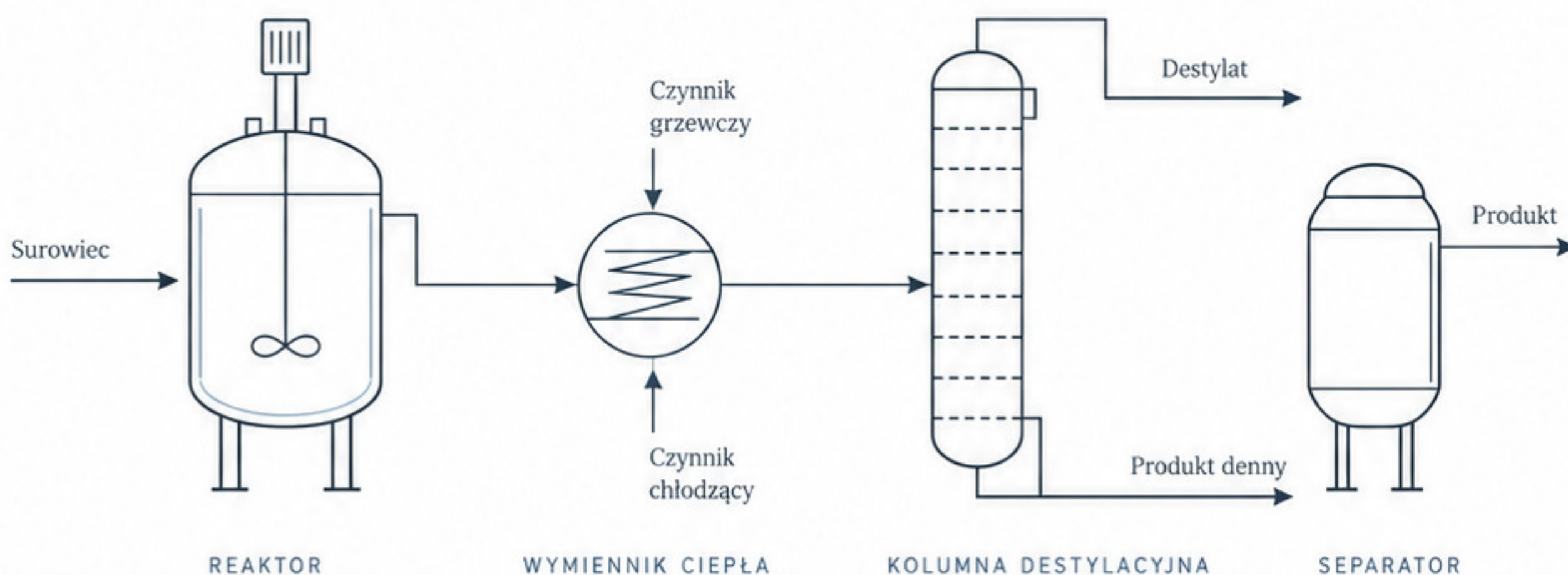


50 pytań z inżynierii chemicznej z omówieniem

Praktyczny bank pytań, obliczeń i wyjaśnień
dla studentów

POWTÓRKA PRZED KOŁOKWIAMI I EGZAMINAMI

*Procesy
tworzą
możliwości*



PYTANIA
TEORETYCZNE



PRZYKŁADY
OBLICZENIOWE



OMÓWIENIA
KROK PO KROKU



ZASTOSOWANIA
W PRAKTYCE

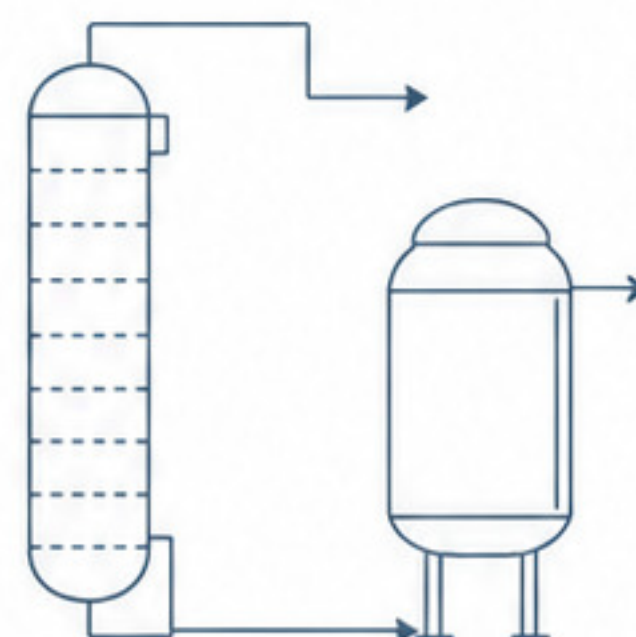
Prawa autorskie

Wszelkie prawa zastrzeżone. Materiał przygotowany do celów edukacyjnych.

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

01 Zakres użytkowania

- Materiał przeznaczony do użytku osobistego.
- Może służyć do nauki, powtórek i samodzielnego sprawdzania wiedzy.
- Udostępnianie całości lub części bez zgody autora jest zabronione.



PROCESY TWORZĄ
MOŻLIWOŚCI

02 Czego nie wolno

- Kopiować, odsprzedawać ani publikować materiału w całości lub we fragmentach.
- Usuwać informacji o autorstwie lub zmieniać treści bez zgody.
- Wykorzystywać materiału jako oficjalnego standardu uczelni lub instrukcji procesowej.

03 Nota edukacyjna

Materiał ma wspierać naukę inżynierii chemicznej i przygotowanie do kolokwii oraz egzaminów. Nie zastępuje zajęć, konsultacji, obowiązujących skryptów ani indywidualnej pracy z zadaniami.



Najlepsze efekty daje aktywne rozwiązywanie pytań, analiza błędów i regularne powtórki.

Spis treści

Układ materiału od strony 00 do 49

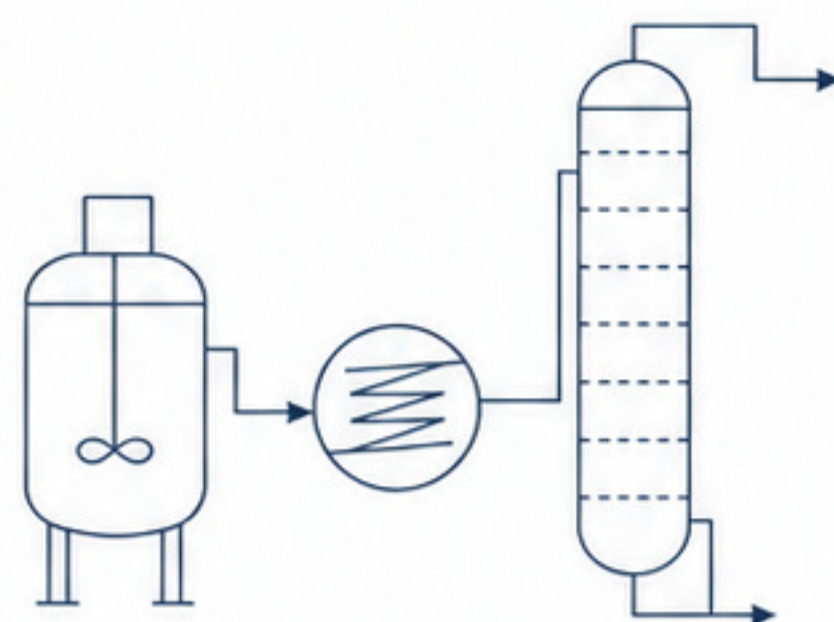
00	Okładka
01	Prawa autorskie
02	Spis treści
03	Wprowadzenie
04	Moduł 01 — Podstawy, jednostki oraz bilanse masy i energii
05–12	Pytania 1–10
13	Moduł 02 — Termodynamika, właściwości płynów i przepływ
14–21	Pytania 11–20
22	Moduł 03 — Wymiana ciepła i operacje cieplne
23–30	Pytania 21–30
31	Moduł 04 — Wymiana masy i procesy rozdzielania
32–39	Pytania 31–40
40	Moduł 05 — Kinetyka reakcji, reaktory i procesy przemysłowe
41–49	Pytania 41–50

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI



Każde pytanie zawiera:

- prawidłową odpowiedź,
- omówienie toku rozumowania,
- wskazówkę
- i typowy błąd.



PROCESY TWORZĄ
MOŻLIWOŚCI

Wprowadzenie

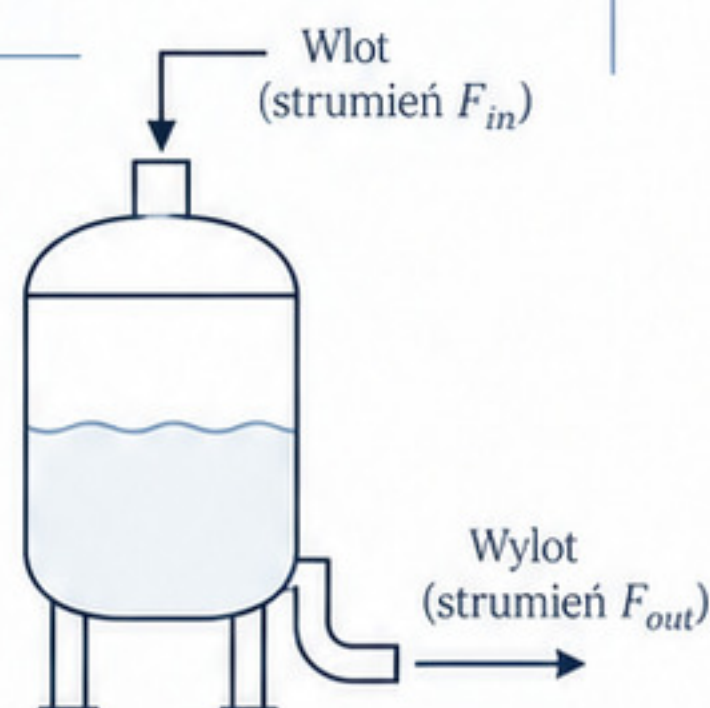
Ten materiał zamienia bierne przeglądanie wzorów i fiszek w aktywne sprawdzanie wiedzy. Pytania zostały ułożone tak, aby wspierać zrozumienie, obliczenia i szybkie powtórki przed kolokwium lub egzaminem.

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

01

Jak korzystać z materiału

- Przeczytaj pytanie i spróbuj odpowiedzieć samodzielnie.
- Porównaj swoją odpowiedź z rozwiązaniem.
- Przeanalizuj omówienie krok po kroku.
- Zwróć uwagę na wskazówkę i typowy błąd.



02

Na każdej stronie znajdziesz



PYTANIE

PRAWIDŁOWA
ODPOWIEDŹ

OMÓWIENIE



WSKAZÓWKA

TYPOWY
BŁĄD

03

Jak się uczyć skutecznie

- Pracuj regularnie – krótkie, ale częste powtórki dają najlepsze efekty.
- Nie pomijaj jednostek – to częste źródło błędów w obliczeniach.
- Sprawdzaj założenia i znaki – zastanów się, czy wynik ma sens fizyczny.

04

Legenda kolorów

Niebieski
definicje
i strukturyZielony
prawidłowe
odpowiedziBursztynowy
wskazówki
i uwagiCzerwony
tylko błędy

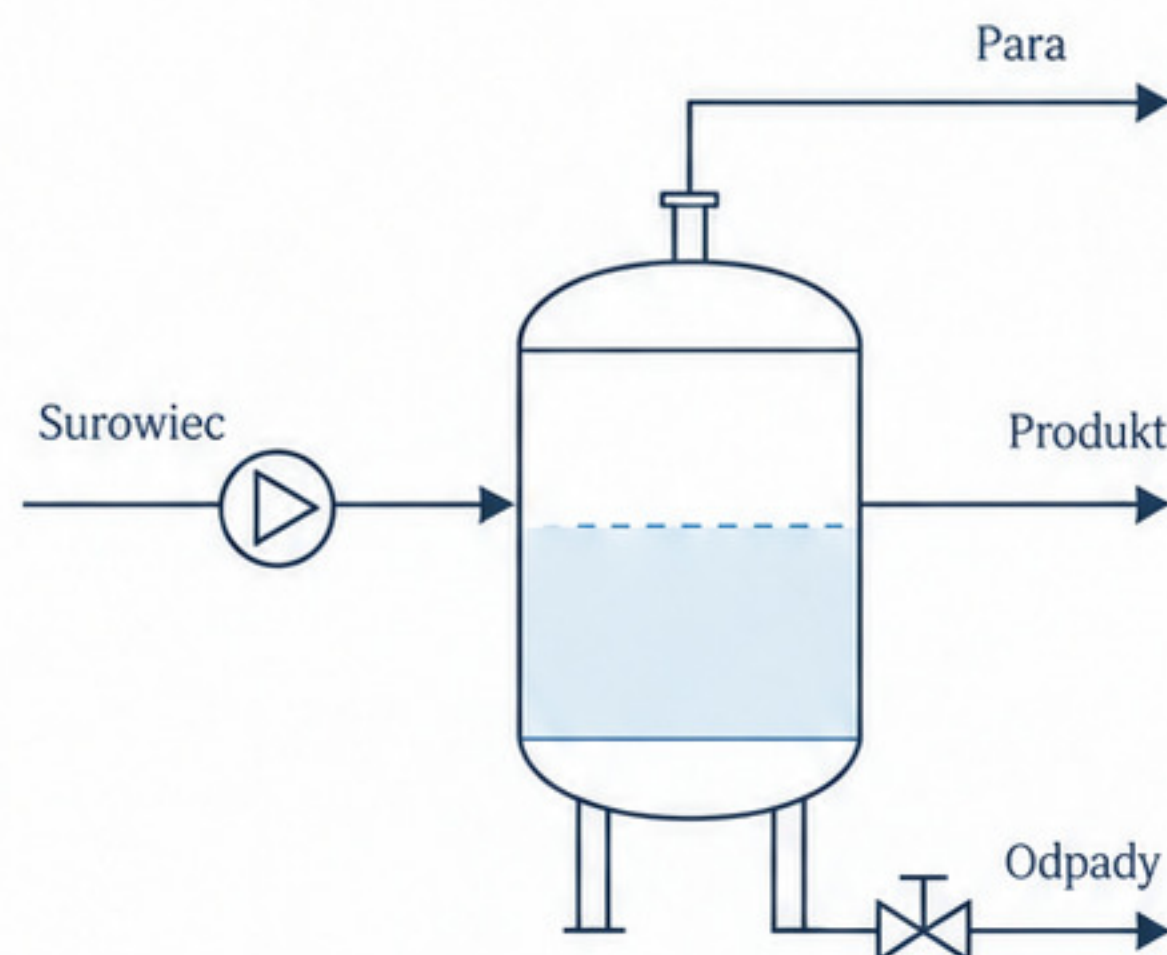
M O D U Ł

01

Podstawy, jednostki oraz bilanse masy i energii

Pytania 1–10

W tym module utrwalasz język obliczeń inżynierskich: poprawne jednostki, rozpoznawanie wielkości procesowych oraz podstawową logikę bilansów wykorzystywaną w dalszych działach inżynierii chemicznej.



JEDNOSTKI
I PRZELICZENIA



GĘSTOŚĆ,
OBJĘTOŚĆ I SKŁAD
MIESZANIN



BILANS MASY:
STAN USTALONY
I NIEUSTALONY



PODSTAWY
BILANSU ENERGII

01

Pytanie 1

Przelicz strumień masy 2,5 t/h na kg/s.



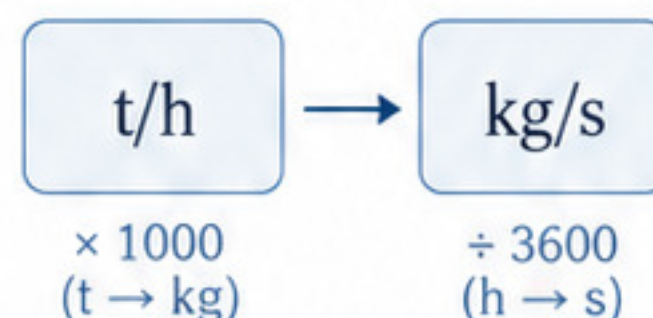
Prawidłowa odpowiedź:
0,694 kg/s

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI



Omówienie

$$2,5 \text{ t/h} = 2500 \text{ kg/h}$$
$$2500 / 3600 = 0,694 \text{ kg/s}$$



Wskazówka

Aby przejść z t/h do kg/s, zamień tony na kilogramy, a godziny na sekundy.



Typowy błąd

Pominięcie dzielenia przez 3600.

02

Pytanie 2

Ile wynosi masa 3,2 m³ cieczy o gęstości 850 kg/m³?



Prawidłowa odpowiedź:
2720 kg



Omówienie

Korzystamy ze wzoru $m = \rho \cdot V$.
Zatem $m = 850 \cdot 3,2 = 2720 \text{ kg}$.



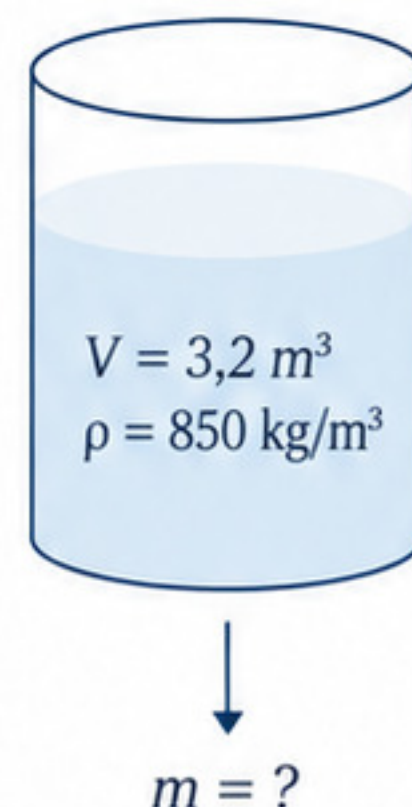
Wskazówka

Najpierw sprawdź, czy jednostki gęstości i objętości są zgodne.



Typowy błąd

Mylenie masy z objętością albo użycie odwrotności gęstości.



Pytanie 3

Zapisz ogólną postać bilansu masy i wyjaśnij znaczenie poszczególnych członów.

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

01 Prawidłowa odpowiedź

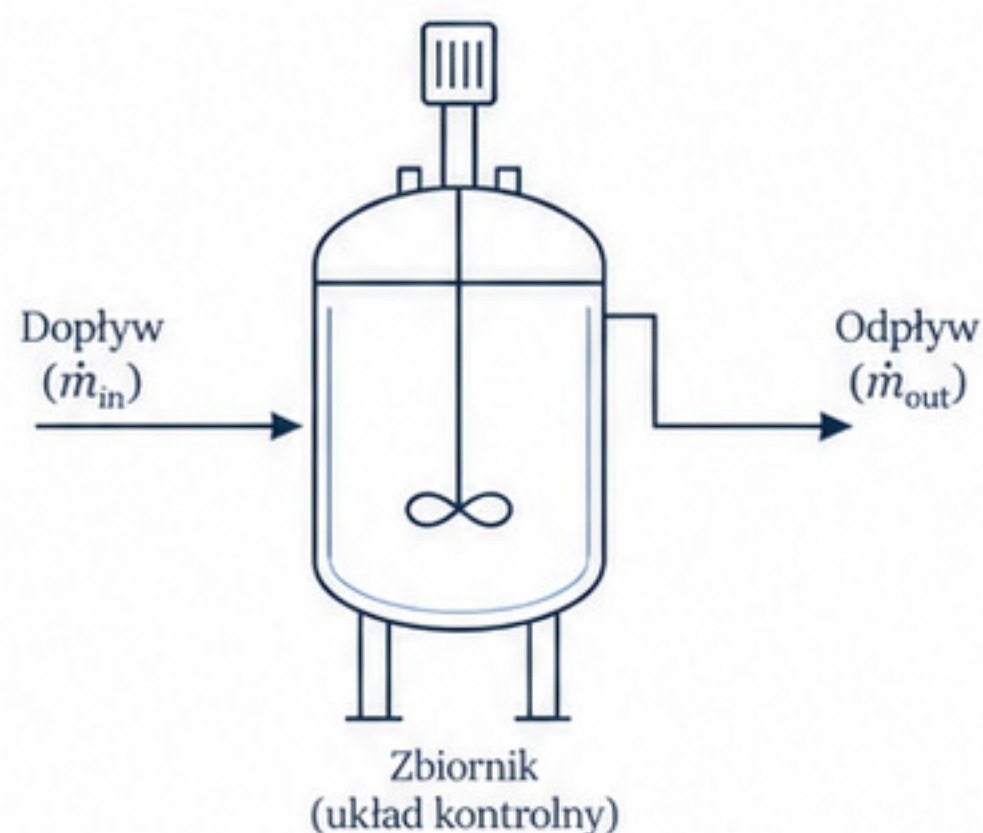


Prawidłowa odpowiedź:

$$\text{Akumulacja} = \text{Dopływ} - \text{Odływ} + \text{Generacja} - \text{Zużycie}$$

02 Omówienie

Ogólna postać bilansu pokazuje, co dzieje się z rozpatrywaną wielkością w układzie. Akumulacja opisuje zmianę ilości w czasie, dopływ i odpływ to strumienie przekraczające granicę układu, a generacja oraz zużycie pojawiają się głównie w bilansach składnikowych związanych z reakcją. Dla całkowitej masy w układzie zamkniętym nie tworzymy ani nie niszczymy masy.



Ogólna postać bilansu masy:

$$\text{Akumulacja} = \text{Dopływ} - \text{Odływ} + \text{Generacja} - \text{Zużycie}$$

03 Wskazówka



Najpierw ustal, czy liczysz bilans całkowity, czy składnikowy.

04 Typowy błąd



Mieszanie bilansu całkowitej masy z bilansem wybranego składnika.



W stanie ustalonym akumulacja = 0.

Pytanie 4

Strumień 500 kg/h mieszaniny zawiera 40% masowych NaCl i 60% wody. Wyznacz strumienie składników.

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI



Prawidłowa odpowiedź:
NaCl = 200 kg/h, H₂O = 300 kg/h

01

Omówienie

- 1 $u(\text{NaCl}) = 0,40$, więc $\dot{m}(\text{NaCl}) = 0,40 \cdot 500 = 200 \text{ kg/h}$
- 2 $u(\text{H}_2\text{O}) = 0,60$, więc $\dot{m}(\text{H}_2\text{O}) = 0,60 \cdot 500 = 300 \text{ kg/h}$
- 3 Suma strumieni składników = 500 kg/h

Mieszanina
500 kg/h
40% NaCl
60% H₂O



Wskazówka

Ułamki masowe powinny dawać łącznie 1,00 albo 100%.



Typowy błąd

Mylenie udziału masowego z udziałem objętościowym.



Zawsze sprawdź, czy suma składników zgadza się ze strumieniem całkowitym.

