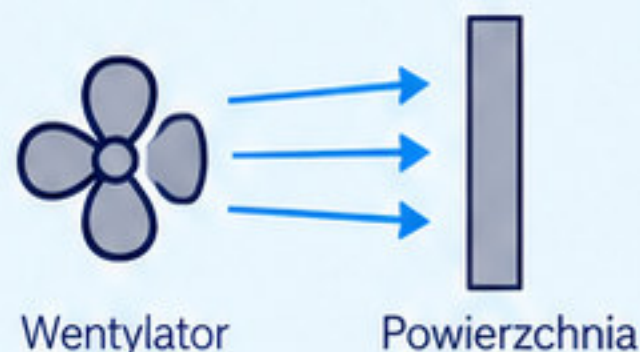
$$\dot{q} = hA(T_s - T_\infty)$$

- h — współczynnik wnikania ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
 A — powierzchnia wymiany [m^2]
 T_s — temperatura powierzchni
 T_∞ — temperatura płynu poza cienką warstwą przy powierzchni

h nie jest stałą materiałową taką jak k . Zależy m.in. od rodzaju płynu, geometrii i warunków przepływu.

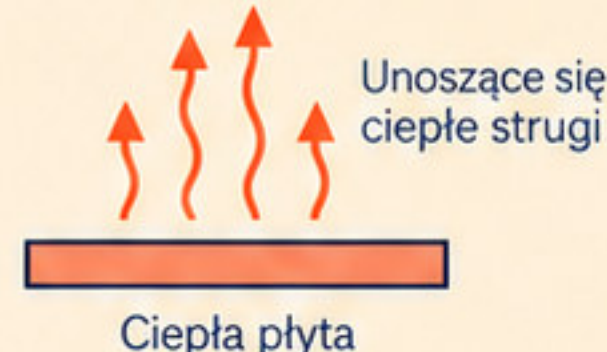
2 Konwekcja wymuszona i swobodna

Wymuszona



Ruch płynu jest wywołany np. przez pompę, wentylator lub mieszadło.

Swobodna



Ruch wynika z różnic gęstości spowodowanych zmianami temperatury.

3 Dlaczego liczby bezwymiarowe są ważne?

Liczby bezwymiarowe (Re , Pr , Nu) pozwalają uogólnić wyniki i tworzyć korelacje, które opisują konwekcję dla różnych płynów, geometrii i warunków przepływu.

4 Liczba Reynoldsa

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}$$

$$Re = \frac{v L}{\nu}$$

Opisuje relację sił bezwładności do sił lepkości.

Intuicja:

- małe Re → przepływ bardziej uporządkowany
- duże Re → większa skłonność do turbulencji

Wartość krytyczna Re zależy od geometrii i warunków przepływu.

5 Liczba Prandtla

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Porównuje transport pędu z transportem energii cieplnej.

6 Liczba Nusselta

$$Nu = \frac{hL}{k}$$

Opisuje intensywność konwekcyjnego transportu ciepła w stosunku do przewodzenia.

Od warunków przepływu do strumienia ciepła

$Re + Pr + \text{geometria}$



korelacja



Nu



h



$\dot{q}$



Prosty przykład

Jeśli zwiększymy prędkość przepływu płynu w wymienniku, współczynnik h często rośnie, ale może również wzrosnąć spadek ciśnienia.



Uwaga!

Na egzaminie nie zgaduj korelacji. Najpierw sprawdź geometrię, zakres Re i warunki jej stosowalności.



Mini lista kontrolna

- ☐ Potrafię zapisać prawo Newtona o chłodzeniu.
- ☐ Rozumiem znaczenie współczynnika h .
- ☐ Wiem, czym różni się konwekcja swobodna i wymuszona.
- ☐ Rozumiem jakościowe znaczenie Re , Pr i Nu .
- ☐ Wiem, jak przejść od korelacji do $\dot{q}$.



Promieniowanie: transport ciepła bez kontaktu

Promieniowanie cieplne nie wymaga przepływu materii ani bezpośredniego kontaktu między ciałami.

1 Prawo Stefana–Boltzmannna

Strumień ciepła emitowanego przez powierzchnię:

$$\dot{q} = \sigma AT^4$$

Uwzględniając emisyjność:

$$\dot{q} = \epsilon \sigma AT^4$$

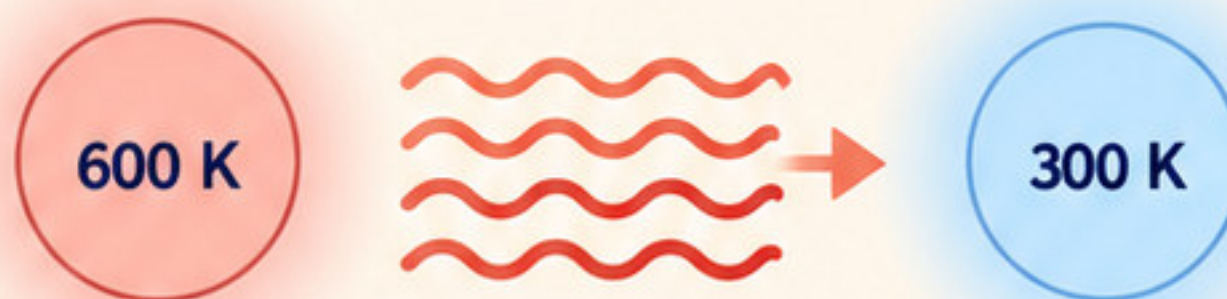
Wymiana netto między dwoma ciałami (o tej samej emisyjności):

$$\dot{q}_{net} \approx \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{ot}^4)$$

- σ — stała Stefana–Boltzmannna ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
- ϵ — emisyjność powierzchni, $0 \leq \epsilon \leq 1$
- T — temperatura bezwzględna w kelwinach [K]

2 Dlaczego T^4 ma znaczenie?

Wpływ temperatury na promieniowanie jest bardzo silny. Przy wysokich temperaturach promieniowanie może stać się dominującym mechanizmem wymiany ciepła.



Promieniowanie netto: od cieplejszego do chłodniejszego.

3 Emisyjność

Emisyjność ϵ określa, jak skutecznie powierzchnia emituje promieniowanie w porównaniu z ciałem doskonale czarnym ($\epsilon = 1$). Zależy od materiału, stanu powierzchni i długości fali.

Intuicja:

- Powierzchnia o wysokiej ϵ → skuteczniejsza emisja (promieniuje więcej ciepła).
- Powierzchnia o niskiej ϵ → słabsza emisja (promieniuje mniej ciepła).

4 Najczęstsze błędy



- ☐ Używanie °C zamiast K w T^4 .
- ☐ Pomijanie czwartej potęgi temperatury.
- ☐ Zapominanie o emisyjności.
- ☐ Liczenie tylko emisji jednego ciała, mimo że interesuje nas wymiana netto.
- ☐ Założenie, że promieniowanie występuje wyłącznie w próżni.

5 Porównaj mechanizmy

Mechanizm	Czy wymaga materii?	Typowa zależność
Przewodzenie	tak	gradient temperatury + k
Konwekcja	tak, płyn	$h \cdot \Delta T$
Promieniowanie	nie	$\epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)$



W rzeczywistym urządzeniu kilka mechanizmów może działać jednocześnie.

Gorąca rura oddaje ciepło do otoczenia przez konwekcję oraz promieniowanie jednocześnie.



Wymiennik ciepła: dwa strumienie, jedna funkcja

Wymiennik umożliwia efektywne przekazywanie energii cieplnej między strumieniami o różnych temperaturach, najczęściej bez ich bezpośredniego mieszania.

1 Co robi wymiennik?

Wymiennik umożliwia przekazywanie energii cieplnej między strumieniami o różnych temperaturach, najczęściej bez ich bezpośredniego mieszania.



2 Bilans energii

$$\dot{Q}_{\text{gorący}} + \dot{Q}_{\text{zimny}} = 0$$

$$|\dot{Q}_{\text{gorący}}| = |\dot{Q}_{\text{zimny}}|$$

Dla stałego c_p :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}$ — strumień ciepła [W]
 $\dot{m}$ — strumień masowy [kg/s]
 c_p — ciepło właściwe [J/(kg·K)]
 ΔT — różnica temperatur [K]

3 Współczynnik przenikania ciepła U

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m$$

U — współczynnik przenikania ciepła [W/(m²·K)]

A — powierzchnia wymiany ciepła [m²]

ΔT_m — średnia różnica temperatur [K]

U uwzględnia łączny efekt różnych oporów cieplnych — np. konwekcji po obu stronach i przewodzenia przez ściankę.

4 Przeciuprąd i współprąd

Współprąd
(strumienie w tym samym kierunku)



Przeciuprąd
(strumienie w przeciwnych kierunkach)



W przeciuprądzie korzystna różnica temperatur może być utrzymywana na większej długości wymiennika.

5 LMTD — logarytmiczna średnia różnica temperatur

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

LMTD pozwala uwzględnić zmianę różnicy temperatur wzdłuż wymiennika.

Sposób zdefiniowania ΔT_1 i ΔT_2 zależy od konfiguracji przepływu.

6 Co ogranicza wymianę ciepła?

- ☐ mała powierzchnia A
- ☐ mały U
- ☐ mała różnica temperatur
- ☐ zabrudzenie powierzchni
- ☐ niekorzystny rozkład przepływu

Fouling — osady na powierzchni wymiany ciepła zwiększają opór cieplny.



Warstwa osadu na rurze działa jak dodatkowa warstwa izolacji. Przy tych samych temperaturach $\dot{Q}$ może się zmniejszyć.

! Egzaminacyjny schemat myślenia

1

Bilans energii.

2

Układ przepływu.

3

Różnice temperatur.

4

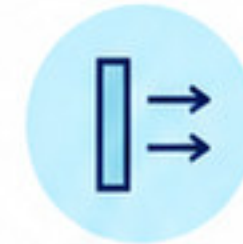
U i A .

5

Kontrola fizycznego sensu wyniku.



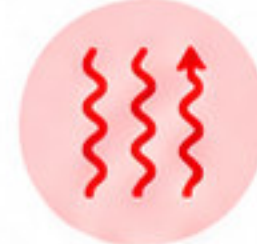
Czy potrafisz przejść od mechanizmu do równania?



Przewodzenie
przez materiał



Konwekcja
z powierzchni
do płynu



Promieniowanie
przez fale
elektromagnetyczne

Najpierw rozpoznaj, jak energia się przemieszcza. Dopiero potem wybierz właściwy model. Ten schemat pomaga łączyć zjawiska fizyczne z odpowiednimi równaniami.

1 CHECKLISTA

- ☐ Rozumiem, że siłą napędową wymiany ciepła jest różnica temperatur.
- ☐ Potrafię rozpoznać przewodzenie, konwekcję i promieniowanie.
- ☐ Potrafię zapisać uproszczone prawo Fouriera dla płaskiej ściany.
- ☐ Rozumiem pojęcie oporu cieplnego.
- ☐ Potrafię sumować opory cieplne ustawione w szeregu.
- ☐ Potrafię zastosować $\dot{q} = hA\Delta T$ dla konwekcji.
- ☐ Rozumiem, od czego zależy współczynnik h .
- ☐ Wiem, do czego służą liczby Re , Pr i Nu .
- ☐ Rozumiem znaczenie temperatury bezwzględnej w promieniowaniu.
- ☐ Potrafię wyjaśnić pojęcie emisyjności.
- ☐ Rozumiem zasadę działania wymiennika ciepła.
- ☐ Potrafię zapisać bilans energii między strumieniem gorącym i zimnym.
- ☐ Rozumiem ideę współczynnika U .
- ☐ Rozpoznaję współprąd i przeciwprąd.
- ☐ Wiem, czym jest LMTD.

2 AUTOTEST – 7 PYTAŃ

- Przez grubą warstwę izolacji przepływa mniej ciepła niż przez cienką warstwę tego samego materiału. Dlaczego?**
Ponieważ opór przewodzenia $R = L/(kA)$ rośnie wraz z grubością L .
- Co oznacza wysoka wartość k ?**
Materiał dobrze przewodzi ciepło.
- Czy współczynnik h jest wyłącznie właściwością materiału?**
Nie. Zależy m.in. od płynu, warunków przepływu i geometrii.
- Co jakościowo opisuje liczba Reynoldsa?**
Relację efektów bezwładności do lepkości i charakter przepływu.
- Dlaczego w prawie Stefana–Boltzmanna temperatura musi być podana w kelwinach?**
Ponieważ zależność wykorzystuje temperaturę bezwzględną podniesioną do czwartej potęgi.
- Jeżeli wymiennik jest dobrze izolowany od otoczenia, co można powiedzieć o energii oddanej przez strumień gorący i odebranej przez zimny?**
Ich wartości bezwzględne są równe w idealizowanym bilansie.
- Jak osad na powierzchni wymiennika wpływa na przenikanie ciepła?**
Zwiększa opór cieplny i zwykle zmniejsza intensywność wymiany ciepła.

3 MINI ZADANIE

Przez płaską ścianę o: $k = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $A = 2 \text{ m}^2$, $L = 0,05 \text{ m}$ przewodzone jest ciepło przy różnicy temperatur 10 K . Oblicz $\dot{q}$.

Rozwiązanie:

$$\begin{aligned}\dot{q} &= \frac{kA\Delta T}{L} \\ \dot{q} &= \frac{1 \cdot 2 \cdot 10}{0,05} \\ \dot{q} &= 400 \text{ W}\end{aligned}$$

Wskazówka kontrolna:



Większa grubość ściany zmniejszyłaby $\dot{q}$.

