

Wizualny Atlas Inżynierii Chemicznej

69 kart wizualnych, które pomagają
szybciej rozumieć procesy, wzory i urządzenia

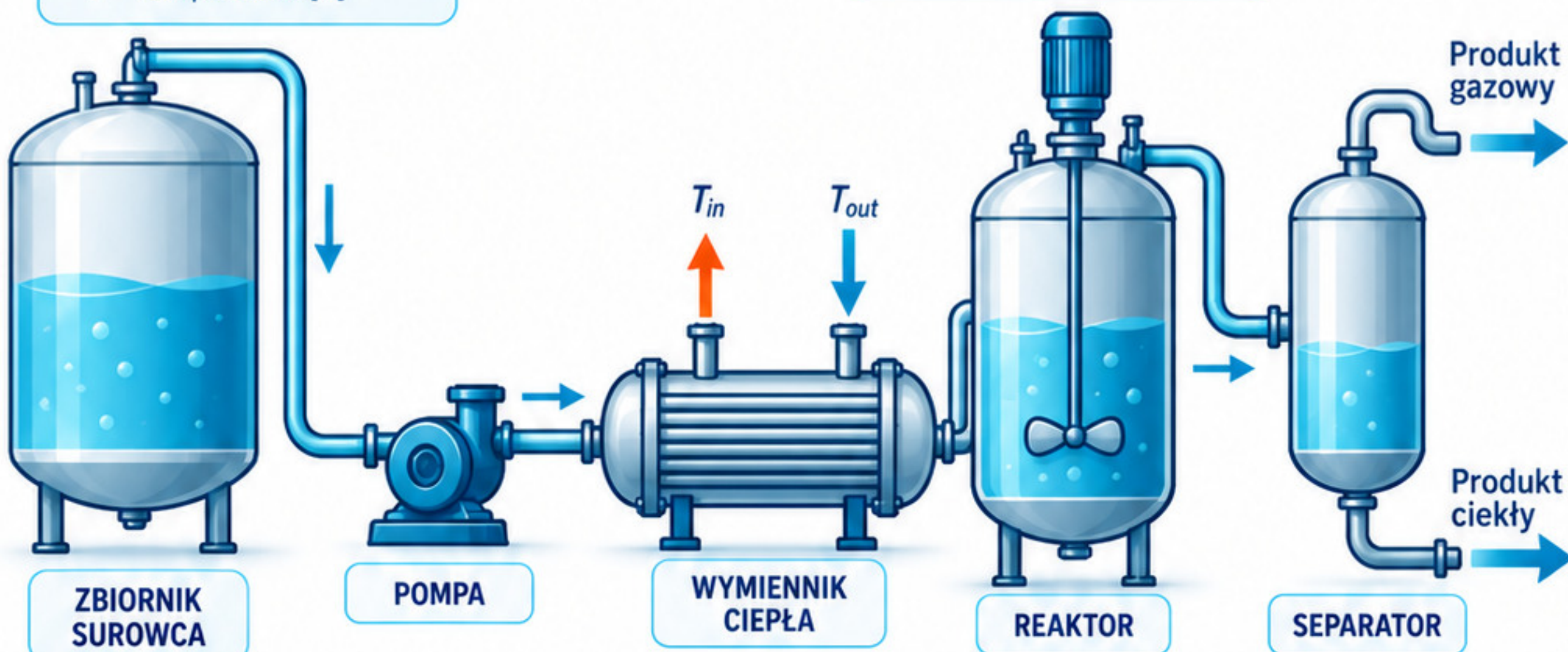
$$pV = nRT$$

p – ciśnienie [Pa]
 V – objętość [m^3]
 n – ilość substancji [mol]
 R – stała gazowa
 T – temperatura [K]



$$Q = UA\Delta T$$

Q – strumień ciepła [W]
 U – współczynnik [$W/(m^2 \cdot K)$]
 A – powierzchnia [m^2]
 ΔT – różnica temperatur [K]



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

$\dot{m}$ – strumień masy [kg/s]
 ρ – gęstość [kg/m^3]
 Q – strumień objętości [m^3/s]

PROCESY
URZĄDZENIA
WZORY
JEDNOSTKI
SCHEMATY

$$r = kC^n$$

r – szybkość reakcji [$mol/(m^3 \cdot s)$]
 k – stała szybkości reakcji
 C – stężenie [mol/m^3]
 n – rząd reakcji



7 modułów



PDF do nauki
i szybkich powtórek



wygodny na telefonie,
tablecie i w druku

PRAWA AUTORSKIE I INFORMACJA EDUKACYJNA

Ten atlas został przygotowany jako materiał pomocniczy do nauki inżynierii chemicznej.

PRAWA AUTORSKIE



Wszelkie prawa zastrzeżone.
Żadna część publikacji nie może być
kopiowana ani rozpowszechniana
bez zgody właściciela praw.

CHARAKTER MATERIAŁU



Materiał ma charakter edukacyjny
i służy do nauki, powtórek oraz
porządkowania pojęć z zakresu
inżynierii chemicznej.

JAK CZYTAĆ ZAPIS TECHNICZNY



W atlasie stosowane są jednostki SI,
spójna notacja techniczna oraz
standardowe oznaczenia używane
w naukach inżynierskich.

UWAGA NAUKOWA



Przed wykorzystaniem wzorów
w zadaniach i projektach zawsze
sprawdź założenia, zakres
stosowalności i jednostki.

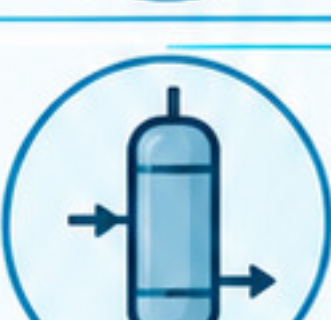
UKŁAD ATLASU



Publikacja zawiera 69 kart wizualnych
pogrupowanych w 7 modułach
tematycznych.

SPIIS TREŚCI

Atlas został podzielony na moduły, aby ułatwić szybkie odnajdywanie tematów.

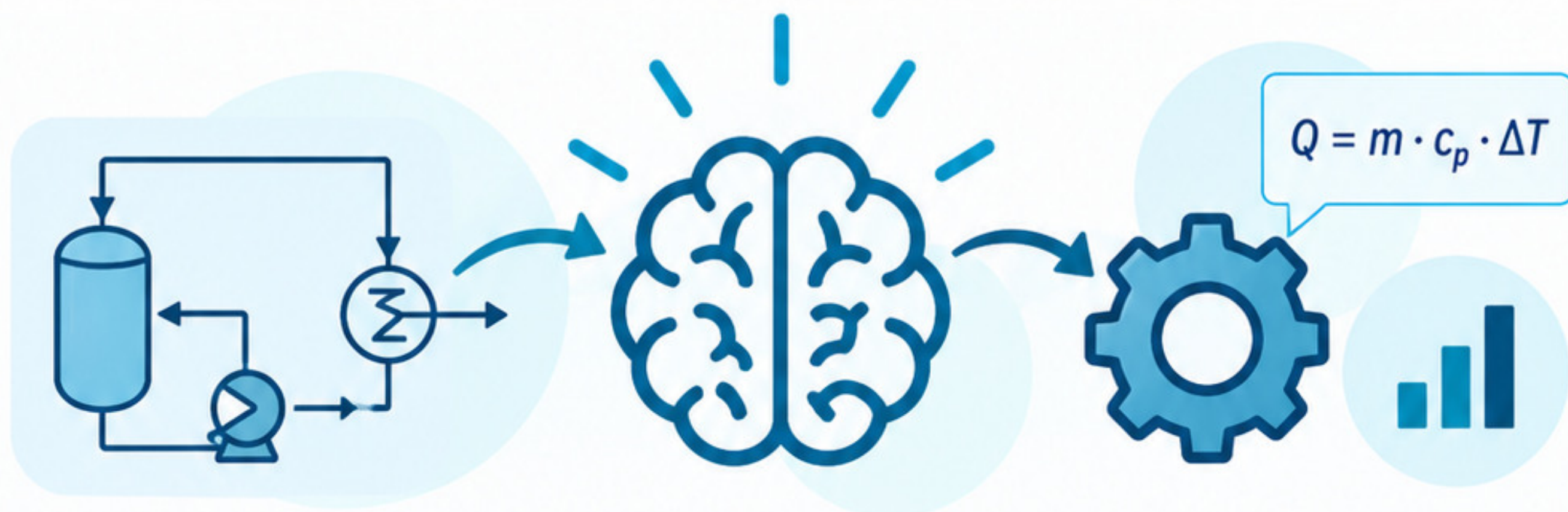
01		Moduł 01 Fundamenty Inżynierii Chemicznej	strony 04–14
02		Moduł 02 Bilanse Masy i Energii	strony 15–25
03		Moduł 03 Termodynamika	strony 26–36
04		Moduł 04 Mechanika Płynów	strony 37–47
05		Moduł 05 Wymiana Ciepła i Masy	strony 48–58
06		Moduł 06 Operacje Jednostkowe i Inżynieria Reakcji	strony 59–69
07		Moduł 07 Procesy Przemysłowe, Sterowanie i Bezpieczeństwo	strony 70–79



Łącznie:

80 stron • 69 kart wizualnych

Najpierw zbuduj obraz procesu — wzory łatwiej zapamiętasz, gdy wiesz, co fizycznie opisują.



1

**Zobacz**

Spójrz na rysunek procesu i elementy aparatury.

2

**Zrozum różnicę**

Poznaj, czym różnią się wielkości, jednostki i zjawiska.

3

**Twórz skojarzenia**

Połącz wzory z intuicją fizyczną i przykładami z rzeczywistych procesów.

4

**Powtarzaj szybko**

Wróć do kart i utrwal wiedzę dzięki krótkim, uporządkowanym podsumowaniom.



Każda karta łączy rysunek, pojęcie, wzór i praktyczny sens inżynierski.

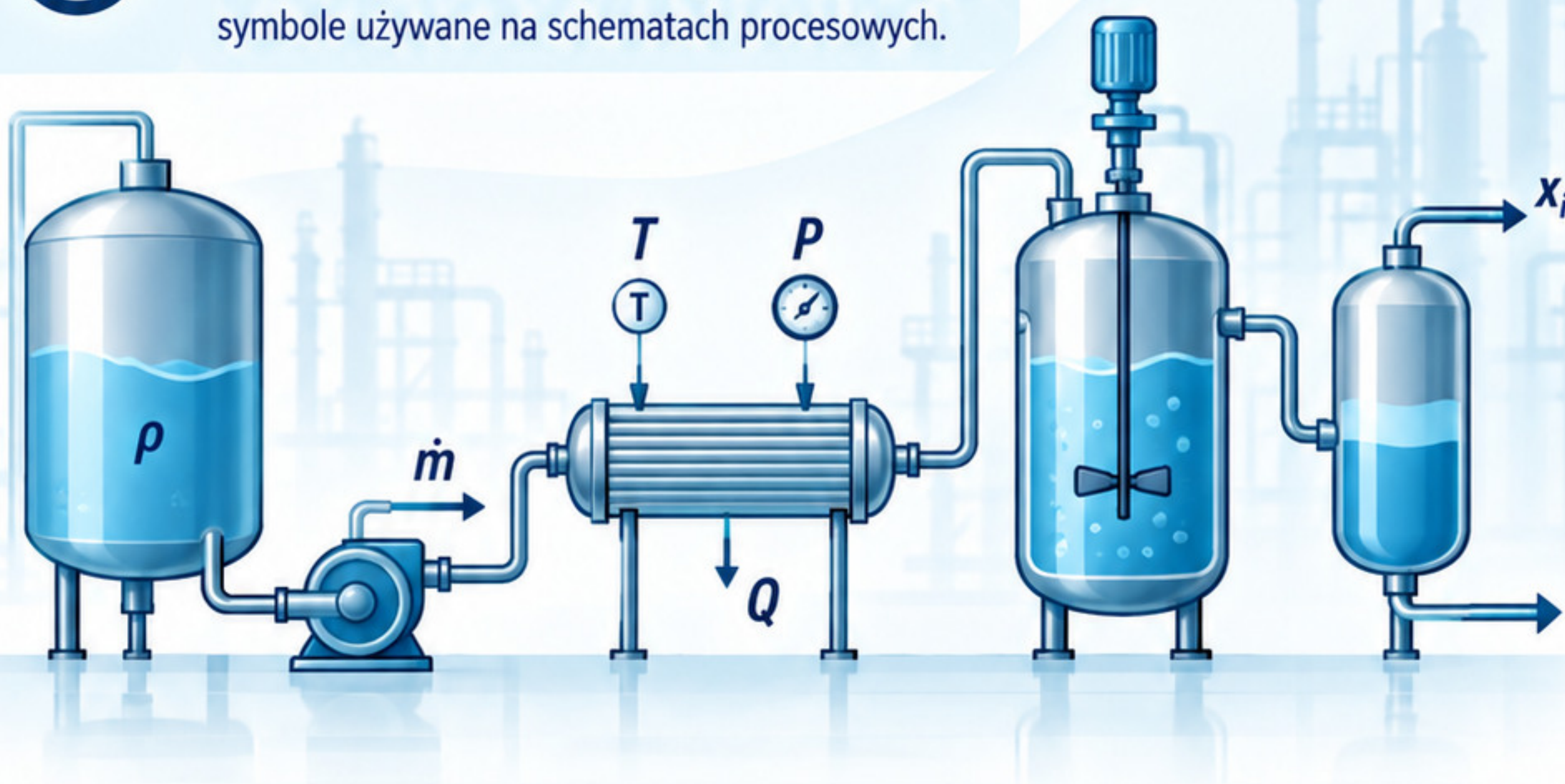
MODUŁ 01

FUNDAMENTY INŻYNIERII CHEMICZNEJ

Najpierw naucz się języka, którym opisuje się każdy proces.



Po tym module będziesz potrafić rozpoznawać podstawowe wielkości, jednostki, skład mieszanin, właściwości płynów i najważniejsze symbole używane na schematach procesowych.



JEDNOSTKI



WYMIARY



MOL



ZMIENNE



SCHEMAT
PROCESU



PŁYNY



GAZY



CIŚNIENIE



SKŁAD

Poprawne jednostki są pierwszym testem poprawności obliczeń inżynierskich.

PODSTAWOWE JEDNOSTKI

Jednostki podstawowe SI to wspólny język opisu wielkości fizycznych.



Masa

kg



Długość

m



Czas

s



Temperatura

K



Ilość substancji

mol

JEDNOSTKI POCHODNE

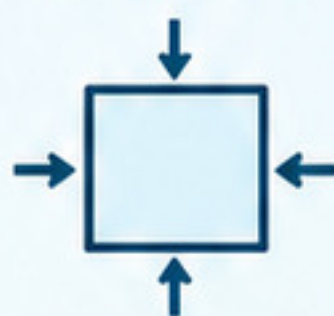
Jednostki pochodne powstają z jednostek podstawowych zgodnie z prawami fizyki.

Siła:



$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Ciśnienie:



$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Energia:



$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Moc:



$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

PRZEDROSTKI

Przedrostki dziesiętne ułatwiają zapis bardzo dużych i małych wartości.

kilo

$$k = 10^3$$

mega

$$M = 10^6$$

mili

$$m = 10^{-3}$$

mikro

$$\mu = 10^{-6}$$



Przykład:

$$250 \text{ kPa} = 250\,000 \text{ Pa}$$

TYPOWY BŁĄD



Nie myl symbolu m oznaczającego metr z przedrostkiem mili. Znaczenie wynika z zapisu jednostki.