06

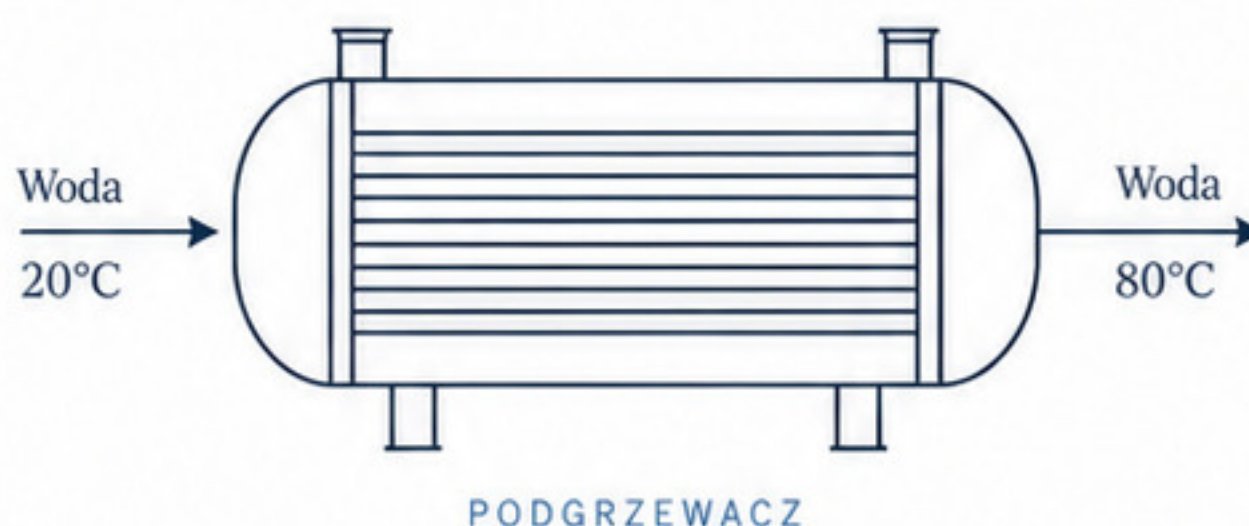
Pytanie 6

Podgrzewacz ogrzewa wodę z 20°C do 80°C.
Strumień masy wynosi 1000 kg/h,
a $c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.
Wyznacz wymaganą moc cieplną.

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Dane

- $\dot{m} = 1000 \text{ kg/h}$
- $T_1 = 20^\circ\text{C}$
- $T_2 = 80^\circ\text{C}$
- $c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$



Omówienie

- 1 Zamień strumień masy:
 $1000 \text{ kg/h} = 0,278 \text{ kg/s}$
- 2 Oblicz różnicę temperatur:
 $\Delta T = 60 \text{ K}$
- 3 Zastosuj wzór:
 $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$
- 4 $\dot{Q} = 0,278 \cdot 4,18 \cdot 60 \approx 69,7 \text{ kJ/s} = 69,7 \text{ kW}$



Wzór

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

- $\dot{Q}$ – moc cieplna [kW]
 $\dot{m}$ – strumień masy [kg/s]
 c_p – ciepło właściwe [kJ/(kg·K)]
 ΔT – różnica temperatur [K]



Prawidłowa odpowiedź:
około 69,7 kW



Wskazówka

Przy obliczaniu mocy zadbaj o spójność jednostek czasu.



Typowy błąd

Pozostawienie strumienia w kg/h i otrzymanie wyniku w kJ/h zamiast w kW.



Ważna informacja

$1 \text{ kJ/s} = 1 \text{ kW}$

05

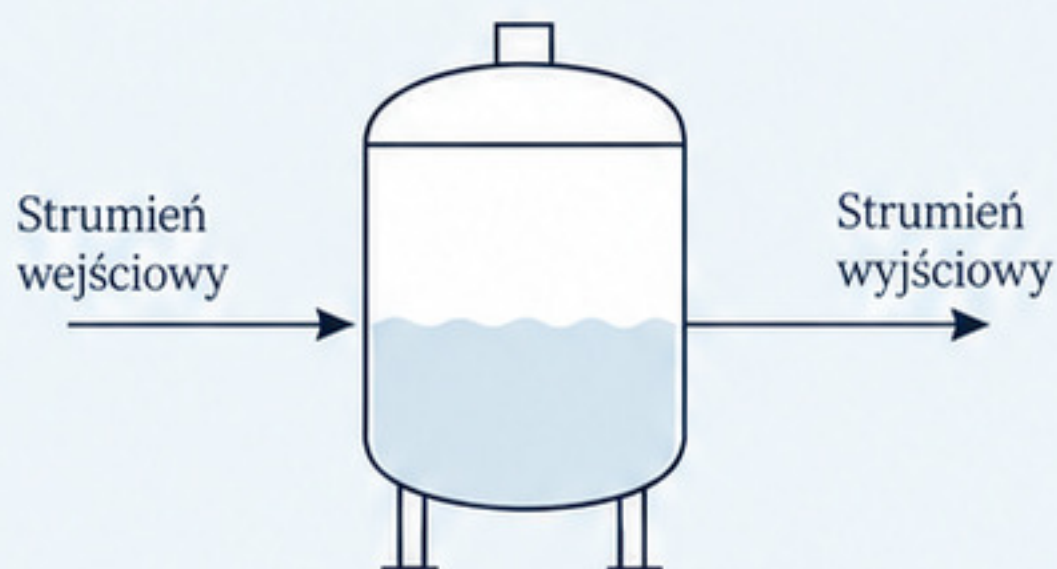
Pytanie 5

Wyjaśnij różnicę między stanem ustalonym a nieustalonym w bilansie procesu.

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Stan ustalony

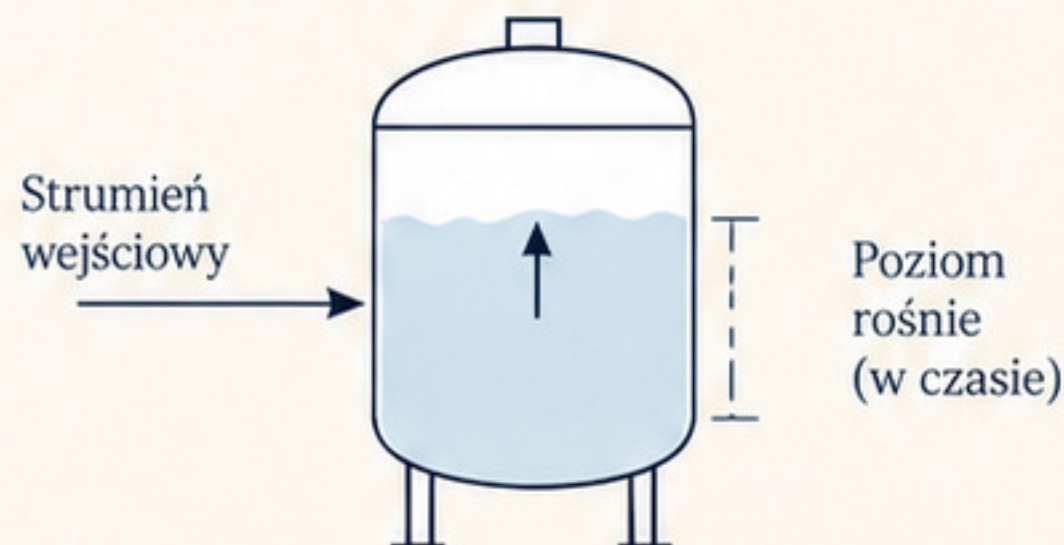
- Wielkości procesowe nie zmieniają się w czasie.
- Akumulacja w bilansie = 0.
- Typowy dla długotrwałej, stabilnej pracy procesu.



STAN USTALONY
poziom cieczy stały

Stan nieustalony

- Wielkości procesowe mogą się zmieniać w czasie.
- Akumulacja w bilansie $\neq 0$.
- Występuje np. podczas rozruchu, napełniania zbiornika lub zmian obciążenia procesu.



STAN NIEUSTALONY
napełnianie zbiornika



Omówienie

Przykładem stanu ustalonego może być aparat pracujący po osiągnięciu stabilnych warunków. Stan nieustalony występuje np. podczas rozruchu, napełniania zbiornika albo zmian obciążenia procesu.



Prawidłowa odpowiedź:

W stanie ustalonym wielkości procesowe nie zmieniają się w czasie, więc akumulacja = 0. W stanie nieustalonym wielkości mogą się zmieniać w czasie, więc akumulacja $\neq 0$.



Wskazówka

Jeśli w treści zadania pojawia się zmiana w czasie, sprawdź, czy układ nie jest nieustalony.



Typowy błąd

Automatyczne założenie, że każdy proces działa w stanie ustalonym.

08 Pytanie 8

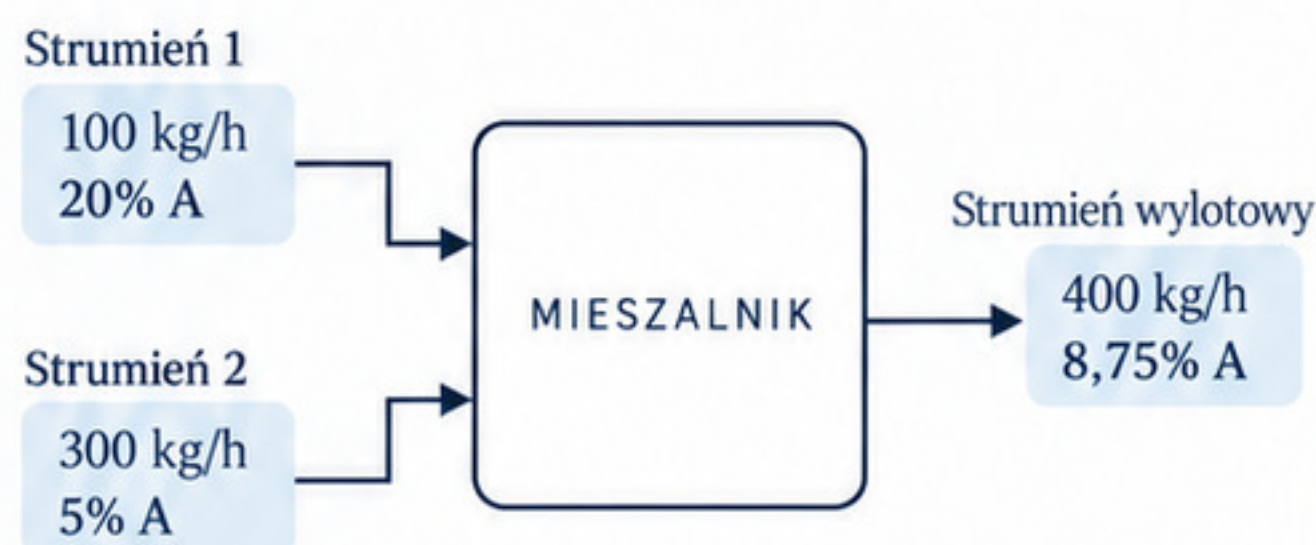
Mieszanie dwóch strumieni

PYTANIE 8 — Stężenie po zmieszaniu

● ● ○ Średnie

Do mieszalnika doprowadzane są dwa strumienie wodnego roztworu substancji A. Strumień 1: 100 kg/h, udział masowy A = 20%. Strumień 2: 300 kg/h, udział masowy A = 5%. Zakładając brak reakcji i strat, jaki będzie udział masowy substancji A w strumieniu opuszczającym mieszalnik?

- A. 7,5%
- B. 8,75%
- C. 12,5%
- D. 25%



Prawidłowa odpowiedź:
B. 8,75%



Omówienie

Tok rozumowania krok po kroku:

- 1 Dla strumienia 1:
 $\dot{m}_{A,1} = 100 \times 0,20 = 20 \text{ kg/h}$
- 2 Dla strumienia 2:
 $\dot{m}_{A,2} = 300 \times 0,05 = 15 \text{ kg/h}$
- 3 Łączny przepływ substancji A:
 $\dot{m}_A = 20 + 15 = 35 \text{ kg/h}$
- 4 Całkowity przepływ mieszaniny:
 $\dot{m} = 100 + 300 = 400 \text{ kg/h}$
- 5 Udział masowy A:
 $w_A = 35 / 400 = 0,0875 = 8,75\%$



Kontrola logiczna

Końcowe stężenie powinno znajdować się pomiędzy 5% i 20%, a ponieważ większy strumień ma niższe stężenie, wynik powinien być bliższy 5% niż 20%.



Typowy błąd

$(20\% + 5\%) / 2 = 12,5\%$ — to błędne, bo strumienie mają różne przepływy masowe.



Zapamiętaj

przy mieszaniu strumieni o różnej wielkości należy wykonać bilans składnika, a nie zwykłą średnią procentów.

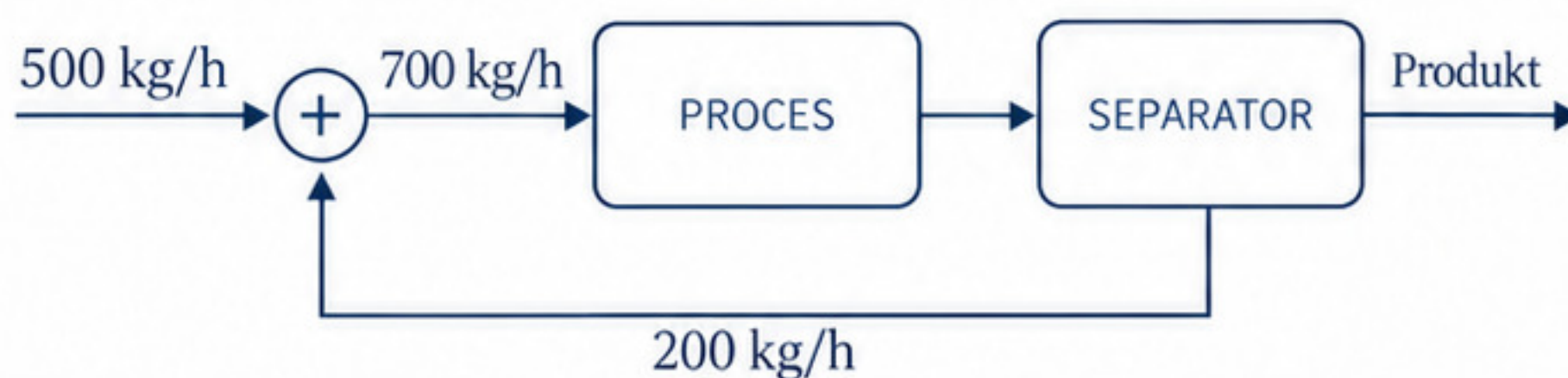
09 Pytanie 9

Recyrkulacja strumienia

PYTANIE 9 — Co wraca do procesu? ●●● Trudniejsze

W instalacji część strumienia opuszczającego separator jest zawracana do początku procesu. Świeży strumień zasilający wynosi 500 kg/h. Strumień recyrkulacyjny wynosi 200 kg/h. Jaki całkowity strumień wpływa do jednostki procesowej po połączeniu świeżego zasilania ze strumieniem recyrkulacyjnym?

- A. 300 kg/h
- B. 500 kg/h
- C. 700 kg/h
- D. 1000 kg/h



Prawidłowa odpowiedź:
C. 700 kg/h



Tok rozumowania

Strumień wpływający do jednostki procesowej jest sumą świeżego zasilania i strumienia zawracanego.

$$\dot{m}_{we} = \dot{m}_{\text{świeży}} + \dot{m}_{\text{recyrkulacja}} = 500 + 200 = 700 \text{ kg/h.}$$



Co oznacza recyrkulacja?

Recyrkulacja to zawracanie części strumienia procesowego do wcześniejszego punktu instalacji. Może być stosowana w celu zwiększenia stopnia konwersji, ponownego wykorzystania nieprzereagowanego substratu, stabilizacji warunków procesu oraz kontroli temperatury lub stężenia.



Ważna informacja

Strumień recyrkulacyjny nie jest nową ilością materiału wprowadzaną z zewnątrz do całej instalacji – jest to materiał już znajdujący się wewnątrz układu procesowego.



Typowy błąd

Dodawanie recyrkulacji do świeżego zasilania również wtedy, gdy wykonywany jest bilans całej instalacji. Dla całego procesu recyrkulacja jest strumieniem wewnętrznym.



Zapamiętaj

Bilans pojedynczego aparatu $\neq$ bilans całej instalacji. Dobór granicy bilansowej decyduje o tym, które strumienie uwzględniasz.

10 Pytanie 10

Łączymy bilans masy i energii

PYTANIE 10 — Zadanie integracyjne ●●● Trudniejsze

Do podgrzewacza dopływa 500 kg/h cieczy. Ciepło właściwe cieczy można przyjąć jako $c_p = 4,0 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Temperatura na wejściu wynosi 20°C , a temperatura na wyjściu 50°C . Zakładając brak strat ciepła i brak przemiany fazowej, jaka moc cieplna jest potrzebna?

- A. około 4,2 kW C. około 16,7 kW
B. około 8,3 kW D. około 60 kW

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Prawidłowa odpowiedź:
C. około 16,7 kW



Omówienie

- 1 $\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T$
- 2 $\Delta T = 50 - 20 = 30 \text{ K}$
- 3 $Q = 500 \times 4,0 \times 30 = 60\,000 \text{ kJ/h}$
- 4 $60\,000 \text{ kJ/h} \div 3600 \approx 16,7 \text{ kW}$



Typowe błędy

- 1 nieprzeliczenie godzin na sekundy.
- 2 dodawanie temperatur zamiast obliczenia $\Delta T = T_{wy} - T_{we}$.



Wskazówka

Zapamiętaj: przy ogrzewaniu bez przemiany fazowej $\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T$.

02

Szybka kontrola modułu 01

Zaznacz, co potrafisz już zrobić bez pomocy:

- | | |
|--|---|
| ☐ Rozpoznaję podstawowe jednostki SI. | ☐ Rozumiem pojęcie stanu ustalonego. |
| ☐ Potrafię wykonać bilans całkowity. | ☐ Potrafię analizować mieszanie strumieni. |
| ☐ Potrafię wykonać bilans składnika. | ☐ Rozumiem funkcję recyrkulacji. |
| ☐ Rozumiem znaczenie akumulacji. | ☐ Potrafię zastosować prosty bilans energii. |



Pole refleksji:

Najwięcej trudności sprawiło mi:

Temat, który chcę powtórzyć:



MASA

+



SKŁAD

+



ENERGIA



POPRAWNY BILANS PROCESU

MODUŁ 02

Termodynamika, właściwości płynów i przepływ

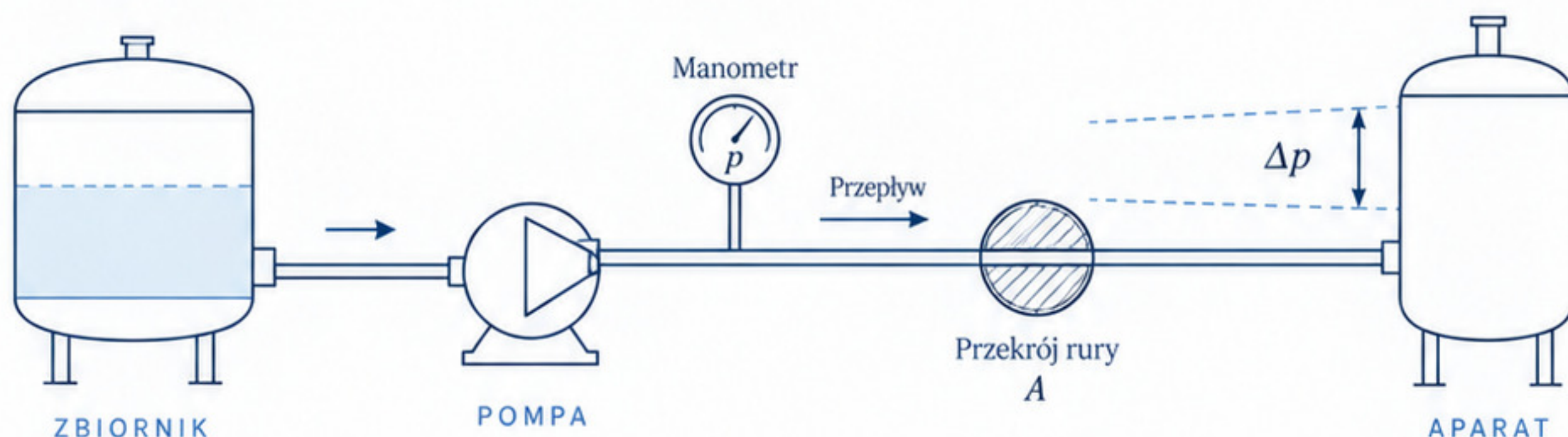
Zrozum, dlaczego płyn płynie, co wpływa na jego stan i jak przewidywać zachowanie układu.

Po ukończeniu tego modułu użytkownik powinien:

- rozumieć zależność pomiędzy ciśnieniem, temperaturą i objętością gazu
- rozróżniać ciśnienie absolutne i manometryczne
- rozumieć podstawowe własności płynów
- rozpoznawać znaczenie lepkości i gęstości
- interpretować liczbę Reynoldsa
- odróżniać przepływ laminarny od turbulentnego
- rozumieć straty ciśnienia w instalacji
- znać podstawową funkcję pompy
- interpretować równanie Bernoulliego w prostych układach

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Zakres pytań:
Pytania 11–20



11 Pytanie 11

Ciśnienie absolutne i manometryczne



PYTANIE 11 — Co pokazuje manometr?

● ● Średnie

Manometr na zbiorniku wskazuje 2,0 bar.
Ciśnienie atmosferyczne wynosi około 1,0 bar.
Jakie jest przybliżone ciśnienie absolutne w zbiorniku?

- A 1,0 bar(a)
- B 2,0 bar(a)
- C 3,0 bar(a)
- D 0 bar(a)



Prawidłowa odpowiedź:

C. 3,0 bar(a)



Tok rozumowania

Ciśnienie manometryczne opisuje różnicę pomiędzy ciśnieniem w układzie a ciśnieniem atmosferycznym.

Zależność: $p_{abs} = p_{man} + p_{atm}$.

Zatem: $p_{abs} = 2,0 + 1,0 = 3,0 \text{ bar(a)}$.



Co oznaczają oznaczenia?

bar(g) — ciśnienie manometryczne, względem atmosfery.

bar(a) — ciśnienie absolutne, względem próżni idealnej.



Przykład praktyczny

Jeżeli zwykły manometr pokazuje 0 bar(g), nie oznacza to próżni. Oznacza to, że ciśnienie w układzie jest równe ciśnieniu atmosferycznemu, więc $p_{abs} \approx 1 \text{ bar(a)}$.



Typowy błąd

Stosowanie ciśnienia manometrycznego bezpośrednio w równaniach gazowych wymagających ciśnienia absolutnego.



Zapamiętaj

W równaniach termodynamicznych bardzo często potrzebujesz ciśnienia absolutnego.