4 WYNIK

- | | |
|----------------|--|
| 6–7 poprawnych | Mechanizmy są rozróżniane prawidłowo. |
| 4–5 | Powtórz mechanizmy, których równania mylisz. |
| 0–3 | Wróć do stron 22–25 i ćwicz rozpoznawanie typu transportu przed liczeniem. |

! Nie zaczynaj od wzoru. Zaczniij od pytania: jaki mechanizm transportuje energię?



MODUŁ 05

Wymiana masy i procesy rozdzielania

Składniki przemieszczają się tam, gdzie istnieje siła napędowa transportu.

Przypomnieć podstawy dyfuzji i przenikania masy oraz połączyć je z praktycznymi procesami rozdzielania stosowanymi w inżynierii chemicznej.

Treści modułu

- 1 Dyfuzja
- 2 Prawo Ficka
- 3 Gradient stężenia
- 4 Wnikanie i przenikanie masy
- 5 Destylacja
- 6 Absorpcja
- 7 Ekstrakcja
- 8 Suszenie
- 9 Autotest

OBSZAR O WYŻSZYM STĘŻENIU



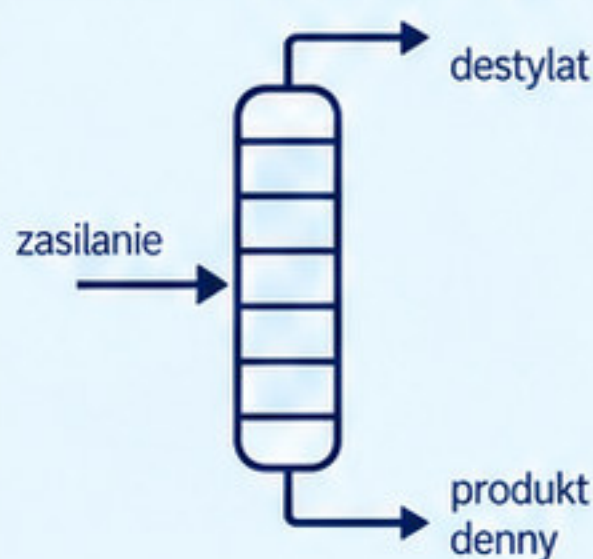
TRANSPORT SKŁADNIKA A

SIŁA NAPĘDOWA →
RÓŻNICA POTENCJAŁU /
STĘŻENIA

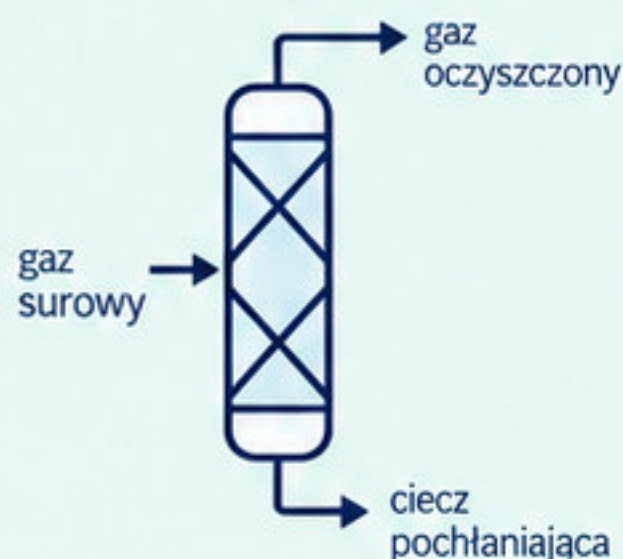
OBSZAR O NIŻSZYM STĘŻENIU

Wybrane procesy rozdzielania

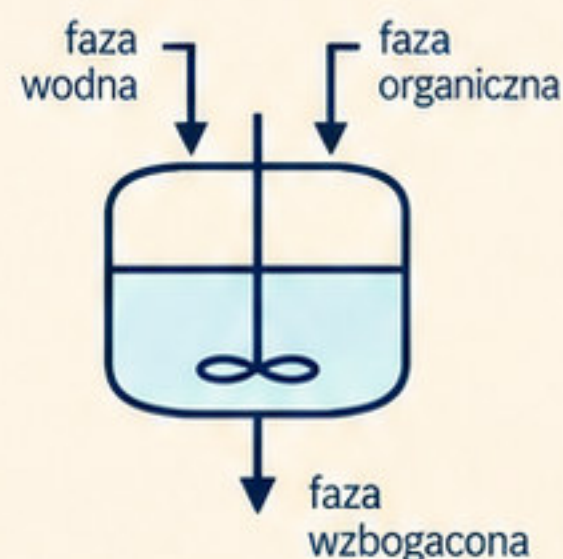
Kolumna destylacyjna



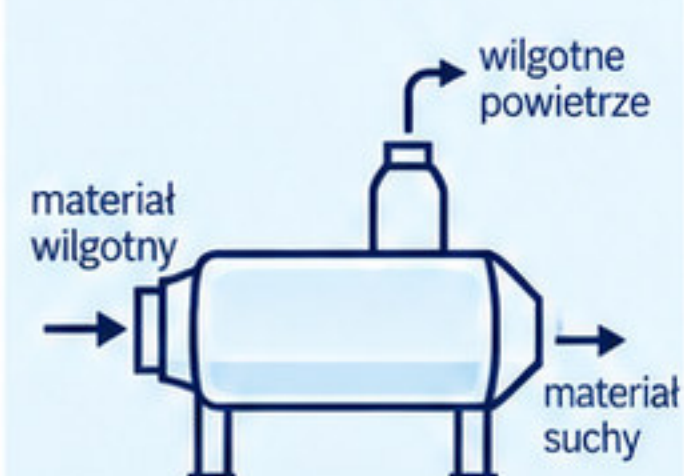
Absorber



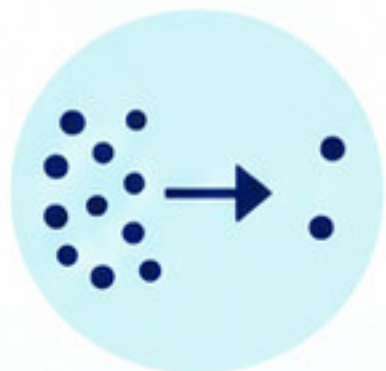
Ekstraktor



Suszarka



Wymiana masy i wymiana ciepła mają podobną logikę:
przepływ pojawia się dzięki różnicy odpowiedniego potencjału.



Dyfuzja: transport wywołany różnicą stężenia

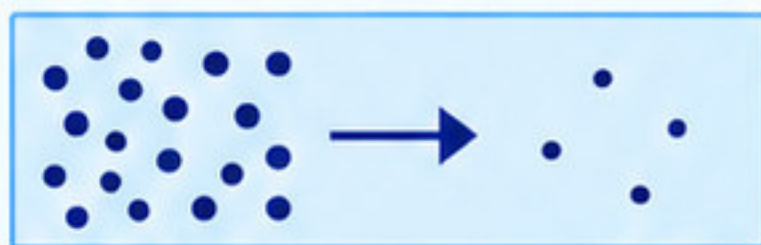
Nawet gdy cały płyn nie porusza się w jednym kierunku, pojedynczy składnik może przemieszczać się na skutek różnicy jego stężenia.

1 Dyfuzja molekularna

Dyfuzja jest transportem składnika wynikającym z chaotycznego ruchu cząsteczek i różnicy ich potencjału chemicznego; w podstawowych zadaniach często opisuje się ją przez gradient stężenia.

Intuicja:

Składnik netto przemieszcza się z obszaru o większym stężeniu do obszaru o mniejszym stężeniu.



Wyższe
stężenie c_A

Niższe
stężenie c_A

2 Pierwsze prawo Ficka

Strumień dyfuzyjny jest proporcjonalny do gradientu stężenia.

$$J_A = -D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{dz}$$

J_A — strumień dyfuzyjny składnika A

D_{AB} — współczynnik dyfuzji A w B

C_A — stężenie A

z — kierunek transportu

Uwaga:

Transport zachodzi przeciwnie do kierunku wzrostu stężenia.

3 Co wpływa na szybkość dyfuzji?

1 Większy gradient stężenia → większy transport.

2 Większy D_{AB} → łatwiejsza dyfuzja.

3 Większa droga transportu → zwykle mniejszy strumień przy tych samych stężeniach granicznych.

4 Współczynnik dyfuzji

D_{AB} opisuje mobilność składnika A w ośrodku B.

Typowe jednostki:

m^2/s

Uwaga:

Dyfuzja w gazach jest zwykle znacznie szybsza niż w cieczech, a w ciałach stałych jeszcze wolniejsza, choć zależy to od konkretnego układu.

5 Uproszczona warstwa o grubości L

Dla ustalonego stanu i liniowego profilu stężenia można zapisać:

$$J_A \approx D_{AB} \cdot \frac{C_{A,1} - C_{A,2}}{L}$$

Przykład:

$D_{AB} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

$C_{A,1} - C_{A,2} = 100 \text{ mol}/\text{m}^3$

$L = 0,001 \text{ m}$

$|J_A| \approx 1 \times 10^{-9} \cdot 100 / 0,001$

$|J_A| \approx 1 \times 10^{-4} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

6 Dyfuzja $\neq$ przepływ konwekcyjny



Dyfuzja:

ruch składnika względem mieszaniny.



Konwekcja masy:

transport związany także z ruchem całego płynu.



Na egzaminie zapytaj:

czy opisuję ruch całej mieszaniny, czy transport jednego składnika względem pozostałych?



Typowe błędy

1 Mylenie gradientu stężenia z samym stężeniem.

2 Pomijanie jednostki powierzchniowej strumienia.

3 Mylenie D_{AB} ze współczynnikiem wnikania masy.

4 Nieuwzględnienie kierunku transportu.



Od dyfuzji do aparatu procesowego

Transport masy umożliwia wymianę składników między fazami i jest kluczowy w wielu procesach przemysłowych, takich jak absorpcja, ekstrakcja czy suszenie.

1 Wnikanie masy

W praktycznych aparatach nie analizuje się zawsze szczegółowego profilu stężenia. Transport opisuje się często za pomocą współczynnika wnikania masy.

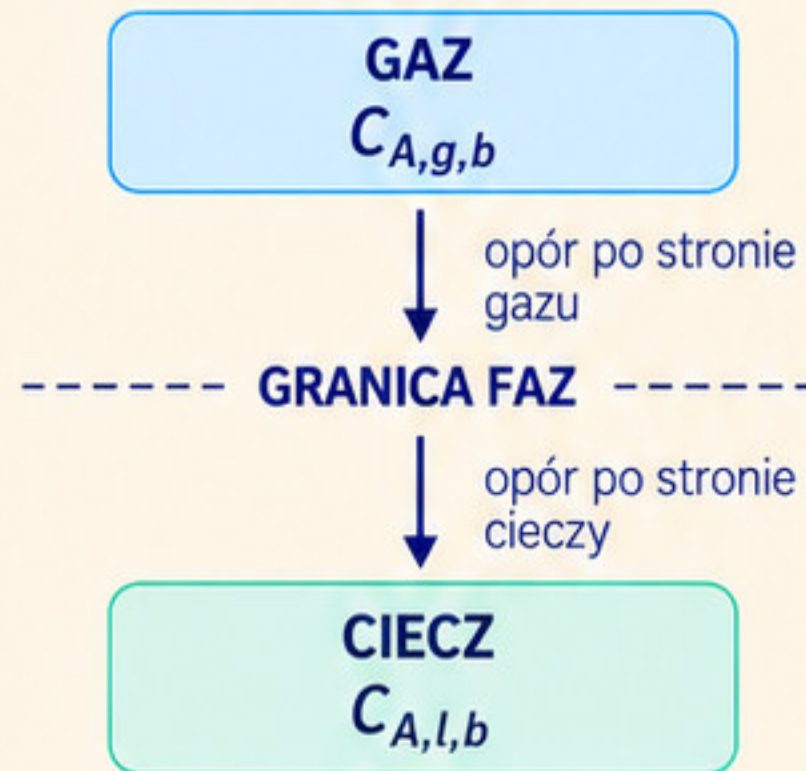
$$N_A = k \cdot (C_{Ab} - C_{Ai})$$

N_A — strumień masy składnika A
 k — współczynnik wnikania masy
 C_{Ab} — stężenie w głębi fazy
 C_{Ai} — stężenie przy granicy faz

Różnica stężeń pełni rolę siły napędowej.

2 Dwie fazy – dwa opory

Transport składnika może być ograniczany przez opór po stronie gazu, cieczy albo obu faz.



3 Całkowity współczynnik przenikania masy

Zamiast osobno liczyć wszystkie lokalne opory, można użyć współczynnika całkowitego.

$$N_A = K \cdot \text{siła napędowa całkowita}$$

W literaturze stosuje się różne definicje współczynników i sił napędowych. Na egzaminie zachowaj zgodność z zapisem używanym na zajęciach.

4 Analogia z wymianą ciepła

Wymiana ciepła	Wymiana masy
ΔT	różnica stężenia / potencjału
h	k
U	K
opór cieplny	opór transportu masy
strumień ciepła	strumień składnika

5 Liczby bezwymiarowe w wymianie masy

$$Sh = \frac{kL}{D}$$

Odpowiednik liczby Nusselta dla transportu masy.

$$Sc = \frac{\nu}{D}$$

Porównuje transport pędu z dyfuzją masy.

Zależność empiryczna (korelacje)



6 Co może zwiększyć intensywność transportu masy?

- ☐ większa siła napędowa
- ☐ większa powierzchnia kontaktu faz
- ☐ bardziej intensywne mieszanie
- ☐ korzystniejsze warunki przepływu
- ☐ mniejszy dominujący opór transportu

Przykład (jakościowy):

Rozdrobnienie cieczy na małe krople może zwiększyć powierzchnię kontaktu faz i przyspieszyć transport masy.