Przykłady:

m (metr) → 1 m = 1 metr

mm (milimetr) → 1 mm = 10^{-3} m

Każde poprawne równanie fizyczne musi być jednorodne wymiarowo.

PODSTAWOWE WYMIARY

Podstawowe wymiary układu SI stanowią bazę do opisu wielkości fizycznych.



M — masa



L — długość



T — czas



θ — temperatura

WAŻNE ZALEŻNOŚCI

Ważne wielkości pochodne można wyrazić za pomocą wymiarów podstawowych.

Prędkość



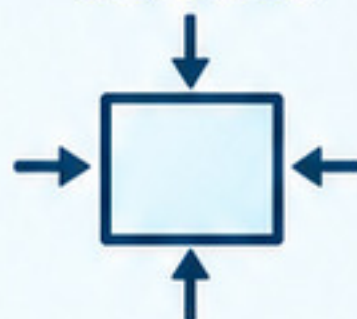
$$[v] = L \cdot T^{-1}$$

Siła



$$[F] = M \cdot L \cdot T^{-2}$$

Ciśnienie



$$[P] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$$

Gęstość



$$[\rho] = M \cdot L^{-3}$$

WERYFIKACJA WYMIAROWA

Sprawdźmy zgodność wymiarową przykładowego równania.

$$\Delta P \sim \rho v^2$$

$$[M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}] = [M \cdot L^{-3}][L^2 \cdot T^{-2}]$$



ZGADZA SIĘ ✓

DO CZEGO SŁUŻY?

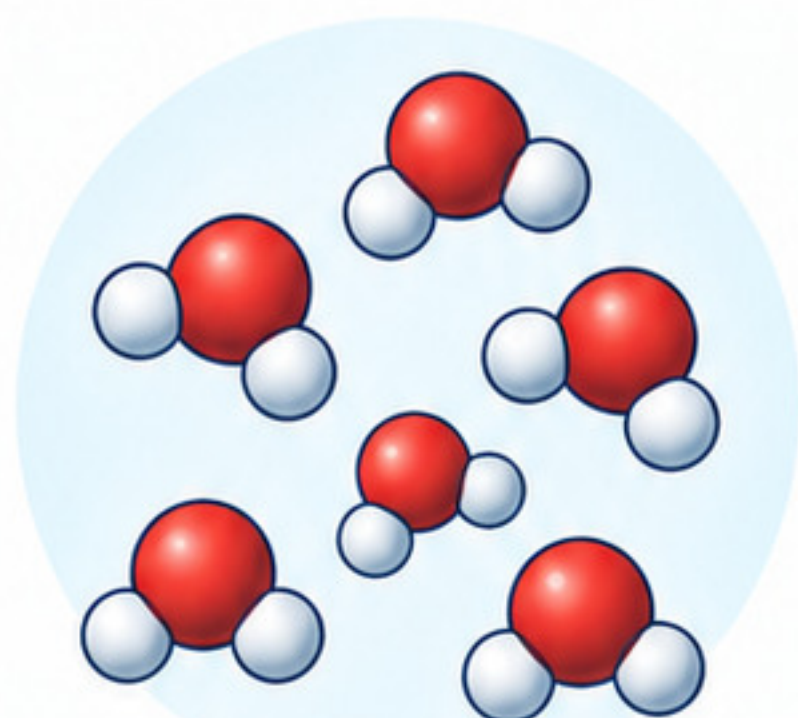
- sprawdzanie równań
- kontrola jednostek
- budowanie grup bezwymiarowych
- wykrywanie błędów przed rozpoczęciem obliczeń

PAMIĘTAJ



Dodawać i odejmować można tylko wielkości o tych samych wymiarach.

Mol łączy liczbę cząsteczek z masą, którą możemy zmierzyć.



$6,02 \times 10^{23}$ cząsteczek
(1 mol H_2O)

Cząsteczki (ilość substancji)



$$n = \frac{m}{M}$$

n — ilość substancji [mol]

m — masa [g lub kg]

M — masa molowa [g/mol lub kg/kmol]



Masa (wielkość mierzalna)

PRZYKŁAD

$$18 \text{ g } \text{H}_2\text{O} \div 18 \text{ g/mol} = 1 \text{ mol } \text{H}_2\text{O}$$

UŁAMEK MOŁOWY

$$x_i = \frac{n_i}{n_{\text{tot}}}$$

$$\sum x_i = 1$$

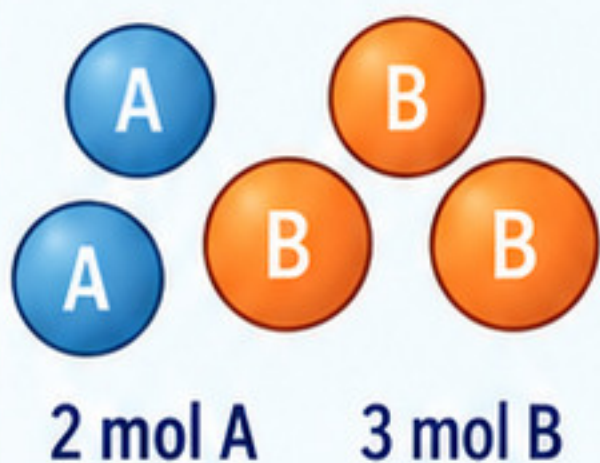
UŁAMEK MASOWY

$$w_i = \frac{m_i}{m_{\text{tot}}}$$

$$\sum w_i = 1$$

PRZYKŁAD: MIESZANINA

Mieszanina zawiera 2 mol A i 3 mol B.



$$x_A = \frac{2}{5} = 0,40$$

$$x_B = \frac{3}{5} = 0,60$$

UWAGA

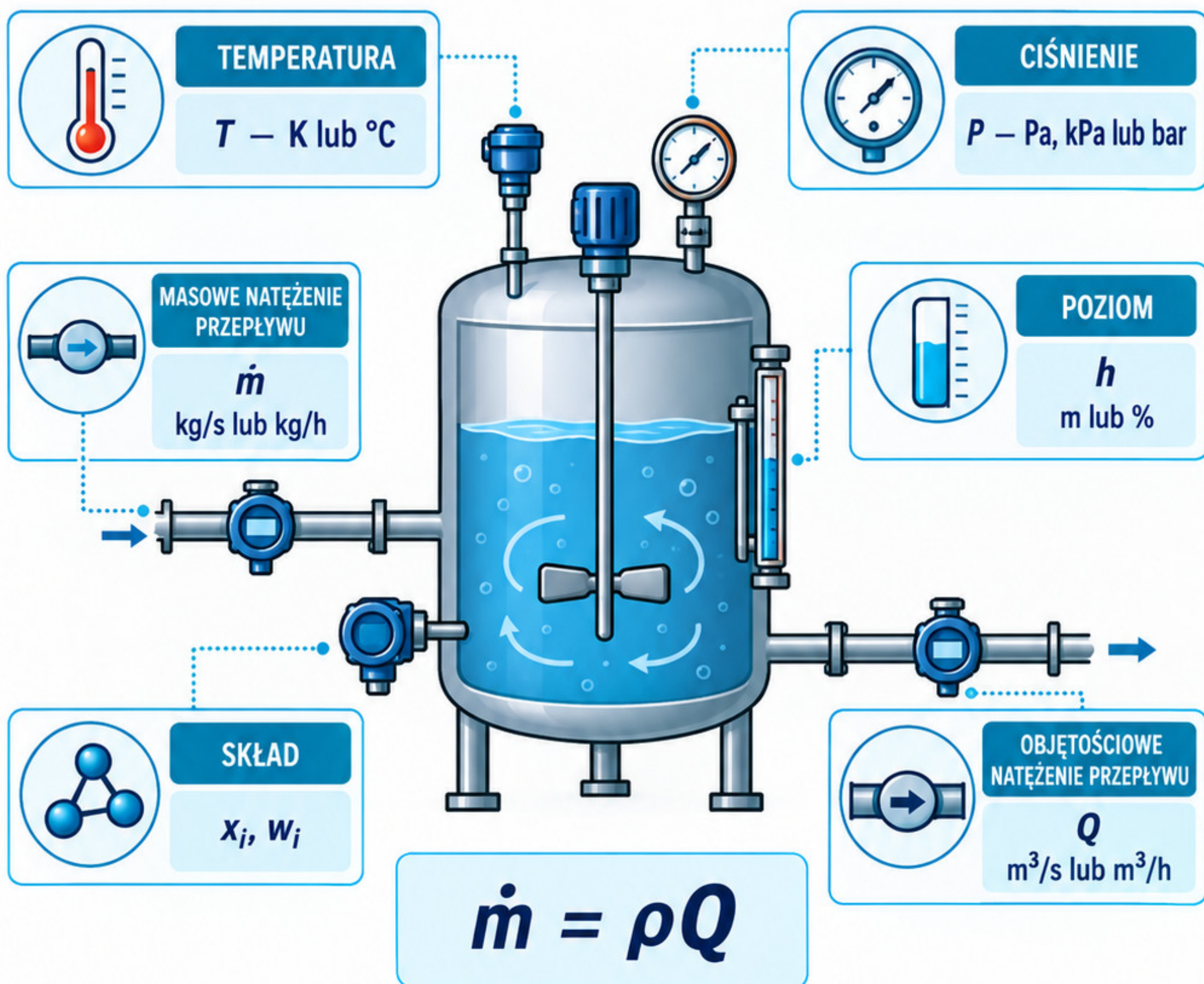


**Ułamek molowy i ułamek masowy
nie są tym samym.**

Przeliczenie wymaga znajomości
mas molowych składników.

KARTA 04 — ZMIENNE PROCESOWE

Zmienne procesowe opisują aktualny stan i działanie instalacji.



ZMIENNE INTENSYWNE

Nie zależą od ilości substancji:

$T, P, \rho, \text{skład}$

ZMIENNE EKSTENSYWNE

Zależą od ilości substancji:

$m, V, \text{energia}$

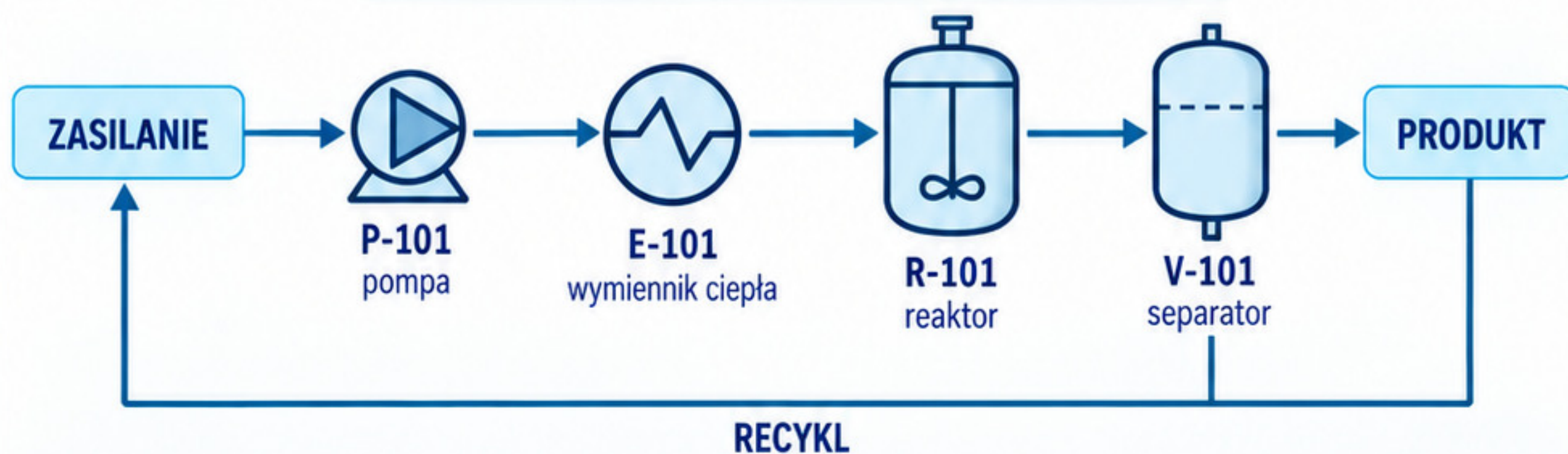
W PRAKTYCE



Czujnik mierzy zmienną, a układ regulacji wykorzystuje pomiar do utrzymania procesu blisko wartości zadanej.

Schemat procesu pokazuje nie tylko urządzenia — pokazuje również drogę materii i informacji.

PRZYKŁADOWY SCHEMAT PROCESU (PFD)

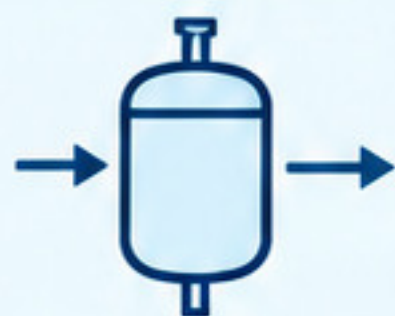


JAK CZYTAĆ SCHEMAT?

- Znajdź kierunek przepływu.
- Rozpoznaj główne urządzenia.
- Zidentyfikuj strumienie zasilania, produktu i recyklu.
- Sprawdź oznaczenia temperatury, ciśnienia i przepływu.
- Dopiero potem zapisuj bilanse.

PFD I P&ID — PORÓWNANIE

PFD — Process Flow Diagram



Pokazuje główną logikę procesu, najważniejsze urządzenia i strumienie.

P&ID — Piping & Instrumentation Diagram



Pokazuje znacznie więcej szczegółów: rurociągi, zawory, aparaturę pomiarową i pętle regulacji.

NAJCZĘŚCIEJ SPOTYKANE SYMBOLE



pompa



wymiennik



reaktor



zawór



manometr



przepływomierz

WAŻNE



Nie próbuj interpretować każdego symbolu od razu. Najpierw zrozum, co wpływa, co wypływa i co dzieje się pomiędzy.



Do PFD wrócimy przy bilansach, operacjach jednostkowych i sterowaniu procesem.

Gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe decydują o tym, jak płyn zachowuje się w instalacji.

GĘSTOŚĆ

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ — gęstość [kg/m³]

m — masa [kg]

V — objętość [m³]



Duża gęstość
(ta sama objętość)



Mała gęstość
(ta sama objętość)

Większa gęstość oznacza większą masę w tej samej objętości.

woda $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$

powietrze $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$

Wartości zależą od temperatury i ciśnienia.

LEPKOŚĆ

Lepkość dynamiczna

$$\mu \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

Lepkość kinematyczna

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ [m}^2\text{/s]}$$



Mała lepkość
(np. woda)



Duża lepkość
(np. olej)

mała lepkość → płyn łatwo się odkształca

duża lepkość → większy opór przepływu

NAPIĘCIE POWIERZCHNIOWE

$$\sigma \text{ [N/m]}$$



Napięcie powierzchniowe jest szczególnie ważne przy tworzeniu kropli, pęcherzyków i zwilżaniu powierzchni.

CO WPŁYWA NA CO?

ρ

masa strumienia
i ciśnienie
hydrostatyczne



μ

opory przepływu
i liczba Reynoldsa



σ

krople, pęcherzyki
i zwilżanie

ZAPAMIĘTAJ



Gęstość mówi „ile masy mieści się w objętości”, a lepkość mówi „jak trudno płynowi płynąć”.