12 Pytanie 12

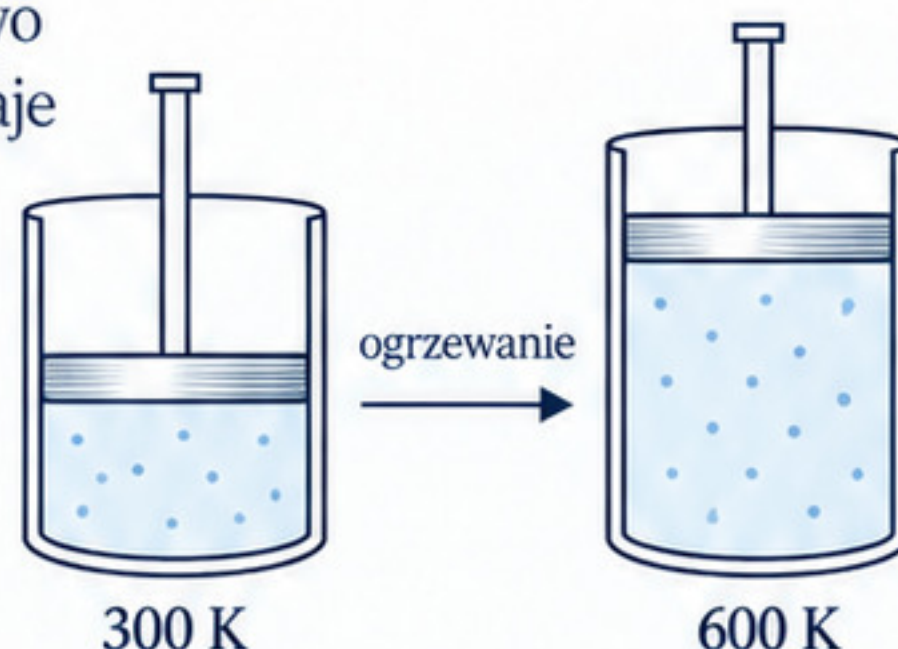
Równanie gazu doskonałego

PYTANIE 12 — Co stanie się z objętością gazu?

● ● ○ Średnie

Określona ilość gazu doskonałego znajduje się początkowo w temperaturze 300 K. Ciśnienie pozostaje stałe. Gaz zostaje ogrzany do 600 K. Jak zmieni się jego objętość?

- A zmniejszy się dwukrotnie
- B pozostanie bez zmian
- C wzrośnie około dwukrotnie
- D wzrośnie czterokrotnie



$$T \times 2 \rightarrow V \times 2$$

przy $p = \text{const.}$



Prawidłowa odpowiedź:
C. wzrośnie około dwukrotnie



Tok rozumowania

Dla gazu doskonałego obowiązuje równanie:

$$pV = nRT$$

Przy stałej liczbie moli i stałym ciśnieniu ($n = \text{const}$, $p = \text{const}$):

$$V \propto T$$

Zatem:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{600}{300} = 2$$

$$V_2 = 2V_1$$



Wskazówka

Temperaturę należy stosować w kelwinach. Nie można wykonać poprawnego porównania przy użyciu temperatury w °C.



Typowy błąd

Stosowanie skali Celsjusza w równaniu gazu doskonałego.



Zapamiętaj

Dla stałego p i n :

$$\frac{V}{T} = \text{const.}$$

13 Pytanie 13

Gęstość i przepływ objętościowy

PYTANIE 13 — Od objętości do masy

 Średnie

W rurociągu płynie ciecz o gęstości $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$.
Przepływ objętościowy wynosi $\dot{V} = 0,010 \text{ m}^3/\text{s}$.
Jaki jest przepływ masowy cieczy?

- A. $0,008 \text{ kg/s}$ C. 80 kg/s
B. 8 kg/s D. 800 kg/s



Prawidłowa odpowiedź:

B. 8 kg/s

$$\dot{V} = 0,010 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m} = 8 \text{ kg/s}$$

**Tok rozumowania**

Zależność pomiędzy przepływem masowym a objętościowym: $\dot{m} = \rho \dot{V}$.
Podstawiamy: $\dot{m} = 800 \times 0,010 = 8 \text{ kg/s}$.

**Interpretacja**

Każdy metr sześcienny tej cieczy ma masę 800 kg .
Jeżeli w ciągu jednej sekundy przepływa $0,010 \text{ m}^3$,
to odpowiada to 8 kg cieczy.

**Sprawdzenie jednostek**

$$\text{kg/m}^3 \times \text{m}^3/\text{s} \rightarrow \text{kg/s}$$

**Typowy błąd**

Dzielenie przepływu objętościowego przez gęstość zamiast mnożenia.

**Zapamiętaj**

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \text{ oraz odwrotnie: } \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

**Ważna informacja**

Sprawdź jednostki przed zaakceptowaniem wyniku.

14

Pytanie 14

Lepkość — opór płynu przed płynięciem

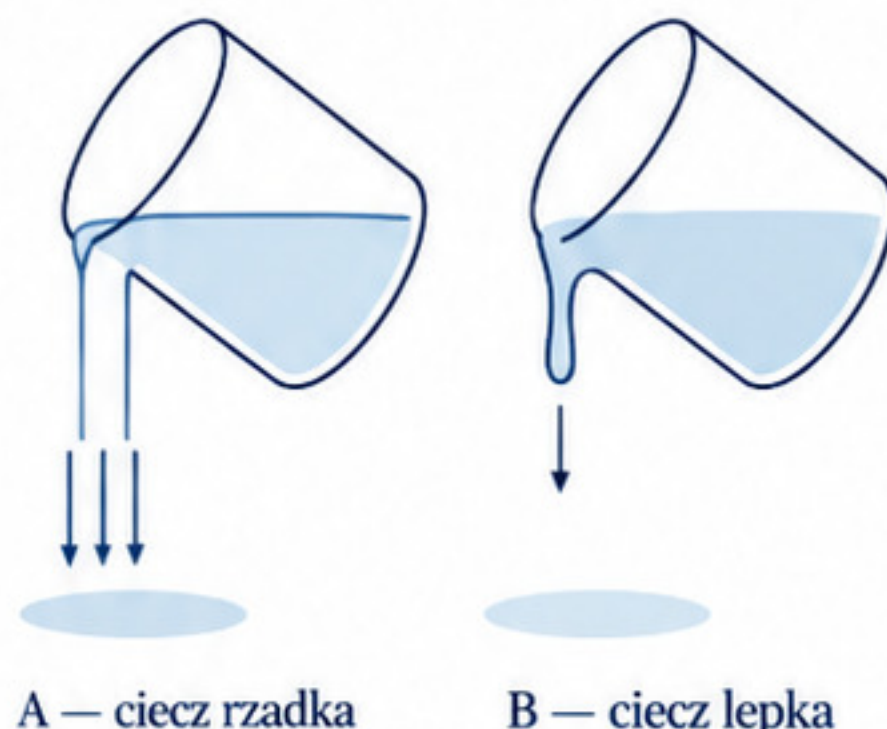
WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

PYTANIE 14 — Która ciecz jest bardziej lepka?

● Łatwe

Dwie cieczы płyną w takich samych warunkach. Ciecz A ma lepkość dynamiczną $\mu_A = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Ciecz B ma lepkość dynamiczną $\mu_B = 500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Które stwierdzenie jest poprawne?

- A Ciecz A jest znacznie bardziej lepka.
- B Ciecz B jest znacznie bardziej lepka.
- C Obie cieczы mają taką samą lepkość.
- D Na podstawie tych danych nie można porównać lepkości.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Ciecz B jest znacznie bardziej lepka.

Omówienie

Lepkość opisuje wewnętrzny opór płynu przeciwko odkształcaniu i przepływowi. Im większa lepkość dynamiczna μ , tym większy opór płynu przed płynięciem. W tym przykładzie $500 \text{ mPa}\cdot\text{s} \gg 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, dlatego ciecz B jest znacznie bardziej lepka.



Przykład intuicyjny

Woda ma stosunkowo małą lepkość. Gęsty syrop lub olej o dużej lepkości płynie znacznie wolniej w podobnych warunkach.



Dlaczego lepkość jest ważna w inżynierii chemicznej?

- spadek ciśnienia
- dobór pompy
- charakter przepływu
- mieszanie
- wymianę ciepła i masy



Typowy błąd

Mylenie lepkości z gęstością. Substancja może mieć dużą gęstość i małą lepkość albo odwrotnie.



Zapamiętaj

Gęstość mówi, ile masy znajduje się w jednostce objętości. Lepkość mówi, jak duży opór płyn stawia przepływowi.

15 Pytanie 15

Liczba Reynoldsa i charakter przepływu



PYTANIE 15 — Co opisuje liczba Reynoldsa?

● ● ● Średnie

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Które stwierdzenie najlepiej opisuje liczbę Reynoldsa?

- A. Określa wyłącznie temperaturę płynu.
- B. Pomaga ocenić charakter przepływu płynu.
- C. Określa jedynie gęstość płynu.
- D. Jest miarą ilości ciepła przekazywanego przez ścianę.



Prawidłowa odpowiedź:
B. Pomaga ocenić charakter przepływu płynu.



Omówienie

Liczba Reynoldsa porównuje znaczenie sił bezwładności i sił lepkości w przepływie.

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

ρ — gęstość płynu

v — średnia prędkość przepływu

D — charakterystyczny wymiar, np. średnica rury

μ — lepkość dynamiczna

16 Pytanie 16



PYTANIE 16 — Przepływ w rurze

● ● ● Średnie

W okrągłej rurze obliczono $Re = 800$. Jaki charakter przepływu jest najbardziej prawdopodobny?

- A. laminarny
- B. turbulentny
- C. przepływ naddźwiękowy
- D. nie można powiedzieć niczego



Prawidłowa odpowiedź:
A. laminarny



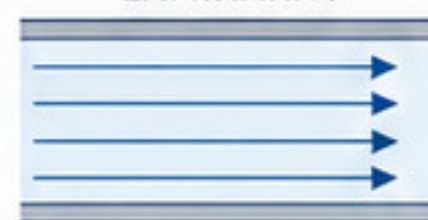
Omówienie

Dla przepływu w typowej okrągłej rurze orientacyjnie:

- $Re < \text{około } 2300 \rightarrow$ przepływ laminarny,
- $Re > \text{około } 4000 \rightarrow$ przepływ turbulentny,
- a pomiędzy tymi wartościami znajduje się obszar przejściowy.

Dla $Re = 800$ przepływ jest wyraźnie laminarny.

LAMINARNY



TURBULENTNY



Różnica

Przepływ laminarny: warstwy płynu przesuwają się uporządkowanie.
Przepływ turbulentny: pojawiają się intensywne fluktuacje i mieszanie poprzeczne.



Typowy błąd

traktowanie wartości granicznych jako absolutnych dla każdej geometrii i wszystkich warunków procesu.



Zapamiętaj

małe Re — dominują efekty lepkości.
Duże Re — rośnie znaczenie bezwładności i turbulencji.

17

Pytanie 17

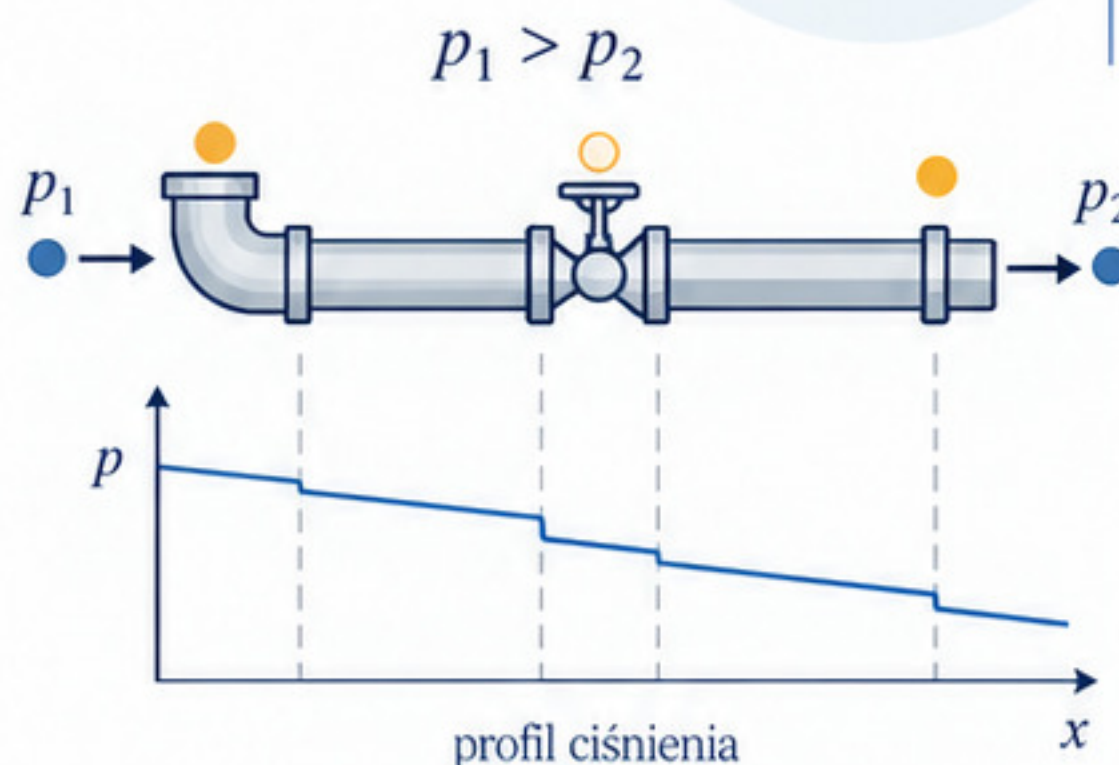
Dlaczego spada ciśnienie?

PYTANIE 17 — Straty ciśnienia w rurociągu

● ● ○ Średnie

Ciecz płynie przez długi poziomy rurociąg o stałej średnicy. Nie ma pompy pomiędzy punktem 1 i punktem 2. W rzeczywistym przepływie ciśnienie w punkcie 2 jest niższe niż w punkcie 1. Która przyczyna najlepiej wyjaśnia tę różnicę?

- A Tarcie płynu o ściany rurociągu i straty przepływu.
- B Masa płynu znika podczas przepływu.
- C Temperatura zawsze musi gwałtownie wzrastać.
- D Gęstość każdego płynu automatycznie spada do zera.



Prawidłowa odpowiedź:

A. Tarcie płynu o ściany rurociągu i straty przepływu.

Omówienie

W rzeczywistych instalacjach płyn traci część energii mechanicznej wskutek oporów przepływu. Źródła strat obejmują: tarcie na długości rury, kolana, zawory, zwężenia, rozszerzenia, filtry i inne elementy instalacji. Dlatego ciśnienie dostępne w kierunku przepływu może się zmniejszać.



Najważniejsza zasada

im większe opory hydrauliczne, tym większy wymagany spadek ciśnienia do utrzymania przepływu.



Co zwykle zwiększa straty ciśnienia?

- większa długość rurociągu
- większa prędkość przepływu
- mniejsza średnica rury
- większa chropowatość powierzchni
- obecność armatury i kształtek



Dla porównania

Krótką, szeroką, postą rurą → małe opory.
Długa, wąska rura z wieloma kolanami → większe opory.



Typowy błąd

zakładanie, że w poziomym rurociągu ciśnienie musi być wszędzie jednakowe. Poziome położenie eliminuje różnicę wysokości, ale nie eliminuje strat tarcia.



Zapamiętaj

rzeczywisty przepływ wymaga uwzględnienia strat energii.

18

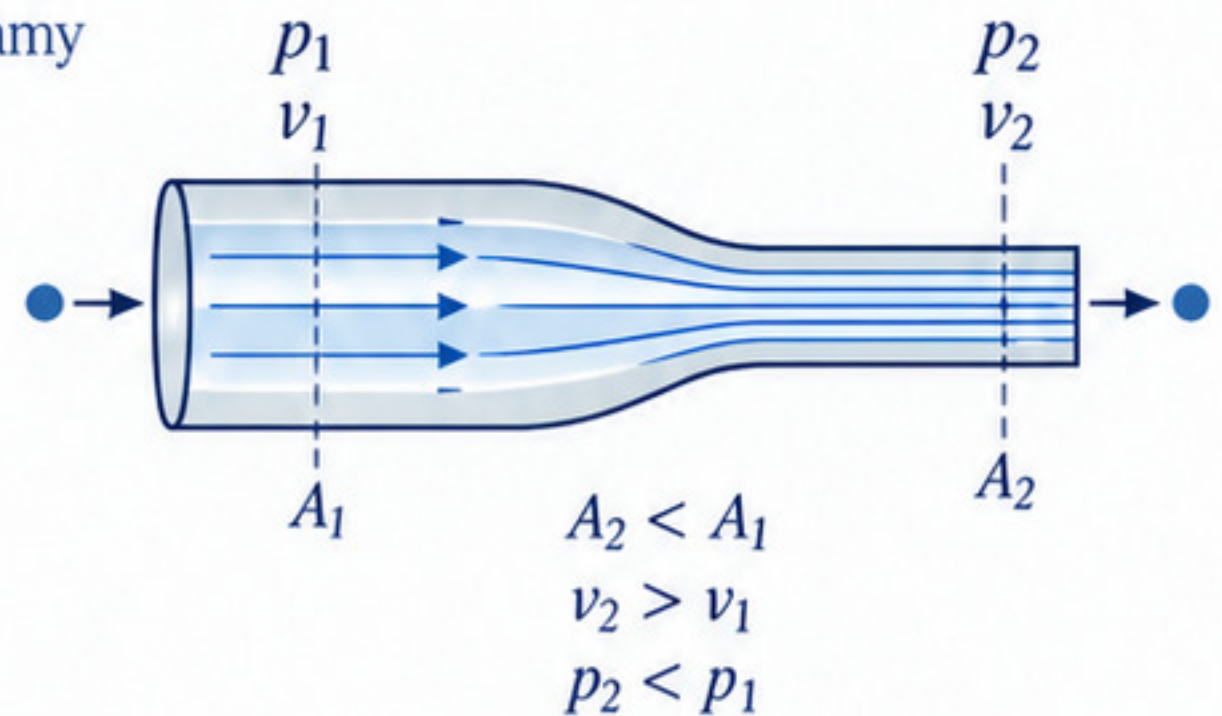
Pytanie 18

Równanie Bernoulliego —
energia płynącego płynuWIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

PYTANIE 18 — Co dzieje się w zwężeniu rury? ●●● Trudniejsze

Woda przepływa ustalonym strumieniem przez poziomą rurę, której średnica stopniowo się zmniejsza. Zakładamy przepływ nieściśliwy i pomijamy straty energii. Co stanie się z prędkością i ciśnieniem statycznym w węższym przekroju?

- A Prędkość maleje, a ciśnienie rośnie.
- B Prędkość rośnie, a ciśnienie statyczne maleje.
- C Prędkość i ciśnienie jednocześnie rosną.
- D Prędkość pozostaje bez zmian.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Prędkość rośnie, a ciśnienie statyczne maleje.

Krok 1 — równanie ciągłości

Dla cieczy nieściśliwej: $A_1 v_1 = A_2 v_2$.Jeżeli $A_2 < A_1$, to $v_2 > v_1$.

Mniejszy przekrój oznacza więc większą średnią prędkość przepływu.



Krok 2 — bilans energii

Dla idealnego przepływu w poziomej rurze:

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

Ponieważ wysokość się nie zmienia, wzrost składnika prędkościowego musi wiązać się ze spadkiem składnika ciśnieniowego.

Dlatego: $v_2 > v_1$ oraz $p_2 < p_1$.

Interpretacja fizyczna

Całkowita energia płynu może występować w postaci ciśnienia (energia ciśnieniowa), energii kinetycznej i energii potencjalnej. W zwężeniu rury część energii ciśnieniowej zamienia się w energię kinetyczną, co powoduje spadek ciśnienia statycznego.



Typowy błąd

Zakładanie, że mniejsza średnica rury zawsze oznacza większe ciśnienie. W idealnym poziomym zwężeniu jest odwrotnie: wzrost prędkości wiąże się ze spadkiem ciśnienia statycznego.



Zapamiętaj

Mniejszy przekrój → większa prędkość → niższe ciśnienie statyczne przy założeniach równania Bernoulliego.

Pompa, wysokość i energia przepływu

19 Pytanie 19



PYTANIE 19 — Po co stosuje się pompę?

● ● ● Średnie

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Które stwierdzenie najlepiej opisuje podstawową rolę pompy w instalacji cieczowej?

- A. Pompa zawsze obniża ciśnienie cieczy.
- B. Pompa dostarcza energię mechaniczną potrzebną do przepływu cieczy.
- C. Pompa zamienia każdą ciecz w gaz.
- D. Pompa usuwa masę z układu.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Pompa dostarcza energię mechaniczną potrzebną do przepływu cieczy.



Omówienie

Pompa może zwiększać energię mechaniczną cieczy i dzięki temu umożliwia: pokonanie różnicy wysokości, pokonanie strat ciśnienia, transport cieczy przez długi rurociąg, uzyskanie wymaganego ciśnienia w aparacie. W rozszerzonym równaniu energii wkład pompy pojawia się jako energia dodana do płynu.



Zapamiętaj

Pompa nie "tworzy przepływu z niczego". Dostarcza energię potrzebną do pokonania oporów i wymagań instalacji.

20 Pytanie 20

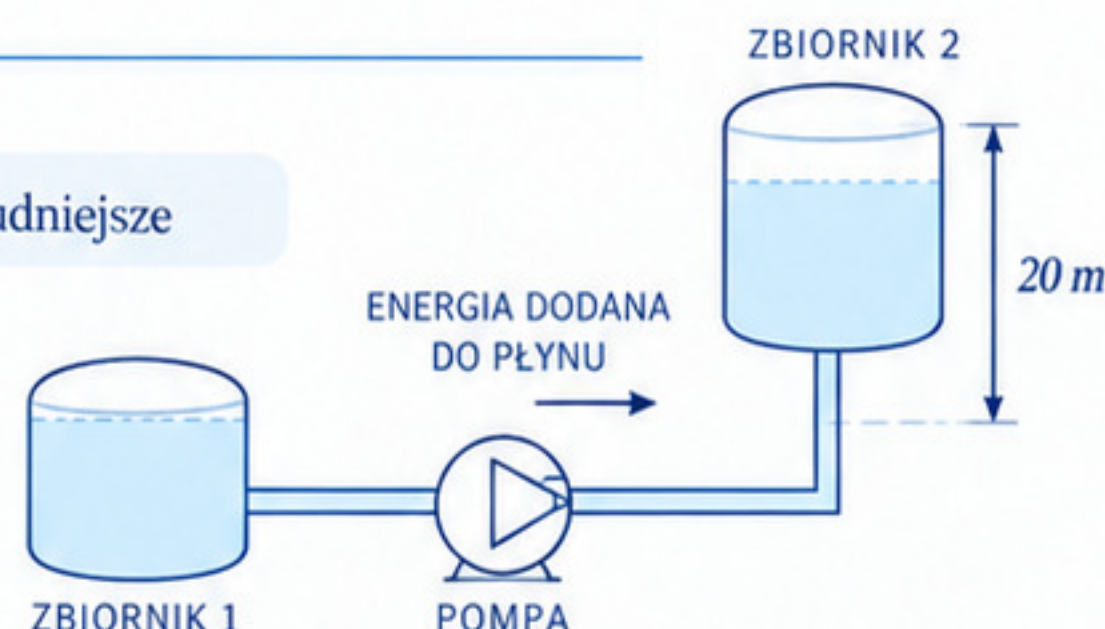


PYTANIE 20 — Podnoszenie cieczy

● ● ● Trudniejsze

Woda ma zostać przetransportowana ze zbiornika położonego niżej do zbiornika znajdującego się 20 m wyżej. Pomijając straty tarcia i zakładając podobne ciśnienia nad powierzchniami obu zbiorników, jaka minimalna wysokość podnoszenia pompy jest wymagana?