! Ważna uwaga

Większy współczynnik transportu nie zawsze oznacza lepszy cały proces — trzeba uwzględnić także energię, hydraulikę i koszty aparatu.



Mini lista kontrolna

- ☐ Rozumiem ideę współczynnika wnikania masy.
- ☐ Potrafię wskazać siłę napędową transportu.
- ☐ Rozumiem pojęcie oporu po stronie każdej fazy.
- ☐ Rozumiem ideę współczynnika całkowitego K.
- ☐ Widzę analogię między Nu–Pr i Sh–Sc.



Destylacja: rozdział dzięki różnicy lotności

Jeżeli jeden składnik mieszaniny łatwiej przechodzi do fazy parowej niż drugi, możemy wykorzystać tę różnicę do rozdzielania.

1. Podstawowa idea

MIESZANINA CIEKŁA

↓ ogrzewanie

CIECZ + PARA

↓

PARA BOGATSZA W SKŁADNIK BARDZIEJ LOTNY

↓ skraplanie

DESTYLAT

Pozostała ciecz: wzbogacona w składnik mniej lotny.

Jedno odparowanie i skroplenie daje ograniczony rozdział. Wielokrotne kontakty ciecz-para umożliwiają znacznie lepszą separację.

2. Co musisz rozumieć z równowagi?

- x_A — udział składnika A w cieczy
- y_A — udział składnika A w parze
- Jeżeli A jest bardziej lotny: często $y_A > x_A$

To właśnie różnica między składem pary i cieczy umożliwia destylację.

3. Kolumna destylacyjna



GÓRA KOLUMNY

↑ para bogatsza w składnik bardziej lotny
↓ część jako refluks
→ część jako destylat

kontakt cieczy i pary

↑ generuje parę

DÓŁ KOLUMNY

→ produkt denny bogatszy w składnik mniej lotny

Destylat — produkt odbierany z góry kolumny.

Produkt denny — produkt odbierany z dołu.

Refluks — część skroplonego produktu zwracana do kolumny.

Reboiler — aparat dostarczający energię do częściowego odparowania cieczy z dna.

4. Dlaczego refluks jest ważny?

Refluks zwiększa kontakt cieczy i pary wewnątrz kolumny, co może poprawić rozdział.

Większy refluks może jednak oznaczać większe zapotrzebowanie energetyczne.

5. Bilans kolumny

$$F = D + B$$

$$F \cdot z_A = D \cdot x_{D,A} + B \cdot x_{B,A}$$

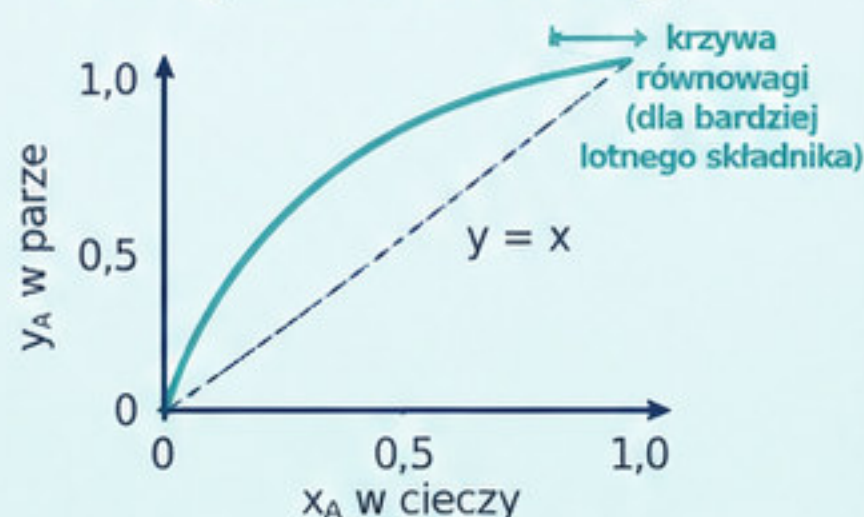
F — zasilanie

D — destylat

B — produkt denny

z_A — udział A w zasilaniu.

6. Krzywa równowagi



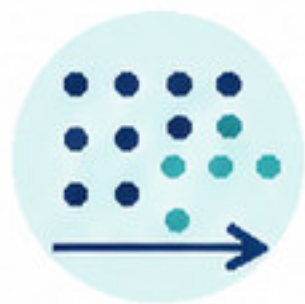
Nie rozwijać metody McCabe'a-Thielego na tej stronie.

7. Typowe błędy

- Założenie, że destylacja działa wyłącznie na podstawie różnicy temperatur wrzenia.
- Mylenie destylatu z produktem dennym.
- Mylenie refluksu z zasilaniem.
- Zakładanie, że para i ciecz mają identyczny skład.
- Pomijanie bilansu składnika.

8. Checklista

- ☐ Potrafię wyjaśnić destylację własnymi słowami.
- ☐ Rozumiem znaczenie względnej lotności.
- ☐ Rozróżniam F, D i B.
- ☐ Wiem, do czego służą skraplacz, refluks i reboiler.
- ☐ Potrafię zapisać prosty bilans całej kolumny i składnika.



Trzy procesy rozdzielania — trzy różne mechanizmy

1. ABSORPCJA

Absorpcja polega na przenoszeniu składnika z fazy gazowej do fazy ciekłej.



Przykład

Usuwanie rozpuszczalnego składnika z gazu przy użyciu odpowiedniej cieczy.

Proces odwrotny, czyli usuwanie składnika z cieczy do gazu, często określa się jako desorpcję lub stripping.

Główna siła napędowa:
odchylenie układu od równowagi między fazami

Aparat: kolumna absorpcyjna

2. EKSTRAKCJA CIECZ-CIECZ

Składnik przechodzi z jednej fazy ciekłej do drugiej, ponieważ ma inną rozpuszczalność w obu cieczach.



Ekstrakt — faza wzbogacona w przenoszony składnik.

Rafinat — pozostała faza po częściowym usunięciu tego składnika.

Fazy powinny umożliwiać późniejsze rozdzielenie, np. dzięki ograniczonej wzajemnej mieszalności.

3. WSPÓŁCZYNNIK PODZIAŁU

$$K = \frac{\text{stężenie A w fazie ekstrakcyjnej}}{\text{stężenie A w fazie pierwotnej}}$$

Im bardziej składnik preferuje rozpuszczalnik ekstrakcyjny, tym korzystniejszy może być rozdział.

Nie narzucać jednego symbolu, jeśli kurs używa innego.

4. SUSZENIE

Suszenie polega na usuwaniu wilgoci z materiału przez jednoczesny transport ciepła i masy.



- ciepło dociera do materiału
- wilgoć opuszcza materiał

Suszenie jest dobrym przykładem procesu, w którym wymiana ciepła i masy są silnie sprzężone.

5. Jak ich nie pomylić?

Proces	Faza początkowa składnika	Faza docelowa
Absorpcja	gaz	ciecz
Ekstrakcja	ciecz 1	ciecz 2
Suszenie	wilgotny materiał	gaz / otoczenie

6. Pytania rozpoznawcze

Jeżeli w zadaniu występuje gaz kontaktowany z cieczą:

pomyśl o absorpcji.

Jeżeli występują dwie fazy ciekłe i rozpuszczalnik:

pomyśl o ekstrakcji.

Jeżeli usuwana jest wilgoć z ciała stałego lub produktu:

pomyśl o suszeniu.

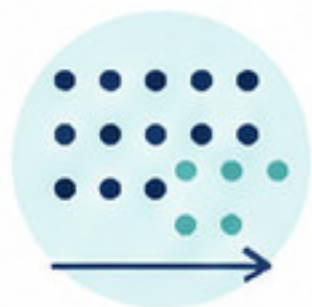
7. Typowe błędy

- Mylenie absorpcji z adsorpcją.
- Mylenie ekstraktu z rafinatem.
- Traktowanie suszenia wyłącznie jako ogrzewania.
- Pomijanie równowagi między fazami.

Ważne rozróżnienie

Absorpcja = składnik przenika do objętości fazy.

Adsorpcja = składnik gromadzi się na powierzchni ciała stałego.



Czy rozpoznajesz siłę napędową i właściwy proces?

1. CHECKLISTA

- | | |
|--|--|
| ☐ Rozumiem fizyczny sens dyfuzji. | ☐ Wiem, do czego służą liczby Sh i Sc . |
| ☐ Potrafię interpretować pierwsze prawo Ficka. | ☐ Rozumiem zasadę działania destylacji. |
| ☐ Rozumiem znaczenie współczynnika dyfuzji D . | ☐ Rozróżniam destylat i produkt dennej. |
| ☐ Rozróżniam dyfuzję i transport wynikający z ruchu całej fazy. | ☐ Wiem, do czego służy refluks. |
| ☐ Rozumiem pojęcie współczynnika wnikania masy. | ☐ Rozumiem zasadę absorpcji. |
| ☐ Potrafię wskazać siłę napędową transportu masy. | ☐ Rozumiem zasadę ekstrakcji ciecz-ciecz. |
| ☐ Rozumiem, że każda faza może wносить własny opór transportu. | ☐ Potrafię wyjaśnić rolę transportu ciepła i masy podczas suszenia. |
| ☐ Rozumiem analogię między wymianą ciepła i masy. | ☐ Rozróżniam absorpcję i adsorpcję. |

2. AUTOTEST — 7 PYTAŃ

1. Co jest siłą napędową prostego modelu dyfuzji opisanej prawem Ficka?

Gradient stężenia, a dokładniej w ogólniejszym ujęciu gradient potencjału chemicznego.

2. Co oznacza minus w prawie Ficka?

Transport zachodzi w kierunku malejącego stężenia.

3. Czy współczynnik wnikania masy k i współczynnik dyfuzji D oznaczają to samo?

Nie. D jest właściwością opisującą dyfuzję molekularną w danym układzie, natomiast k opisuje praktyczny transport przez warstwę przyfazową i zależy również od hydrodynamiki.

4. Dlaczego destylacja może rozdzielać mieszaninę dwóch składników?

Ponieważ skład fazy parowej może różnić się od składu cieczy wskutek różnicy lotności składników.

5. Gaz zawierający zanieczyszczenie kontaktuje się z cieczą, która rozpuszcza to zanieczyszczenie. Jaki proces zachodzi?

Absorpcja.

6. Składnik przechodzi z jednej cieczy do drugiego, częściowo niemieszanego się rozpuszczalnika. Jaki proces wykorzystujemy?

Ekstrakcję ciecz-ciecz.

7. Dlaczego suszenie jest jednocześnie problemem wymiany ciepła i masy?

Ponieważ energia jest potrzebna do usunięcia wilgoci, a sama wilgoć musi następnie zostać przetransportowana z materiału do otaczającej fazy.

3. MINI ZADANIE ROZPOZNAWCZE

Połącz proces z opisem:

- | | |
|---------------|--|
| A. Destylacja | 1. Usuwanie wilgoci z granulatu. |
| B. Absorpcja | 2. Rozdział dwóch lotnych składników. |
| C. Ekstrakcja | 3. Przeniesienie składnika z gazu do rozpuszczalnika. |
| D. Suszenie | 4. Przeniesienie substancji między dwiema fazami ciekłymi. |

Odpowiedzi: 1-D 2-A 3-B 4-C

4. WYNIK

6-7 poprawnych: Możesz przejść do operacji jednostkowych i przepływu.

4-5: Powtórz procesy, które nadal mylisz.

0-3: Wróć do stron 28-31 i ucz się przez porównywanie mechanizmów.