KARTA 07 — GAZ DOSKONAŁY

Model gazu doskonałego łączy ciśnienie, objętość, temperaturę i ilość substancji w jednym równaniu.



P — ciśnienie
[Pa]



V — objętość
[m³]

$$PV = nRT$$

R — uniwersalna stała gazowa
 $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



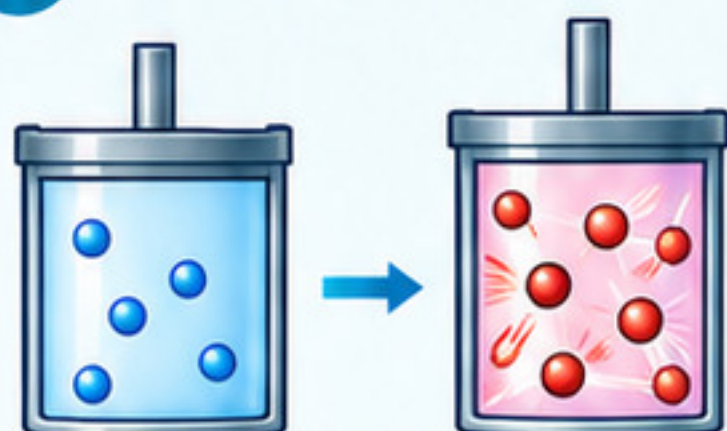
n — liczba moli
[mol]



T — temperatura
[K]

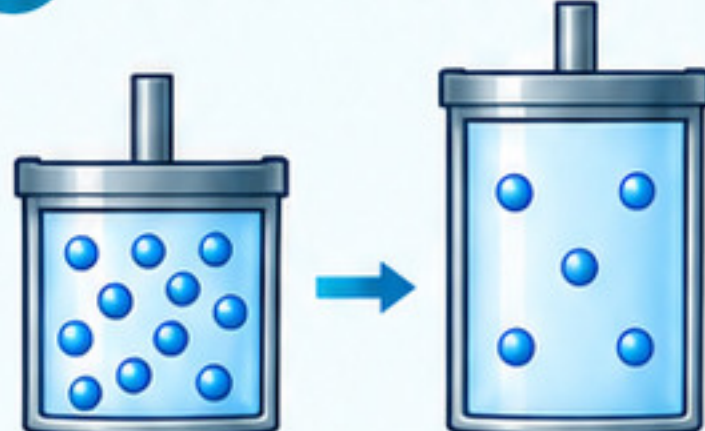
CO MÓWI RÓWNANIE?

1 $T \uparrow$ przy stałym $V \rightarrow P \uparrow$



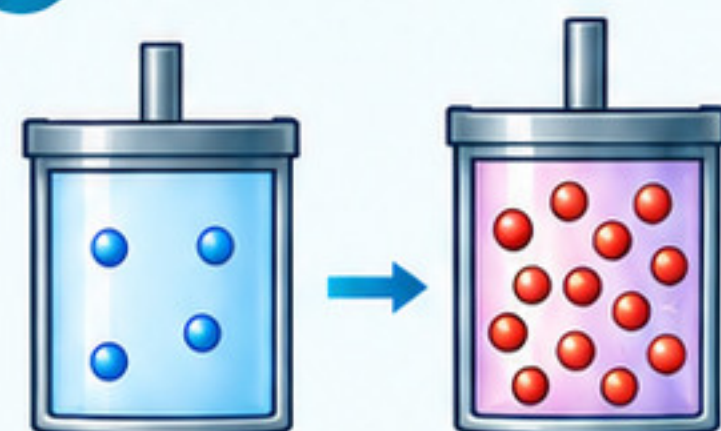
Niższa temperatura
(mniejsza energia cząsteczek) Wyższa temperatura
(więcej i silniejsze zderzenia)

2 $V \uparrow$ przy stałym $T \rightarrow P \downarrow$



Mniejsza objętość
(wyższe ciśnienie) Większa objętość
(niższe ciśnienie)

3 $n \uparrow$ przy stałych T i $V \rightarrow P \uparrow$



Mniejsza liczba moli
(mniej cząsteczek) Większa liczba moli
(więcej cząsteczek)

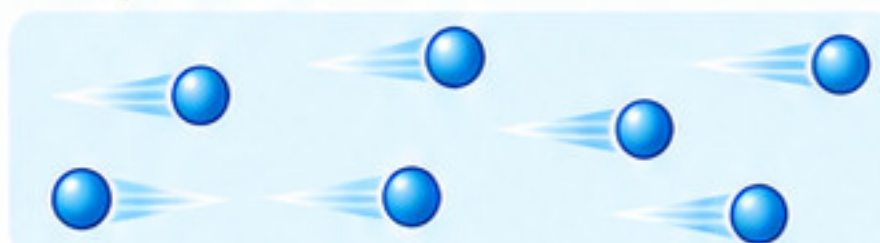
NA 1 MOL

$$PV_m = RT$$

V_m — objętość molowa
[m³/mol]

KIEDY MODEL DZIAŁA DOBRZE?

- przy niskim lub umiarkowanym ciśnieniu
- gdy temperatura jest dostatecznie wysoka
- gdy oddziaływania międzycząsteczkowe są niewielkie



Cząsteczki są daleko od siebie.

TYPOWY BŁĄD



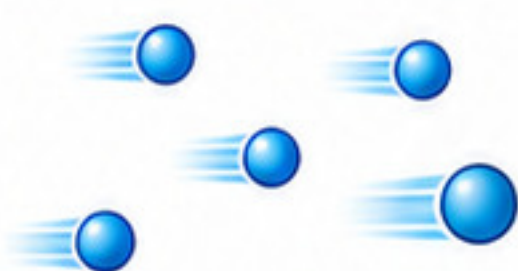
Temperaturę w równaniu gazu doskonałego należy stosować w kelwinach, nie w °C.

Przykład:

$$25^\circ\text{C} = 298,15 \text{ K}$$

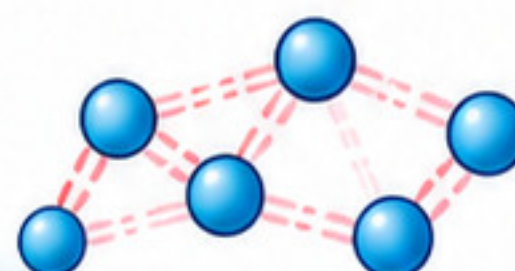
PORÓWNANIE MODELI GAZU

GAZ DOSKONAŁY



- cząsteczki traktujemy jak punkty
- brak istotnych oddziaływań między cząsteczkami

GAZ RZECZYWISTY



- cząsteczki mają własną objętość
- występują siły międzycząsteczkowe



→ Następną kartą: współczynnik ściśliwości Z

Im większe odchylenie od zachowania idealnego, tym ważniejsza staje się korekta współczynnikiem Z .

PODSTAWOWE RÓWNANIA

$$PV = ZnRT$$

$$Z = \frac{PV}{nRT}$$

P — ciśnienie [Pa]
 V — objętość [m³]
 n — liczba moli [mol]
 R — uniwersalna stała gazowa
 (8,314 J·mol⁻¹·K⁻¹)
 T — temperatura [K]
 Z — współczynnik ściśliwości [-]

UPROSZCZONA INTERPRETACJA FIZYCZNA

Wartość współczynnika Z informuje o kierunku i sile odchylenia od zachowania gazu idealnego.



WPŁYW CIŚNIENIA NA ZACHOWANIE GAZU

Wraz ze wzrostem ciśnienia rosną odchylenia od modelu gazu idealnego.

NISKIE CIŚNIENIE



$$Z \approx 1$$

cząsteczki daleko od siebie

WZROST CIŚNIENIA



cząsteczki bliżej siebie

DUŻE ODCHYLENIE OD IDEALNOŚCI



$$Z \neq 1$$

silne oddziaływania i zauważalna objętość cząsteczek

KIEDY UWAŻAĆ?

Odchylenia od modelu idealnego rosną zwykle przy:



wysokim ciśnieniu



niskiej temperaturze



warunkach bliskich kondensacji

JAK UŻYWAĆ Z ?

P , T , skład gazu



określ właściwości krytyczne lub użyj równania stanu



wyznacz Z



zastosuj
 $PV = ZnRT$

WAŻNE

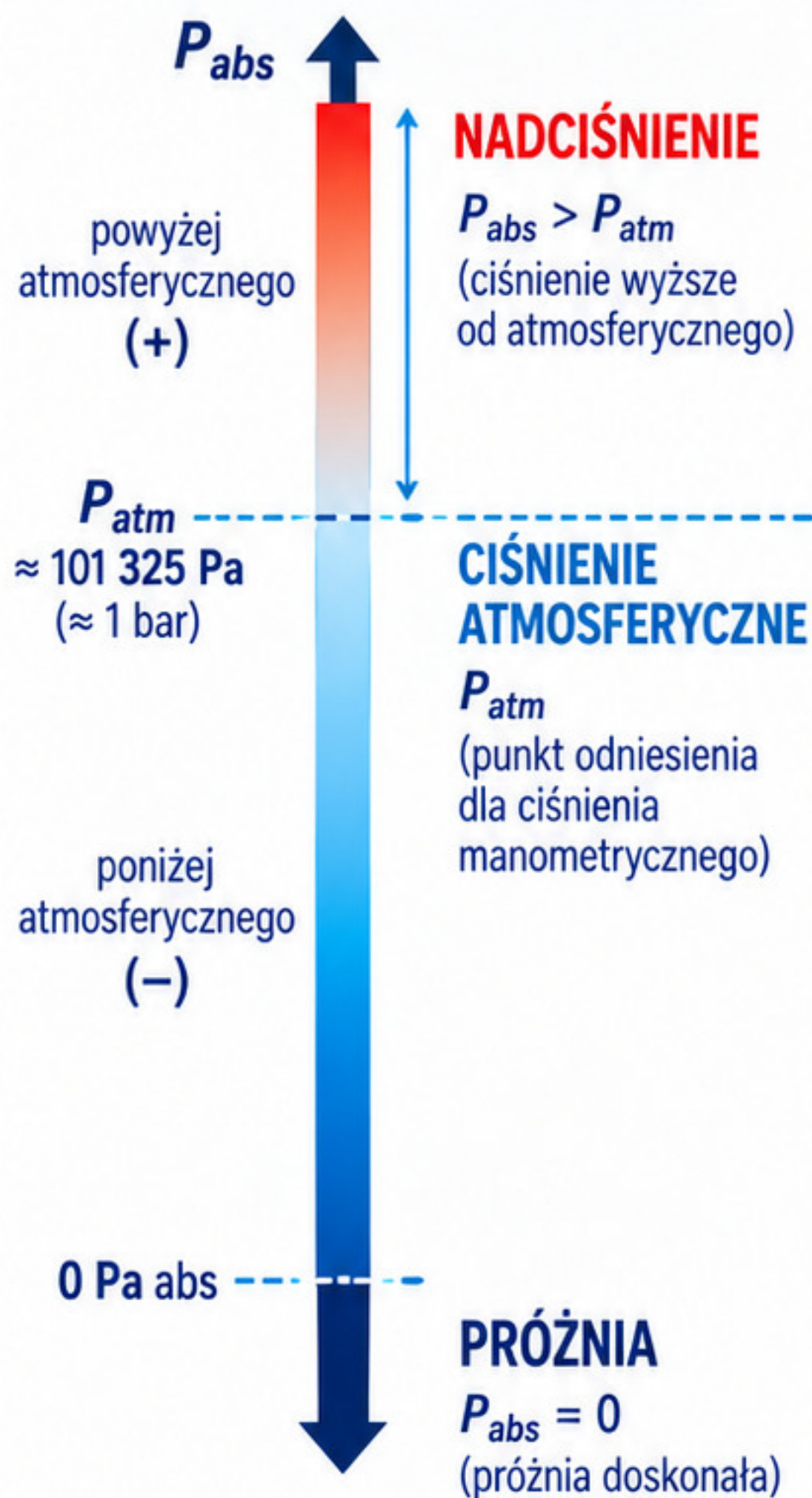


Z nie jest stałą gazu. Zależy od rodzaju substancji oraz warunków P i T .

W dokładnych obliczeniach przemysłowych zamiast prostego współczynnika Z często stosuje się równania stanu, np. Peng–Robinson.

To samo wskazanie ciśnienia może oznaczać coś innego w zależności od punktu odniesienia.

SKALA CIŚNIENIA



PODSTAWOWA ZALEŻNOŚĆ

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{gauge}$$

P_{abs} — ciśnienie absolutne

P_{gauge} — ciśnienie manometryczne

P_{atm} — ciśnienie atmosferyczne

RODZAJE CIŚNIENIA

CIŚNIENIE ABSOLUTNE

Punkt odniesienia: idealna próżnia.



Zawsze $P_{abs} \geq 0$.

CIŚNIENIE MANOMETRYCZNE

Punkt odniesienia: lokalne ciśnienie atmosferyczne.



0 bar(g)
(otwarty do atmosfery)

Wskazuje różnicę względem P_{atm} .

PRÓŻNIA

Występuje, gdy ciśnienie absolutne jest niższe od atmosferycznego.



$P_{abs} < P_{atm}$
(ciśnienie ujemne względem atmosfery)

PRZYKŁAD

Manometr wskazuje 2 bar(g).



$$P_{atm} \approx 1\text{ bar}$$

$$\downarrow$$

$$P_{abs} \approx 3\text{ bar(a)}$$

W dokładnych obliczeniach należy używać rzeczywistego ciśnienia atmosferycznego.

PORÓWNANIE

$$2\text{ bar(a)} \neq 2\text{ bar(g)}$$

To różne wartości i nie są zamienne.

TYPOWY BŁĄD



W równaniach gazowych i termodynamicznych zwykle należy stosować ciśnienie absolutne.

Skład mieszaniny można opisać na kilka sposobów — przed obliczeniem sprawdź, której definicji używasz.



- A – składnik A
- B – składnik B

UŁAMEK MOŁOWY

$$x_i = \frac{n_i}{n_{\text{tot}}} \quad \sum_i x_i = 1$$

Porównuje liczbę moli składnika z całkowitą liczbą moli.

UŁAMEK MASOWY

$$w_i = \frac{m_i}{m_{\text{tot}}} \quad \sum_i w_i = 1$$

Porównuje masę składnika z masą całej mieszaniny.

STĘŻENIE MOŁOWE

$$c_i = \frac{n_i}{V}$$

jednostka typowa: **mol/m³**

Mówi, ile moli składnika znajduje się w jednostce objętości mieszaniny.

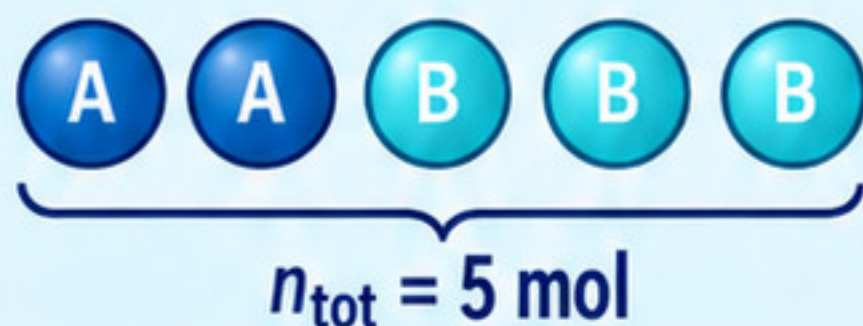
STĘŻENIE MASOWE

$$c_{m,i} = \frac{m_i}{V}$$

jednostka typowa: **kg/m³**

PRZYKŁAD: SKŁAD MIESZANINY

2 mol A + 3 mol B



$$x_A = \frac{2}{5} = 0,40$$

$$x_B = \frac{3}{5} = 0,60$$

UWAGA NA PROCENTY

$$40\% = 0,40$$

40% mol $\neq$ 40% mas.,
jeśli składniki mają różne masy molowe.