- A. 5 m
- B. 10 m
- C. 20 m
- D. 40 m



Prawidłowa odpowiedź:

C. 20 m



Tok rozumowania

Jeżeli pomijamy straty, pompa musi co najmniej pokryć różnicę wysokości: $H_p \approx z_2 - z_1$.

$$H_p = 20 \text{ m.}$$

W rzeczywistej instalacji wymagana wysokość podnoszenia byłaby większa, ponieważ należałoby dodatkowo uwzględnić straty ciśnienia w rurach, zaworach i innych elementach.



Ważne rozróżnienie

Wysokość podnoszenia H nie jest fizyczną wysokością samej pompy. Opisuje ilość energii przekazywanej jednostce ciężaru cieczy i jest wyrażana w metrach słupa płynu.



Typowy błąd

Uwzględnianie wyłącznie różnicy ciśnień i pomijanie różnicy poziomów.



Zapamiętaj

Rzeczywista pompa musi pokryć: różnicę ciśnień, różnicę wysokości, straty przepływu i ewentualną różnicę energii kinetycznej.

02 Szybka kontrola modułu 02

Zaznacz, co potrafisz już wyjaśnić:

- ☐ Różnicę między ciśnieniem absolutnym i manometrycznym.
- ☐ Zależność p – V – T dla gazu doskonałego.
- ☐ Związek pomiędzy przepływem masowym i objętościowym.
- ☐ Fizyczne znaczenie lepkości.
- ☐ Znaczenie liczby Reynoldsa.

- ☐ Różnicę między przepływem laminarnym i turbulentnym.
- ☐ Przyczyny spadku ciśnienia.
- ☐ Zależność pomiędzy przekrojem i prędkością.
- ☐ Podstawową interpretację równania Bernoulliego.
- ☐ Rolę pompy w instalacji.



Pole samooceny:

Najlepiej rozumiem: _____

Muszę powtórzyć: _____

M O D U Ł

03

Wymiana ciepła
i operacje cieplne

Śledź kierunek przepływu energii i naucz się rozpoznawać mechanizmy odpowiedzialne za ogrzewanie, chłodzenie i zmianę fazy.

Po ukończeniu tego modułu użytkownik powinien:

- rozróżniać przewodzenie, konwekcję i promieniowanie,
- rozumieć rolę różnicy temperatur jako siły napędowej wymiany ciepła,
- stosować podstawową zależność $\dot{Q} = UA\Delta T$,
- interpretować funkcję wymiennika ciepła,
- rozumieć różnicę między przepływem współprądowym i przeciwprądowym,
- odróżniać ciepło jawne od utajonego,
- analizować ogrzewanie, chłodzenie i przemiany fazowe,
- rozumieć znaczenie współczynnika przenikania ciepła,
- rozpoznawać wpływ osadów na działanie wymiennika.

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Zakres pytań:

Pytania 21–30

Ciepło przepływa samorzutnie:
**od wyższej temperatury →
do niższej temperatury,**
dopóki istnieje różnica temperatur.



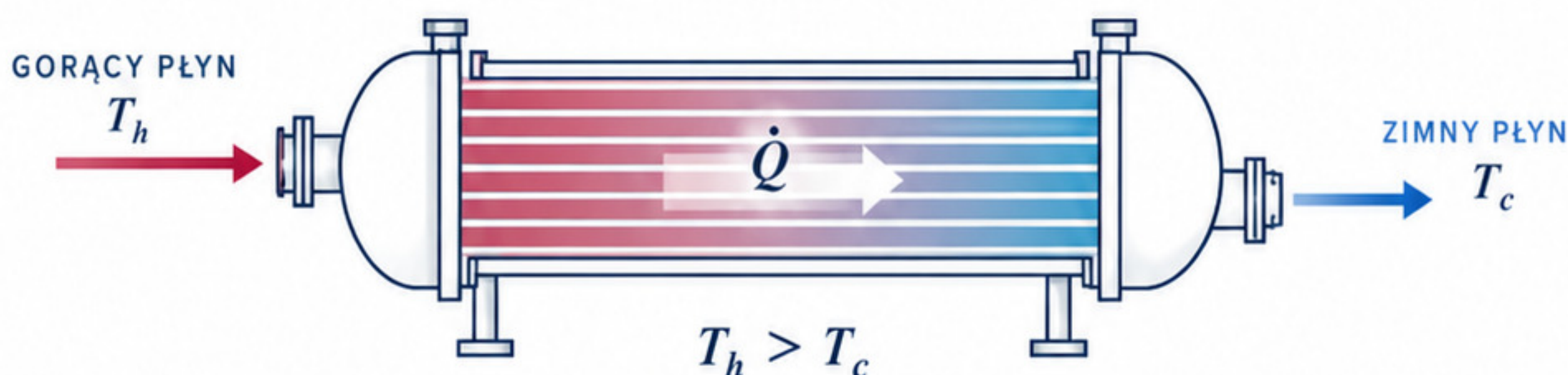
PRZEWODZENIE

transport energii
wewnątrz materiału

KONWEKCJA

wymiana energii
między powierzchnią
a płynem

PROMIENIOWANIE

transport energii
za pomocą fal
elektromagnetycznych

21

Pytanie 21

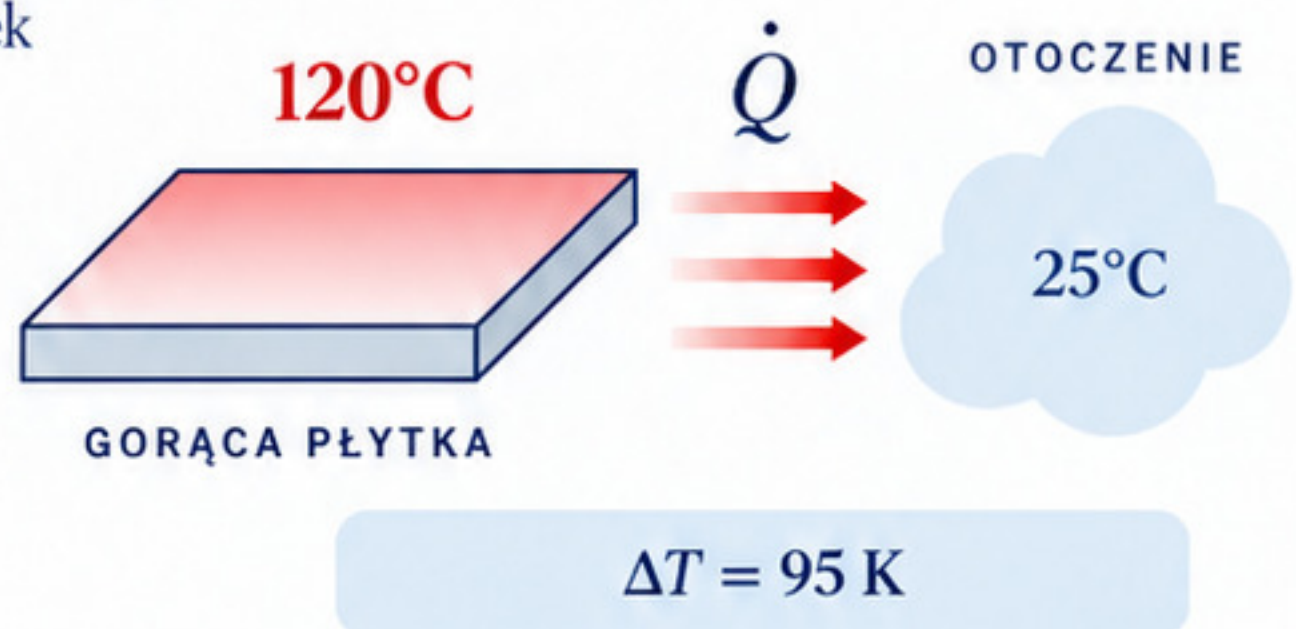
W którą stronę płynie ciepło?

PYTANIE 21 — Kierunek wymiany ciepła

● ○ ○ Łatwe

Metalową płytkę o temperaturze 120°C umieszczono w otoczeniu o temperaturze 25°C . Jeżeli nie dostarczamy dodatkowej energii, jaki będzie naturalny kierunek przepływu ciepła?

- A Od otoczenia do płytki.
- B Od płytki do otoczenia.
- C Ciepło nie będzie przepływać.
- D Kierunek zmienia się losowo.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Od płytki do otoczenia.

Omówienie

Ciepło jest energią przekazywaną w wyniku różnicy temperatur. Samorzutnie przepływa od obszaru o temperaturze wyższej do obszaru o temperaturze niższej.

Tutaj: $T_{\text{płytki}} = 120^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{otoczenia}} = 25^{\circ}\text{C}$.
Zatem: $120^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C}$.



Co będzie działo się dalej?

Płytkę będzie tracić energię (jej temperatura będzie spadać), a otoczenie będzie ją zyskiwać (jego temperatura będzie rosnąć). Proces będzie zachodził aż do osiągnięcia równowagi termicznej, gdy temperatury się wyrównają.



Różnica temperatur

$$\Delta T = 120 - 25 = 95 \text{ K}$$

Różnica temperatur jest siłą napędową przepływu ciepła.



Typowy błąd

Myślenie o „zimnie” jako o energii przepływającej z zimnego ciała do gorącego. W analizie termicznej śledzimy przepływ ciepła, nie „przepływ zimna”.



Zapamiętaj

Bez urządzenia wykonującego pracę: ciepło samorzutnie płynie **GORĄCE** → **ZIMNE**.

22

Pytanie 22

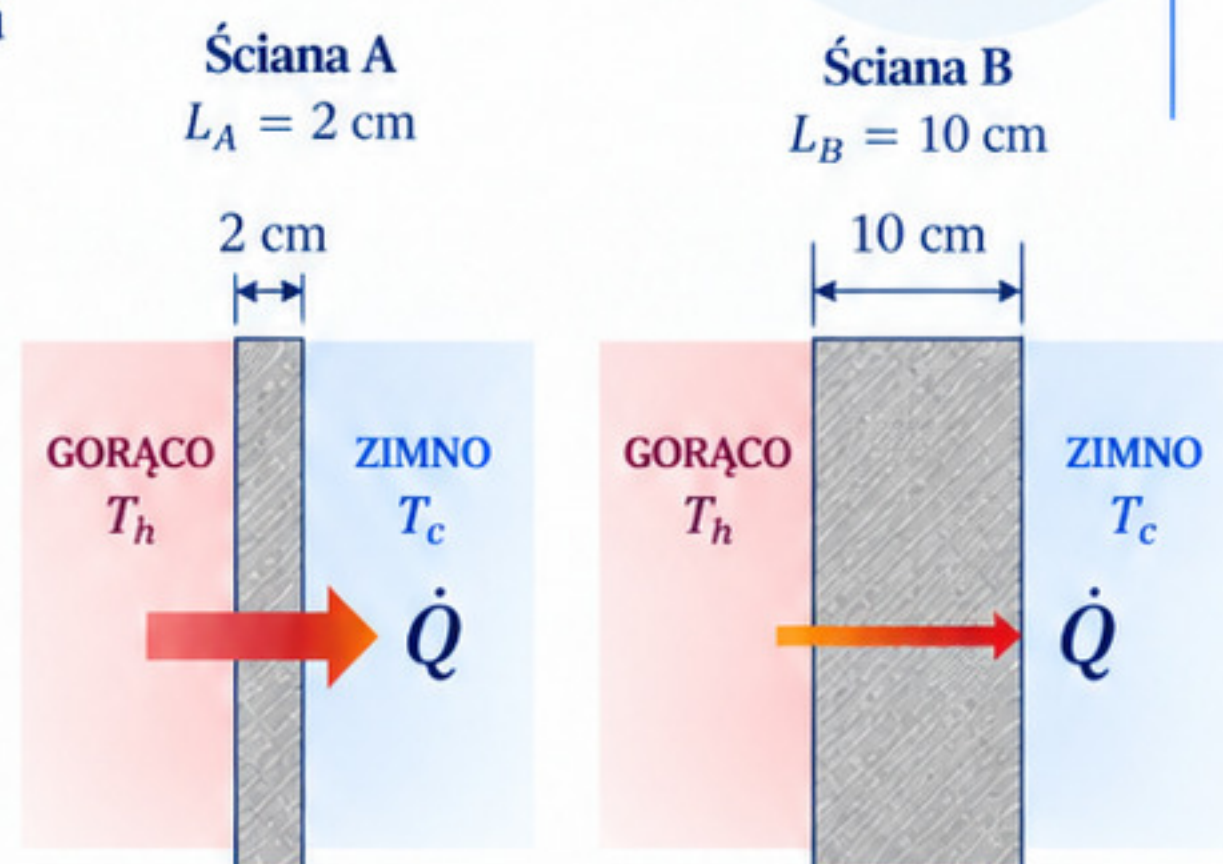
Przewodzenie ciepła przez ścianę

PYTANIE 22 — Która ściana lepiej izoluje?

● ● ○ Średnie

Dwie płaskie ściany wykonano z tego samego materiału i mają taką samą powierzchnię. Ściana A ma grubość: $L_A = 2 \text{ cm}$. Ściana B ma grubość: $L_B = 10 \text{ cm}$. Po obu stronach ścian utrzymywana jest taka sama różnica temperatur. Która ściana będzie przewodziła mniej ciepła?

- A Ściana A
- B Ściana B
- C Obie zawsze przewodzą dokładnie tyle samo
- D Nie istnieje zależność między grubością a przewodzeniem

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Prawidłowa odpowiedź:

B. Ściana B

Podstawowa zależność dla przewodzenia przez płaską ścianę

$$\dot{Q} = \frac{kA\Delta T}{L}$$

k — współczynnik przewodzenia ciepła
 A — powierzchnia
 ΔT — różnica temperatur
 L — grubość ściany

Jeżeli pozostałe wielkości są stałe: $\dot{Q} \propto \frac{1}{L}$.



Opór cieplny przewodzenia

$$R = \frac{L}{kA}$$

Wzrost $L \rightarrow$ wzrost $R \rightarrow$ spadek $\dot{Q}$.

Intuicyjna interpretacja

Im grubsza ściana, tym dłuższa droga, którą musi pokonać ciepło, dlatego przepływ ciepła jest mniejszy.



Typowy błąd

Założenie, że większa ilość materiału zawsze przewodzi więcej ciepła. W izolacji większa grubość oznacza dłuższą drogę przewodzenia i większy opór cieplny, a więc mniejszy przepływ ciepła.



Zapamiętaj

Dla tego samego materiału:
 większe $L \rightarrow$ większy opór cieplny $\rightarrow$ mniejszy przepływ ciepła.

Konwekcja i promieniowanie

23 Pytanie 23



PYTANIE 23 — Ciepło między ścianą a płynem

● ● ● Średnie

WIEDZA
OB LICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Gorąca powierzchnia rury przekazuje energię przepływającemu obok powietrzu. Który mechanizm wymiany ciepła opisuje przede wszystkim transport energii między powierzchnią rury a poruszającym się powietrzem?

- A. Konwekcja
- B. Dyfuzja masy
- C. Wyłącznie przewodzenie przez ciało stałe
- D. Reakcja chemiczna



Prawidłowa odpowiedź:

A. Konwekcja

Omówienie

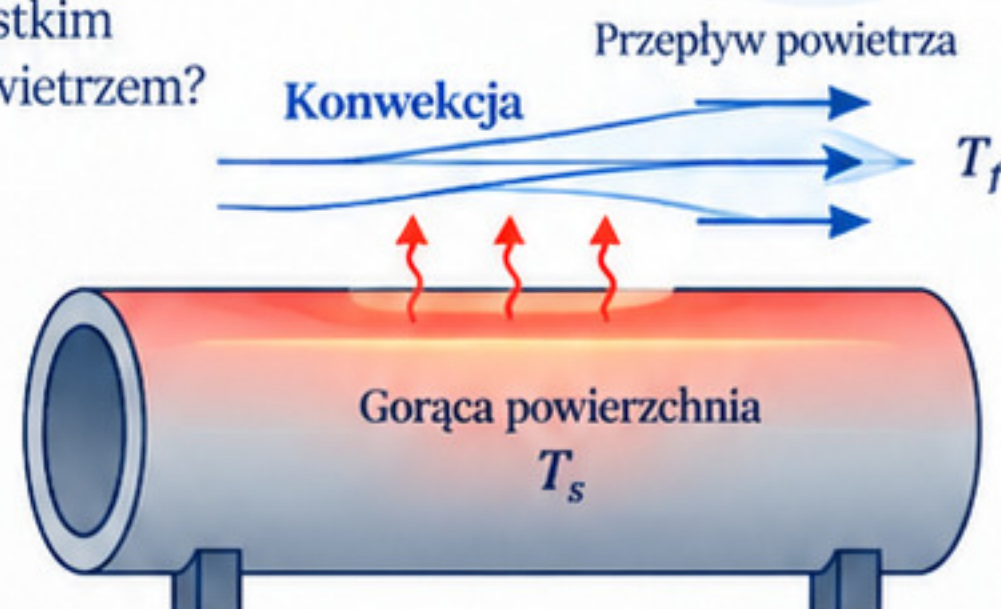
Podstawowy zapis: $\dot{Q} = hA(T_s - T_f)$, gdzie:

h — współczynnik przejmowania ciepła

T_s — temperatura powierzchni

T_f — temperatura płynu

Konwekcja dotyczy wymiany energii pomiędzy powierzchnią a płynem. Na jej intensywność wpływają między innymi: prędkość przepływu, właściwości płynu, geometria powierzchni, charakter przepływu.



24 Pytanie 24



PYTANIE 24 — Czy promieniowanie wymaga płynu?

● ● ● Średnie

Które stwierdzenie dotyczące promieniowania ciepłego jest prawidłowe?

- A. Promieniowanie wymaga zawsze przepływającej cieczy.
- B. Promieniowanie może przenosić energię również przez próżnię.
- C. Promieniowanie zachodzi wyłącznie w temperaturze 0 K.
- D. Promieniowanie jest rodzajem przepływu masowego.

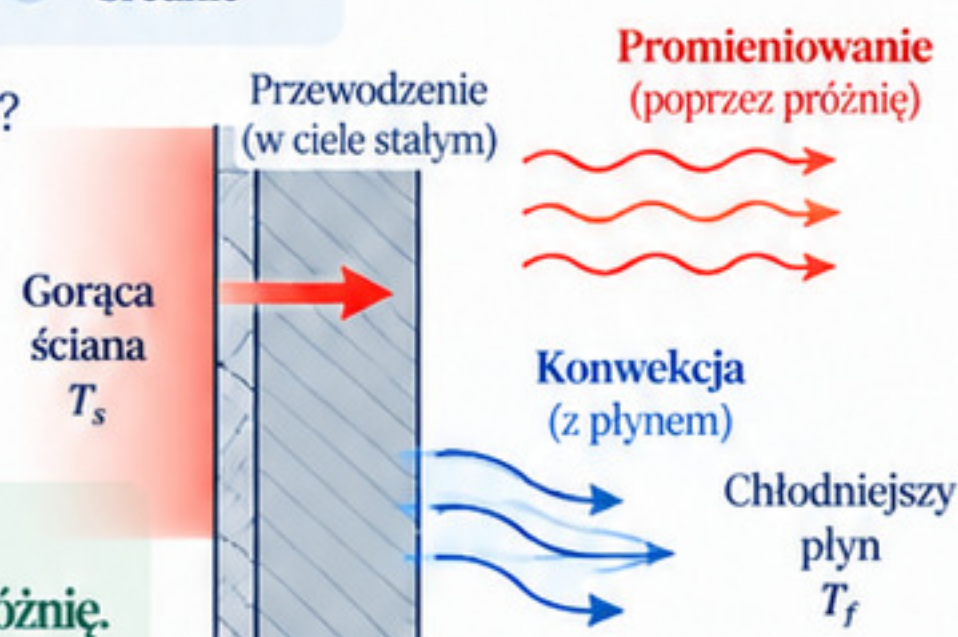


Prawidłowa odpowiedź:

B. Promieniowanie może przenosić energię również przez próżnię.

Omówienie

Promieniowanie ciepłe jest transportem energii poprzez fale elektromagnetyczne. Nie wymaga materialnego ośrodka. Dlatego energia słoneczna może docierać do Ziemi przez przestrzeń kosmiczną.



Trzy mechanizmy — szybkie porównanie

PRZEWODZENIE

głównie wewnątrz materiału
lub pomiędzy stykającymi się ciałami

KONWEKCJA

pomiędzy powierzchnią a płynem

PROMIENIOWANIE

poprzez fale elektromagnetyczne



Typowy błąd

Założenie, że w rzeczywistym urządzeniu występuje zawsze tylko jeden mechanizm. W praktyce kilka mechanizmów może zachodzić jednocześnie.



Zapamiętaj

Przewodzenie + konwekcja + promieniowanie mogą współistnieć w jednym procesie cieplnym.

25

Pytanie 25

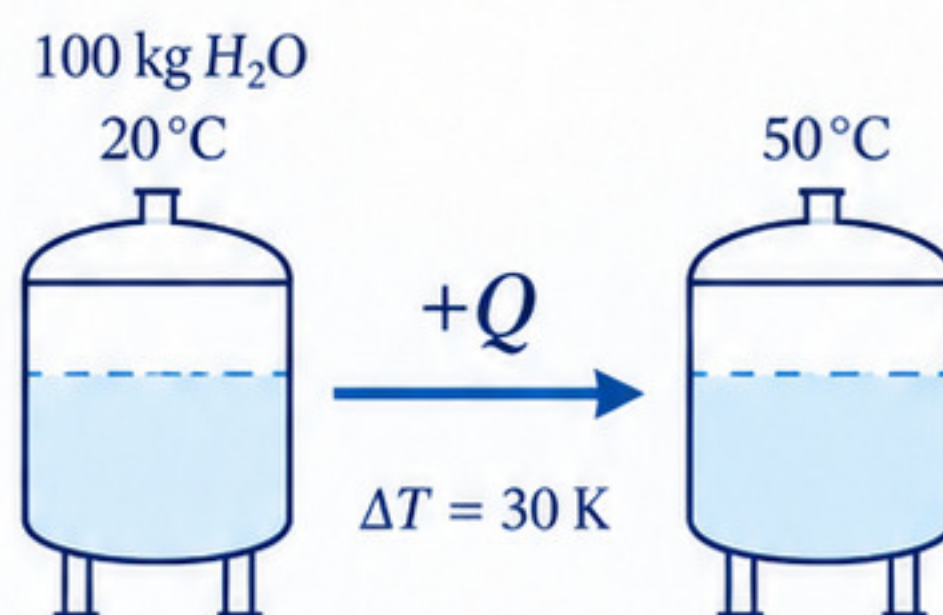
Ciepło jawne — zmiana temperatury bez zmiany fazy

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

PYTANIE 25 — Ogrzewanie wody ●●○ Średnie

100 kg wody ogrzewamy od 20°C do 50°C. Przyjmij:
 $c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Zakładając brak zmiany fazy i strat ciepła, ile energii należy dostarczyć?

- A. około 125 kJ
- B. około 1 254 kJ
- C. około 12 540 kJ
- D. około 41 800 kJ



FAZA: ciecz → ciecz



Prawidłowa odpowiedź:

C. około 12 540 kJ

Tok rozumowania

- 1 Przy ogrzewaniu bez zmiany fazy:
 $Q = m c_p \Delta T$.
- 2 Różnica temperatur: $\Delta T = 50 - 20 = 30 \text{ K}$.
- 3 Podstawiamy:
 $Q = 100 \times 4,18 \times 30 = 12\,540 \text{ kJ}$.