**Na egzaminie najpierw zidentyfikuj fazy.
To często od razu wskazuje właściwy proces.**



gaz



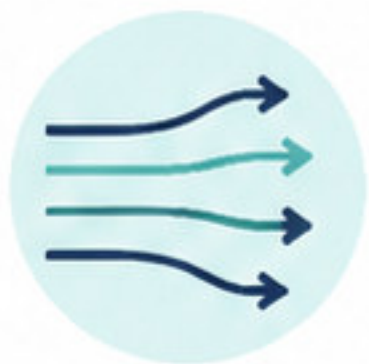
ciecz



ciecz



ciało stałe



MODUŁ 06

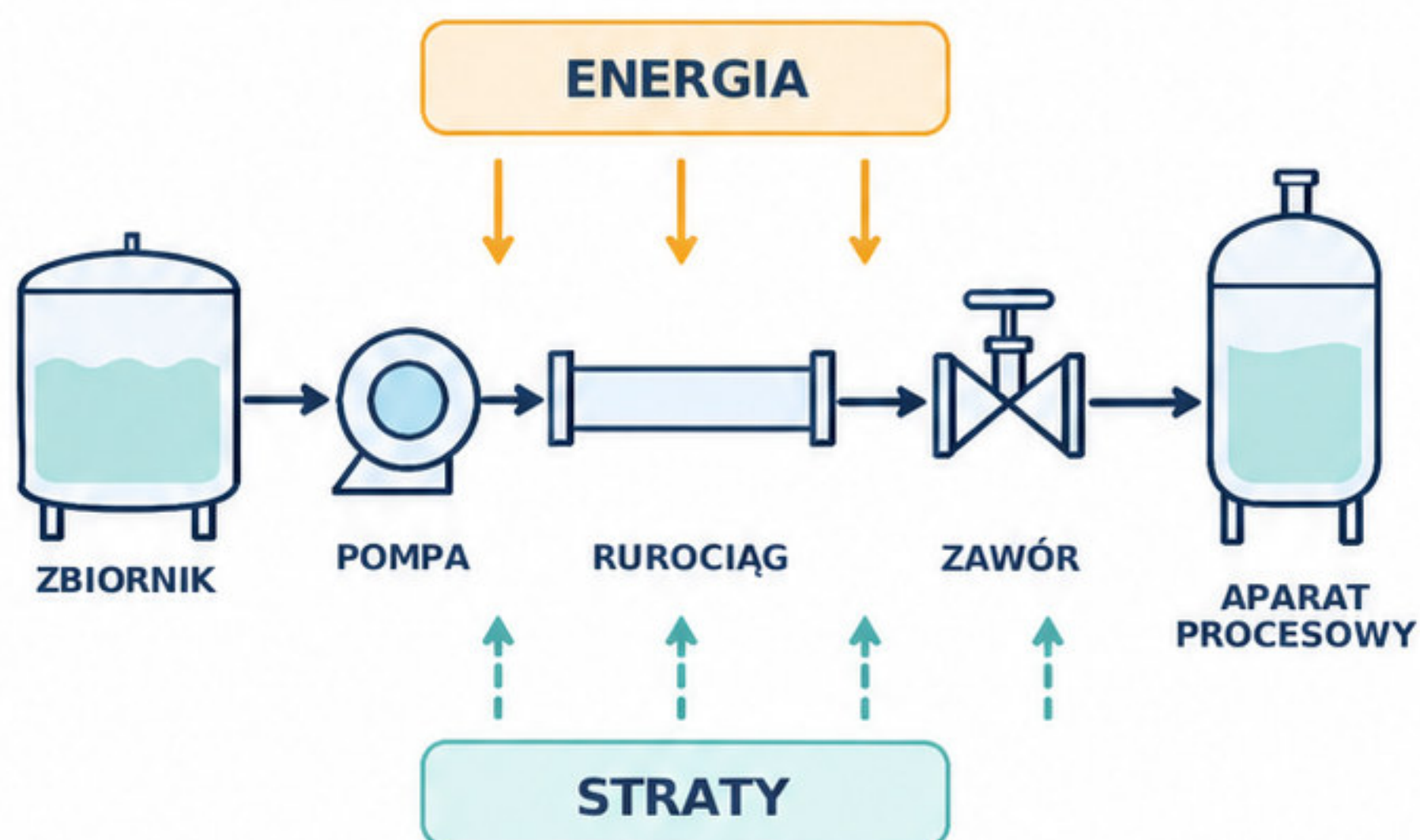
Przepływ płynów i operacje jednostkowe

Zrozum, co porusza płyn – i co przeciwstawia się jego ruchowi.

Przypomnieć studentowi podstawowe zależności opisujące przepływ cieczy i gazów oraz najważniejsze operacje mechaniczne stosowane w procesach przemysłowych.

Treści modułu

- Natężenie przepływu
- Prędkość
- Ciśnienie
- Równanie ciągłości
- Równanie Bernoulliego
- Liczba Reynoldsa
- Straty ciśnienia
- Rurociągi
- Pompy
- Sedymencja
- Filtracja
- Mieszanie
- Rozdrabnianie



$$Q = A \cdot v$$



W ustalonym przepływie nieściśliwym to, co wpływa do odcinka rurociągu, musi również z niego wypłynąć.



Przepływ płynu: prędkość, ciśnienie i energia

1. Natężenie przepływu

Natężenie przepływu określa ilość płynu przemieszczaną przez przekrój w czasie.

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$[Q] = \text{m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = \rho Q$$

$$[\dot{m}] = \text{kg/s}$$

Q — przepływ objętościowy
 V — objętość
 t — czas
 $\dot{m}$ — przepływ masowy
 ρ — gęstość

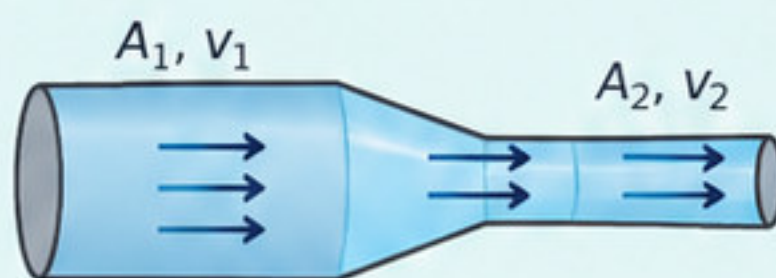
2. Prędkość średnia

Prędkość średnia wynika z przepływu przez przekrój poprzeczny.

$$Q = A \cdot v$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

Dla tego samego przepływu objętościowego mniejszy przekrój oznacza większą średnią prędkość.



$$A \downarrow \rightarrow v \uparrow \quad (\text{dla stałego } Q)$$

3. Równanie ciągłości

Dla ustalonego przepływu cieczy o stałej gęstości:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

A — pole przekroju
 v — średnia prędkość
 $\dot{m}$ — przepływ masowy

Ciągłość jest bilansem masy zastosowanym do przepływu.

4. Ciśnienie

Ciśnienie to siła działająca na jednostkę powierzchni.

$$p = \frac{F}{A}$$

$$[p] = \text{Pa}, \text{kPa}, \text{bar}$$

Ciśnienie statyczne, dynamiczne i wysokość położenia mogą być traktowane jako różne składniki energii mechanicznej płynu.

5. Równanie Bernoulliego — idealizowany przypadek

Dla ustalonego, nieściśliwego, nielepkiego przepływu wzdłuż linii prądu:

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{const}$$

$$\frac{p}{\rho g}$$

wysokość ciśnienia

$$\frac{v^2}{2g}$$

wysokość prędkości

$$z$$

wysokość położenia

Równanie Bernoulliego w tej prostej postaci wymaga określonych założeń. W rzeczywistych instalacjach często trzeba uwzględnić pompy, turbiny i straty energii.

6. Praktyczna wersja energetyczna

W rzeczywistych układach należy uwzględnić dostarczaną lub odbieraną energię oraz straty.

$$\begin{array}{c} \text{energia w punkcie 1} + \text{energia pompy} = \text{energia w punkcie 2} \\ + \text{straty } (\Delta h_{\text{strat}}) + \text{energia odebrana przez turbinę} \end{array}$$

7. Liczba Reynoldsa

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$$Re = \frac{v D}{\nu}$$

Pokazuje relację sił bezwładności do lepkości.

Dla klasycznego przepływu w prostej rurze:

$Re < \text{ok. } 2300$	laminarny
$Re > \text{ok. } 4000$	turbulentny
po między	obszar przejściowy

Wartości te odnoszą się do typowego przepływu wewnętrznego w rurze. Inne geometrie mogą mieć inne kryteria.



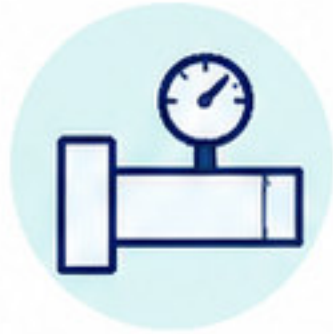
Myśl jak inżynier

- Jeżeli rura się zwęża: sprawdź zmianę prędkości.
- Jeżeli zmienia się wysokość: sprawdź składnik z .
- Jeżeli w układzie jest pompa: uwzględnij dostarczoną energię.
- Jeżeli rurociąg jest długi: nie pomijaj strat ciśnienia.



Typowe błędy

- Mylenie Q i $\dot{m}$.
- Stosowanie Bernoulliego bez sprawdzenia założeń.
- Pomijanie strat energii.
- Mylenie średnicy z promieniem przy liczeniu pola.
- Używanie niewłaściwej lepkości w Re .



Rzeczywisty przepływ kosztuje energię

1. Dlaczego ciśnienie spada?

Podczas przepływu część energii mechanicznej jest rozpraszana wskutek lepkości i tarcia.

- ☐ większa długość rury
- ☐ mniejsza średnica
- ☐ większa prędkość
- ☐ większa chropowatość
- ☐ kolana, zawory i inne elementy lokalne

2. Darcy–Weisbach

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

f — współczynnik tarcia
 L — długość rury
 D — średnica
 v — średnia prędkość

Wartość f zależy m.in. od liczby Reynoldsa i względnej chropowatości.

3. Straty miejscowe

Dodatkowe straty powstają w elementach armatury i zmianach geometrii.



zawór



kolano



trójnik



nagłe
rozszerzenie



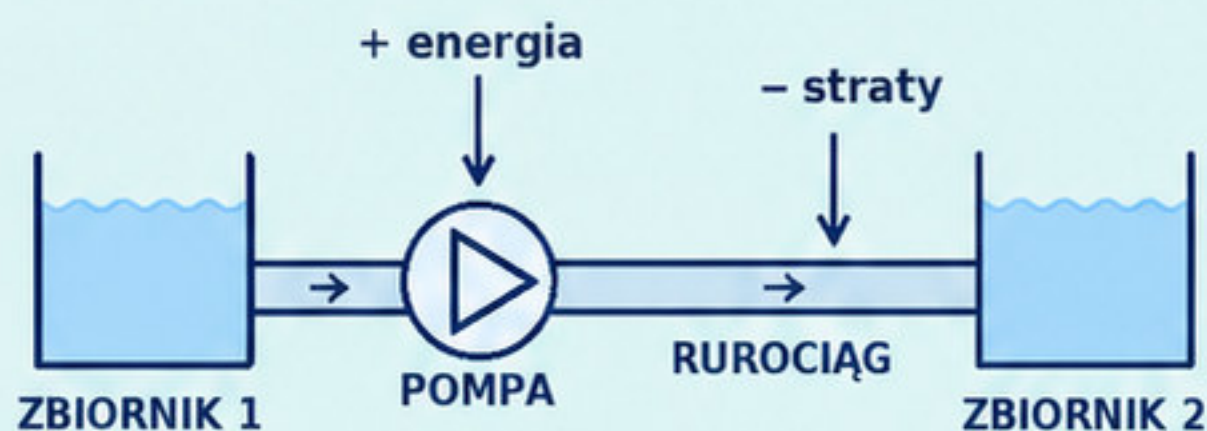
zwężenie

$$h_{\text{local}} = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

K — współczynnik straty lokalnej.

4. Pompa

Pompa dostarcza energii mechanicznej do cieczy, umożliwiając pokonanie różnicy wysokości, ciśnienia i strat instalacji.



5. Moc hydrauliczna

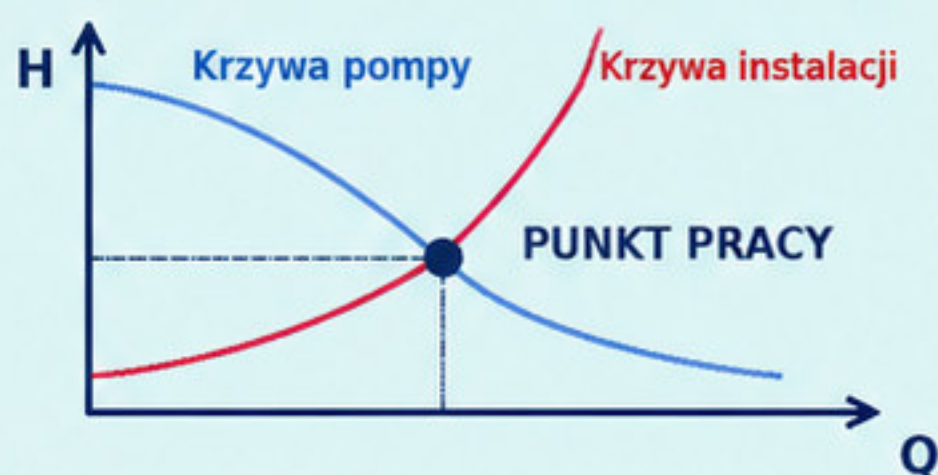
$$P = \Delta p \cdot Q$$

$$P = \rho g Q H$$

$$P_{\text{napęd}} = \frac{P_{\text{hyd}}}{\eta}$$

H — wysokość podnoszenia
 η — sprawność pompy.

6. Krzywa instalacji i krzywa pompy



Rzeczywisty przepływ wynika z jednoczesnej charakterystyki pompy i instalacji.

7. Kawitacja — pojęcie, które warto rozpoznawać

Jeżeli lokalne ciśnienie cieczy spadnie zbyt nisko, mogą tworzyć się pęcherzyki pary. Ich późniejsze zapadanie może powodować hałas, drgania i uszkodzenia pompy.

Nie rozwijać NPSH.

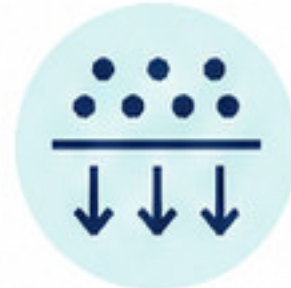


pęcherzyki pary
i ich zapadanie

Nie dobieraj pompy wyłącznie na podstawie wymaganego przepływu. Instalacja określa również wymagane ciśnienie lub wysokość podnoszenia.

Typowe błędy

- ☐ Pominięcie sprawności.
- ☐ Pominięcie strat miejscowych.
- ☐ Użycie średnicy w mm zamiast m.
- ☐ Mylenie mocy hydraulicznej z mocą pobieraną przez silnik.
- ☐ Założenie, że pompa narzuca dowolny przepływ niezależnie od instalacji.



Rozdzielanie mechaniczne: pozwól cząstkom opaść albo je zatrzymaj

1. SEDYMENTACJA

Sedymencja wykorzystuje ruch cząstek pod wpływem siły ciężkości lub innego pola sił.



Cząstki powinny mieć inną gęstość niż otaczający płyn.

2. Co wpływa na prędkość opadania?

- rozmiar cząstek
- różnica gęstości
- lepkość płynu
- kształt cząstek
- charakter przepływu wokół cząstki

3. Prawo Stokesa

$$v_t = \frac{g \cdot d^2 \cdot (\rho_p - \rho_f)}{18\mu}$$

v_t — prędkość graniczna opadania
 d — średnica cząstki
 ρ_p — gęstość cząstki
 ρ_f — gęstość płynu
 μ — lepkość dynamiczna

Uwaga:

Nie używaj prawa Stokesa automatycznie. Sprawdź założenia dotyczące małych liczb Reynoldsa i charakteru ruchu cząstki.