TYPY PROCENTÓW

% mol



oparty na molach

% mas.



oparty na masie

% obj.



oparty na objętości

ZAPAMIĘTAJ



Zawsze zapisuj podstawę składu: molową, masową lub objętościową. Sam symbol „%” nie wystarcza.



Skład strumieni stanie się kluczowy w bilansach masy.

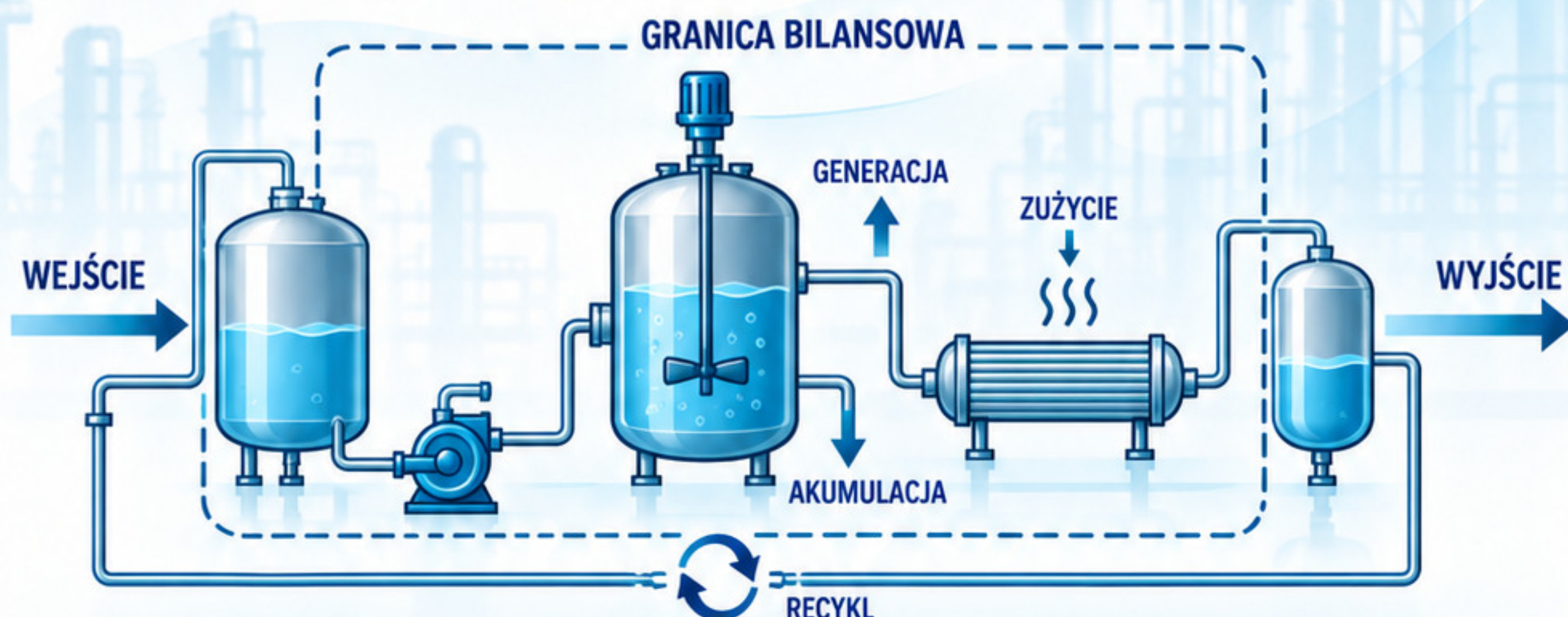
MODUŁ 02

BILANSE MASY I ENERGII

To, co wpływa, wypływa, powstaje i gromadzi się, można opisać jednym sposobem myślenia.



Po tym module będziesz potrafić budować podstawowe bilanse masy i energii, analizować strumienie procesowe oraz rozpoznawać wpływ reakcji, recyklu, akumulacji i wymiany energii na cały układ.



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

strumień
wchodzący

strumień
wychodzący

powstawanie
w układzie

zużycie
w układzie

gromadzenie
w czasie



GRANICA
UKŁADU



BILANS
CAŁKOWITY



BILANS
SKŁADNIKA



REAKCJA



RECYKL



ENERGIA



POŁĄCZONY
BILANS

Masa nie znika i nie pojawia się znikąd. Możemy jedynie śledzić, gdzie wchodzi, wychodzi i się gromadzi.

RÓWNANIE BILANSU MASY

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

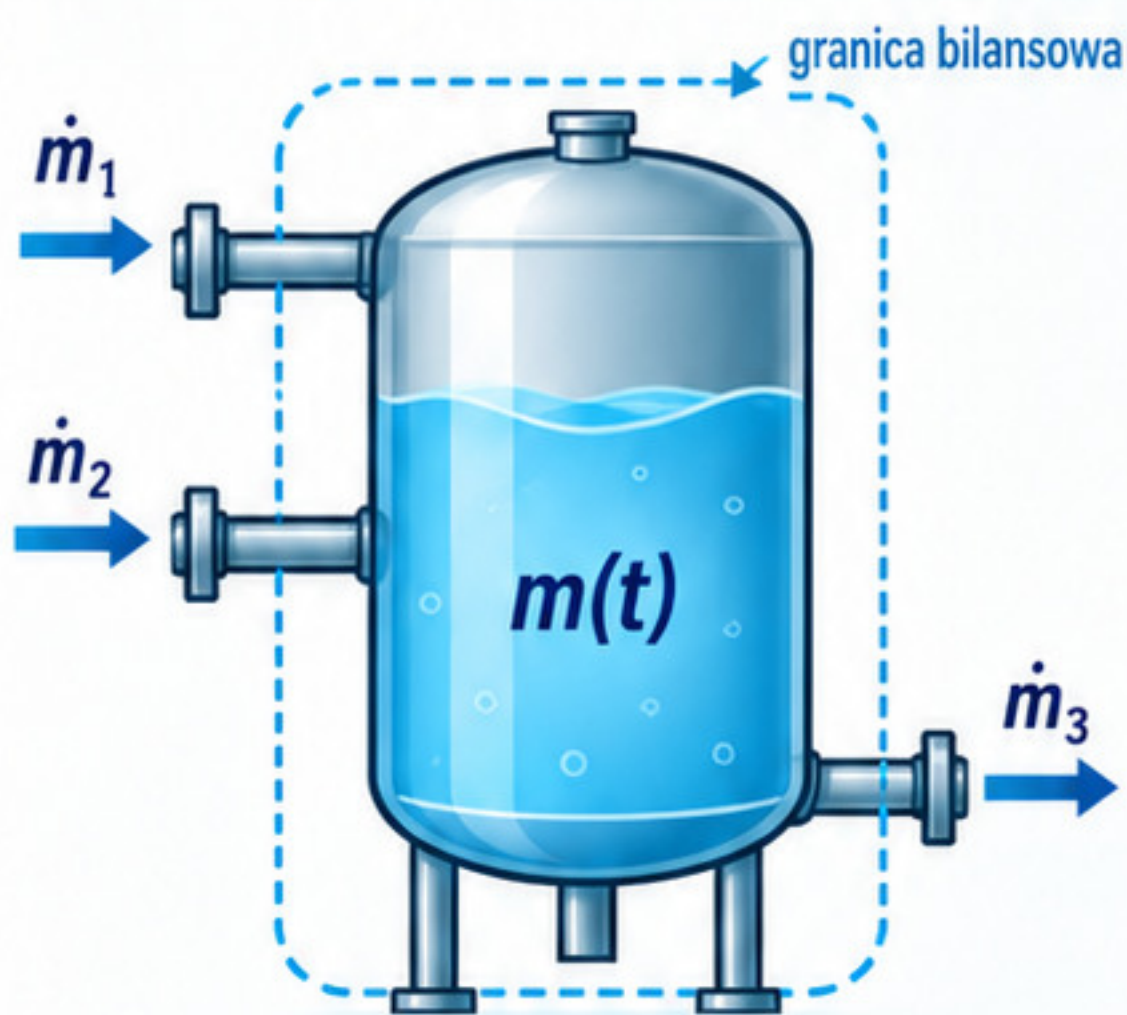
$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out}$$

$\frac{dm}{dt}$ — szybkość zmiany masy w układzie [kg/s]

$\sum \dot{m}_{in}$ — suma masowych natężeń przepływu na wejściu [kg/s]

$\sum \dot{m}_{out}$ — suma masowych natężeń przepływu na wyjściu [kg/s]

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY



Dane:

$$\dot{m}_1 = 5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_2 = 3 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_3 = 6 \text{ kg/s}$$

Bilans masy:

$$\frac{dm}{dt} = 5 + 3 - 6$$

$$\frac{dm}{dt} = 2 \text{ kg/s}$$

Akumulacja dodatnia → ilość masy w układzie rośnie.

GRANICA BILANSOWA

Zanim zapiszesz równanie, zdecyduj, co znajduje się wewnątrz analizowanego układu.



PROCEDURA ZAPISU BILANSU MASY

1



Narysuj granicę układu.

2



Zaznacz wszystkie wejścia i wyjścia.

3



Określ, czy masa gromadzi się w układzie.

4



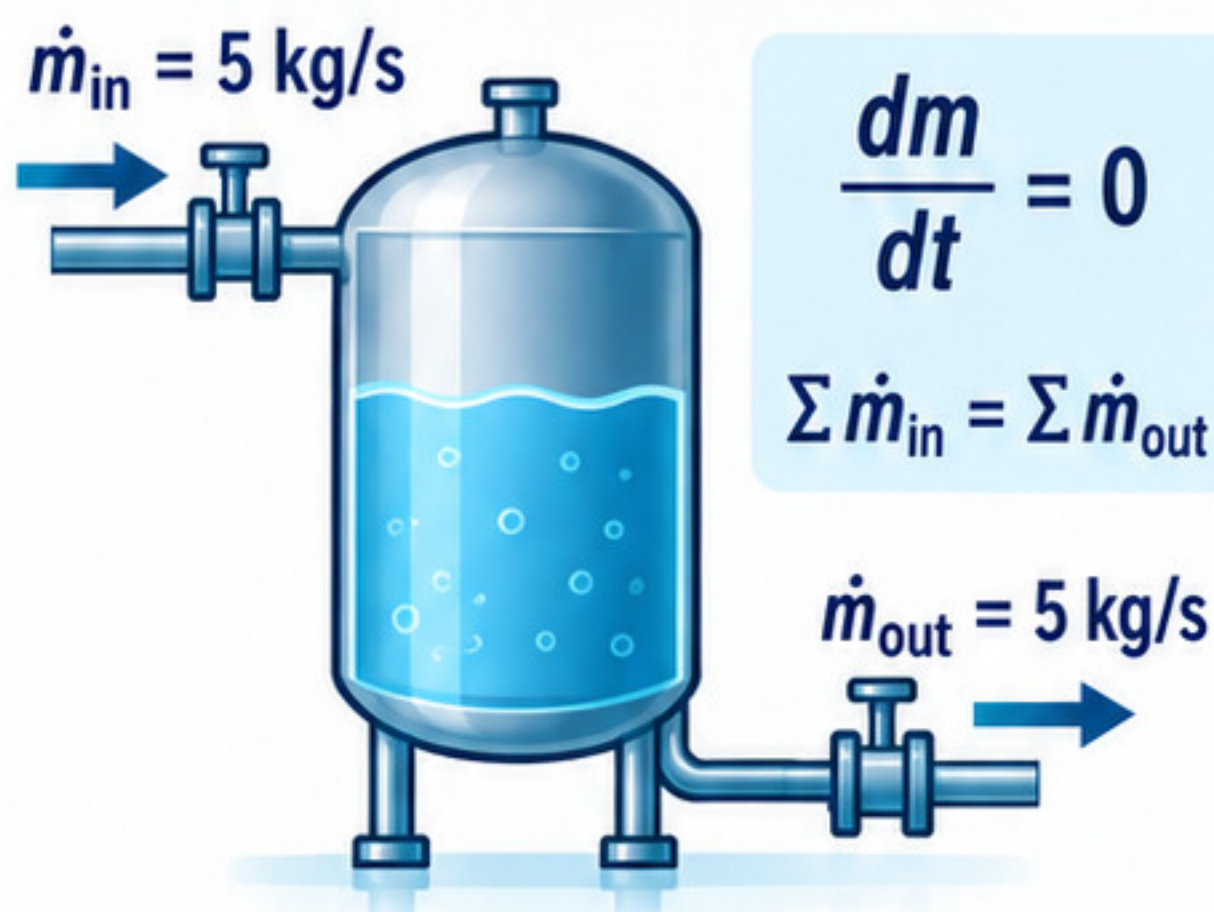
Dopiero potem zapisz bilans.

WAŻNE



W reakcji chemicznej mogą zniknąć poszczególne składniki, ale całkowita masa jest zachowana.

Stan ustalony nie oznacza braku przepływu — oznacza brak zmian w czasie w obserwowanym punkcie lub układzie.

STAN NIEUSTALONY**STAN USTALONY****NIE MYL POJĘĆ****STAN USTALONY**

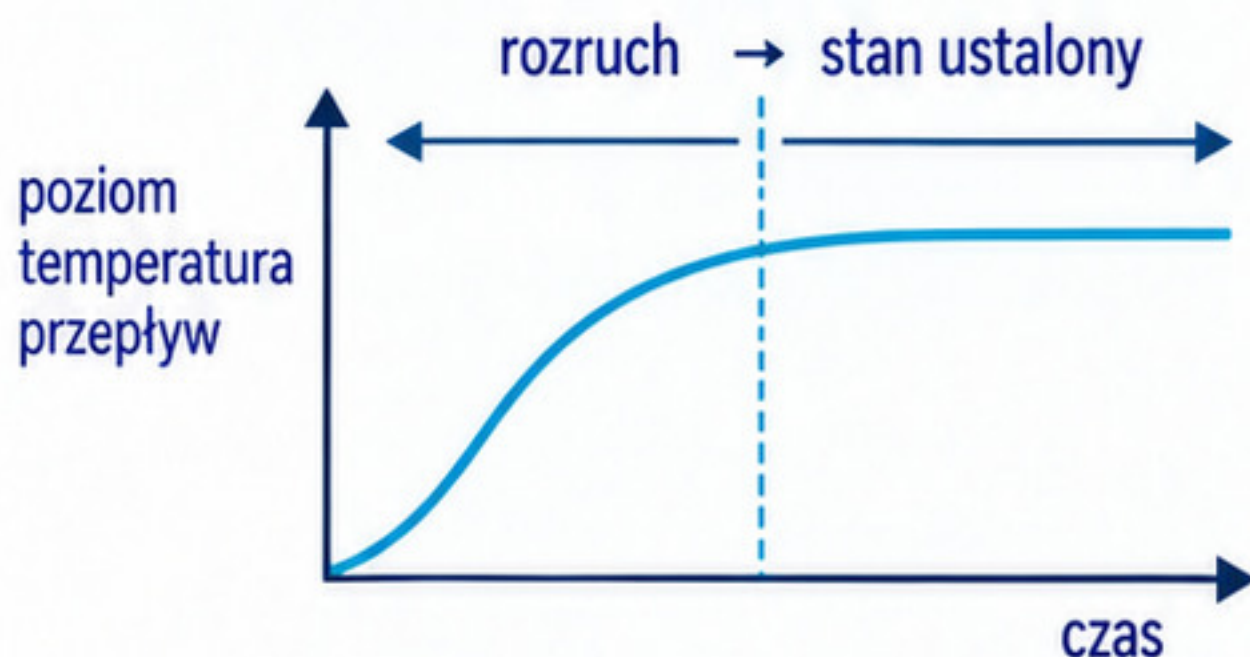
wielkości w danym miejscu nie zmieniają się w czasie

**RÓWNOWAGA**

brak siły napędowej do dalszej zmiany



Przez wymiennik ciepła może stale przepływać gorący i zimny płyn, a cały aparat może pracować w stanie ustalonym — mimo że energia cały czas jest przenoszona.