Co oznacza ciepło jawne?

Ciepło jawne prowadzi do zmiany temperatury substancji bez zmiany jej fazy. W tym przykładzie: woda ciekła → woda ciekła. Zmienia się temperatura, ale nie stan skupienia.



Kontrola jednostek

$$\text{kg} \times \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K}) \times \text{K} \rightarrow \text{kJ}$$



Typowy błąd

Stosowanie temperatury końcowej 50°C zamiast różnicy temperatur 30 K.



Zapamiętaj

Bez zmiany fazy:
 $Q = m c_p \Delta T$.

Nie używaj samej temperatury końcowej — użyj ΔT .

26

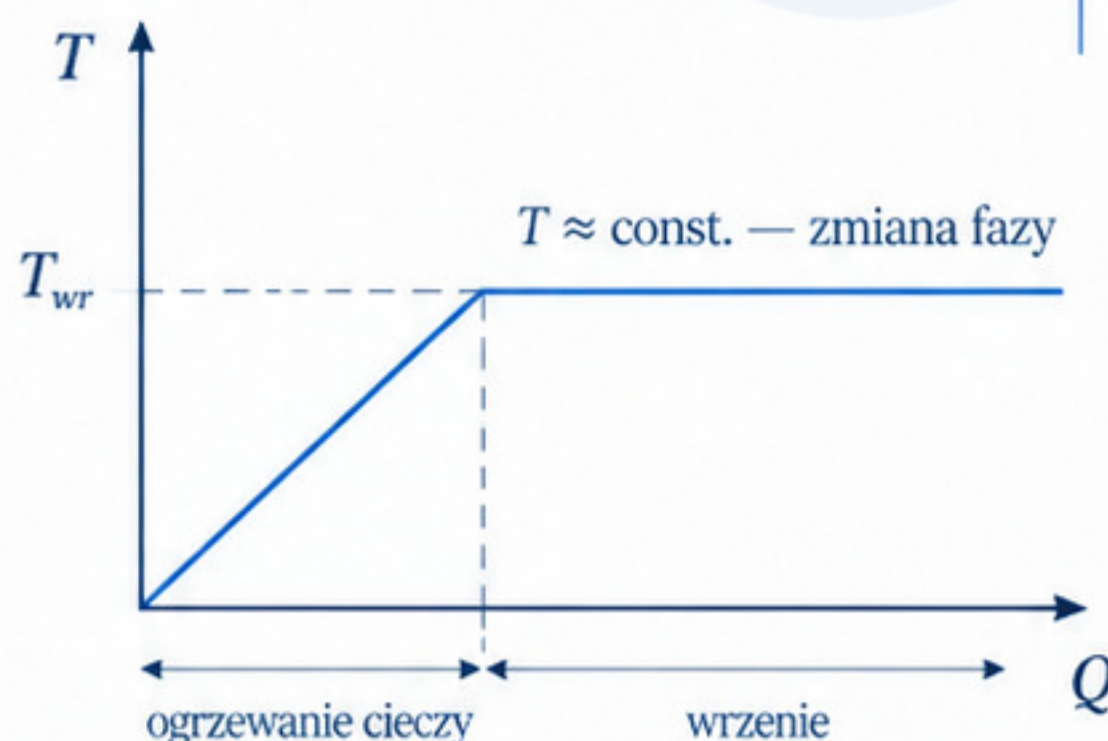
Pytanie 26

Ciepło utajone i przemiana fazowa

PYTANIE 26 — Co dzieje się podczas wrzenia? ● ● ● Średnie

Woda wrze pod stałym ciśnieniem. Podczas dalszego dostarczania ciepła trwa przemiana cieczy w parę. Które stwierdzenie najlepiej opisuje ten etap?

- A. Cała energia powoduje wyłącznie wzrost temperatury cieczy.
- B. Energia jest wykorzystywana przede wszystkim do przemiany fazowej.
- C. Ciepło przestaje być przekazywane.
- D. Masa wody automatycznie wzrasta.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Energia jest wykorzystywana przede wszystkim do przemiany fazowej.

Omówienie

Podczas przemiany fazowej przy stałym ciśnieniu temperatura czystej substancji może pozostać praktycznie stała, mimo że dostarczamy energię. Energia jest wtedy potrzebna do zmiany struktury i oddziaływań pomiędzy cząsteczkami. Dla parowania:

$$Q = m\Delta h_{\text{vap}},$$

gdzie Δh_{vap} — entalpia parowania na jednostkę masy.



Różnica

Ciepło jawne: zmienia temperaturę,

$$Q = m c_p \Delta T$$

Ciepło utajone: zmienia fazę,

$$Q = m\Delta h$$



Przykład

ciecz przy temperaturze wrzenia
+ energia → para przy temperaturze wrzenia.

Temperatura nie musi wzrosnąć,
mimo że układ otrzymał dużą ilość energii.



Typowy błąd

Zakładanie, że każda dostarczona ilość ciepła musi powodować wzrost temperatury.



Zapamiętaj

Energia może zmieniać temperaturę
lub fazę substancji — to nie jest to samo.

27

Pytanie 27

Wymiennik ciepła i kierunek przepływu

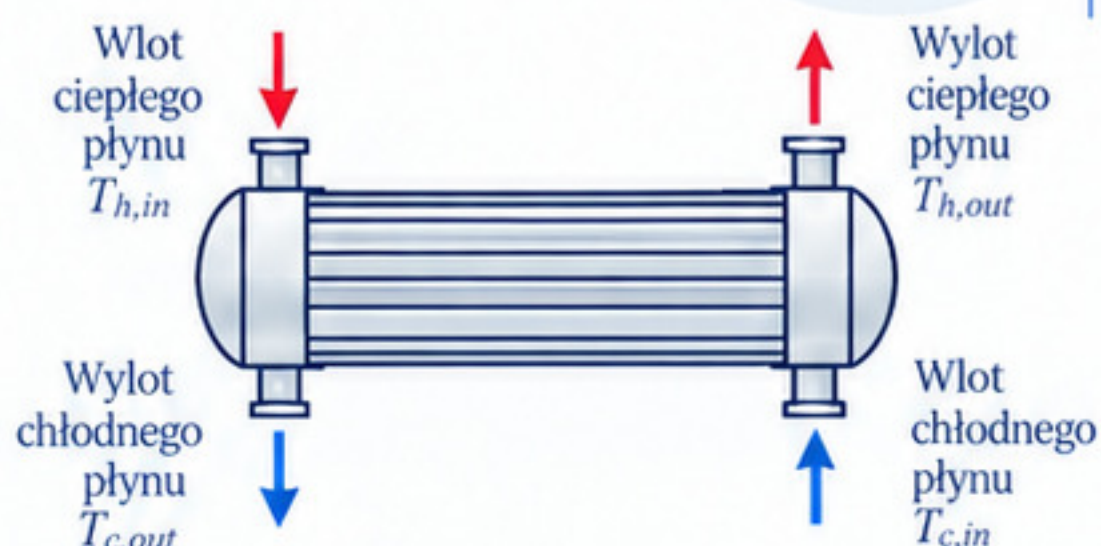


PYTANIE 27 — Jaką funkcję pełni wymiennik?

● ○ ○ Łatwe

Które stwierdzenie najlepiej opisuje wymiennik ciepła?

- A. Umożliwia przekazywanie ciepła pomiędzy strumieniami o różnych temperaturach.
- B. Zawsze miesza ze sobą oba płyny.
- C. Służy wyłącznie do zwiększania ciśnienia.
- D. Powoduje reakcję chemiczną w każdych warunkach.



Prawidłowa odpowiedź:

A. Umożliwia przekazywanie ciepła pomiędzy strumieniami o różnych temperaturach.

Omówienie

W wielu wymiennikach dwa płyny są oddzielone ścianą. Ciepło przepływa: gorący płyn → ściana → zimny płyn, bez konieczności bezpośredniego mieszania strumieni.

28

Pytanie 28



PYTANIE 28 — Przepływ przeciwny czy współprąd?

● ● ● Trudniejsze

W dwóch wymiennikach ciepła pracują te same płyny przy podobnych warunkach. W wymienniku A oba płyny poruszają się w tym samym kierunku. W wymienniku B płyny poruszają się w przeciwnych kierunkach. Który układ często pozwala efektywniej wykorzystać różnicę temperatur na długości aparatu?

- A. Współprąd
- B. Przepływ przeciwny
- C. Kierunek nigdy nie ma znaczenia
- D. Wyłącznie przepływ pionowy



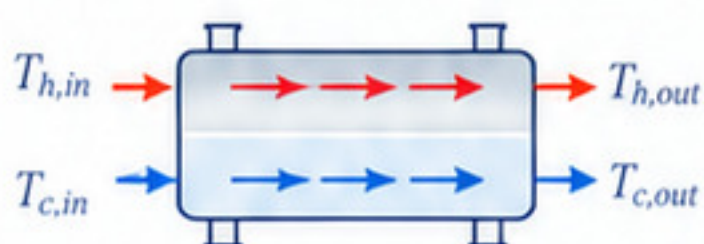
Prawidłowa odpowiedź:

B. Przepływ przeciwny

Omówienie

W przepływie przeciwnym gorący i zimny strumień poruszają się w przeciwnych kierunkach, co często pozwala utrzymać bardziej korzystną różnicę temperatur na większej części długości wymiennika.

Współprąd (oba w tym samym kierunku)

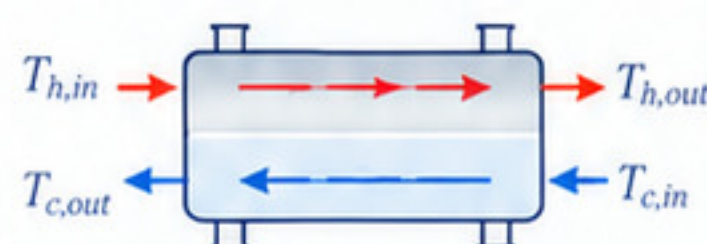


Profil temperatury (współprąd)

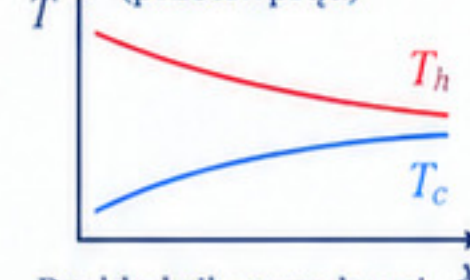


Największa różnica temperatur zwykle na wejściu, potem szybko maleje.

Przepływ przeciwny (przeciwny kierunki)



Profil temperatury (przepływ przeciwny)



Rozkład siły napędowej bywa korzystniejszy.



Typowy błąd

Mylenie przepływu przeciwnego z mieszaniem obu strumieni. Kierunki przepływu mogą być przeciwne, mimo że płyny pozostają całkowicie oddzielone.



Ważne

Nie zawsze jest to rozwiązanie absolutnie najlepsze. Zależy to także od wymaganych temperatur wylotowych, konstrukcji, bezpieczeństwa, właściwości płynów, kosztów i sterowania procesem.



Zapamiętaj

Przepływ przeciwny często zapewnia bardziej korzystną siłę napędową wymiany ciepła.

29

Pytanie 29

Współczynnik przenikania ciepła

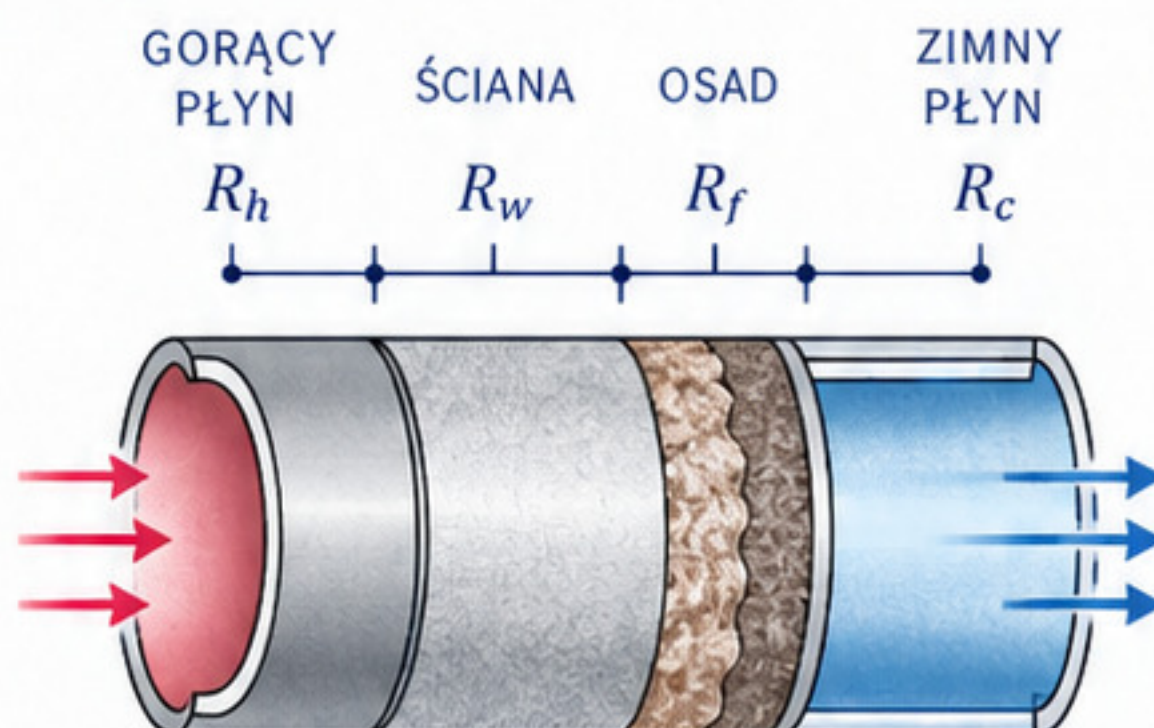
PYTANIE 29 — Co oznacza większe U ? ●●● TrudniejszeWIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Dla wymiennika ciepła można zapisać uproszczoną zależność:

 $\dot{Q} = UA\Delta T_m$. Dwa wymienniki mają taką samą powierzchnię A i pracują przy tej samej średniej sile napędowej ΔT_m .Wymiennik 1: $U_1 = 200 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.Wymiennik 2: $U_2 = 600 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Który z nich może przekazywać większą moc cieplną przy tych założeniach?

- A Wymiennik 1
- B Wymiennik 2
- C Oba zawsze przekazują identyczną moc
- D Nie istnieje związek między U a $\dot{Q}$



Prawidłowa odpowiedź:

B. Wymiennik 2

Tok rozumowania

Z zależności: $\dot{Q} = UA\Delta T_m$ wynika, że przy stałych A i ΔT_m : $\dot{Q} \propto U$. Jeżeli $U_2 = 3U_1$, to przy tych samych pozostałych warunkach: $\dot{Q}_2 = 3\dot{Q}_1$.

Co oznacza współczynnik U ?

Ogólny współczynnik przenikania ciepła uwzględnia łączne opory na drodze transportu energii, w tym konwekcję po stronie gorącego płynu, przewodzenie przez ścianę, konwekcję po stronie zimnego płynu oraz ewentualne warstwy osadów.

Jak interpretować wartość U ?Duże U

→ mały łączny opór cieplny
→ łatwiejsze przenikanie ciepła

Małe U

→ większy opór cieplny
→ trudniejszy transport energii



Co dzieje się, gdy pojawia się osad?

 $R_{całk} \uparrow \rightarrow U \downarrow \rightarrow \dot{Q} \downarrow$

przy pozostałych warunkach niezmiennych.



Typowy błąd

Zakładanie, że współczynnik U zależy wyłącznie od materiału ściany. W rzeczywistym wymienniku znaczenie mają także warunki przepływu i opory po obu stronach powierzchni.



Zapamiętaj

 $\dot{Q} = UA\Delta T_m$.

Trzy podstawowe sposoby zwiększenia potencjalnej wymiany ciepła: zwiększyć U , zwiększyć A , zwiększyć odpowiednią różnicę temperatur.

30

Pytanie 30

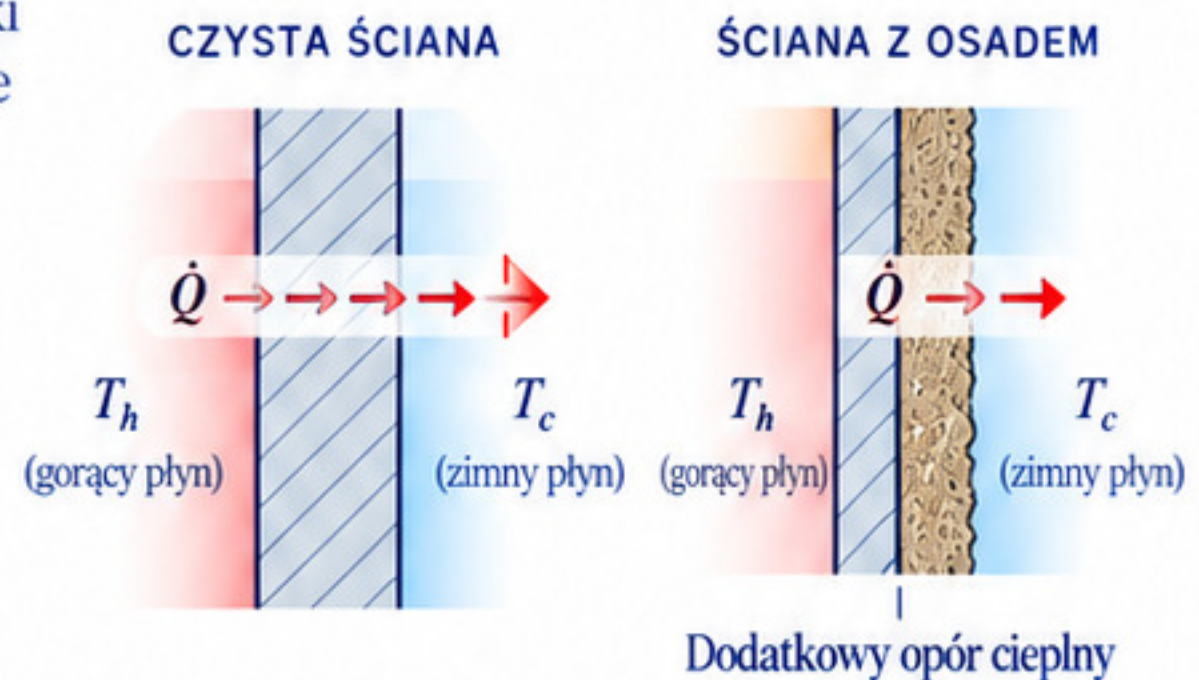
Osady i sprawność wymiennika

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

PYTANIE 30 — Co robi warstwa osadu? ●●● Trudniejsze

W wymienniku ciepła podczas eksploatacji na powierzchni wymiany ciepła tworzy się warstwa osadu. Pozostałe warunki procesu pozostają podobne. Jaki wpływ ma osad na działanie wymiennika?

- A** Zwiększa współczynnik przenikania ciepła U .
- B** Zmniejsza opór cieplny.
- C** Zwiększa opór cieplny i może zmniejszyć wydajność wymiany ciepła.
- D** Nie ma żadnego wpływu na proces.



Prawidłowa odpowiedź:

C. Zwiększa opór cieplny i może zmniejszyć wydajność wymiany ciepła.

Tok rozumowania:

Transport ciepła przez wymiennik można traktować jako przepływ energii przez kilka kolejnych oporów. W uproszczeniu:

$$R_{\text{całk}} = R_{\text{gorący}} + R_{\text{ściany}} + R_{\text{osadu}} + R_{\text{zimny}}$$

Pojawienie się dodatkowej warstwy osadu oznacza: $R_{\text{osadu}} > 0$, czyli: $R_{\text{całk}} \uparrow$.

Ponieważ ogólny współczynnik przenikania ciepła U jest odwrotnie związany z całkowitym oporem: $U \downarrow$.

A z zależności: $\dot{Q} = UA\Delta T_m$ wynika, że przy niezmiennych A i ΔT_m : $\dot{Q} \downarrow$.



Skutki praktyczne mogą obejmować:

- słabsze ogrzewanie lub chłodzenie,
- większe zużycie energii,
- konieczność zwiększenia powierzchni wymiany,
- wzrost kosztów eksploatacji,
- konieczność okresowego czyszczenia aparatu.



Przykład:

Nowy wymiennik zapewnia temperaturę produktu: 70°C . Po dłuższej eksploatacji, przy tych samych nastawach, produkt osiąga tylko: 64°C . Jedną z możliwych przyczyn jest narastanie osadu na powierzchni wymiany ciepła.



Typowy błąd:

Myślenie, że osad wpływa wyłącznie na estetykę lub czystość instalacji. W rzeczywistości może znacząco zmieniać opór cieplny i hydrauliczny.



Zapamiętaj:

Osad: $R \uparrow \rightarrow U \downarrow \rightarrow$ zdolność wymiany ciepła $\downarrow$.



Szybka kontrola modułu 03

- ☐ W jakim kierunku samorzutnie przepływa ciepło.
- ☐ Czym różni się przewodzenie od konwekcji i promieniowania.
- ☐ Jak grubość ściany wpływa na przewodzenie.
- ☐ Jak obliczyć ciepło jawne.
- ☐ Czym ciepło jawne różni się od utajonego.
- ☐ Co dzieje się energetycznie podczas zmiany fazy.
- ☐ Do czego służy wymiennik ciepła.
- ☐ Czym różni się współprąd od przeciuprądu.
- ☐ Co oznacza współczynnik U .
- ☐ Jak osad wpływa na działanie wymiennika.

Najbardziej intuicyjne zagadnienie:

Najtrudniejsze zagadnienie:

MODUŁ

04

Wymiana masy
i procesy rozdzielania

Rozpoznaj siłę napędową transportu masy
i zrozum, dlaczego składniki można rozdzielać.