4. FILTRACJA

Filtracja oddziela cząstki stałe od płynu dzięki przepływowi przez materiał porowaty.



Cząstki zatrzymane na filtrze mogą tworzyć placek filtracyjny, który sam staje się dodatkowym oporem przepływu.

5. Co napędza filtrację?

Różnica ciśnienia.



6. Opór rośnie podczas filtracji

Wraz z narastaniem placka filtracyjnego przepływ może stawać się coraz trudniejszy.

większy opór → mniejszy przepływ przy tej samej różnicy ciśnienia

Typowe błędy

- ☐ Mylenie filtratu z osadem.
- ☐ Stosowanie prawa Stokesa poza zakresem.
- ☐ Pominięcie lepkości.
- ☐ Założenie, że opór filtra jest stały przez cały proces.

7. Sedymencja czy filtracja?

Sedymencja	Filtracja
brak bariery porowatej	medium filtracyjne
ruch cząstek	przepływ płynu przez porowaty materiał
siła ciężkości	różnica ciśnienia
klarowanie + osad	filtrat + placek

Przykład: Jeżeli cząstki są bardzo drobne i opadają bardzo wolno, sama sedymencja może być niepraktyczna.

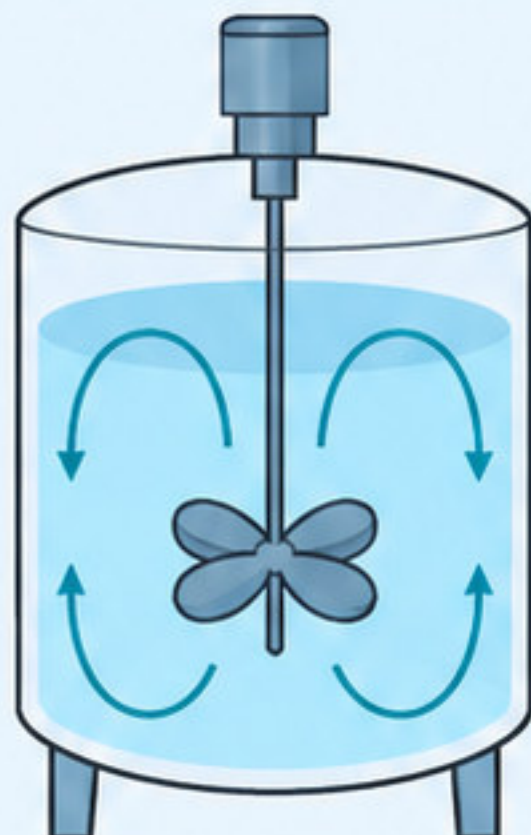


Operacje mechaniczne: przygotuj materiał do następnego etapu

1. MIESZANIE

Cele mieszania:

- ujednolodzenie składu
- wyrównanie temperatury
- zwiększenie kontaktu faz
- utrzymanie cząstek w zawieszeniu
- poprawa wymiany ciepła lub masy



2. Co wpływa na mieszanie?

- geometria zbiornika
- typ mieszadła
- prędkość obrotowa
- właściwości płynu
- lepkość
- obecność przegród
- liczba faz

Większa prędkość mieszadła zwykle zwiększa intensywność mieszania, ale również zapotrzebowanie na energię.

3. Rozdrabnianie

Zmniejszanie rozmiaru cząstek poprzez działanie sił mechanicznych.



ściskanie



uderzanie



ścieranie



cięcie

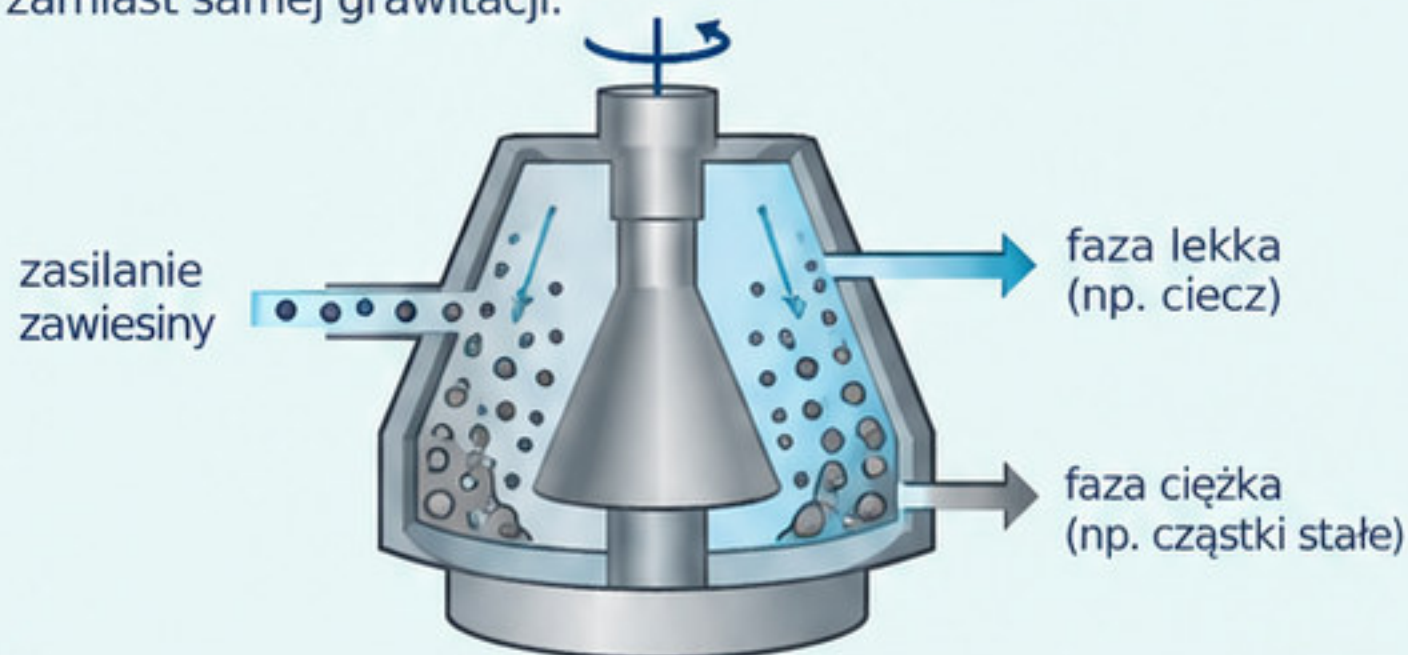


ENERGIA
MECHANICZNA



6. Wirowanie

Separacja wykorzystująca pole siły odśrodkowej zamiast samej grawitacji.



Może przyspieszyć rozdział cząstek lub faz, które sedimentowałyby bardzo wolno.

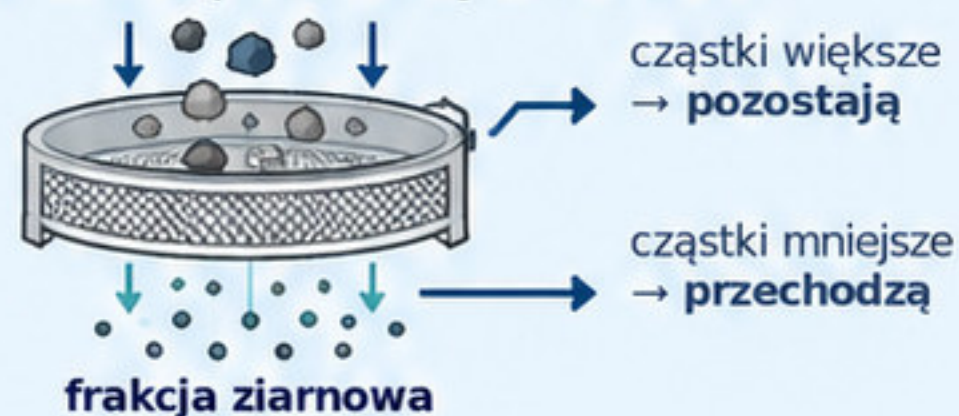
4. Po co rozdrabniać?

- zwiększenie powierzchni właściwej
- przyspieszenie rozpuszczania
- ułatwienie reakcji
- przygotowanie do separacji
- uzyskanie wymaganej granulacji produktu

Mniejsza cząstka = większa powierzchnia na jednostkę masy.

5. Klasyfikacja i przesiewanie

Rozdzielanie cząstek według ich rozmiaru.



7. Operacja jednostkowa ≠ reakcja

OPERACJA JEDNOSTKOWA

zmiana fizyczna,
transport lub rozdział

REAKCJA CHEMICZNA

zmiana składu
chemicznego

W realnym aparacie transport i reakcja mogą oczywiście zachodzić jednocześnie.

Mini zadanie

1. Chcesz ujednolicić stężenie w zbiorniku → **mieszanie**
2. Chcesz zwiększyć powierzchnię ciała stałego → **rozdrabnianie**
3. Chcesz oddzielić frakcje według rozmiaru → **przesiewanie**
4. Chcesz przyspieszyć separację dzięki sile odśrodkowej → **wirowanie**



Sprawdź, czy rozumiesz przepływ — zanim zaczniesz liczyć

1. CHECKLISTA

- | | | |
|--|--|---|
| ☐ Rozróżniam Q i $\dot{m}$. | ☐ Wiem, od czego zależą straty ciśnienia w rurze. | ☐ Rozumiem zasadę sedymentacji. |
| ☐ Potrafię zastosować $Q = A \cdot v$. | ☐ Rozpoznaję straty liniowe i miejscowe. | ☐ Rozumiem zasadę filtracji. |
| ☐ Rozumiem równanie ciągłości. | ☐ Rozumiem rolę współczynnika tarcia. | ☐ Potrafię odróżnić filtrat od osadu. |
| ☐ Potrafię wyjaśnić trzy składniki równania Bernoulliego. | ☐ Potrafię wyjaśnić działanie pompy. | ☐ Rozumiem cele mieszania. |
| ☐ Wiem, kiedy proste równanie Bernoulliego wymaga rozszerzenia. | ☐ Rozumiem pojęcie wysokości podnoszenia. | ☐ Wiem, dlaczego rozdrabnianie zwiększa powierzchnię właściwą. |
| ☐ Rozumiem znaczenie liczby Reynoldsa. | ☐ Wiem, czym jest punkt pracy pompy. | ☐ Rozpoznaję przesiewanie i wirowanie. |

2. AUTOTEST — 7 PYTAŃ

1. Przepływ objętościowy w rurze jest stały. Średnica rury maleje. Co dzieje się ze średnią prędkością cieczy?

Rośnie, ponieważ $Q = A \cdot v$.

2. Co opisuje liczba Reynoldsa?

Relację efektów bezwładności do lepkości i pomaga określić charakter przepływu.

3. Dlaczego długa i wąska rura powoduje zwykle większy spadek ciśnienia niż krótka i szeroka?

Ponieważ zwiększa się opór hydrauliczny związany z tarciem i prędkością przepływu.

4. Jaka jest podstawowa funkcja pompy?

Dostarczenie cieczy energii mechanicznej.

5. Czym różni się sedymentacja od filtracji?

Sedymentacja wykorzystuje ruch cząstek w polu sił, a filtracja zatrzymuje cząstki na lub w materiale porowatym podczas przepływu płynu.

6. Dlaczego placek filtracyjny może zmniejszać przepływ?

Ponieważ zwiększa opór hydrauliczny.

7. Dlaczego rozdrobnienie ciała stałego może przyspieszyć późniejszy proces rozpuszczania lub reakcji?

Ponieważ zwiększa dostępny obszar powierzchni.

3. MINI ZADANIE

Przez rurę o polu przekroju $0,01 \text{ m}^2$ przepływa ciecz z natężeniem $Q = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Oblicz średnią prędkość.

$$v = Q/A$$
$$v = 0,02 / 0,01$$
$$v = 2 \text{ m/s}$$

Jeżeli pole przekroju zmniejszymy dwukrotnie przy stałym Q , co stanie się z prędkością?

Wzrośnie dwukrotnie.

4. SZYBKA DIAGNOZA BŁĘDU

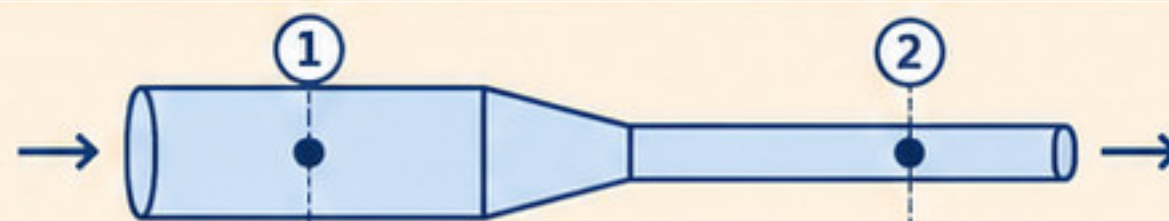
Jeśli mylisz:

Q i $\dot{m}$	→ wróć do strony 34
Bernoulliego i straty	→ 34–35
pompy	→ 35
sedymentację i filtrację	→ 36
operacje mechaniczne	→ 37

5. WYNIK

6–7	Dobra baza do wejścia w kinetykę i reaktory.
4–5	Popraw konkretne luki i idź dalej.
0–3	Powtórz strony 34–37 przed kolejnym modulem.

W zadaniu hydraulicznym narysuj instalację i zaznacz punkty 1 i 2. To często porządkuje całe rozwiązanie.