PRZYKŁADOWY PRZEBIEG**ZAPAMIĘTAJ**

Stan ustalony oznacza, że akumulacja jest równa zero, ale wejścia i wyjścia mogą być duże.



Typowy proces ciągły po zakończeniu rozruchu analizuje się często jako proces w stanie ustalonym.

KARTA 13 — BILANS SKŁADNIKA BEZ REAKCJI

W mieszaninie bilansujemy nie tylko całkowitą masę – możemy osobno śledzić każdy składnik.

PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI

Bilans składnika A
(ogólnie):

A na wejściu – A na wyjściu
= akumulacja A

Stan ustalony
(brak akumulacji):

$$\sum \dot{m}_{A,in} = \sum \dot{m}_{A,out}$$

Zależności podstawowe:

$$\dot{m}_A = w_A \dot{m}$$

(udział masowy)

$$\dot{n}_A = x_A \dot{n}$$

(udział molowy)

PRZYKŁAD: MIESZANIE DWÓCH STRUMIENI

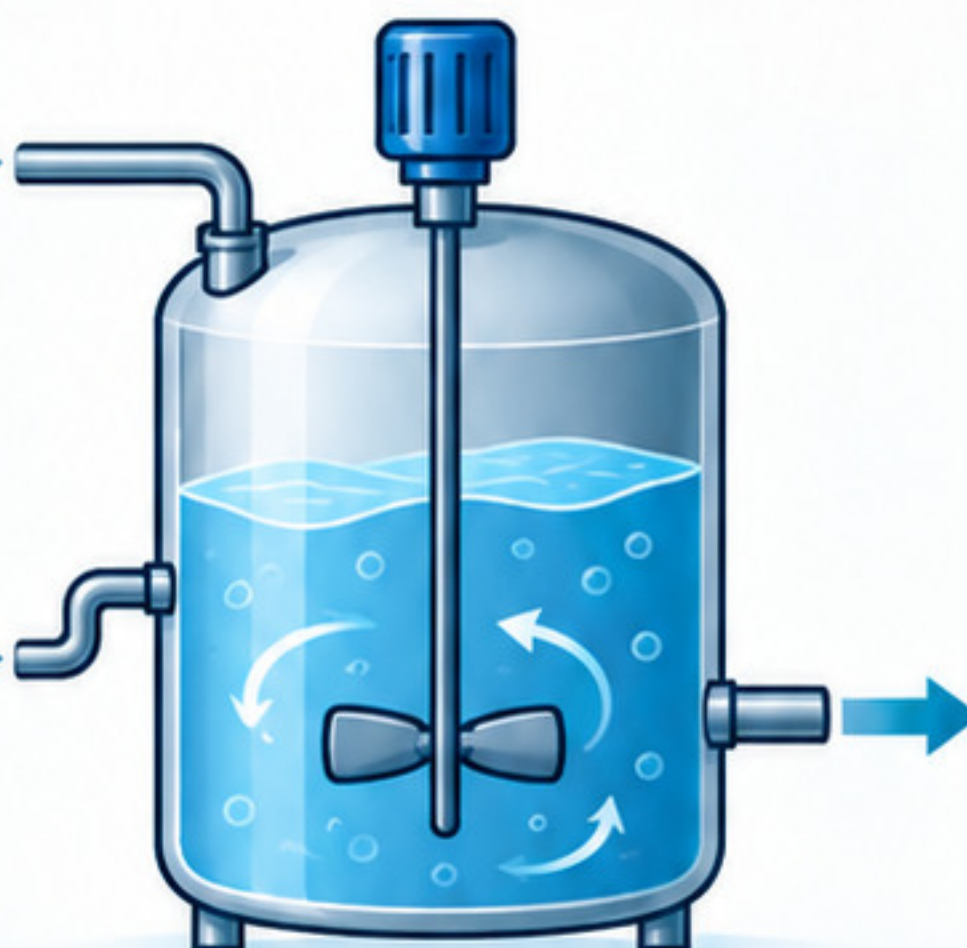
Do zbiornika mieszającego doprowadzane są dwa strumienie. Oblicz skład strumienia wylotowego.

Strumień 1

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= 100 \text{ kg/h} \\ w_A &= 0,20 \\ \dot{m}_A &= 20 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

Strumień 2

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 &= 50 \text{ kg/h} \\ w_A &= 0,60 \\ \dot{m}_A &= 30 \text{ kg/h}\end{aligned}$$



Strumień wylotowy

$$\begin{aligned}\dot{m}_3 &= 150 \text{ kg/h} \\ \dot{m}_A &= 20 + 30 = 50 \text{ kg/h} \\ w_{A,out} &= \frac{50}{150} \\ w_{A,out} &= 0,333 \\ &= 33,3\% \text{ mas.}\end{aligned}$$

Bilans całkowity:

$$100 + 50 = 150 \text{ kg/h}$$



**BILANS
CAŁKOWITY ✓**

Bilans składnika A:

$$20 + 30 = 50 \text{ kg/h}$$



**BILANS
SKŁADNIKA A ✓**

METODA

Postępuj według poniższych kroków.

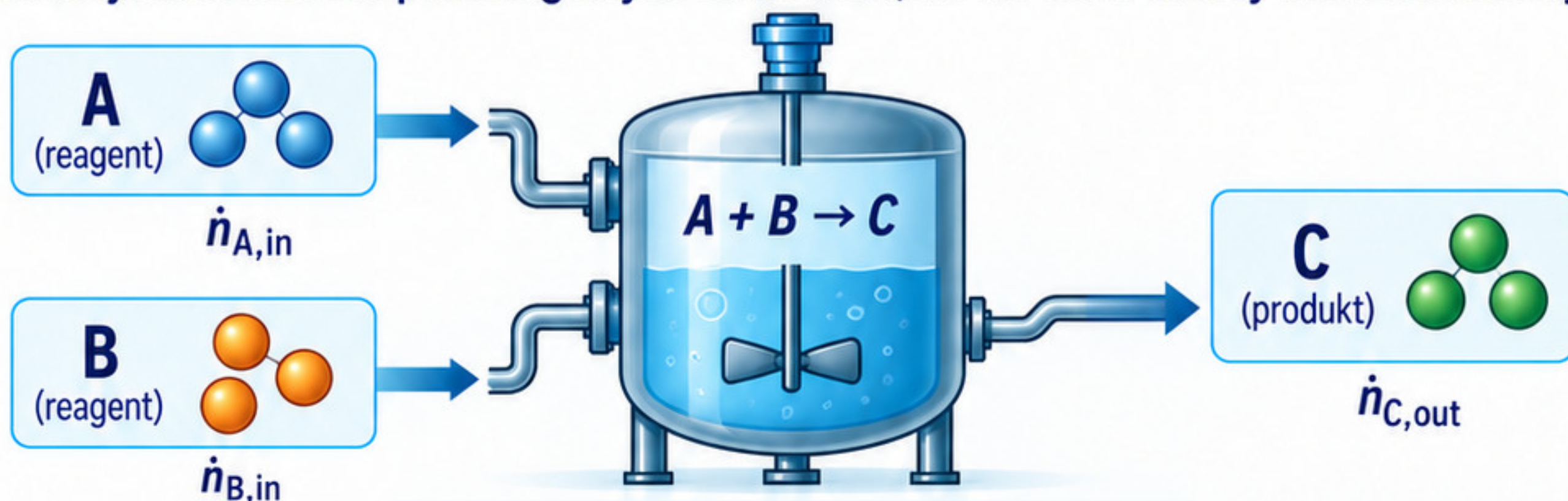
- 
Zapisz bilans całkowity.
- 
Wybierz jeden składnik.
- 
Przelicz udział składnika na przepływ.
- 
Zapisz osobny bilans składnika.

TYPOWY BŁĄD



Nie dodawaj bezpośrednio procentów z dwóch strumieni.
Najpierw oblicz ilość składnika w każdym strumieniu.

Reakcja zmienia ilość poszczególnych składników, ale nie łamie zasady zachowania masy.



BILANS MASOWY SKŁADNIKA i (OGÓLNY)

WEJŚCIE – WYJŚCIE + GENERACJA – ZUŻYCIE = AKUMULACJA

$$\dot{n}_{i,in} - \dot{n}_{i,out} + R_{i,gen} - R_{i,zuż} = \frac{dN_i}{dt}$$

STAN STACJONARWY (BRAK AKUMULACJI)

WEJŚCIE – WYJŚCIE + GENERACJA – ZUŻYCIE = 0

$$\dot{n}_{i,in} - \dot{n}_{i,out} + R_{i,gen} - R_{i,zuż} = 0$$

DLA REAGENTA A



GENERACJA = 0
ZUŻYCIE > 0

$$\dot{n}_{A,out} < \dot{n}_{A,in}$$

DLA PRODUKTU C



GENERACJA > 0
ZUŻYCIE = 0

$$\dot{n}_{C,out} > \dot{n}_{C,in}$$

Produkt C może pojawić się na wylocie, nawet jeśli nie był obecny na wlocie.

PRZYKŁAD: REAKCJA $A \rightarrow B$

Strumień wejściowy: 100 mol/h A
Stopień konwersji: $X_A = 0,80$
Przereagowało: $100 \times 0,80 = 80$ mol/h
Pozostało A: $100 - 80 = 20$ mol/h
Powstało B (stosunek 1:1): 80 mol/h

Wejście



100 mol/h A
0 mol/h B

Wyjście



20 mol/h A 80 mol/h B

MASA CAŁKOWITA

$$\dot{m}_{total,in} = \dot{m}_{total,out}$$

Atomy są przegrupowywane — nie znikają,

WAŻNE



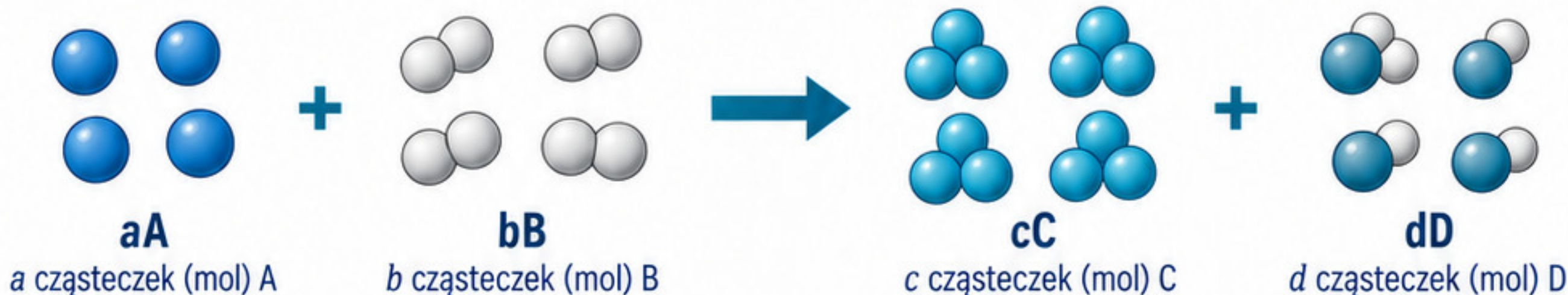
Bilans składnika może zawierać człon reakcyjny, Bilans całkowitej masy nie wymaga członu generacji masy w zwykłej reakcji chemicznej.



Następny krok: połączymy bilans z równaniem stechiometrycznym i stopniem postępu reakcji.

KARTA 15 — STECHIOMETRIA I POSTĘP REAKCJI

Współczynniki stechiometryczne mówią, w jakich proporcjach reagenty znikają, a produkty powstają.



RÓWNANIE
CHEMICZNE



WSPÓŁCZYNNIKI



ZMIANA
LICZBY MOLI

WSPÓŁCZYNNIKI STECHIOMETRYCZNE

$$\begin{aligned} v_A &= -a & v_B &= -b \\ v_C &= +c & v_D &= +d \end{aligned}$$



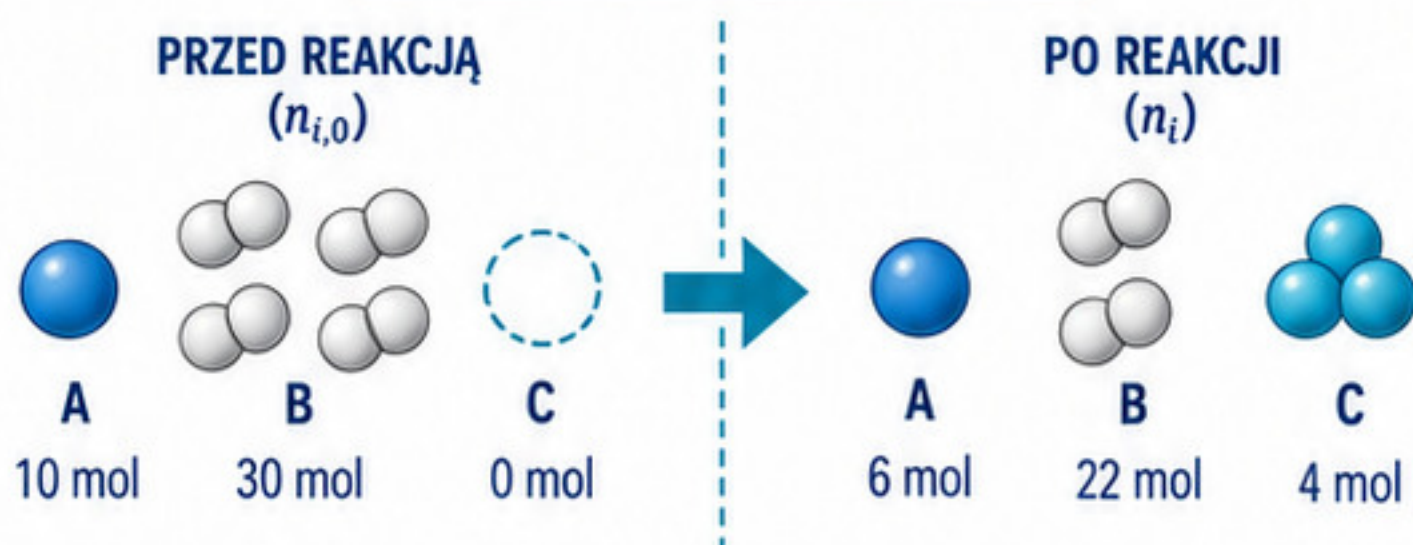
Dla reagentów współczynnik stechiometryczny jest ujemny, a dla produktów dodatni.