Zakres pytań:

Pytania 31–40

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Po ukończeniu tego modułu użytkownik powinien:

- rozumieć podstawową ideę dyfuzji
- rozpoznawać znaczenie gradientu stężenia
- rozumieć pojęcie siły napędowej wymiany masy
- odróżniać destylację od absorpcji, ekstrakcji i adsorpcji
- rozumieć podstawową funkcję kolumny destylacyjnej
- interpretować pojęcia destylatu i produktu dennego
- rozumieć znaczenie lotności składników
- rozpoznawać funkcję refluksu
- rozumieć ideę równowagi fazowej
- dobierać proces separacji do podstawowych właściwości mieszaniny

Rozdzielanie jest możliwe wtedy,
gdy składniki różnią się określoną
właściwością fizyczną lub chemiczną.



różna lotność



destylacja



różna rozpuszczalność



ekstrakcja



różne powinowactwo
do powierzchni



adsorpcja

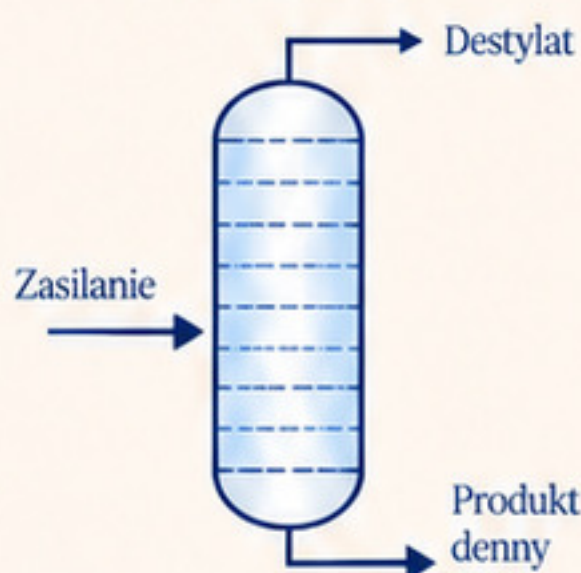


różna zdolność
rozpuszczania w cieczy



absorpcja

KOLUMNA



DESTYLACJA

DWIE FAZY CIEKŁE



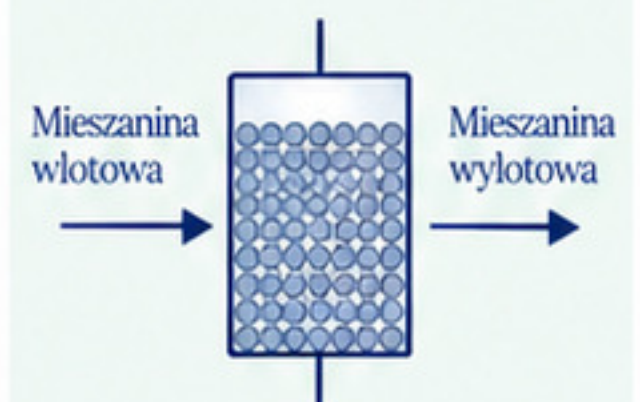
EKSTRAKCJA

GAZ + CIECZ



ABSORPCJA

POWIERZCHNIA STAŁA



ADSORPCJA

Dyfuzja — transport wywołany różnicą stężeń

31

Pytanie 31



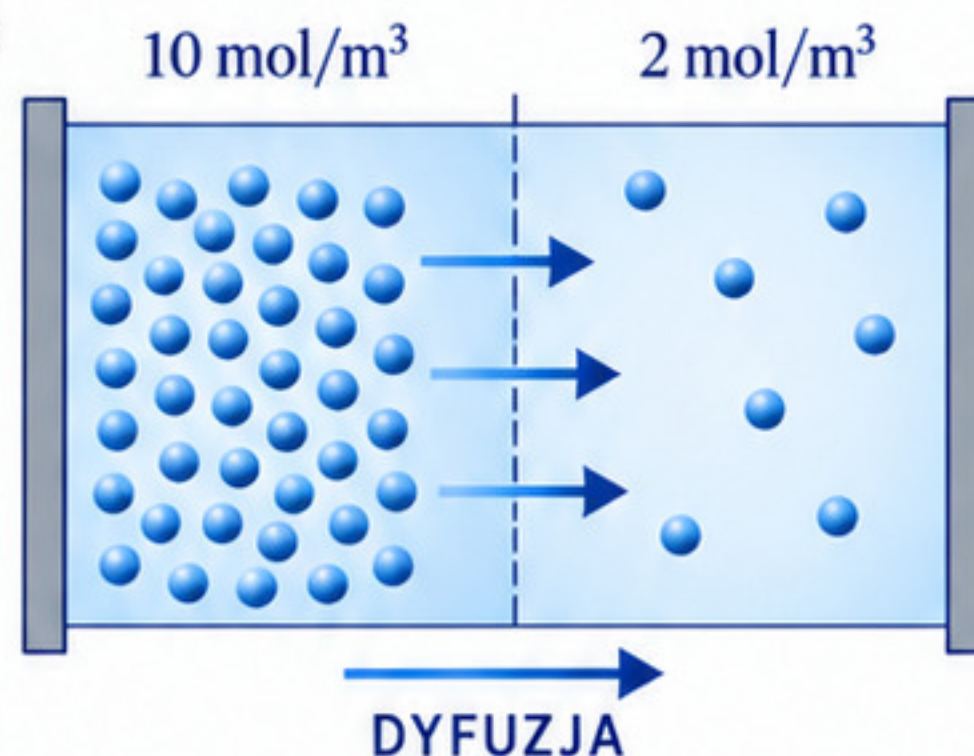
PYTANIE 31 — W którą stronę przemieszcza się składnik?



Średnie

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

W dwóch sąsiadujących obszarach cieczy stężenie składnika A jest różne. Po lewej stronie: $C_A = 10 \text{ mol/m}^3$. Po prawej stronie: $C_A = 2 \text{ mol/m}^3$. Jeżeli nie występują dodatkowe efekty wymuszające transport, jaki będzie naturalny kierunek dyfuzji składnika A?



- A** Od 2 mol/m^3 do 10 mol/m^3 .
- B** Od 10 mol/m^3 do 2 mol/m^3 .
- C** Składnik A nie będzie się przemieszczał.
- D** Kierunek zależy wyłącznie od ciśnienia atmosferycznego.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Od 10 mol/m^3 do 2 mol/m^3 .

Omówienie

Dyfuzja jest transportem składnika wywołanym różnicą jego stężenia. W uproszczeniu składnik przemieszcza się:

od obszaru o wyższym stężeniu → do obszaru o niższym stężeniu.

W tym przykładzie: $10 \text{ mol/m}^3 \rightarrow 2 \text{ mol/m}^3$.



Prawo Ficka — zapis koncepcyjny

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dx}, \quad \text{gdzie:}$$

J_A — strumień molowy składnika A,
 D_{AB} — współczynnik dyfuzji,
 dC_A/dx — gradient stężenia.



Dlaczego pojawia się znak minus?

Ponieważ transport zachodzi przeciwnie do kierunku wzrostu stężenia. Innymi słowy: składnik przemieszcza się „w dół” gradientu stężenia.



Co stanie się z czasem?

Jeżeli układ pozostanie niezakłócony, różnica stężeń będzie się zmniejszać. Proces będzie dążył do bardziej jednorodnego rozkładu składnika.



Typowy błąd

Mylenie dyfuzji z przepływem całej cieczy. Dyfuzja może zachodzić nawet wtedy, gdy średni ruch płynu jest bardzo mały.



Zapamiętaj

Różnica stężeń → siła napędowa dyfuzji.
 Wyższe $C_A \rightarrow$ niższe C_A .

33

Siła napędowa wymiany masy



Pytanie 32



PYTANIE 32 — Kiedy transport masy jest intensywniejszy?

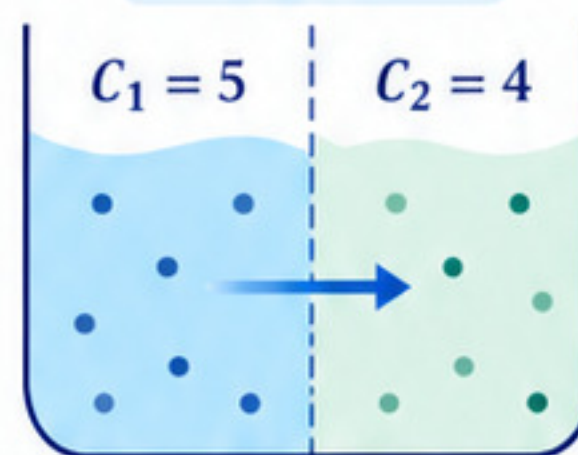
● ● ● Średnie

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Porównujemy dwa podobne układy wymiany masy. W układzie A różnica stężeń składnika pomiędzy fazami jest niewielka. W układzie B różnica stężeń jest znacznie większa. Pozostałe warunki są podobne. W którym układzie można oczekiwać większej siły napędowej transportu masy?

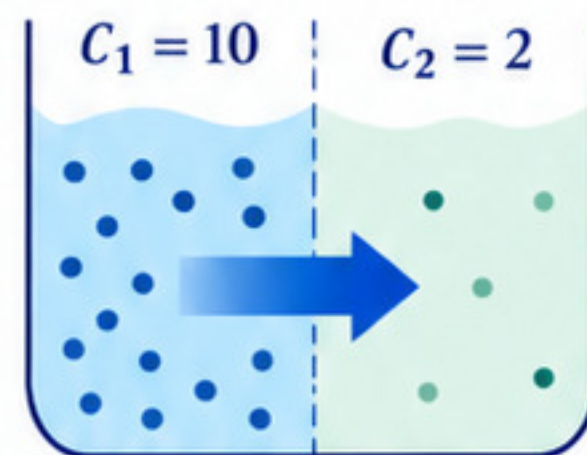
- A** W układzie A.
- B** W układzie B.
- C** W obu zawsze identycznej.
- D** Siła napędowa nie ma związku ze stężeniem.

UKŁAD A



mała różnica

UKŁAD B



duża różnica



Prawidłowa odpowiedź:
B. W układzie B.



Omówienie

W wielu procesach transportowych szybkość wymiany zależy od:

- współczynnika transportu,
- powierzchni kontaktu,
- siły napędowej.

Uproszczona analogia: $N_A = kA \times \text{siła napędowa}$.

Im większa różnica pomiędzy aktualnym stanem układu a stanem równowagi, tym większy może być transport masy.



Analogiczna idea

Analogiczna idea występuje również w wymianie ciepła:

duża różnica temperatur →
większa siła napędowa wymiany ciepła.

W wymianie masy:

duża różnica stężeń lub potencjałów →
większa siła napędowa transportu masy.



Typowy błąd

Zakładanie, że sama duża powierzchnia kontaktu gwarantuje intensywny transport. Jeżeli układ jest blisko równowagi, siła napędowa może być niewielka.



Ważne

Nie zawsze wystarczy znać samą różnicę stężeń całkowitych. W bardziej zaawansowanej analizie wykorzystuje się między innymi:

- różnice udziałów molowych,
- różnice ciśnień cząstkowych,
- różnicę względem stanu równowagi.



Zapamiętaj

Transport wymaga:
siły napędowej.
Im bliżej równowagi,
tym mniejsza tendencja
do dalszej wymiany.

33

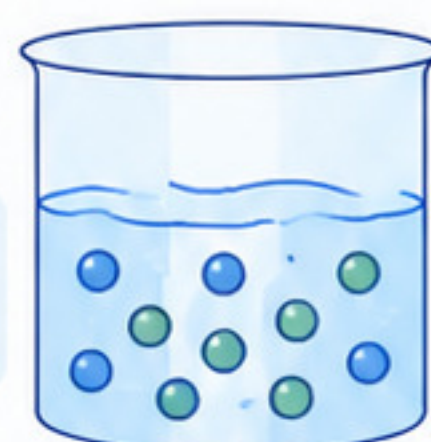
Pytanie 33

Destylacja — rozdzielanie dzięki różnicy lotności

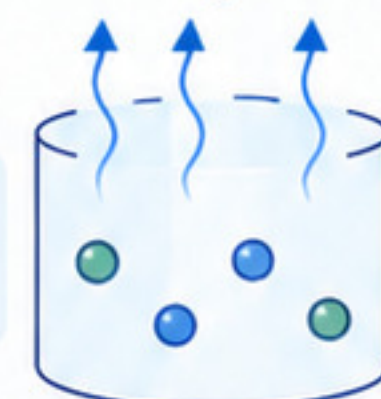
WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

PYTANIE 33 — Co umożliwia destylację? ● ● Średnie

Mieszanina zawiera dwa ciekłe składniki, które mają różną lotność. Na jakiej podstawowej właściwości opiera się ich rozdział przez destylację?

CIECZ:
A A B B B

ogrzewanie

PARA:
A A A Bpara bogatsza
w składnik
bardziej lotny

- A Wyłącznie na różnicy kolorów.
- B Na różnicy skłonności składników do przechodzenia do fazy parowej.
- C Wyłącznie na różnicy gęstości ciał stałych.
- D Na obecności membrany półprzepuszczalnej.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Na różnicy skłonności składników do przechodzenia do fazy parowej.

Omówienie

Destylacja wykorzystuje różnice lotności składników. Składnik bardziej lotny:

- łatwiej przechodzi do fazy parowej,
- zwykle występuje w większym udziale w parze niż w cieczy pozostającej w równowadze.

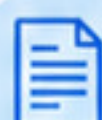
Dlatego poprzez wielokrotne:
parowanie → kontakt pary z cieczą →
skraplanie można zwiększać stopień rozdziału.



Co oznacza „bardziej lotny”?

W podobnych warunkach składnik bardziej lotny ma większą tendencję do występowania w fazie gazowej. Często wiąże się to z:

- wyższą prężnością pary,
- niższą temperaturą wrzenia przy tym samym ciśnieniu.



Prosty przykład

Mieszanina: A — bardziej lotny,
B — mniej lotny.

Po częściowym odparowaniu:

- PARA → bogatsza w A,
- CIECZ → bogatsza w B.



Typowy błąd

Zakładanie, że destylacja działa dlatego, że wszystkie składniki mają całkowicie różne temperatury wrzenia. W rzeczywistości analizuje się równowagę ciecz–para i względną lotność składników.



Zapamiętaj

Destylacja: różnica lotności →
różnica składu pary i cieczy →
możliwość rozdziału.

Kolumna destylacyjna — góra i dół procesu

34 Pytanie 34



PYTANIE 34 — Gdzie trafia składnik bardziej lotny?

● ● ● Średnie

W idealizowanej kolumnie destylacyjnej rozdzielane są składniki A i B. A jest bardziej lotny niż B. Który produkt powinien być zwykle bogatszy w A?

- A. Produkt górny — destylat.
- B. Produkt dolny.
- C. Oba produkty zawsze mają identyczny skład.
- D. Produkt górny nie zawiera żadnej substancji.



Prawidłowa odpowiedź:

A. Produkt górny — destylat.Zasilanie
A + B

Omówienie

Bardziej lotny składnik ma większą tendencję do przechodzenia do pary. W typowej kolumnie destylacyjnej:
góra kolumny → produkt bogatszy w składnik bardziej lotny,
dół kolumny → produkt bogatszy w składnik mniej lotny.

35 Pytanie 35



PYTANIE 35 — Jak nazywa się produkt dolny?

● ● ● Łatwe

Jak najczęściej nazywa się strumień odbierany z dolnej części kolumny destylacyjnej?

- A. Destylat.
- B. Produkt denny.
- C. Refluks.
- D. Gaz obojętny.



Prawidłowa odpowiedź:

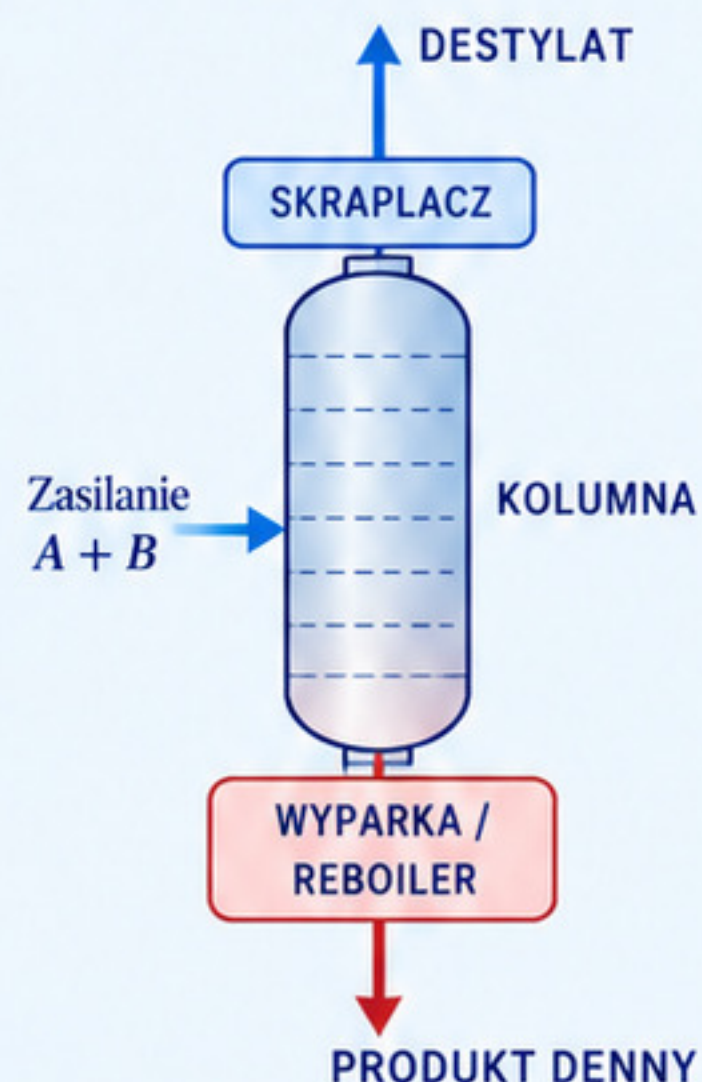
B. Produkt denny.

Omówienie

Podstawowe pojęcia:

Destylat — produkt odbierany z górnej części układu po skropleniu pary.**Produkt denny** — strumień odbierany z dolnej części kolumny.**Refluks** — część skroplonego produktu górnego zwracana do kolumny.

Schemat funkcjonalny:



Typowy błąd

Mylenie destylatu z całym strumieniem pary wychodzącym z kolumny. Destylat jest zwykle produktem uzyskanym po skropleniu odpowiedniej części strumienia górnego.



Zapamiętaj

GÓRA → składnik bardziej lotny.
DÓŁ → składnik mniej lotny.

36

Refluks — dlaczego część — destylatu wraca do kolumny?

PYTANIE 36 — Funkcja refluksu

● ● ● Trudniejsze

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

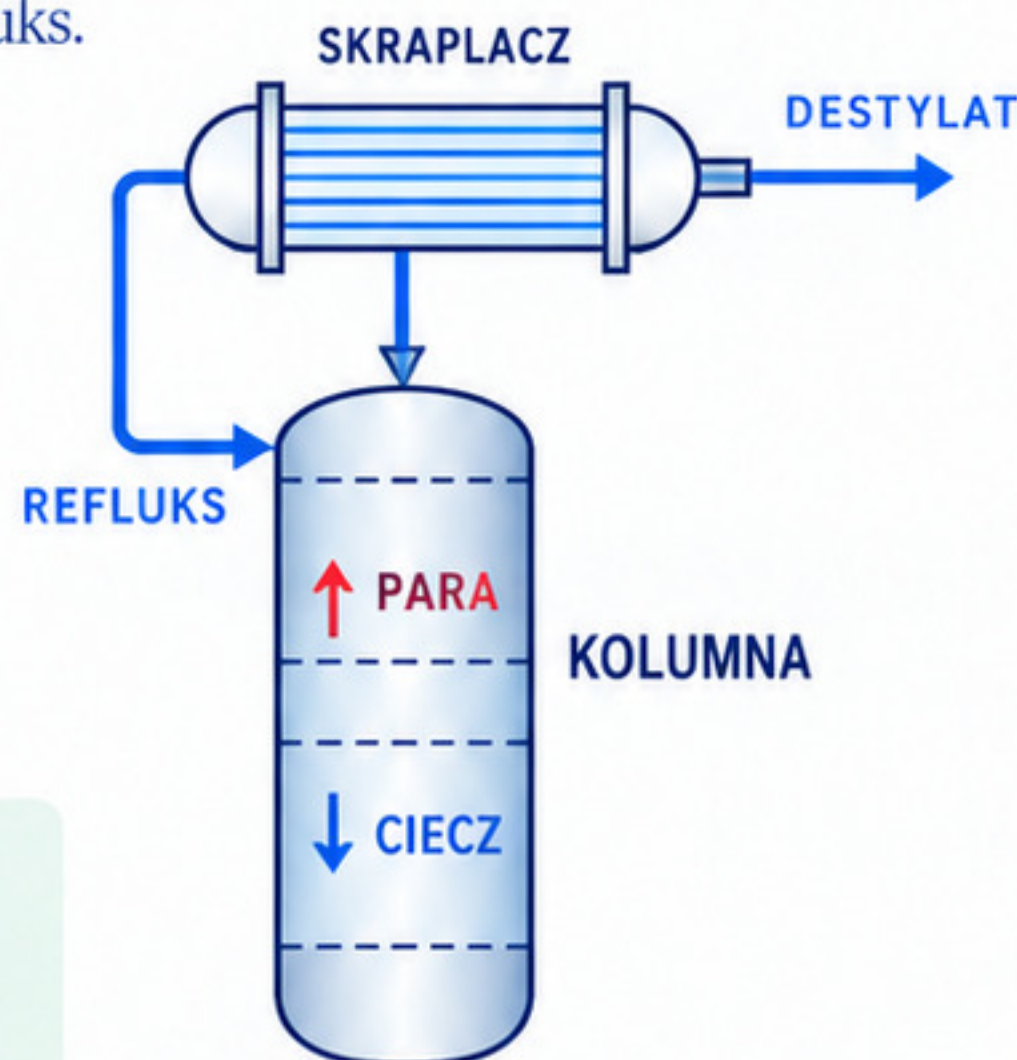
W kolumnie destylacyjnej część skroplonego strumienia z górnej części aparatu jest zawracana do kolumny jako refluks. Jaki jest podstawowy cel takiego działania?

- A** Zawsze całkowicie zatrzymać przepływ pary.
- B** Zwiększyć kontakt cieczy z parą i poprawić możliwość rozdziału.
- C** Usunąć cały produkt denny.
- D** Zmienić ciecz w ciało stałe.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Zwiększyć kontakt cieczy z parą i poprawić możliwość rozdziału.



Wyjaśnienie

W kolumnie rektyfikacyjnej para przemieszcza się ku górze, a ciecz ku dołowi. Refluks dostarcza cieczy do górnej części kolumny. Dzięki temu powstaje intensywniejszy kontakt przeciwprądowy:

PARA ↑ | **CIECZ** ↓

To umożliwia wielokrotne zbliżanie faz do równowagi i zwiększa stopień rozdziału.



Uproszczona zasada

Więcej refluksu → często lepszy rozdział, ale jednocześnie → większe obciążenie energetyczne i eksploatacyjne.

Dlatego nie oznacza to, że „im więcej refluksu, tym zawsze lepiej” z punktu widzenia całej instalacji.



Współczynnik refluksu — idea

$$R = \frac{L}{D}, \text{ gdzie:}$$

L — strumień cieczy zawracanej do kolumny,

D — strumień destylatu odbieranego jako produkt.

Nie trzeba na tej stronie wykonywać zaawansowanych obliczeń. Celem jest zrozumienie funkcji refluksu.



Typowy błąd

Traktowanie refluksu jako niepożądanego strumienia. Refluks jest celowym strumieniem wewnętrznym wykorzystywanym do poprawy separacji.



Zapamiętaj

Refluks: więcej kontaktu para–ciecz → możliwość lepszego rozdziału.

Absorpcja i adsorpcja — podobne nazwy, różne procesy

37

Pytanie 37



PYTANIE 37 — Usuwanie składnika gazowego za pomocą cieczy

● ● ● Średnie

Gaz zawiera składnik A, który dobrze rozpuszcza się w określonej cieczy. Gaz kontaktuje się z tą cieczą, a składnik A przechodzi z fazy gazowej do ciekłej. Jak nazywa się ten proces?

- A. Absorpcja.
- B. Adsorpcja.
- C. Krystalizacja.
- D. Filtracja.



Prawidłowa odpowiedź:
A. Absorpcja.



Omówienie

Podczas absorpcji składnik jednej fazy jest pochłaniany przez objętość innej fazy. Typowy przykład: gaz zawierający A → ciecz absorbująca → ciecz wzbogacona w A.