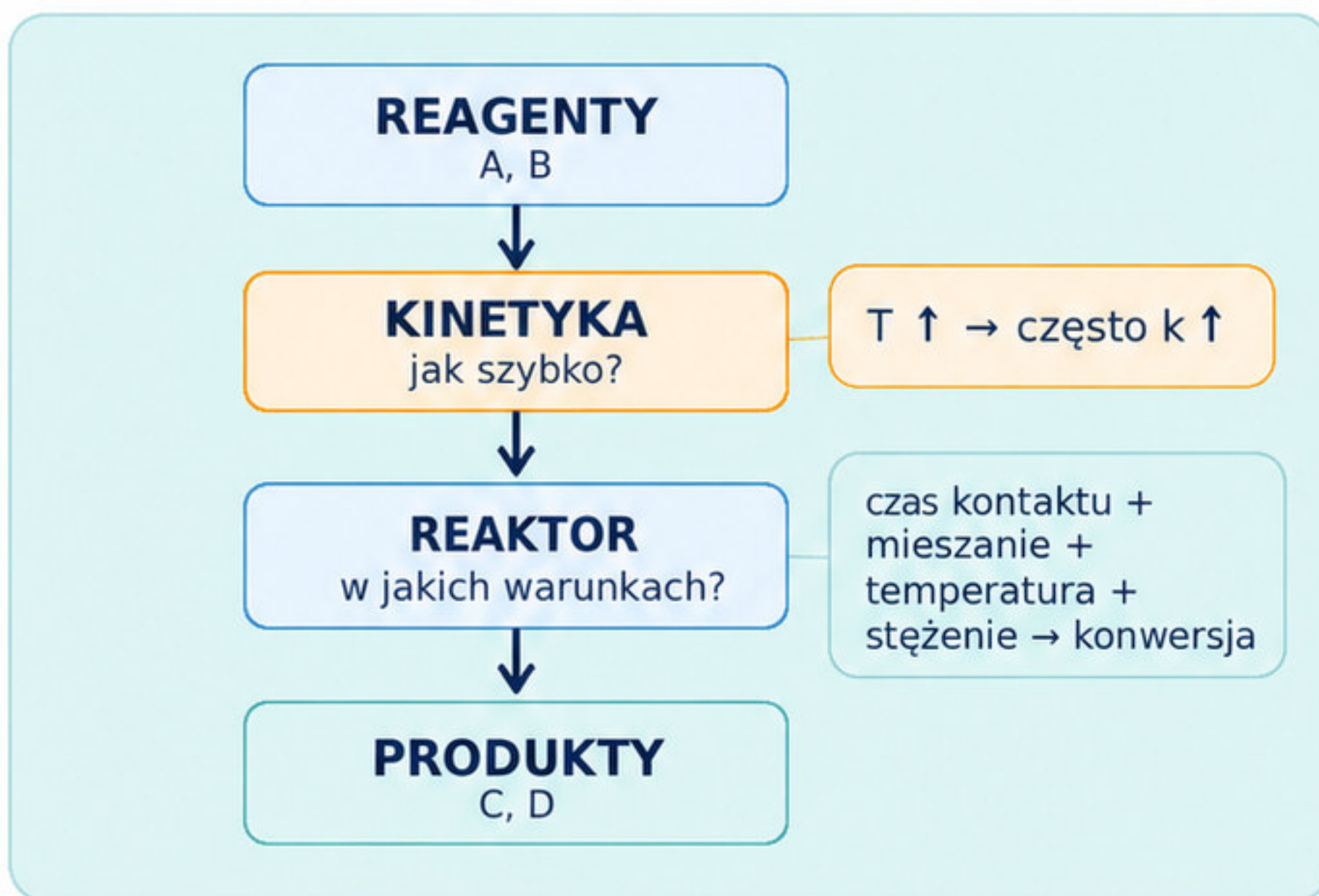


MODUŁ 07

Kinetyka i reaktory

Równowaga mówi, dokąd proces może dojść.
Kinetyka mówi, jak szybko.

Przypomnieć podstawowe pojęcia szybkości reakcji, wpływu temperatury i stężenia oraz połączyć je z zasadami działania najważniejszych idealnych reaktorów.



Treści modułu

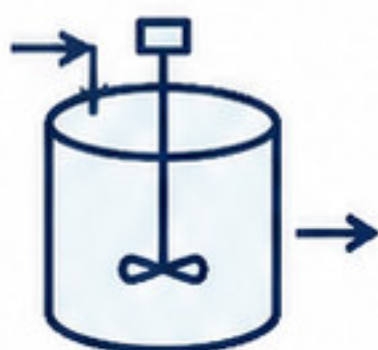
- Szybkość reakcji
- Rząd reakcji
- Stała szybkości
- Równanie Arrheniusa
- Konwersja
- Selektywność
- Wydajność
- Reaktor okresowy
- CSTR
- PFR
- Dobór reaktora
- Autotest

Idealne reaktory



BATCH

zamknięty zbiornik
z mieszadłem



CSTR

ciągły zbiornik
mieszany



PFR

długi reaktor
rurowy

Nie wybieraj modelu reaktora na podstawie samego kształtu aparatu.
Najważniejsze są założenia dotyczące przepływu i mieszania.



Kinetyka: jak szybko zachodzi reakcja?

Stechiometria mówi, ile substancji reaguje. Kinetyka mówi, jak szybko ta przemiana zachodzi.

1. Szybkość reakcji

Dla składnika A:

$$r_A = -\frac{dC_A}{dt}$$

Znak minus: Stężenie reagenta maleje w czasie.

Dla produktu P:

$$r_P = \frac{dC_P}{dt}$$

Sposób definiowania szybkości może uwzględniać współczynniki stechiometryczne. Na egzaminie stosuj definicję używaną na zajęciach.

2. Równanie kinetyczne

A → produkty

$$-r_A = k \cdot C_A^n$$

k — stała szybkości reakcji

C_A — stężenie reagenta

n — rząd reakcji względem A

Dla kilku reagentów: $-r_A = k \cdot C_A^\alpha \cdot C_B^\beta$

Całkowity rząd: $n = \alpha + \beta$

Wykładniki w równaniu kinetycznym nie muszą być równe współczynnikom stechiometrycznym, chyba że wynika to z mechanizmu elementarnego.

3. Co oznacza rząd reakcji?

Reakcja zerowego rzędu

$$-r_A = k$$

Szybkość nie zależy od C_A .

Reakcja pierwszego rzędu

$$-r_A = k \cdot C_A$$

Szybkość jest proporcjonalna do C_A .

Reakcja drugiego rzędu

$$-r_A = k \cdot C_A^2$$

lub np. $-r_A = k \cdot C_A \cdot C_B$

4. Jednostki k zależą od rzędu

Rząd całkowity	Przykładowa jednostka k przy stężeniu mol/m ³
0	mol/(m ³ · s)
1	1/s
2	m ³ /(mol · s)

Analiza jednostek pomaga wykryć błędne równanie kinetyczne.

5. Kinetyka a stechiometria

STECHEIOMETRIA

ile moli A znika na mol produktu

KINETYKA

jak szybko A znika w danych warunkach

7. Typowe błędy

- Mylenie szybkości reakcji ze zmianą całkowitej ilości produktu.
- Automatyczne przypisywanie rzędu ze stechiometrii.
- Pomijanie jednostek k .
- Zapominanie, że k zależy od temperatury.
- Używanie dodatniego znaku dla zaniku reagenta bez określenia konwencji.

6. Mini przykład

$$-r_A = k \cdot C_A$$

$$k = 0,20 \text{ min}^{-1}$$

$$C_A = 3 \text{ mol/L}$$

$$-r_A = 0,20 \cdot 3 = 0,60 \text{ mol/(L} \cdot \text{min)}$$

Jeśli C_A spadnie do połowy, co stanie się z szybkością reakcji pierwszego rzędu?

Spadnie do połowy, jeśli k pozostaje bez zmian.

8. CHECKLISTA

- | | |
|---|---|
| ☐ Potrafię zdefiniować szybkość reakcji. | ☐ Potrafię odróżnić reakcję zerowego, pierwszego i drugiego rzędu. |
| ☐ Rozumiem rolę k i rzędu reakcji. | ☐ Potrafię sprawdzić jednostki równania kinetycznego. |



Temperatura przyspiesza reakcję – ale produkt nadal trzeba ocenić

1. Równanie Arrheniusa

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

A – czynnik przedeksponencjalny
E_a – energia aktywacji
R – stała gazowa
T – temperatura bezwzględna

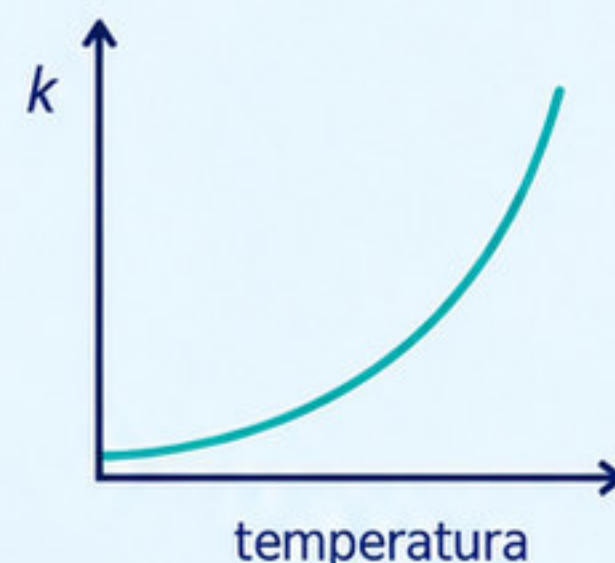
Intuicja:

W wielu reakcjach wzrost T powoduje wzrost k, a więc szybszą reakcję.

Nie oznacza to automatycznie, że wyższa temperatura zawsze daje lepszy proces. Może wpływać również na równowagę, reakcje uboczne, materiały konstrukcyjne i bezpieczeństwo.

2. Energia aktywacji

E_a można traktować jako miarę wrażliwości szybkości reakcji na temperaturę.



3. Konwersja

$$X_A = \frac{n_{A,0} - n_A}{n_{A,0}}$$

lub analogicznie na bazie przepływów molowych w układzie przepływowym.

Konwersja mówi, jaka część początkowego A została zużyta.

Przykład:

100 mol A na wejściu, 25 mol A na wyjściu.

$$X_A = (100 - 25) / 100 = 0,75 = 75\%$$

4. Selektowność

Selektowność mówi, jaka część przereagowanego materiału została skierowana do pożądanego produktu zamiast produktów ubocznych.

$$S = \frac{\text{ilość pożądanego produktu}}{\text{ilość niepożądanego produktu}}$$

Dokładna definicja zależy od przyjętej bazy i stechiometrii.

5. Wydajność

Wydajność łączy zużycie reagenta z ilością uzyskanego pożądanego produktu.

wysoka konwersja +
wysoka selektywność



zwykle wysoka wydajność
pożądanego produktu

Nie narzucać jednego wzoru dla wszystkich reakcji.

6. Nie myl tych pojęć

Wskaźnik	Odpowiada na pytanie
Konwersja	Ile reagenta zużyłem?
Selektywność	Na co został zużyty reagent?
Wydajność	Ile pożądanego produktu faktycznie uzyskałem?

7. Przykład jakościowy

A → B – produkt pożądaný

A → C – produkt uboczny

Przypadek 1:

90% A zużyte, ale dużo C.

Wniosek:

Wysoka konwersja nie gwarantuje wysokiej selektywności.

Przypadek 2:

60% A zużyte, niemal wszystko do B.

Wniosek:

Niższa konwersja może współistnieć z wysoką selektywnością.

Na egzaminie zawsze sprawdź, o który wskaźnik pytają.
90% konwersji nie oznacza 90% wydajności produktu.

CHECKLISTA

- | | |
|--|--|
| ☐ Potrafię interpretować równanie Arrheniusa. | ☐ Potrafię policzyć prostą konwersję. |
| ☐ Wiem, dlaczego T musi być w kelwinach. | ☐ Rozróżniam konwersję, selektywność i wydajność. |



Trzy modele reaktorów, trzy różne obrazy procesu

1. REAKTOR OKRESOWY — BATCH



Zamknięty zbiornik
z mieszadłem

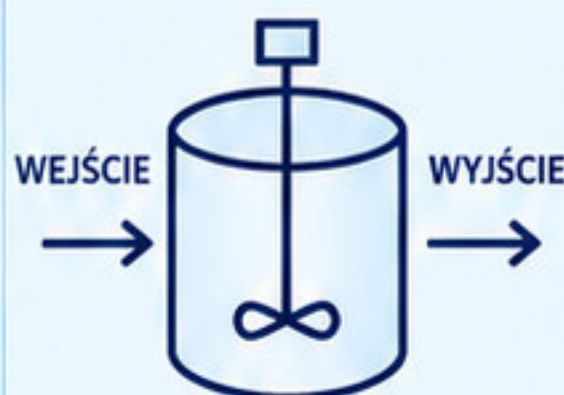
Reagenty są ładowane do aparatu,
reakcja zachodzi przez określony czas,
a następnie produkt jest odbierany.

Założenie idealne: Jednorodny skład
i temperatura w całej objętości,
jeśli reaktor jest idealnie mieszany.

Kluczowa zmienna: czas.

Prosty bilans reagenta:
akumulacja = reakcja.
Dla stałej objętości: $\frac{dC_A}{dt} = r_A$

2. CSTR — CIĄGŁY REAKTOR ZBIORNIKOWY IDEALNIE MIESZANY



Zbiornik idealnie
mieszany (CSTR)

Skład i temperatura w reaktorze
są jednorodne.

Warunki na wyjściu są takie same
jak warunki wewnątrz idealnie
wymieszanego reaktora.