STOPIEŃ POSTĘPU REAKCJI

$$n_i = n_{i,0} + v_i \xi$$

- n_i — liczba moli składnika po reakcji
- $n_{i,0}$ — początkowa liczba moli
- v_i — współczynnik stechiometryczny
- ξ — stopień postępu reakcji [mol]

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

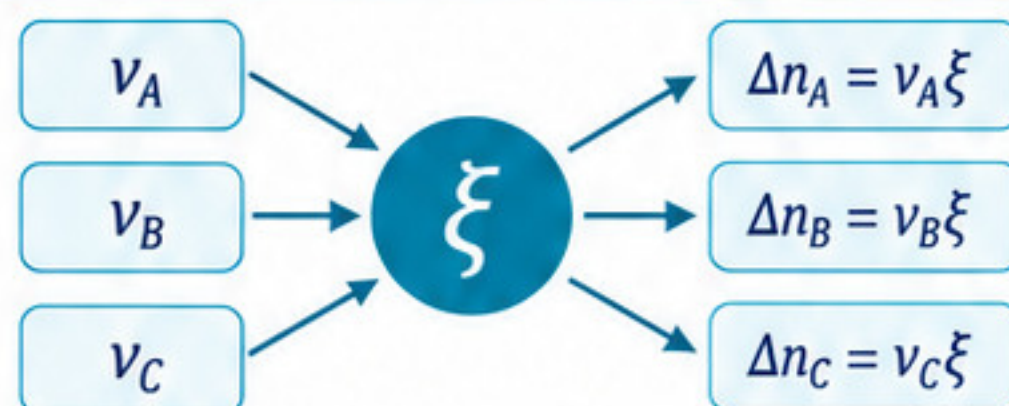


Początkowo: A = 10 mol, B = 30 mol, C = 0 mol

$$\xi = 4 \text{ mol}$$

$$n_A = 10 - 4 = 6 \text{ mol} \quad n_B = 30 - 2(4) = 22 \text{ mol} \quad n_C = 0 + 4 = 4 \text{ mol}$$

JEDNA REAKCJA — JEDEN ξ



Zmiana ilości każdego składnika wynika z tego samego stopnia postępu reakcji.

TYPOWY BŁĄD

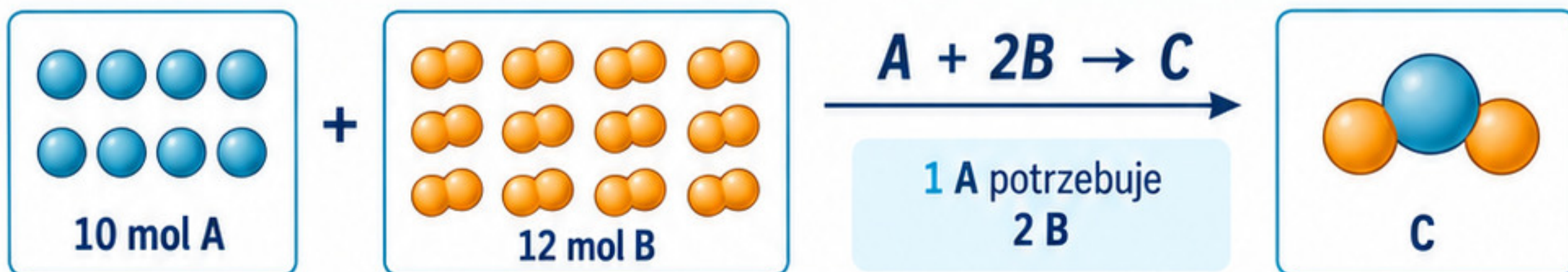


Nie traktuj zmian ilości reagentów i produktów jako niezależnych. Wiąże je stechiometria reakcji.

KARTA 16 — REAGENT OGRANICZAJĄCY I NADMIAR

Reakcję zatrzymuje ten reagent, którego zabraknie jako pierwszego zgodnie ze stechiometrią.

PRZYKŁAD REAKCJI



Jeśli cała ilość A zareagowałaby:
10 mol A $\Rightarrow$ 20 mol B

Dostępna ilość:
12 mol B

B = REAGENT OGRANICZAJĄCY

JAK GO ZNALEŹĆ?

- 1 Dla każdego reagenta oblicz stosunek ilości moli do wartości bezwzględnej współczynnika stechiometrycznego:

$$r_i = \frac{n_i}{|\nu_i|}$$

- 2 Oblicz dla reagentów z przykładu:

A: $\frac{10}{1} = 10$

B: $\frac{12}{2} = 6$

- 3 Najmniejsza wartość $\rightarrow$ reagent ograniczający.

REAGENT W NADMIARZE

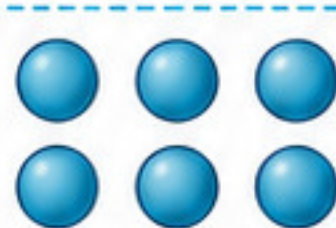
Aby zużyć 12 mol B (reagent ograniczający), potrzebna ilość A wynosi:

$$n_A = \frac{12}{2} = 6 \text{ mol}$$

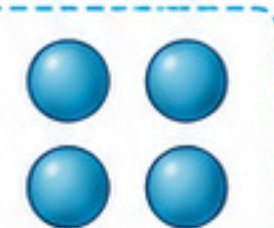
Początkowo mamy 10 mol A, zatem pozostaje:

$$10 - 6 = 4 \text{ mol A (w nadmiarze)}$$

A zużyte
(6 mol)



A pozostaje
(4 mol)



PROCENT NADMIARU

$$\% \text{ nadmiaru} = \frac{n_{\text{rzeczywiste}} - n_{\text{stech}}}{n_{\text{stech}}} \times 100\%$$

Nadmiar mówi, ile więcej reagenta podano niż wynikałoby dokładnie ze stechiometrii.

PALIWO + POWIETRZE



PALIWO



POWIETRZE

W procesach spalania często stosuje się nadmiar powietrza, aby ułatwić pełne spalanie paliwa.

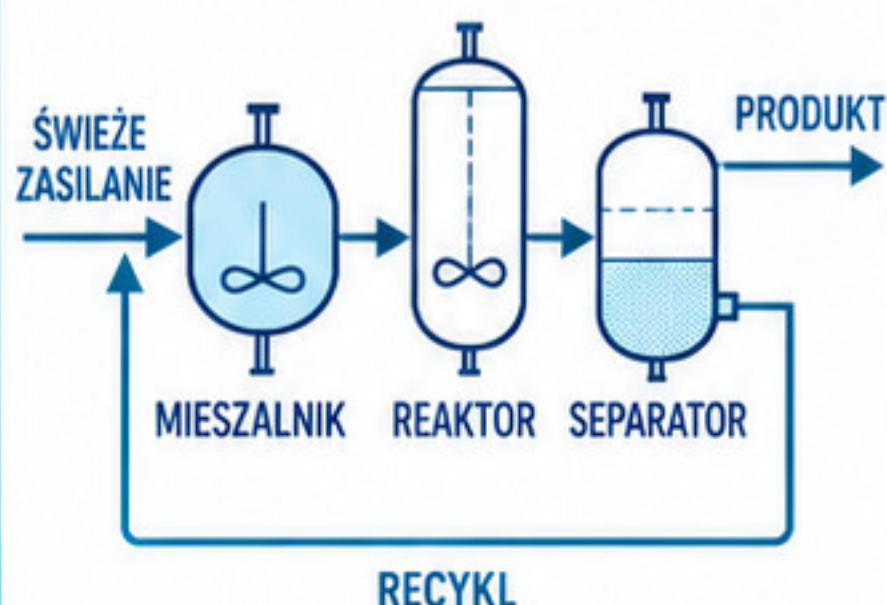


ZAPAMIĘTAJ

Najwięcej moli nie musi oznaczać nadmiaru.
Zawsze porównuj ilości z proporcjami stechiometrycznymi.

Nie każdy strumień płynie od początku procesu prosto do produktu — część może wracać, omijać aparat lub opuszczać obieg.

RECYKL



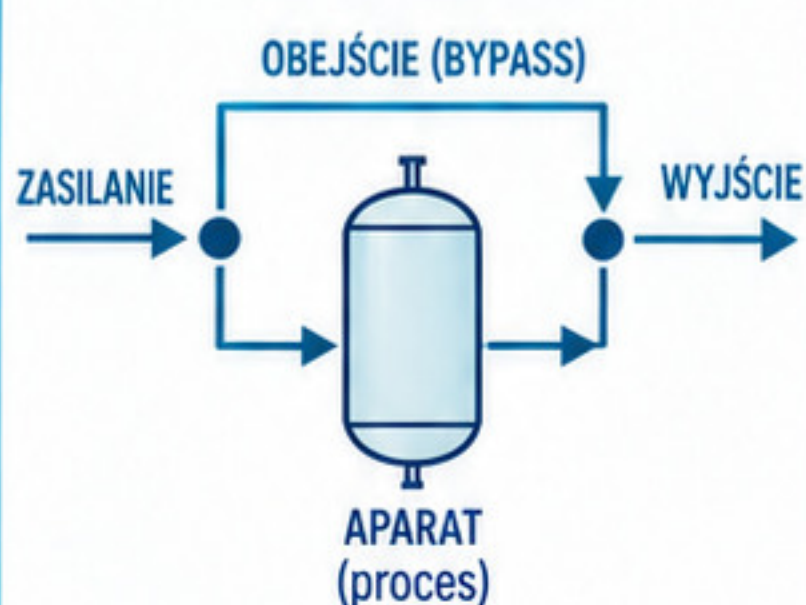
Część strumienia wyjściowego wraca do wcześniejszego etapu procesu.



ZASTOSOWANIE:

zwiększenie wykorzystania nieprzereagowanego surowca.

OBEJŚCIE / BYPASS



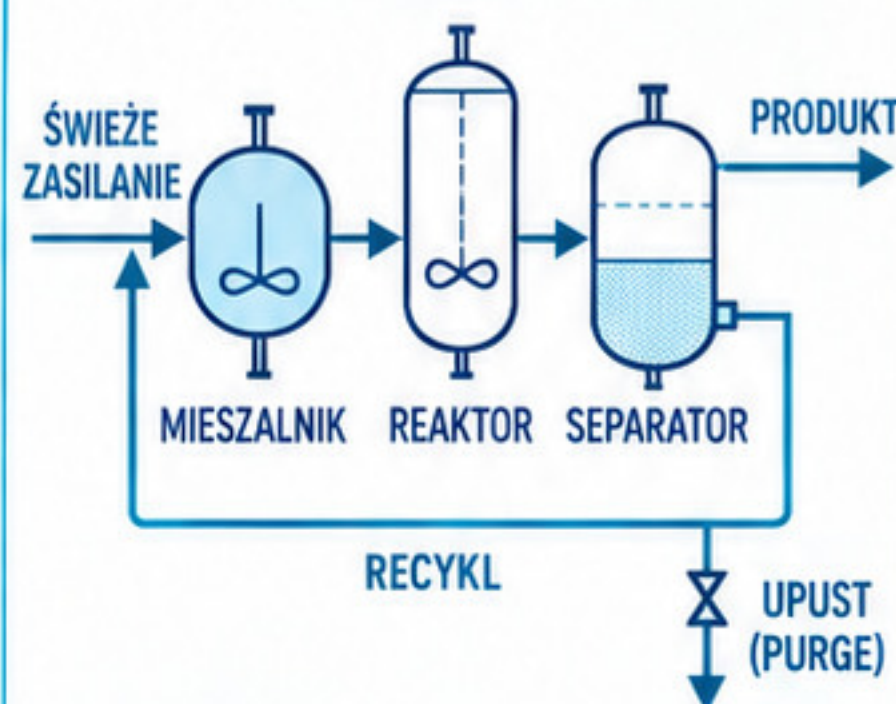
Część zasilania omija aparat i łączy się ponownie ze strumieniem głównym.



ZASTOSOWANIE:

regulacja końcowej temperatury lub składu.

UPUST / PURGE



Część strumienia recyrkulacyjnego jest usuwana z obiegu.



ZASTOSOWANIE:

zapobieganie nagromadzeniu składników obojętnych lub zanieczyszczeń.

NIE MYL



RECYKL

→ wraca



BYPASS

→ omija



PURGE

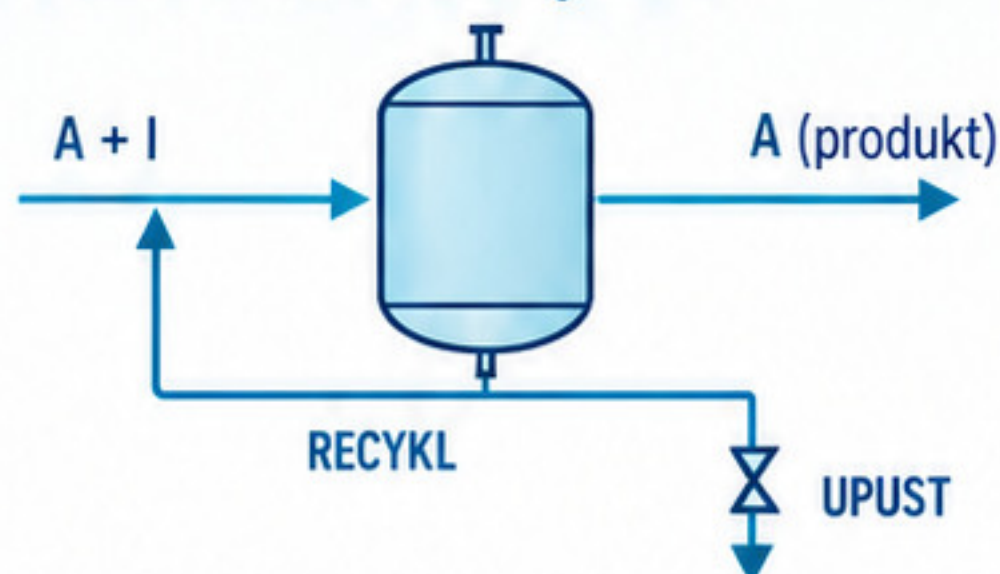
→ opuszcza obieg

PRZYKŁAD: NAGROMADZENIE SKŁADNIKA OBOJĘTNEGO

Zasilanie zawiera:

A + I

I = składnik obojętny
(nie ulega reakcji)



Bez upustu:

A reaguje, I nie reaguje

→ I ↑ ↑ ↑
(nagromadzenie)

Z upustem:

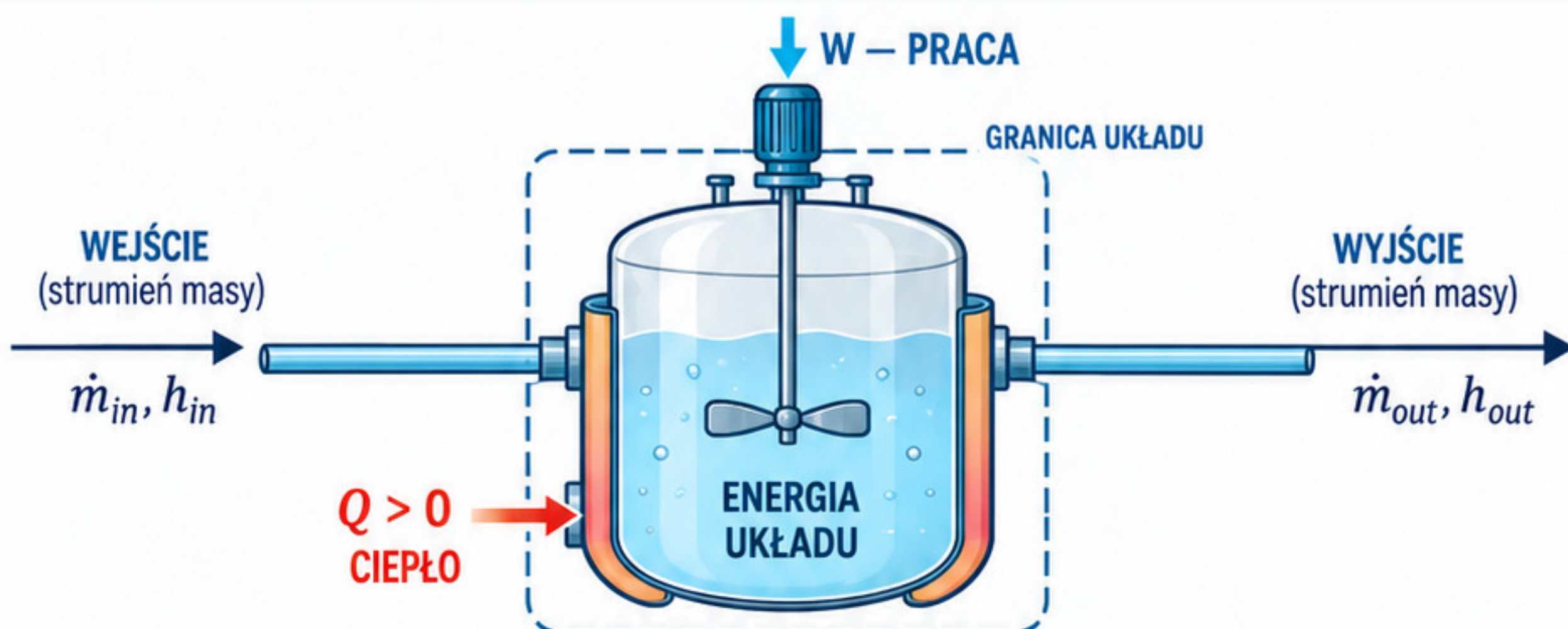
stężenie I można kontrolować.