38

Pytanie 38



PYTANIE 38 — Wiązanie na powierzchni ciała stałego

● ● ● Średnie

Zanieczyszczenie obecne w gazie przyląca się do powierzchni porowatego ciała stałego, na przykład węgla aktywnego. Jak nazywa się ten proces?

- A. Absorpcja.
- B. Adsorpcja.
- C. Destylacja.
- D. Sedimentacja.



Prawidłowa odpowiedź:
B. Adsorpcja.



Kluczowe rozróżnienie

ABSORPCJA

substancja trafia do wnętrza objętości drugiej fazy.
Przykład: gaz → ciecz.

ADSORPCJA

substancja gromadzi się na powierzchni materiału.
Przykład: cząsteczki → powierzchnia węgla aktywnego.

Prosta analogia wizualna

ABSORPCJA:

składnik wnika do wnętrza.



ABSORPCJA:

na powierzchni.



Dlaczego to ważne?

Nazwy różnią się tylko jedną literą, ale opisują inne mechanizmy. W inżynierii procesowej błędne używanie tych pojęć może prowadzić do złej interpretacji aparatu.



Typowy błąd

Używanie pojęć „absorpcja” i „adsorpcja” zamiennie.



Zapamiętaj

aB sorpcja → do objętości;
aD sorpcja → na powierzchni.

38

Ekstrakcja ciecz–ciecz

Pytanie 39

PYTANIE 39 — Do której fazy przejdzie składnik?

● ● ● Trudniejsze

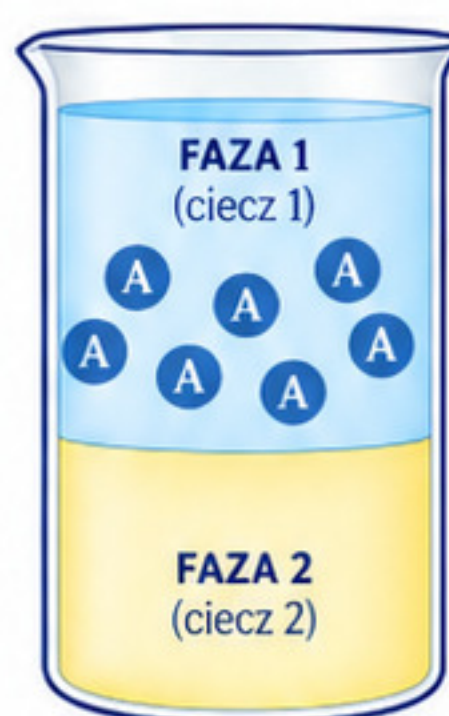
Składnik A znajduje się początkowo w cieczy 1. Do układu dodano ciecz 2, która:

- nie miesza się dobrze z cieczą 1,
- bardzo dobrze rozpuszcza składnik A.

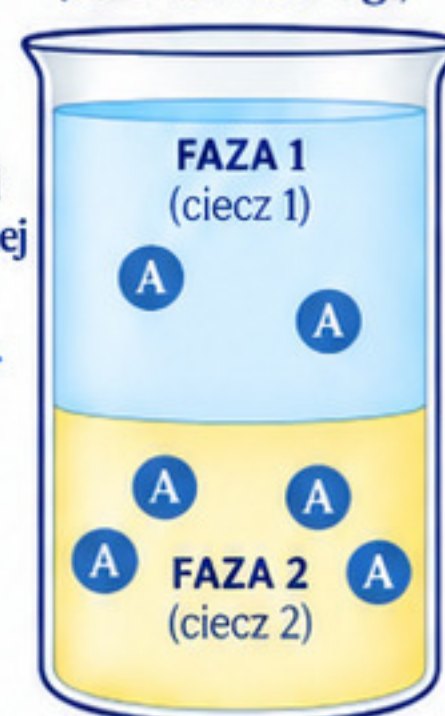
Po kontakcie faz i osiągnięciu równowagi, gdzie można oczekiwać większej części składnika A?

- A** Wyłącznie w fazie gazowej.
- B** W cieczy 2, jeżeli A ma do niej większe powinowactwo.
- C** Zawsze pozostanie w cieczy 1.
- D** Składnik A musi ulec reakcji chemicznej.

Przed kontaktem



Po kontakcie
(stan równowagi)



A przechodzi
do preferowanej
fazy



Prawidłowa odpowiedź:

B. W cieczy 2, jeżeli A ma do niej większe powinowactwo.



Omówienie

Ekstrakcja ciecz–ciecz wykorzystuje różną rozpuszczalność składnika w dwóch niemieszających się lub słabo mieszających fazach ciekłych.

Schemat:



Jeżeli składnik A lepiej rozpuszcza się w ekstrahencie, część A przechodzi do tej fazy.



Współczynnik podziału — idea

$$K = \frac{C_{A,2}}{C_{A,1}}$$

Jeżeli $K > 1$, to w stanie równowagi składnik A preferuje fazę 2. Im większa wartość K , tym korzystniejszy może być transfer A do ekstrahentu.



Podstawowe pojęcia

Ekstrahent — ciecz dodawana w celu selektywnego rozpuszczenia wybranego składnika.

Ekstrakt — faza bogatsza w przeniesiony składnik.

Rafinat — faza pozostała po częściowym usunięciu składnika.



Typowy błąd

Zakładanie, że ekstrakcja wymaga wrzenia mieszaniny. To cecha kojarzona z destylacją, nie z ekstrakcją ciecz–ciecz.



Zapamiętaj

Destylacja → różnica lotności.

Ekstrakcja → różnica rozpuszczalności / powinowactwa do faz.



Dobry ekstrahent powinien między innymi:

- dobrze rozpuszczać składnik docelowy,
- być wystarczająco selektywny,
- umożliwiać późniejsze rozdzielenie faz.

39

Jak dobrać metodę rozdziału?



Pytanie 40

PYTANIE 40 — Wybór właściwego procesu separacji

● ● ● Trudniejsze

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Inżynier musi usunąć niewielką ilość organicznego zanieczyszczenia z wodnego roztworu. Zanieczyszczenie:

- słabo odparowuje,
- bardzo dobrze rozpuszcza się w drugim, niemieszającym się z wodą rozpuszczalniku,
- nie reaguje chemicznie z rozpuszczalnikiem.

Która metoda może być najbardziej logicznym pierwszym wyborem?

- Ekstrakcja ciecz–ciecz.
- Destylacja oparta wyłącznie na dużej lotności zanieczyszczenia.
- Filtracja zwykłym sitem.
- Pompa odśrodkowa bez procesu separacji.



Prawidłowa odpowiedź:
A. Ekstrakcja ciecz–ciecz.



Tok rozumowania

Dobór operacji rozdzielania powinien wynikać z właściwości mieszaniny. W zadaniu podano trzy ważne informacje:

- 1 Zanieczyszczenie słabo odparowuje. Destylacja może być mniej atrakcyjna, jeżeli różnica lotności nie jest korzystna.
- 2 Zanieczyszczenie dobrze rozpuszcza się w drugim rozpuszczalniku. To wskazuje na możliwość wykorzystania różnicy powinowactwa do dwóch faz ciekłych.
- 3 Rozpuszczalnik nie miesza się dobrze z wodą. Po kontakcie można ponownie rozdzielić dwie fazy ciekłe. To jest typowa sytuacja sprzyjająca ekstrakcji ciecz–ciecz.



Mapa decyzji

Czy składniki różnią się lotnością?

→ rozważ **destylację**.

Czy składnik selektywnie przechodzi do innej cieczy?

→ rozważ **ekstrakcję**.

Czy składnik gazowy można pochłoniąć w cieczy?

→ rozważ **absorpcję**.

Czy składnik przylacza się do powierzchni ciała stałego?

→ rozważ **adsorpcję**.



Typowy błąd

Wybieranie procesu na podstawie zapamiętanej nazwy aparatu, a nie właściwości mieszaniny.



Ważne

W praktycznym projektowaniu nie wybiera się operacji wyłącznie na podstawie jednej właściwości. Uwzględnia się także:

- koszt energii,
- bezpieczeństwo,
- dostępność rozpuszczalnika,
- możliwość regeneracji,
- czystość produktu,
- wpływ procesu na środowisko.



Zapamiętaj

Najpierw zadaj pytanie: „Jaką różnicę pomiędzy składnikami mogę wykorzystać?” Dopiero potem dobieraj operację separacji.



Szybka kontrola modułu 04

- ☐ Czym jest dyfuzja.
- ☐ Jaką rolę pełni gradient stężenia.
- ☐ Co oznacza siła napędowa wymiany masy.
- ☐ Na czym opiera się destylacja.
- ☐ Czym różni się destylat od produktu dennego.
- ☐ Do czego służy refluks.
- ☐ Czym absorpcja różni się od adsorpcji.
- ☐ Na czym polega ekstrakcja ciecz–ciecz.
- ☐ Jak właściwości składników wpływają na wybór procesu separacji.

WŁAŚCIWOŚĆ MIESZANINY

MECHANIZM ROZDZIAŁU

DOBÓR OPERACJI



Destylacja



Ekstrakcja



Absorpcja



Adsorpcja



Miniwyzwanie końcowe

Dopasuj operację do właściwości:

Różna lotność → _____.

Różna rozpuszczalność w dwóch cieczach → _____.

Pochłanianie składnika gazowego przez ciecz → _____.

Gromadzenie składnika na powierzchni ciała stałego → _____.



Odpowiedzi do samokontroli

Destylacja. Ekstrakcja. Absorpcja. Adsorpcja.

MODUŁ
05**Kinetyka reakcji, reaktory
i procesy przemysłowe**

Połącz szybkość reakcji z bilansem procesu i naucz się oceniać, jak warunki pracy wpływają na konwersję, selektywność i bezpieczeństwo.

Zakres pytań:

Pytania 41–50

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Po ukończeniu tego modułu użytkownik powinien:

- rozumieć pojęcie szybkości reakcji,
- interpretować rząd reakcji,
- rozumieć wpływ stężenia na szybkość reakcji,
- wyjaśniać wpływ temperatury za pomocą równania Arrheniusa,
- obliczać podstawową konwersję substratu,
- rozróżniać reaktory CSTR i PFR,
- interpretować czas przebywania,
- rozróżniać konwersję, wydajność i selektywność,
- analizować podstawowe kompromisy procesowe,
- łączyć reakcję chemiczną z bilansem masy, energii i bezpieczeństwem.

Proces reakcyjny nie zależy tylko od tego: czy reakcja może zajść?



Jak szybko?



Jak daleko?



Do jakiego produktu?



W jakim reaktorze?



Przy jakiej temperaturze?



Jak bezpiecznie odprowadzić lub dostarczyć energię?

Reaktor zbiornikowy
z mieszaniem (CSTR)



CSTR

Stężenie substratu
wzdłuż przebiegu reakcji



Reaktor rurowy (PFR)



PFR

Najważniejsze parametry

T

T – temperatura
wpływa na stałą
szybkości reakcji (k)

C

C – stężenie
wpływa na szybkość
reakcji i rząd reakcji

τ

τ – czas przebywania
wpływa na konwersję
i rozkład produktów

Szybkość reakcji — jak szybko znika substrat?

41

Pytanie 41



PYTANIE 41 — Interpretacja szybkości reakcji

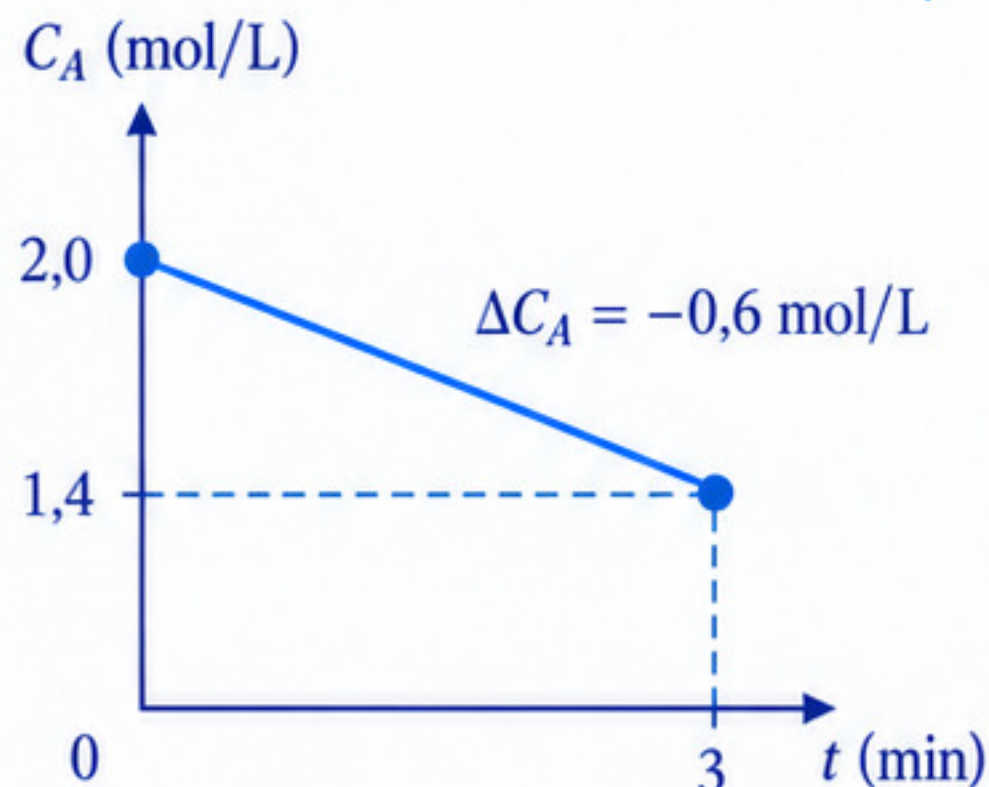


Średnie

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

W reakcji: $A \rightarrow$ produkty stężenie substratu A maleje z:
2,0 mol/L do: 1,4 mol/L w ciągu: 3 minut.
Jaka jest średnia szybkość zanikania A w tym przedziale czasu?

- A 0,2 mol/(L·min)
- B 0,6 mol/(L·min)
- C 1,4 mol/(L·min)
- D 3,0 mol/(L·min)



Prawidłowa odpowiedź:

A. 0,2 mol/(L·min).

Tok rozumowania krok po kroku:

- 1 Zmiana stężenia:
 $\Delta C_A = 1,4 - 2,0 = -0,6 \text{ mol/L}$.
- 2 Czas:
 $\Delta t = 3 \text{ min}$.
- 3 Dla zanikania substratu stosujemy:
 $-\frac{\Delta C_A}{\Delta t}$.
- 4 Obliczenie:
 $-\frac{(-0,6)}{3} = 0,2 \text{ mol/(L·min)}$.



Dlaczego stosujemy znak minus?

Stężenie substratu maleje w czasie, dlatego $dC_A/dt < 0$. Szybkość zanikania substratu zapisujemy jako $-dC_A/dt$, aby otrzymać wartość dodatnią.



Interpretacja:

W każdym litrze mieszaniny średnio 0,2 mola A zniknęło w ciągu jednej minuty w tym przedziale czasu.



Ważne:

Jest to szybkość średnia. Szybkość chwilowa może się zmieniać wraz ze stężeniem, temperaturą i postępowaniem reakcji.



Zapamiętaj:

Dla substratu: $r_A = -\frac{dC_A}{dt}$.

Dla produktu znak jest zwykle dodatni, ponieważ jego ilość rośnie.



Typowy błąd:

Dzielenie stężenia końcowego przez czas zamiast wykorzystania zmiany stężenia. Należy uwzględnić różnicę stężeń (ΔC_A), a nie samo stężenie końcowe.

Rząd reakcji i wpływ stężenia

42

Pytanie 42



PYTANIE 42 — Co się stanie po podwojeniu stężenia?



Średnie

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Dla reakcji $A \rightarrow$ produkty obowiązuje równanie kinetyczne: $r = kC_A^2$. Co stanie się z szybkością reakcji, jeżeli stężenie A zostanie podwojone, a temperatura pozostanie stała?

Wizualne podsumowanie

$$C_A \times 2$$



$$\text{dla } n = 1 \rightarrow r \times 2$$

$$\text{dla } n = 2 \rightarrow r \times 4$$

$$\text{dla } n = 3 \rightarrow r \times 8$$

A

Szybkość nie zmieni się.

B

Szybkość wzrośnie dwukrotnie.

C

Szybkość wzrośnie czterokrotnie.

D

Szybkość zmniejszy się czterokrotnie.



Prawidłowa odpowiedź:

C. Szybkość wzrośnie czterokrotnie.

Tok rozumowania:

Początkowo szybkość reakcji wynosi:
 $r_1 = kC_A^2$.

Po podwojeniu stężenia: $C_{A,2} = 2C_A$.

Nowa szybkość reakcji:

$$r_2 = k(2C_A)^2 = 4kC_A^2$$

Zatem $r_2 = 4r_1$, czyli szybkość wzrośnie czterokrotnie.



Co oznacza wykładnik 2?

Reakcja jest drugiego rzędu względem A, co oznacza, że szybkość reakcji jest proporcjonalna do kwadratu stężenia A. Wykładnik rzędu reakcji określa, jak silnie szybkość zależy od stężenia danego składnika — im wyższy wykładnik, tym większa wrażliwość szybkości reakcji na zmianę stężenia.



Porównanie różnych rzędów reakcji

Dla reakcji o równaniu kinetycznym:

- $r = k$ (rząd zerowy) → zmiana C_A nie zmienia szybkości,
- $r = kC_A$ (rząd pierwszy) → podwojenie C_A daje 2 × większą szybkość,
- $r = kC_A^2$ (rząd drugi) → podwojenie C_A daje 4 × większą szybkość.



Ważna uwaga

Rząd reakcji należy wyznaczyć doświadczalnie lub na podstawie modelu kinetycznego. Nie należy automatycznie odczytywać rzędu reakcji z współczynników stechiometrycznych równania reakcji.



Typowy błąd

Częstym błędem jest założenie, że podwojenie stężenia zawsze powoduje dwukrotny wzrost szybkości reakcji.



Zapamiętaj

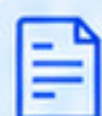
Jeżeli: $r \propto C_A^n$

$$\text{to po zmianie stężenia: } \frac{r_2}{r_1} = \left(\frac{C_{A,2}}{C_{A,1}} \right)^n$$

Reakcja pierwszego rzędu i czas połowicznego zaniku

43

Pytanie 43



PYTANIE 43 — Ile substratu pozostanie?



Trudniejsze

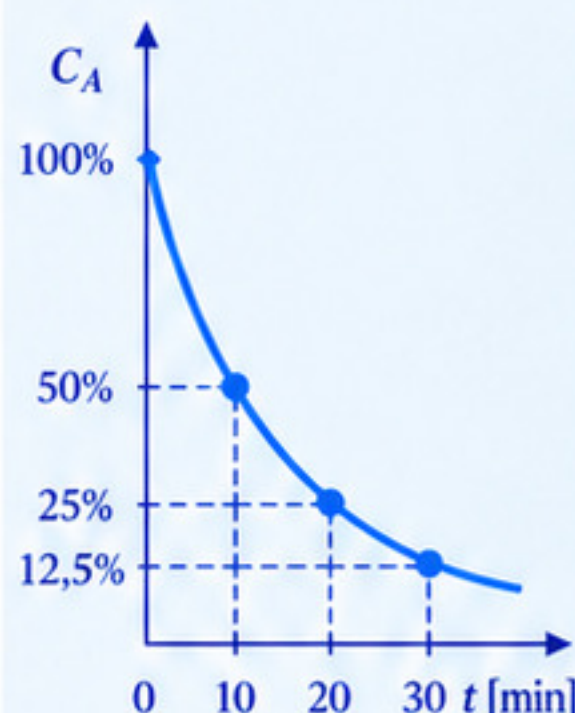
WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Reakcja $A \rightarrow \text{produkty}$ jest pierwszego rzędu. Czas połowicznego zaniku wynosi: $t_{1/2} = 10 \text{ min}$. Początkowo w układzie znajduje się 100 mol A. Ile moli A pozostanie po 20 minutach?

- A** 75 mol.
- B** 50 mol.
- C** 25 mol.
- D** 10 mol.



Wykładniczy zanik stężenia



Prawidłowa odpowiedź:
C. 25 mol.



Tok rozumowania:

Po pierwszym czasie połowicznego zaniku:
100 mol $\rightarrow$ 50 mol (po 10 min).
Po drugim czasie połowicznego zaniku:
50 mol $\rightarrow$ 25 mol (po 20 min).
Zatem po 20 minutach pozostaje 25 mol A.



Dla reakcji pierwszego rzędu:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k},$$

gdzie k — stała szybkości reakcji.
Czas połowicznego zaniku nie zależy od początkowego stężenia (lub ilości) substratu.



Można również użyć równania:

$$C_A = C_{A0} e^{-kt},$$

ale w tym zadaniu łatwiej wykorzystać podany czas połowicznego zaniku.



Interpretacja w czasie:

0 min 100% $\rightarrow$ 10 min 50% $\rightarrow$ 20 min 25% $\rightarrow$ 30 min 12,5%

Po każdym czasie $t_{1/2}$ ilość (lub stężenie) zmniejsza się o połowę.



Typowy błąd

Odejmowanie 50% początkowej ilości w każdym kroku (np. 100 $\rightarrow$ 50 $\rightarrow$ 0), zamiast połowy z aktualnie pozostałej ilości.



Zapamiętaj

Po każdym czasie połowicznego zaniku dla reakcji pierwszego rzędu pozostaje połowa aktualnej ilości substratu.

Temperatura i równanie Arrheniusa

44

Pytanie 44



PYTANIE 44 — Dlaczego reakcja przyspiesza?



Trudniejsze

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Dla wielu reakcji chemicznych wzrost temperatury prowadzi do wzrostu stałej szybkości k . Które równanie opisuje tę zależność?

- A** $k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$
- B** $pV = nRT$
- C** $Q = mc_p \Delta T$
- D** $\dot{m} = \rho \dot{V}$



Prawidłowa odpowiedź:

A. $k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$



Równanie Arrheniusa:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

gdzie:

- k — stała szybkości reakcji,
- A — czynnik przedeksponencjalny (często związany z częstotliwością zderzeń i orientacją cząsteczek),
- E_a — energia aktywacji [J/mol],
- R — uniwersalna stała gazowa (8,314 J/(mol·K)),
- T — temperatura [K].



Co dzieje się przy wzroście temperatury?

Gdy temperatura T rośnie, wyrażenie $-\frac{E_a}{RT}$ staje się mniej ujemne, dlatego wartość $\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ rośnie, a w konsekwencji stała szybkości k wzrasta.

Jeżeli szybkość reakcji opisana jest wzorem $r = kC_A^n$, to przy tym samym stężeniu C_A wyższa wartość k oznacza wyższą szybkość reakcji.



Dlaczego ma to ogromne znaczenie przemysłowe?

- wpływa na szybkość reakcji,
- wpływa na selektywność,
- wpływa na stan równowagi chemicznej,
- zwiększa zapotrzebowanie na chłodzenie,
- wpływa na bezpieczeństwo procesu.



Typowy błąd

Stosowanie temperatury w stopniach Celsjusza (°C) w równaniu Arrheniusa.

Zawsze używaj temperatury w kelwinach (K).