Dla stanu ustalonego:
wejście – wyjście + reakcja = 0.

Podstawowy bilans A:
 $F_{A0} - F_A + r_A \cdot V = 0$
Przy $r_A < 0$ dla reagenta.

3. PFR — REAKTOR RUROWY Z PRZEPŁYWEM TŁOKOWYM



Reaktor rurowy (PFR)

Brak mieszania w kierunku osiowym, a właściwości zmieniają się
wzdłuż długości reaktora.

Każdy element płynu przesuwa się wzdłuż reaktora jak kolejny
fragment tłoka.

Podstawowy zapis różniczkowy: $\frac{dF_A}{dV} = r_A$

4. Porównanie jednym spojrzeniem

Cecha	Batch	CSTR	PFR
Praca	okresowa	ciągła	ciągła
Idealne mieszanie	tak	tak	poprzecznie, nie osiowo
Zmiana składu w aparacie	w czasie	brak przestrzennego gradientu	wzdłuż długości
Wyjście = wnętrze	na końcu cyklu	tak	nie
Typowa zmienna	t	V / τ	$V / \text{położenie}$

5. Czas przebywania

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

τ — przestrzenny czas przebywania
 V — objętość reaktora
 Q — przepływ objętościowy

Interpretacja τ zależy od modelu i założeń dotyczących
gęstości oraz przepływu.

6. Jak rozpoznać model w zadaniu?

Załaduj → reaguj
→ opróżnij

Batch

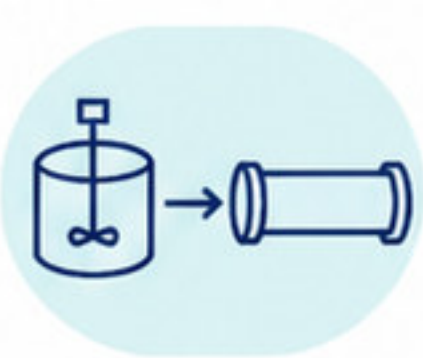
Idealnie wymieszany
zbiornik z ciągłym
dopływem i odpływem

CSTR

Warunki zmieniają się
wzdłuż rury

PFR

**Model matematyczny jest idealizacją. Rzeczywisty reaktor
może odbiegać od zachowania idealnego.**



Ten sam proces — różne reaktory, różne wyniki

1. Dlaczego model reaktora wpływa na konwersję?

- 1 W różnych reaktorach reagenty doświadczają różnych historii stężenia i czasu kontaktu.
- 2 Dla dodatniego rzędu reakcji: Wyższe stężenie reagenta często oznacza większą szybkość reakcji.
- 3 Dlatego rozkład stężeń w reaktorze może wpływać na wymaganą objętość.

2. CSTR



Cała objętość reaktora ma stężenie równe stężeniu na wyjściu.

Jeżeli szybkość maleje wraz ze spadkiem stężenia reagenta, cały reaktor pracuje przy tej niższej szybkości charakterystycznej dla warunków wyjścia.

3. PFR



Stężenie reagenta zmniejsza się stopniowo wzdłuż reaktora.

Na początku reaktora szybkość może być większa dzięki wyższemu stężeniu reagenta.

Dla wielu prostych reakcji dodatniego rzędu PFR może osiągać daną konwersję przy mniejszej objętości niż pojedynczy CSTR. Nie jest to jednak uniwersalna reguła dla wszystkich układów kinetycznych.

4. Reaktory szeregowe



CSTR

CSTR

CSTR

Kilka CSTR połączonych szeregowo może zachowywać się bardziej podobnie do PFR niż pojedynczy duży CSTR.

5. Dobór nie jest tylko równaniem

Kryterium	Pytanie
Kinetyka	Jak szybko zachodzi reakcja?
Selektywność	Czy powstają produkty uboczne?
Ciepło	Czy reakcja jest silnie egzotermiczna?
Mieszanie	Czy wymagany jest dobry kontakt faz?
Transport masy	Czy reakcję ogranicza dyfuzja?
Bezpieczeństwo	Co się stanie przy utracie chłodzenia?
Skala	Czy proces jest ciągły czy kampanijny?
Produkt	Czy występują ciała stałe, osady lub wysoka lepkość?

6. Reakcje egzotermiczne

Jeżeli reakcja wydziela dużo ciepła, projekt musi uwzględniać bezpieczne odprowadzenie energii.

Wzrost temperatury może zwiększać k , co z kolei zwiększa szybkość wydzielania ciepła.



Ten mechanizm może prowadzić do niestabilności cieplnej, dlatego bezpieczeństwo termiczne jest integralną częścią projektowania reaktorów.

7. Szybkie pytania doboru

- ☐ Batch czy proces ciągły?
- ☐ Jedna czy kilka faz?
- ☐ Czy wymagana jest intensywna kontrola temperatury?
- ☐ Czy mieszanie wpływa na selektywność?
- ☐ Czy transport masy może ograniczać reakcję?
- ☐ Czy produkt może powodować osady lub zatykanie?

Przykład

Reakcja w małej skali, wiele różnych produktów, częsta zmiana receptury.



Najbardziej naturalny punkt startowy do analizy: **reaktor okresowy**

Nie twierdzić, że jest to zawsze jedyna poprawna opcja.



Czy potrafisz połączyć kinetykę z bilansem reaktora?

1. CHECKLISTA

- | | | |
|--|--|---|
| ☐ Potrafię zdefiniować szybkość zaniku reagenta. | ☐ Wiem, jak temperatura wpływa na k . | ☐ Rozumiem podstawowe założenia idealnego CSTR. |
| ☐ Rozumiem rolę stałej szybkości k . | ☐ Potrafię policzyć konwersję reagenta. | ☐ Rozumiem podstawowe założenia idealnego PFR. |
| ☐ Rozumiem pojęcie rzędu reakcji. | ☐ Rozróżniam konwersję, selektywność i wydajność. | ☐ Rozumiem pojęcie czasu przebywania. |
| ☐ Wiem, że rząd reakcji nie musi wynikać bezpośrednio ze stechiometrii. | ☐ Rozpoznaję reaktor Batch. | ☐ Wiem, dlaczego wybór reaktora zależy również od wymiany ciepła i masy. |
| ☐ Potrafię sprawdzić jednostki k . | ☐ Rozpoznaję CSTR. | ☐ Rozumiem podstawowe ryzyko reakcji silnie egzotermicznych. |
| ☐ Rozumiem równanie Arrheniusa. | ☐ Rozpoznaję PFR. | |

2. AUTOTEST — 7 PYTAŃ

1. Dla reakcji pierwszego rzędu stężenie A spada dwukrotnie przy stałej temperaturze. Co dzieje się z szybkością?

Spada dwukrotnie.

2. Czy współczynnik stechiometryczny 2 oznacza automatycznie drugi rząd reakcji?

Nie.

3. Co dzieje się zazwyczaj z k po zwiększeniu temperatury?

Rośnie zgodnie z zależnością Arrheniusa dla typowej dodatniej energii aktywacji.

4. Do reaktora wchodzi 100 mol/h A, a wychodzi 40 mol/h. Jaka jest konwersja?

60%.

5. Który idealny reaktor ciągły ma taki sam skład w całej objętości jak na wyjściu?

CSTR.

6. W którym idealnym reaktorze stężenie zmienia się wzdłuż kierunku przepływu?

PFR.

7. Dlaczego reakcja egzotermiczna może wymagać szczególnie dobrej kontroli temperatury?

Ponieważ wzrost temperatury może zwiększyć szybkość reakcji, a to zwiększa tempo wydzielania ciepła.

3. MINI ZADANIE

Do reaktora wchodzi 200 mol/h A, a wychodzi 50 mol/h A. Oblicz konwersję A.

$$\begin{aligned}F_{A0} &= 200 \text{ mol/h} \\F_A &= 50 \text{ mol/h} \\X_A &= (200 - 50) / 200 \\X_A &= 0,75 = 75\%\end{aligned}$$

Czy na podstawie samej konwersji można określić selektywność produktu?

Nie. Trzeba znać ilość pożądanego i niepożądanego produktu.

4. WYNIK

6–7 Możesz przejść do integracji całego procesu.

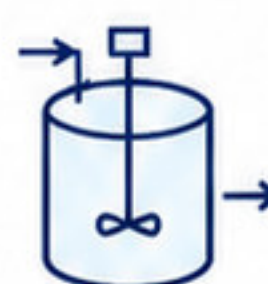
4–5 Powtórz przede wszystkim punkty dotyczące modelu reaktora lub wskaźników procesu.

0–3 Wróć do stron 40–43.

Reaktor nie jest osobnym światem. Łączy bilans masy, energii, przepływ, transport ciepła, transport masy i kinetykę.



BATCH



CSTR



PFR



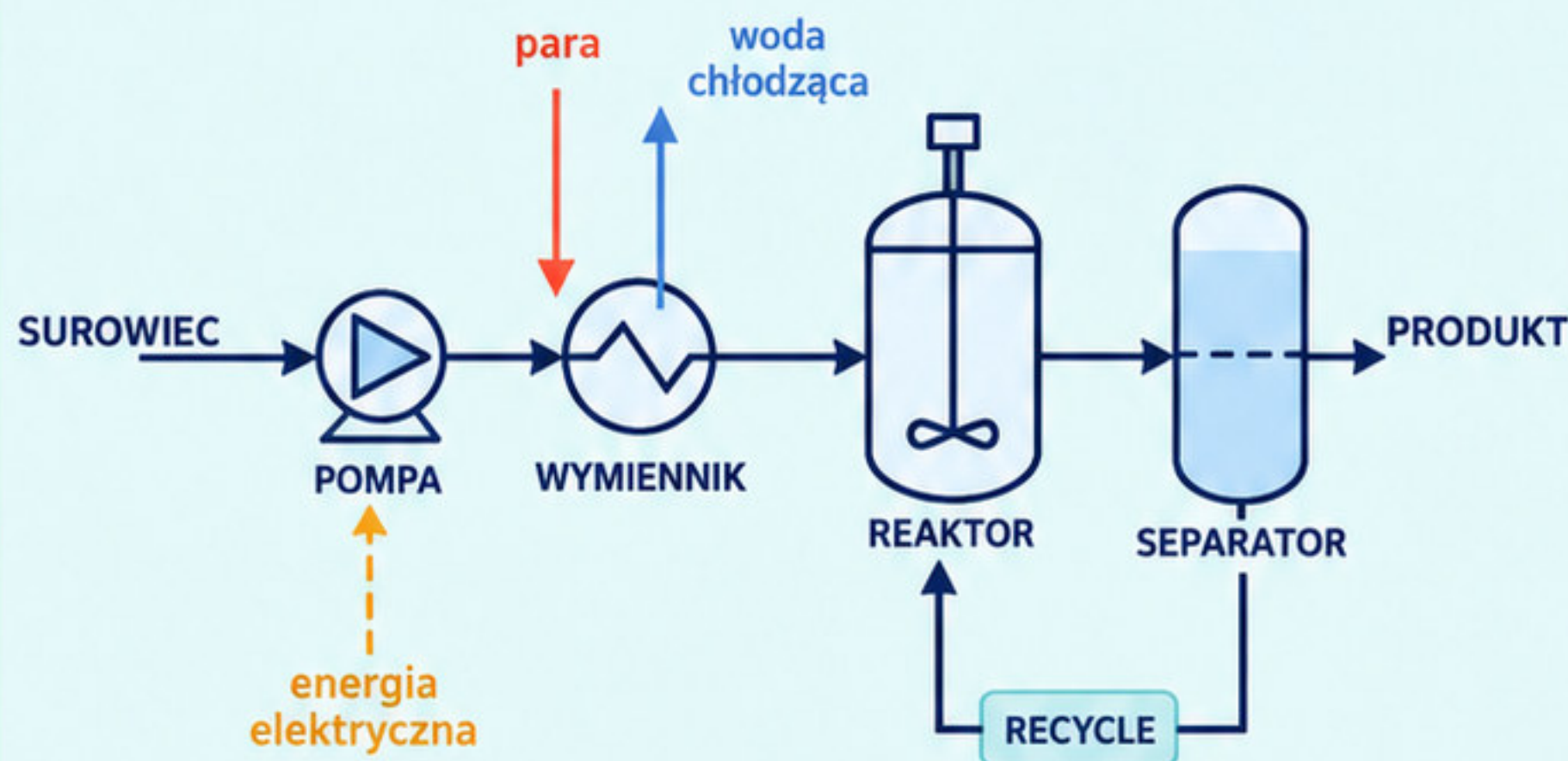
MODUŁ 08

Procesy przemysłowe i finałowa kontrola

Na egzaminie pojedyncze tematy często łączą się w jeden proces.

Cel modułu

Nauczyć studenta patrzeć na instalację procesową jako połączenie strumieni, aparatów, bilansów, transportu, reakcji, energii, sterowania i bezpieczeństwa.



Treści modułu

- Schemat procesu
- Strumienie i aparaty
- Media pomocnicze
- Integracja bilansów
- Bezpieczeństwo
- Zadanie łączące kilka działów
- Ostateczna checklista przed egzaminem

Każda strzałka oznacza informację, którą można zbilansować.



Strumienie
masowe
i molowe



Energia
ciepło,
praca



Media pomocnicze
para, woda
chłodząca, gazy



Sterowanie
pomiar,
regulacja



Bezpieczeństwo
odpowietrzanie,
zabezpieczenia



Jeśli rozumiesz przepływ informacji przez schemat procesu, łatwiej połączysz zagadnienia z całego kursu.



Czytaj proces od lewej do prawej — i od strumienia do strumienia

1. NAJPIERW ZNAJDŹ GRANICE PROCESU

- ☐ Gdzie wchodzą surowce?
- ☐ Gdzie wychodzą produkty?
- ☐ Czy istnieją produkty uboczne?
- ☐ Czy są strumienie odpadowe?
- ☐ Czy występuje recyrkulacja?