TYPOWY BŁĄD

W układzie z recyklem całkowity przepływ przez aparat może być znacznie większy niż świeże zasilanie procesu.

Energia może przekraczać granicę układu jako ciepło, praca lub energia niesiona przez strumień materii.



ENERGIA WEJŚCIOWA — ENERGIA WYJŚCIOWA = AKUMULACJA ENERGII

energia wnoszona
do układu

energia wynoszona
z układu

zmiana energii
w czasie

UKŁAD ZAMKNIĘTY (BRAK PRZEPŁYWU MASY)



$$\Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p = Q - W$$

LEGENDA SYMBOLI

U	— energia wewnętrzna
$E_k = \frac{mv^2}{2}$	— energia kinetyczna
$E_p = mgz$	— energia potencjalna

TRZY SPOSOBY PATRZENIA NA ENERGIĘ



CIEPŁO

Q

— energia przekazywana wskutek różnicy temperatur.



PRACA

W

— energia przekazywana poprzez działanie siły, wału, sprężania itd.



ENERGIA MATERII

—

— strumień wpływający do aparatu również wnosi energię.

UWAGA NA KONWENCJĘ ZNAKÓW



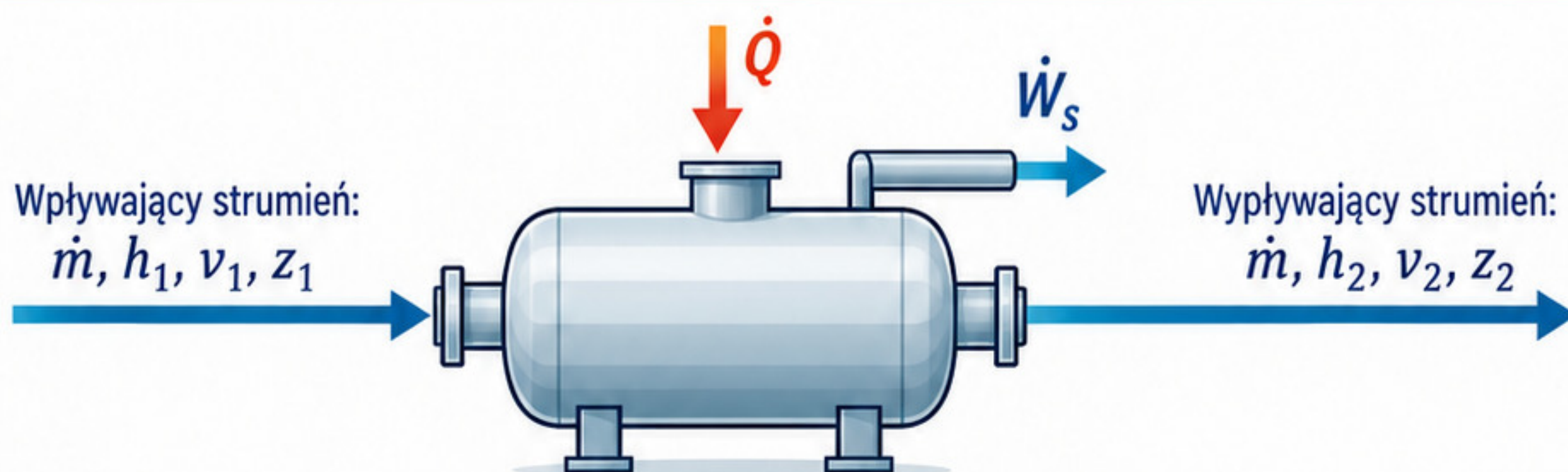
W różnych podręcznikach znak pracy może być definiowany inaczej. Zawsze sprawdź przyjętą konwencję przed użyciem równania.

ZAPAMIĘTAJ



Bilans energii jest zastosowaniem pierwszej zasady termodynamiki do konkretnego układu procesowego.

W aparacie przepływowym energia wchodzi i wychodzi razem ze strumieniem płynu.



Równanie bilansu energii (stan ustalony):

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

LEGENDA SYMBOLI

h — entalpia właściwa (J/kg)

v — prędkość (m/s)

z — wysokość (m)

$\dot{W}_s$ — moc związana z pracą wału (W)

CO CZĘSTO MOŻNA POMINAĆ?



$$\Delta E_k \approx 0$$

gdy prędkości zmieniają się niewiele



$$\Delta E_p \approx 0$$

gdy różnica wysokości jest mała

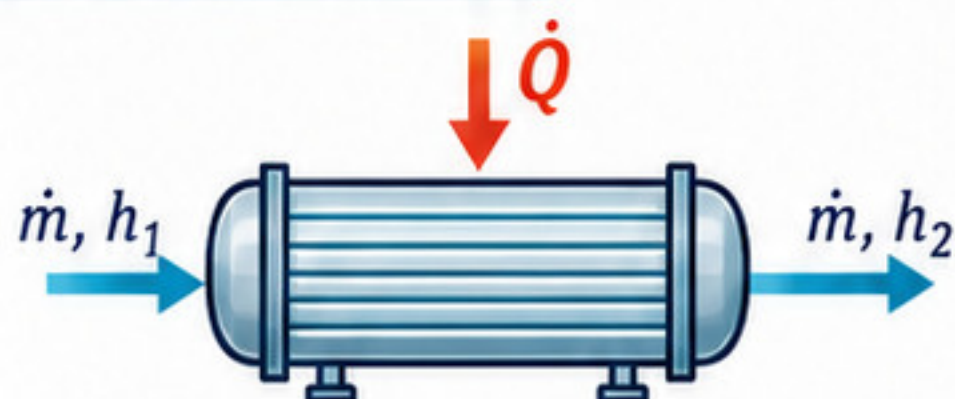


$$\dot{W}_s = 0$$

dla aparatu bez pracy wału

Pomijaj tylko po sprawdzeniu skali danego członu.

WYMIENNIK CIEPŁA

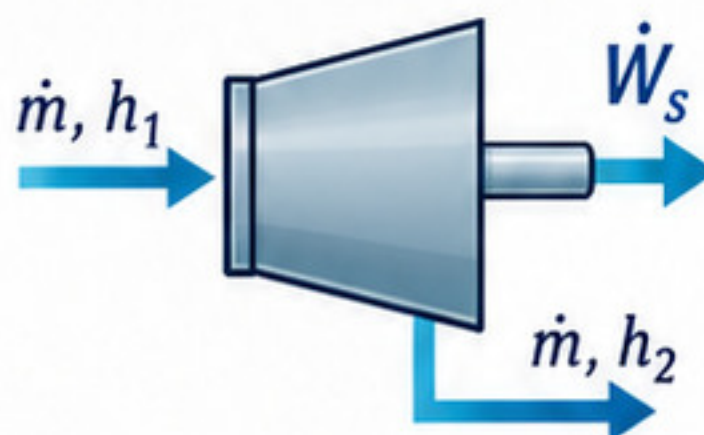


$$\dot{W}_s = 0, \Delta E_k \approx 0, \Delta E_p \approx 0$$

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Jeśli $h_2 > h_1$, płyn otrzymał energię cieplną.

TURBINA (PRZYKŁAD)



Spadek entalpii może zostać zamieniony na pracę wału.

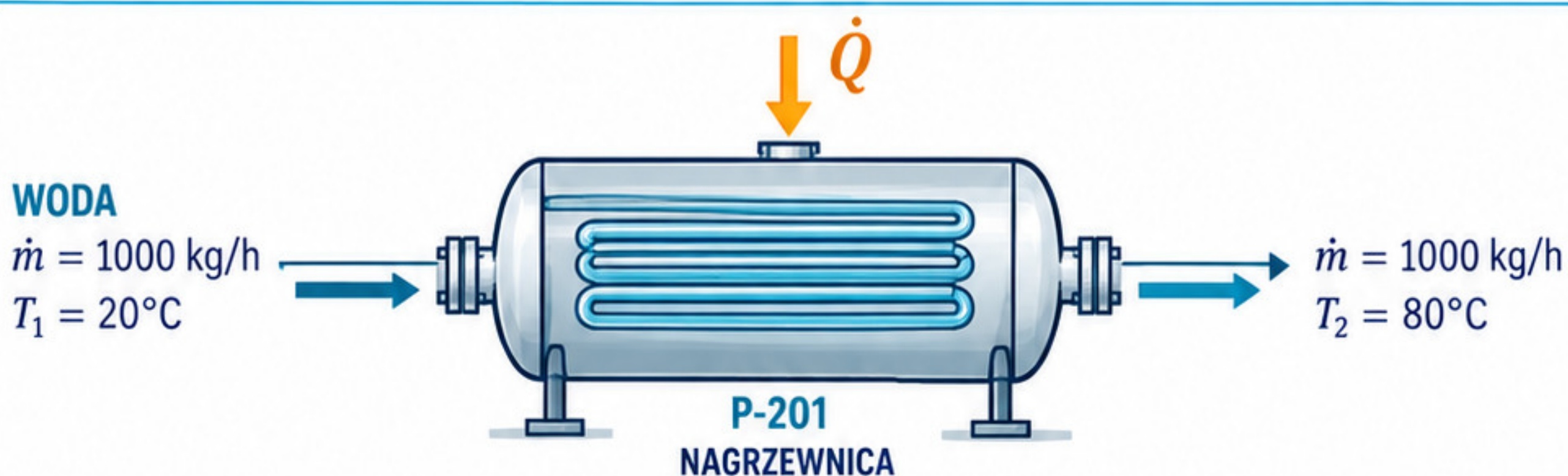
TYPOWY BŁĄD



W procesach przepływowych zwykle pracujemy z entalpią h , a nie tylko z energią wewnętrzną u .

KARTA 20 — ŁĄCZNY BILANS MASY I ENERGII

Najpełniejszy obraz procesu powstaje wtedy, gdy jednocześnie śledzisz materię i energię.



1 ETAP 1 — BILANS MASY



$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

$$1000 = 1000 \text{ kg/h}$$

Bilans masy mówi, ile materiału przepływa.

2 ETAP 2 — BILANS ENERGII



$$\dot{Q} \approx \dot{m} c_p (T_2 - T_1)$$

dla cieczy bez zmiany fazy

$$c_p \approx 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$\dot{Q} = 1000 \times 4,18 \times (80 - 20)$$

$$\dot{Q} = 250\,800 \text{ kJ/h}$$

$$\dot{Q} \approx \mathbf{69,7 \text{ kW}}$$

DWA PYTANIA



BILANS MASY

Ile substancji
wpływa i wypływa?



BILANS ENERGII

Ile energii trzeba
dostarczyć lub odebrać?

TOK MYŚLENIA



ZAPAMIĘTAJ

Bilans masy nie powie Ci, ile trzeba ogrzewać.

Bilans energii nie zastąpi informacji o przepływie i składzie.

W procesie potrzebujesz obu.

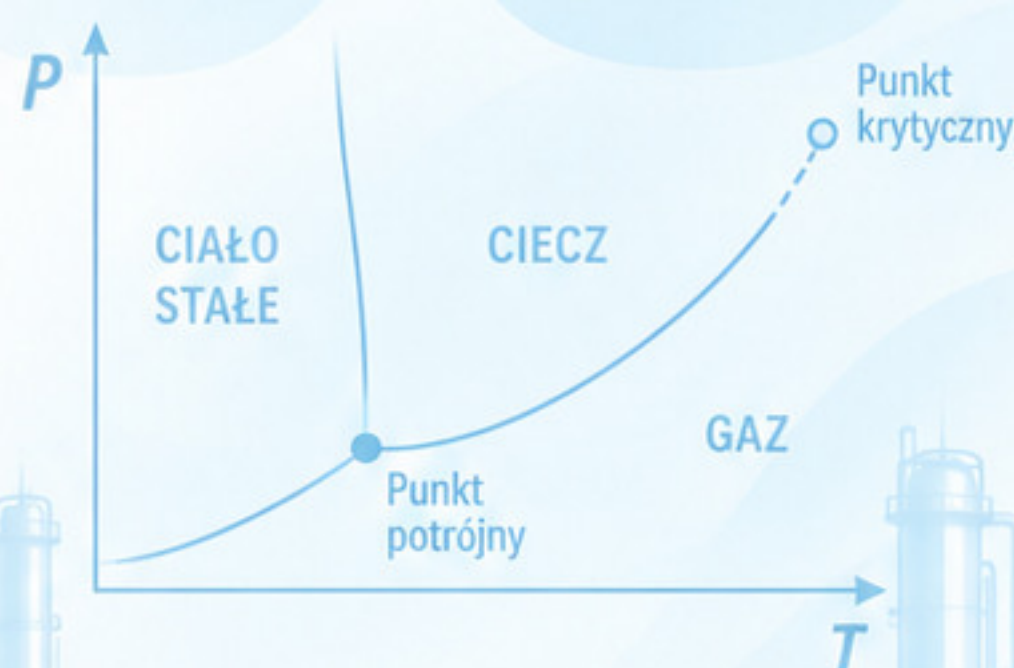
MODUŁ 03

TERMODYNAMIKA

Termodynamika odpowiada nie tylko na pytanie „ile energii?”, ale również „w którą stronę proces może przebiegać?”.



Po tym module będziesz potrafić rozróżniać podstawowe funkcje stanu, interpretować pierwszą i drugą zasadę termodynamiki oraz rozumieć entalpię, entropię, równowagę fazową i energię swobodną Gibbsa.