Wyższa temperatura nie zawsze jest lepsza

Zbyt wysoka temperatura może prowadzić do:

- reakcji ubocznych,
- rozkładu produktu,
- utraty selektywności,
- przegrzania reaktora,
- wzrostu ciśnienia.

Konwersja substratu

45

Pytanie 45



PYTANIE 45 — Jaka część substratu przereagowała?



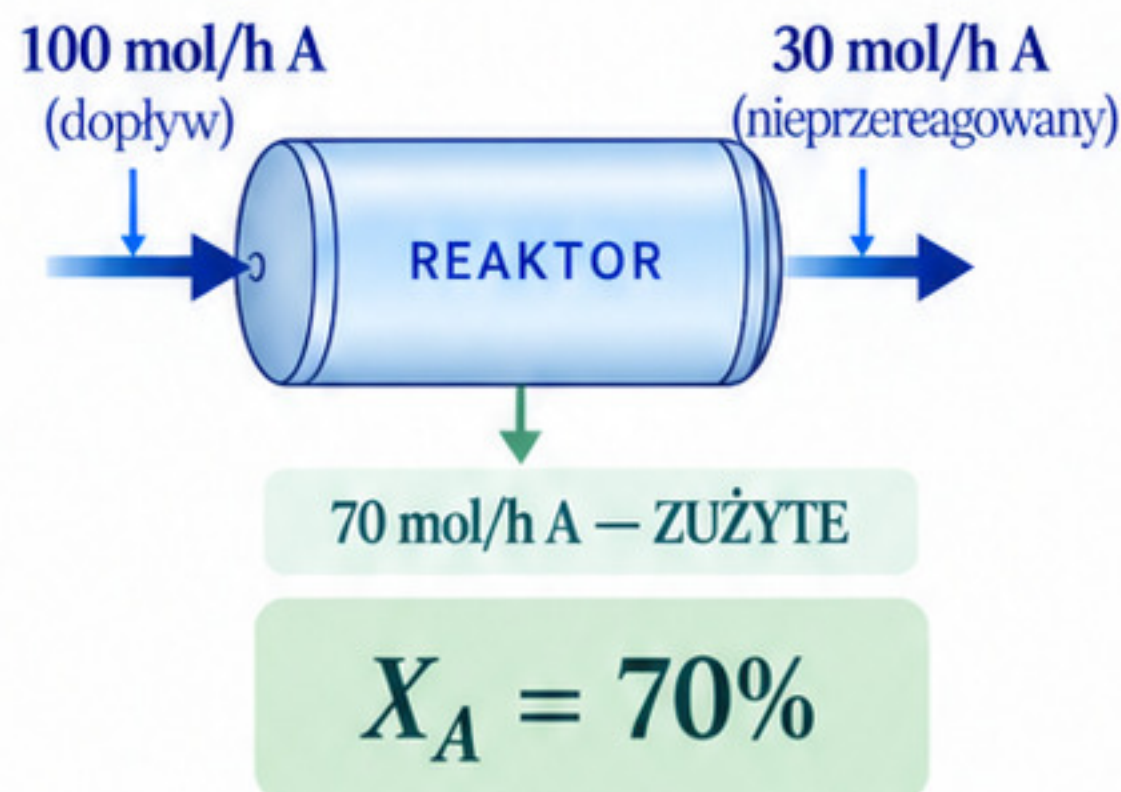
Średnie

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Do reaktora wpływa: 100 mol/h substratu A.

Na wyjściu pozostaje: 30 mol/h nieprzereagowanego A.

Jaka jest konwersja A?



Prawidłowa odpowiedź:

C. 70%.

Definicja konwersji:

Konwersja określa, jaka część doprowadzonego substratu została zużyta (przereagowała).

$$X_A = \frac{F_{A0} - F_A}{F_{A0}}, \quad \text{gdzie:}$$

F_{A0} — strumień molowy substratu A na dopływie do reaktora,

F_A — strumień molowy nieprzereagowanego substratu A na wypływie z reaktora.

Podstawiając dane:

$$X_A = \frac{100 - 30}{100} = \frac{70}{100} = 0,70 = 70\%.$$



Interpretacja:

Na każde 100 mol A doprowadzonych do reaktora, 70 mol przereagowało, a 30 mol pozostało nieprzereagowane.



Wysoka konwersja ≠ dużo produktu

Wysoka konwersja nie zawsze oznacza dużą ilość pożądanego produktu, jeśli w układzie zachodzą reakcje uboczne. Oprócz konwersji warto analizować również selektywność i wydajność.



Typowy błąd

Częstym błędem jest obliczanie F_A/F_{A0} , co odpowiada części nieprzereagowanego substratu, a nie konwersji.



Zapamiętaj

KONWERSJA:

ile substratu zostało zużyte?

CSTR czy PFR?

46

Pytanie 46



PYTANIE 46 — Jak zmienia się stężenie w reaktorze?



Trudniejsze

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Porównujemy idealny reaktor zbiornikowy z ciągłym mieszaniem CSTR oraz idealny reaktor rurowy PFR. Które stwierdzenie jest poprawne?

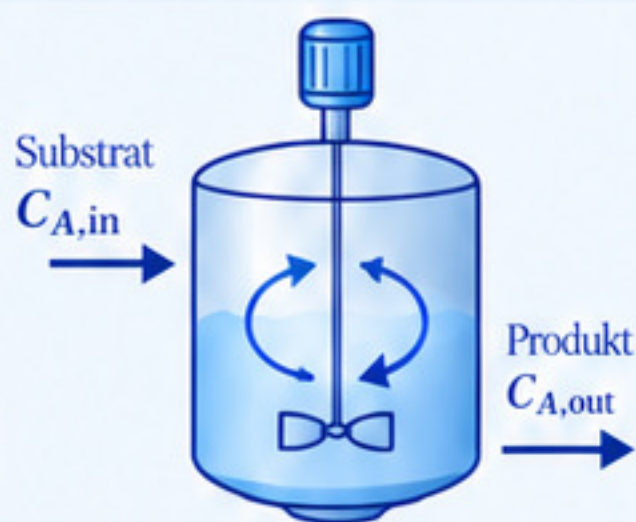
- A** W idealnym CSTR skład mieszaniny wewnątrz reaktora jest jednorodny i odpowiada składowi na wyjściu.
- B** W PFR skład jest zawsze identyczny w każdym punkcie długości reaktora.
- C** CSTR nigdy nie może pracować w sposób ciągły.
- D** PFR zawsze wymaga intensywnego mieszadła mechanicznego.



Prawidłowa odpowiedź:

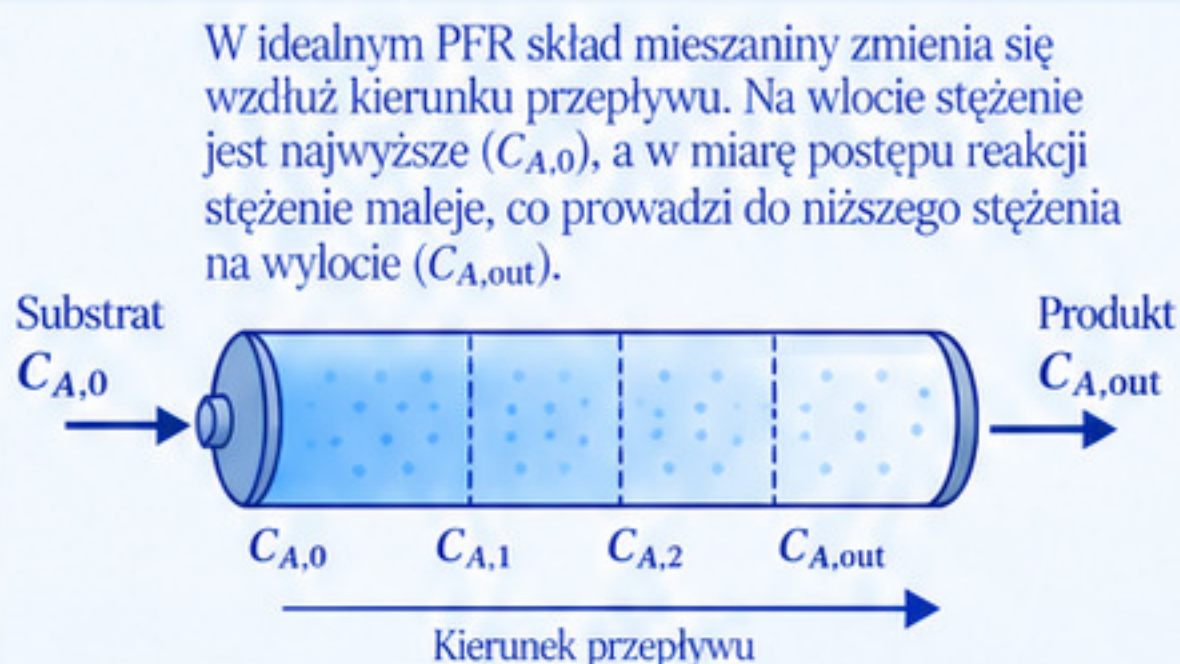
A. W idealnym CSTR skład mieszaniny wewnątrz reaktora jest jednorodny i odpowiada składowi na wyjściu.

CSTR — Continuous Stirred-Tank Reactor

 $C_A = \text{const. przestrzenie}$

W idealnym CSTR zakłada się doskonałe wymieszanie cieczy. Oznacza to, że stężenie składnika w całej objętości reaktora jest jednakowe i równe stężeniu na wylocie, choć nie musi być równe stężeniu na wlocie.

PFR — Plug Flow Reactor



W idealnym PFR skład mieszaniny zmienia się wzdłuż kierunku przepływu. Na wlocie stężenie jest najwyższe ($C_{A,0}$), a w miarę postępu reakcji stężenie maleje, co prowadzi do niższego stężenia na wylocie ($C_{A,out}$).



Porównanie profilu stężenia

CSTR: $C_A \approx$ jednolite w całej objętości

PFR: $C_A =$ funkcja położenia



Dlaczego to ma znaczenie?

Szybkość reakcji często zależy od stężenia składników. Profil stężenia w reaktorze wpływa na wymaganą objętość reaktora oraz na osiągalny stopień konwersji. CSTR i PFR to modele idealne — rzeczywiste reaktory mogą odchodzić od tych założeń.



Typowy błąd

Założenie, że wszystkie reaktory pracujące ciągle zachowują się tak samo. CSTR i PFR różnią się profilem stężenia oraz wpływem na konwersję.



Zapamiętaj

CSTR → doskonałe wymieszanie;

PFR → zmiana składu wzdłuż drogi przepływu.

Czas przebywania w reaktorze

47

Pytanie 47



PYTANIE 47 — Jak długo płyn pozostaje w aparacie?



Średnie

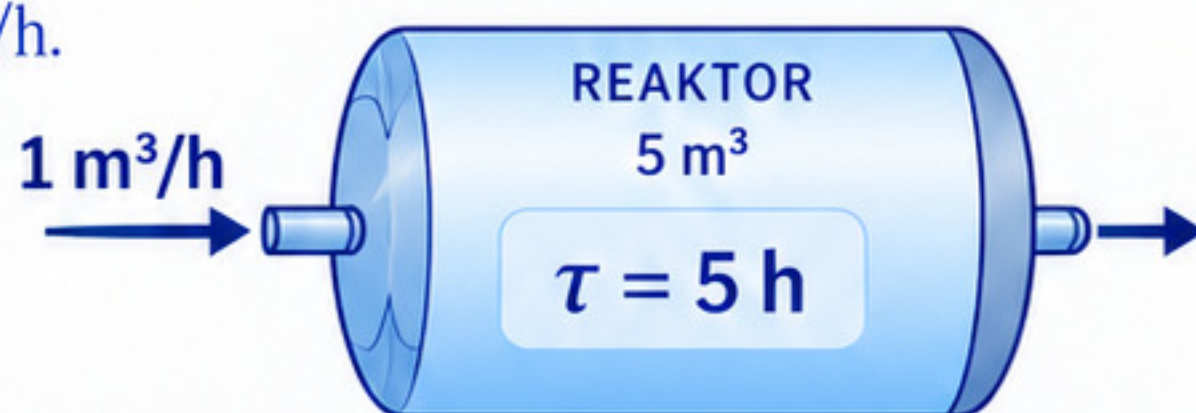
WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

Idealny reaktor ma objętość: $V = 5 \text{ m}^3$.

Przepływ objętościowy cieczy wynosi: $\dot{V} = 1 \text{ m}^3/\text{h}$.

Jaki jest nominalny czas przebywania?

- A 0,2 h
- B 1 h
- C 5 h
- D 6 h



$$V \uparrow \rightarrow \tau \uparrow$$

$$\dot{V} \uparrow \rightarrow \tau \downarrow$$



Prawidłowa odpowiedź:

C. 5 h.

Podstawowa zależność:

Nominalny czas przebywania w idealnym aparacie oblicza się ze wzoru:

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

Po podstawieniu:

$$\tau = 5 \text{ m}^3 / 1 \text{ m}^3/\text{h} = 5 \text{ h}.$$



Co oznacza czas przebywania?

Czas przebywania jest charakterystycznym czasem, przez jaki materiał pozostaje w aparacie. Większa objętość aparatu powoduje większy czas przebywania, a większy przepływ objętościowy — mniejszy czas przebywania.

Przykład:

Jeżeli $\dot{V} = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, to:

$$\tau = 5 \text{ m}^3 / 2,5 \text{ m}^3/\text{h} = 2 \text{ h}.$$



Dlaczego czas przebywania jest ważny?

Wiele reakcji chemicznych wymaga odpowiedniego czasu na zajście. Jeżeli materiał opuszcza aparat zbyt szybko, konwersja może być zbyt niska. Z drugiej strony, zbyt długi czas przebywania może oznaczać większy aparat, wyższy koszt, reakcje uboczne lub degradację produktu.



Nominalny a rzeczywisty czas

Nominalny czas przebywania $\tau = V/\dot{V}$ jest prostą wielkością projektową. W rzeczywistych aparatach rozkłady czasów przebywania mogą być bardziej złożone (zależne od hydrodynamiki i mieszania).



Typowy błąd

Częstym błędem jest mnożenie objętości przez przepływ: $V \cdot \dot{V}$. Sprawdzenie jednostek pokazuje, że poprawnie: $\text{m}^3/(\text{m}^3/\text{h}) = \text{h}$.



Zapamiętaj

$$\tau = V/\dot{V}.$$

Większe $V \rightarrow$ dłużej.

Większe $\dot{V} \rightarrow$ krócej.

Selektywność, wydajność i kompromis procesowy

48

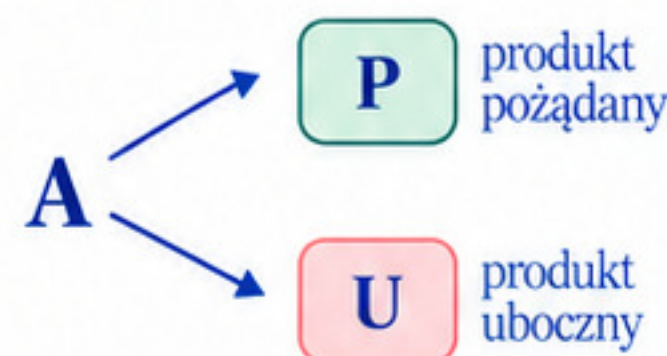
Pytanie 48

PYTANIE 48 — Wysoka konwersja nie wystarcza

● ● ● Trudniejsze

Substrat A może reagować dwiema drogami: $A \rightarrow P$ — produkt pożądany;
 $A \rightarrow U$ — produkt uboczny. W pewnych warunkach niemal całe A zostaje zużyte,
 ale większość przekształca się w U. Które stwierdzenie jest najbardziej poprawne?

- A. Konwersja A może być wysoka, ale selektywność do P jest niska.
- B. Konwersja A musi wynosić zero.
- C. Selektywność do P musi wynosić 100%.
- D. Reakcje uboczne nie mają znaczenia.



Prawidłowa odpowiedź:

A. Konwersja A może być wysoka, ale selektywność do P jest niska.



Trzy różne pytania:

KONWERSJA — jaka część substratu A uległa reakcji?

SELEKTYWNOŚĆ — jaka część przereagowanego A dała produkt P?

WYDAJNOŚĆ — jaka część początkowego A dała produkt P?

Przykład liczbowy (jakościowo):

- 100 mol A na wejściu,
- 95 mol A uległo reakcji,
- 30 mol przekształciło się w P,
- 65 mol przekształciło się w U.

Konwersja jest bardzo wysoka,
 ale produkt pożądany stanowi tylko część
 przereagowanego materiału.

49

Pytanie 49

PYTANIE 49 — Czy najwyższa temperatura jest zawsze najlepsza?

● ● ● Trudniejsze

W procesie: $A \rightarrow P$ przy wyższej temperaturze reakcja główna przebiega szybciej.
 Jednocześnie jeszcze silniej przyspiesza reakcja uboczna: $A \rightarrow U$.
 Co powinien zrobić inżynier?

- A. Zawsze ustawić najwyższą możliwą temperaturę.
- B. Zignorować reakcję uboczną.
- C. Szukać kompromisu pomiędzy szybkością reakcji, selektywnością, energią i bezpieczeństwem.
- D. Założyć, że temperatura nie wpływa na proces.



Prawidłowa odpowiedź:

C. Szukać kompromisu pomiędzy szybkością reakcji, selektywnością, energią i bezpieczeństwem.



Omówienie

Optymalizacja procesu nie polega na maksymalizacji jednego parametru. Wyższa temperatura może przyspieszyć reakcję główną, ale jednocześnie często jeszcze silniej przyspiesza reakcję uboczną, co pogarsza selektywność i może zwiększać zapotrzebowanie na chłodzenie, ciśnienie oraz ryzyko termiczne.

Właściwe pytanie brzmi nie „Jak sprawić, aby reakcja była najszybsza?”, lecz „Przy jakich warunkach cały proces daje najlepszy wynik techniczny, ekonomiczny i bezpieczny?”.



Typowy błąd

Traktowanie maksymalnej konwersji lub maksymalnej szybkości reakcji jako jedynego kryterium optymalizacji.



Zapamiętaj

Dobry proces przemysłowy równoważy konwersję, selektywność, wydajność, energię, bezpieczeństwo i koszt.

50

Myślenie jak inżynier procesu



Pytanie 50

PYTANIE 50 — Zadanie integracyjne

Integracyjne

WIEDZA
OBLICZENIA
PRAKTYKA
LEPSZE
WYNIKI

W egzotermicznym reaktorze ciągłym zachodzi reakcja: $A \rightarrow P$.
Operator zauważa jednocześnie:

- wzrost temperatury reaktora,
- wzrost szybkości reakcji,
- dalszy samoczynny wzrost temperatury,
- coraz większe zapotrzebowanie na chłodzenie.

Która interpretacja jest najbardziej właściwa?

- Wzrost temperatury nie może wpływać na szybkość reakcji.
- Może występować dodatnie sprzężenie między temperaturą a szybkością reakcji i należy ocenić bezpieczeństwo cieplne procesu.
- Należy natychmiast zwiększyć temperaturę bez analizy.
- Bilans energii nie ma znaczenia w reaktorze chemicznym.



Prawidłowa odpowiedź:

B. Może występować dodatnie sprzężenie między temperaturą a szybkością reakcji i należy ocenić bezpieczeństwo cieplne procesu.

1

Reakcja jest egzotermiczna

Większa szybkość reakcji oznacza większe wydzielanie ciepła.

2

Temperatura rośnie

Z równania Arrheniusa wynika, że $T \uparrow \rightarrow k \uparrow$, a więc szybkość reakcji może wzrastać.

3

Szybsza reakcja wydziela więcej ciepła

$T \uparrow \rightarrow k \uparrow \rightarrow r \uparrow \rightarrow$ wydzielanie ciepła $\uparrow \rightarrow T \uparrow$.
To jest **dodatnie sprzężenie termiczne**.

4

System chłodzenia staje się krytyczny

Bezpieczna praca wymaga, aby wydajność odprowadzania ciepła była dopasowana do ilości generowanego ciepła.



Wniosek

Kinetyki nie można analizować oddzielnie od bilansu energii. W rzeczywistym reaktorze należy jednocześnie rozumieć bilans masy, szybkość reakcji, bilans energii, przenoszenie ciepła, sterowanie procesem i bezpieczeństwo.



Typowy błąd

Temperatura to nie tylko parametr wydajności procesu. W reakcjach egzotermicznych jest także kluczowym parametrem bezpieczeństwa.



Zapamiętaj

**REAKTOR PRZEMYSŁOWY =
BILANS MASY + KINETYKA +
BILANS ENERGII + TRANSPORT +
BEZPIECZEŃSTWO.**



Końcowa samoocena

50 pytań za Tobą. Co naprawdę już potrafisz?



Bilanse i podstawy

- ☐ Prosty bilans ogólny.
- ☐ Bilans składnika.
- ☐ Stan ustalony i akumulacja.
- ☐ Mieszanie i recyrkulacja.
- ☐ Podstawowy bilans energii.



Przepływ i właściwości płynów

- ☐ Ciśnienie absolutne i manometryczne.
- ☐ Gęstość i lepkość.
- ☐ Liczba Reynoldsa.
- ☐ Straty ciśnienia.
- ☐ Rola pompy i równanie Bernoulliego.



Wymiana ciepła

- ☐ Przewodzenie, konwekcja, promieniowanie.
- ☐ Ciepło jawne i utajone.
- ☐ Działanie wymiennika ciepła.
- ☐ Znaczenie współczynnika U.
- ☐ Zabrudzenia obniżają sprawność.



Wymiana masy i separacje

- ☐ Dyfuzja.
- ☐ Siła napędowa procesu.
- ☐ Destylacja.
- ☐ Absorpcja, adsorpcja, ekstrakcja.
- ☐ Dobór metody separacji do właściwości mieszaniny.



Kinetyka i reaktory

- ☐ Szybkość reakcji.
- ☐ Rząd reakcji.
- ☐ Wpływ temperatury (Arrhenius).
- ☐ Stopień konwersji.
- ☐ CSTR vs PFR.
- ☐ Czas przebywania.
- ☐ Konwersja, selektywność, wydajność.
- ☐ Rola bilansu energii w reaktorze egzotermicznym.



Twój wynik

24–28 Bardzo dobrze. Masz solidne podstawy i potrafisz łączyć wiele zagadnień.

18–23 Dobra baza. Warto wrócić do kilku tematów, zanim przejdziesz do trudniejszych zadań.

12–17 Potrzebna kolejna powtórka. Skorzystaj ponownie z modułów odpowiadających niezaznaczonym obszarom.

0–11 Wróć do fundamentów. Przejdź ponownie przez pytania bez pośpiechu i skup się na rozumieniu toku rozwiązania.



Ostatnia zasada

Nie zapamiętuj wzorów bez kontekstu. Zanim zaczniesz rozwiązywać kolejne zadania, zadaj sobie pięć pytań:

1. Co wpływa do układu?
2. Co z niego wypływa?
3. Co dzieje się wewnątrz?
4. Jaka jest siła napędowa procesu?
5. Czy wynik ma sens fizyczny?

Nie chodzi o to, aby znać odpowiedź na 50 pytań.

Chodzi o to, aby nauczyć się rozumować tak, by poradzić sobie z pięćdziesięcioma kolejnymi.

SUROWCE



PRZEPŁYW



WYMIANA CIEPŁA I MASY



REAKCJA



SEPARACJA