2. ROZPOZNAJ GŁÓWNE APARATY

Symbol / aparat	Główna funkcja
	Pompa
	Sprężarka
	Wymiennik
	Reaktor
	Kolumna
	Separator
	Mieszalnik
	Zbiornik

3. NADAJ STRUMIENIOM NUMERY

- S1** — świeży surowiec
- S2** — po podgrzaniu
- S3** — produkt reaktora
- S4** — produkt końcowy
- S5** — recyrkulacja
- S6** — purge

Numerowanie upraszcza zapisywanie danych i równań.

4. DLA KAŻDEGO STRUMIENIA PYTAJ O 5 RZECZY

- 1** przepływ
- 2** skład
- 3** temperatura
- 4** ciśnienie
- 5** faza

Nie każdy parametr będzie znany, ale to właśnie brakujące wielkości stają się niewiadomymi.

5. SCHEMAT PRZYKŁADOWY



6. JAK WYBIERAĆ GRANICĘ BILANSOWĄ?

Opcja A: cały proces



Dobra do: bilansu całkowitego i oceny surowców / produktów.

Opcja B: pojedynczy aparat



Dobra do: lokalnych parametrów urządzenia.

Opcja C: kilka aparatów razem



Dobra do: uproszczenia pętli recyrkulacji lub wyeliminowania nieznanymi strumieni wewnętrznymi.

Dobry bilans zaczyna się od dobrej granicy układu.

7. PFD a P&ID — rozpoznaj różnicę

PFD: Process Flow Diagram

pokazuje główne aparaty i strumienie procesu.



P&ID: Piping and Instrumentation Diagram

zawiera bardziej szczegółowe informacje o rurociągach, armaturze, pomiarach i sterowaniu.



Nie wymagać znajomości wszystkich symboli P&ID.



Proces to nie tylko surowiec i produkt

1. Media pomocnicze — utilities

Aparaty technologiczne często wymagają dodatkowych mediów, które nie stają się głównym produktem, ale umożliwiają działanie procesu.



2. Po co para?



- ogrzewanie
- reboilery
- wyparki
- utrzymanie temperatury

3. Po co woda chłodząca?



- kondensacja
- chłodzenie produktów
- odprowadzanie ciepła reakcji

4. Azot



tworzenie atmosfery obojętnej, ograniczenie kontaktu z tlenem, inertyzacja określonych układów.

Zastosowanie musi odpowiadać właściwościom procesu i procedurom bezpieczeństwa.

5. Podstawowe pytania bezpieczeństwa

- ☐ Czy substancje są palne?
- ☐ Czy są toksyczne lub żrące?
- ☐ Czy reakcja jest egzotermiczna?
- ☐ Czy może wzrosnąć ciśnienie?
- ☐ Co stanie się po utracie chłodzenia?
- ☐ Co się stanie przy zablokowaniu odpływu?
- ☐ Czy możliwe jest niepożądane mieszanie substancji?
- ☐ Czy występują pyły lub pary tworzące niebezpieczne mieszaniny?

6. Warstwy ochrony

NORMALNA KONTROLA

↓
ALARM

↓
INTERLOCK /
AUTOMATYCZNE ZABEZPIECZENIE

↓
SYSTEM ULGOWY / AWARYJNY

↓
PROCEDURA REAGOWANIA

Bezpieczeństwo nie powinno opierać się na jednym elemencie.

7. Podstawowa logika sterowania

Reaktor ma zadaną temperaturę.



Pomiar: T

Działanie: zmienia przepływ chłodziwa

To przykład sprzężenia zwrotnego.

8. HAZARD ≠ RISK

Hazard

źródło potencjalnej szkody

Risk

połączenie prawdopodobieństwa i konsekwencji

W języku technicznym te pojęcia nie są synonimami.

9. Myślenie systemowe



Na egzaminie proces przemysłowy oceniał również pytaniem: co może pójść nie tak?



Jedno zadanie, pięć działów

Zadanie

Świeży strumień surowca A o natężeniu 100 kmol/h miesza się ze strumieniem recyrkulacyjnym. Mieszanina jest podgrzewana w wymienniku, a następnie kierowana do reaktora.

W reaktorze zachodzi reakcja: $A \rightarrow B$

Jednoprześciowa konwersja A wynosi 60%.

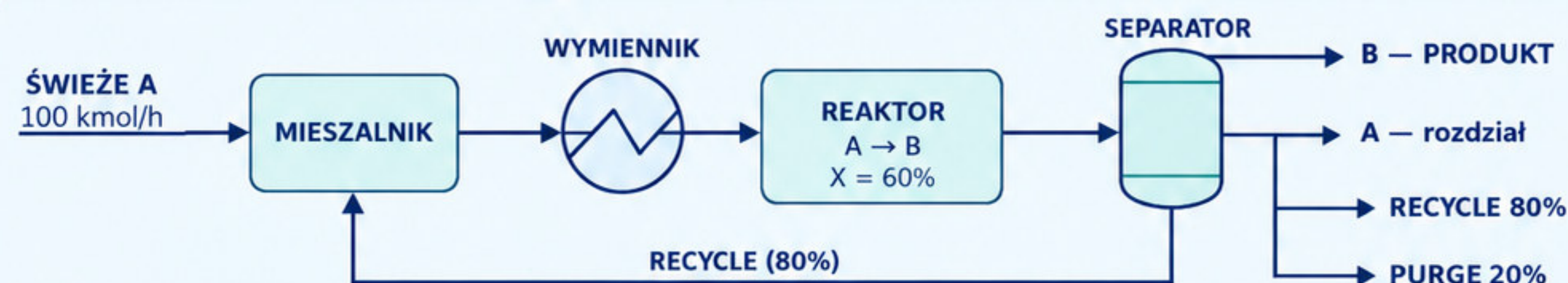
Po reaktorze produkt trafia do separatora.

Separator usuwa całe B jako produkt, natomiast 80% nieprzereagowanego A jest zawracane do reaktora.

Pozostałe 20% nieprzereagowanego A opuszcza instalację jako purge.

Założ stan ustalony i brak innych składników.

1. KROK 1 — NARYSUJ PROCES



2. KROK 2 — WYBIERZ GRANICĘ

Najpierw: cała instalacja.

Strumień recyle jest wewnętrzny, więc znika z bilansu całej instalacji.

3. KROK 3 — BILANS A DLA CAŁEGO PROCESU

F — całkowity A wchodzący do reaktora

Po reaktorze pozostaje: $0,40F$

Recyle: $0,80 \cdot 0,40F = 0,32F$

Bilans przed reaktorem: $F = 100 + 0,32F$

$0,68F = 100$

$F \approx 147,06$ kmol/h

4. KROK 4 — REAKTOR

A przereagowane: $0,60 \cdot 147,06 \approx 88,24$ kmol/h

Zatem B: $\approx 88,24$ kmol/h

A nieprzereagowane: $0,40 \cdot 147,06 \approx 58,82$ kmol/h

5. KROK 5 — SEPARATOR

Recyle: $0,80 \cdot 58,82 \approx 47,06$ kmol/h

Purge: $0,20 \cdot 58,82 \approx 11,76$ kmol/h

Kontrola: 100 kmol/h świeżego A = 88,24 kmol/h przereagowanego A + 11,76 kmol/h A w purge

Bilans zamyka się: $100 \approx 100$

6. KROK 6 — WYMIENNIK

Jeżeli całkowity strumień do reaktora ma zostać ogrzany o ΔT , a znamy średnie c_p , potrzebne ciepło można oszacować z:

$$\dot{Q} \approx \dot{n} \cdot c_{p,mol} \cdot \Delta T$$

Przed obliczeniem trzeba zapewnić zgodność jednostek i właściwe c_p dla mieszaniny.

7. CO TO ZADANIE SPRAWDZA?

- | | |
|--|--|
| ☐ bilans całego procesu | ☐ różnicę między świeżym zasilaniem a zasilaniem reaktora |
| ☐ bilans lokalny | ☐ bilans energetyczny wymiennika |
| ☐ recyrkulację | ☐ kontrolę poprawności wyniku |
| ☐ purge | |
| ☐ konwersję jednoprześciową | |

8. Najważniejszy wniosek

Konwersja jednoprześciowa wynosi 60%, ale dzięki recyrkulacji całkowite wykorzystanie świeżego A jest większe.

Purge zapobiega nieskończonemu zawracaniu nieprzereagowanego materiału lub gromadzeniu się składników niepożądanych w bardziej realistycznym układzie.

**Najpierw bilans całego procesu.
Potem lokalne aparaty.
To często najkrótsza droga
do rozwiązania.**



Ostatnie 20 minut powtórki

Nie ucz się już wszystkiego. Sprawdź, czy fundamenty są na miejscu.

1. BILANSE

- ☐ Potrafię narysować granicę układu.
- ☐ Wiem, czym jest stan ustalony.
- ☐ Potrafię zapisać bilans całkowitej masy.
- ☐ Potrafię zapisać bilans składnika.
- ☐ Rozumiem recyrkulację, bypass i purge.
- ☐ Potrafię rozpocząć prosty bilans energii.

2. TERMODYNAMIKA

- ☐ Rozróżniam układ otwarty, zamknięty i izolowany.
- ☐ Rozumiem U , H , Q i W .
- ☐ Rozpoznaję przemiany izotermiczną, izobaryczną, izochoryczną i adiabatyczną.
- ☐ Wiem, kiedy stosuje się kelwiny.
- ☐ Rozumiem równowagę cieczeniowo-para.
- ☐ Rozumiem ciepło jawne i utajone.

3. WYMIANA CIEPŁA

- ☐ Rozróżniam przewodzenie, konwekcję i promieniowanie.
- ☐ Znam fizyczny sens prawa Fouriera.
- ☐ Rozumiem $\dot{q} = hA\Delta T$.
- ☐ Rozpoznaję rolę Re , Pr i Nu .
- ☐ Rozumiem współczynnik U .
- ☐ Rozumiem zasadę działania wymiennika ciepła.

4. WYMIANA MASY

- ☐ Rozumiem prawo Ficka.
- ☐ Rozumiem gradient stężenia.
- ☐ Rozumiem współczynnik wnikania masy.
- ☐ Rozpoznaję Sh i Sc .
- ☐ Potrafię wyjaśnić destylację.
- ☐ Rozróżniam absorpcję, ekstrakcję i suszenie.

5. PRZEPŁYW I OPERACJE

- ☐ Rozróżniam Q i $\dot{m}$.
- ☐ Potrafię użyć $Q = A \cdot v$.
- ☐ Rozumiem Bernoulliego.
- ☐ Rozumiem Reynolds.
- ☐ Wiem, dlaczego powstają straty ciśnienia.
- ☐ Rozumiem rolę pompy.
- ☐ Rozróżniam sedymentację i filtrację.
- ☐ Rozumiem podstawowe cele mieszania i rozdrabniania.

6. KINETYKA I REAKTORY

- ☐ Rozumiem szybkość reakcji.
- ☐ Rozumiem znaczenie k i rzędu reakcji.
- ☐ Rozumiem równanie Arrheniusa.
- ☐ Rozróżniam konwersję, selektywność i wydajność.
- ☐ Rozpoznaję Batch, CSTR i PFR.
- ☐ Rozumiem, dlaczego wymiana ciepła może być kluczowa dla reaktora.

7. PROCES JAKO CAŁOŚĆ

- ☐ Potrafię przeczytać prosty schemat procesu.
- ☐ Rozpoznaję podstawowe aparaty.
- ☐ Potrafię ponumerować strumienie.
- ☐ Rozumiem rolę mediów pomocniczych.
- ☐ Pamiętam, że bezpieczeństwo jest częścią projektu, a nie dodatkiem.

8. 7 PYTAŃ, KTÓRE WARTO ZADAĆ SOBIE PRZY KAŻDYM ZADANIU

- 1 Co jest moim układem?
- 2 Co wchodzi i co wychodzi?
- 3 Co jest zachowane?
- 4 Jaka jest siła napędowa procesu?
- 5 Jakie założenia mogę przyjąć?
- 6 Czy jednostki są spójne?
- 7 Czy wynik ma fizyczny sens?

9. SYGNAŁY OSTRZEGAWCZE PRZED ODDANIEM ZADANIA

- ! wynik bez jednostki
- ! temperatura w $^{\circ}C$ w równaniu wymagającym K
- ! ujemny przepływ bez fizycznego wyjaśnienia
- ! konwersja większa niż 100%
- ! udziały molowe, które nie sumują się do 1
- ! bilans wejścia i wyjścia, który się nie zamyka
- ! użycie wzoru bez sprawdzenia założeń
- ! pominięty strumień na schemacie

10. OSTATNIA MINUTA

Jeżeli utkniesz na egzaminie:

- 1 Narysuj proces.
- 2 Wypisz dane i jednostki.
- 3 Nazwij zjawisko.
- 4 Zapisz równanie ogólne.
- 5 Dopiero potem upraszczaj.

Nie musisz pamiętać każdej zależności z całego kursu, aby myśleć poprawnie.

Jeżeli rozumiesz bilanse, siły napędowe, podstawowe mechanizmy transportu i potrafisz kontrolować założenia — masz solidny fundament do rozwiązania wielu zadań inżynierskich.

- ✓ Sprawdzone
- ~ Jeszcze raz przejrzeć
- ! Powtórzyć teraz

3 rzeczy, które powtarzam jako ostatnie:

1. ---
2. ---
3. ---

BILANS

TERMODYNAMIKA

TRANSPORT

PRZEPŁYW

REAKCJA

PROCES

Od zjawiska do rozwiązania.