ENERGIA

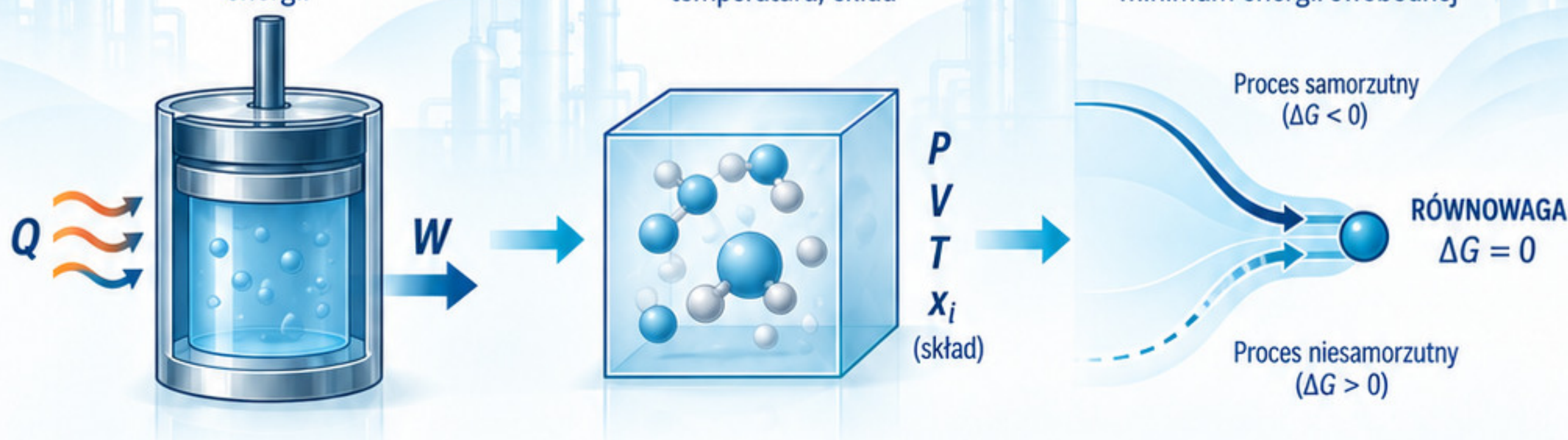
ciepło, praca, wymiana energii

STAN UKŁADU

ciśnienie, objętość, temperatura, skład

KIERUNEK PROCESU

samorzutność, równowaga, minimum energii swobodnej



UKŁAD I STAN
 P, V, T, x_i



I ZASADA
 $\Delta U = Q - W$



ENTALPIA
 $H = U + pV$



PRZEMIANY
FAZOWE
równowaga faz



ENTROPIA
 ΔS



GIBBS
 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$



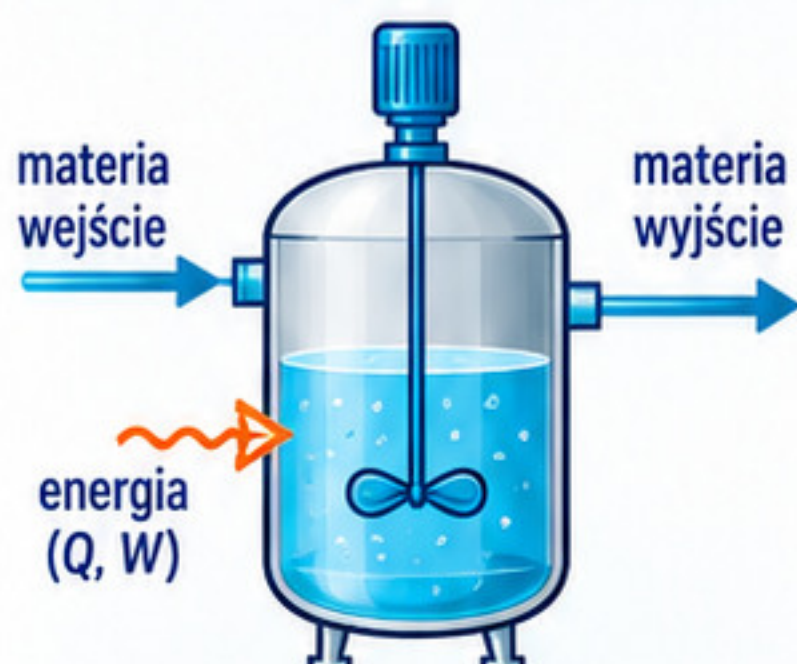
RÓWNOWAGA
FAZOWA
 $\mu^\alpha = \mu^\beta$

Energia mówi, ile.

Entropia i energia Gibbsa pomagają zrozumieć, czy i w jakim kierunku proces może zachodzić.

Zanim opiszesz proces termodynamiczny, musisz wiedzieć, co należy do układu i co może przekraczać jego granicę.

UKŁAD OTWARTY



materia ✓
energia ✓

Przykłady:

turbina, wymiennik,
reaktor przepływowy

UKŁAD ZAMKNIĘTY



materia ✗
energia ✓

Przykład:

gaz w zamkniętym
cylindrze z tłokiem

UKŁAD IZOLOWANY



materia ✗
energia ✗

Model idealny:

– brak wymiany materii
i energii z otoczeniem

STAN TERMODYNAMICZNY



Stan układu opisuje zestaw wielkości makroskopowych, np.: P , T , V , n , skład.

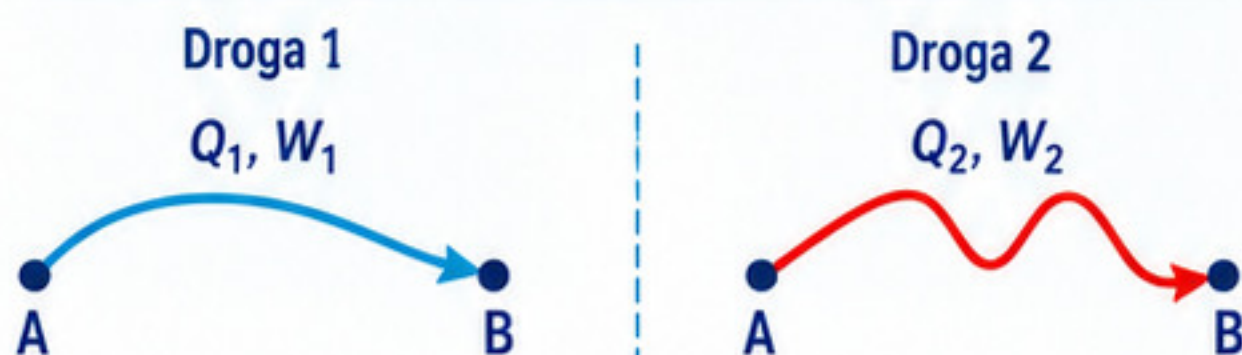
Można go traktować jak „dowód osobisty” układu w danym momencie.

FUNKCJE STANU

- U** — energia wewnętrzna
- H** — entalpia
- S** — entropia
- G** — energia swobodna Gibbsa

Zmiana funkcji stanu zależy od stanu początkowego i końcowego, a nie od drogi procesu.

FUNKCJA STANU vs. WIELKOŚĆ DROGI



$$\Delta U_1 = \Delta U_2$$

Q, W mogą być różne

RÓWNOWAGA

- termiczna → brak różnicy T
- mechaniczna → brak niezrównoważonej różnicy P
- fazowa → brak netto przemiany faz
- chemiczna → brak netto postępu reakcji

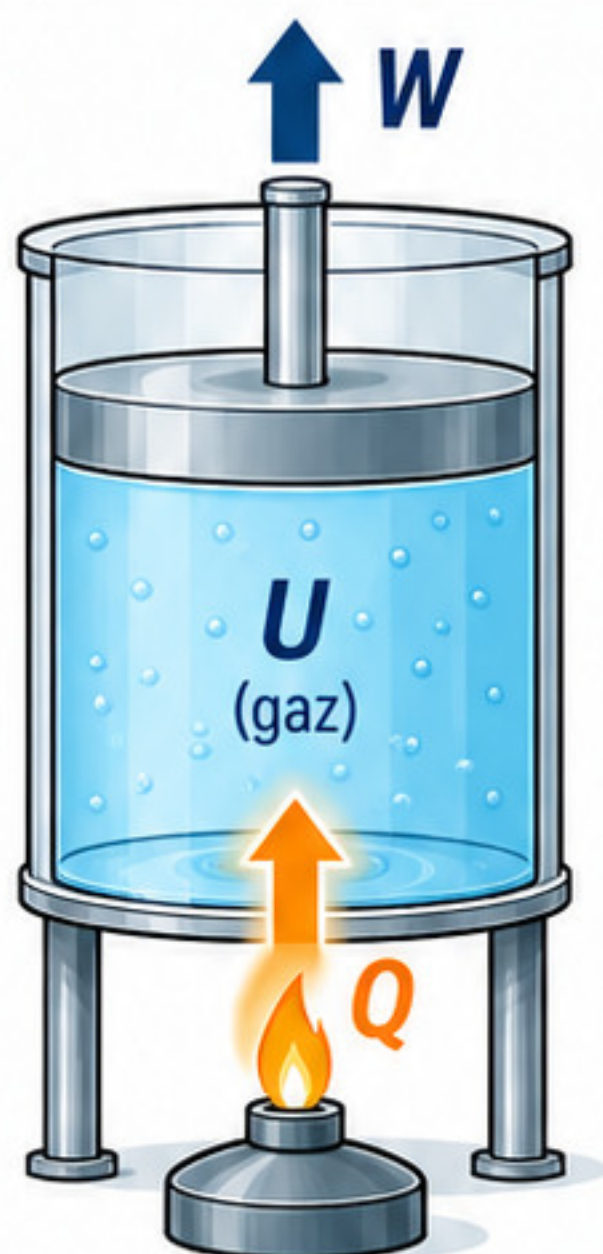


ZAPAMIĘTAJ

Stan ustalony i równowaga nie są tym samym.

Układ przepływowy może pracować w stanie ustalonym, będąc daleko od równowagi termodynamicznej.

Energia nie powstaje z niczego i nie znika — może tylko zmieniać formę lub przekraczać granicę układu.



I ZASADA TERMODYNAMIKI (układ zamknięty)

$$\Delta U = Q - W$$

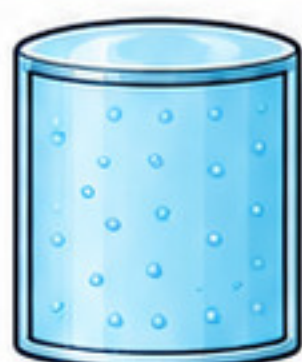


W tej karcie przyjmujemy:

$Q > 0$ — ciepło dostarczone do układu

$W > 0$ — praca wykonana przez układ na otoczeniu

1 OGRZEWANIE SZTYWNEGO ZBIORNIKA



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

$$W = 0$$

$$\Delta U = Q$$

Całe dostarczone ciepło zwiększa energię wewnętrzną, jeśli pomijamy inne formy energii.

2 ROZPRĘŻANIE GAZU



$$W > 0$$

$$\Delta U = Q - W$$

Część energii może zostać przekazana do otoczenia jako praca.

3 PROCES ADIABATYCZNY



izolacja cieplna

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -W$$

ADIABATYCZNY $\neq$ IZOTERMICZNY



ADIABATYCZNY

$$Q = 0$$



IZOTERMICZNY

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



Brak wymiany ciepła nie oznacza automatycznie stałej temperatury.

TYPOWY BŁĄD



Nie zapamiętuj samego znaku przed W bez znajomości konwencji. Najpierw ustal, czy praca jest dodatnia „przez układ”, czy „nad układem”.

W procesach przepływowych entalpia jest wygodnym sposobem śledzenia energii niesionej przez płyn.

DEFINICJA ENTALPII

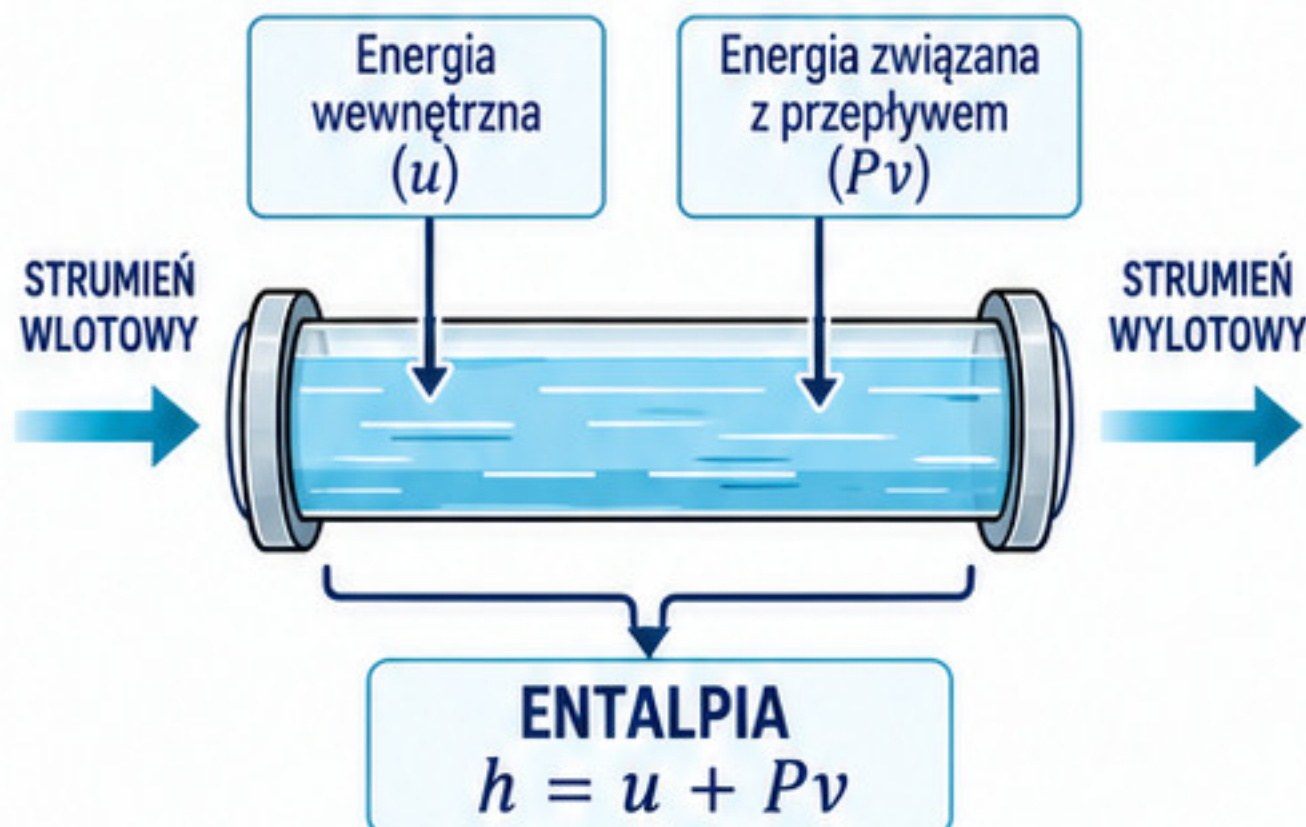
$$H = U + PV$$

$$h = u + Pv$$

- H — entalpia [J]
- h — entalpia właściwa [J/kg]
- u — energia wewnętrzna właściwa
- v — objętość właściwa [m³/kg]

ENTALPIA W STRUMIENIU PŁYNU

Płyn niesie energię wewnętrzną oraz energię związaną z przepływem.



CIEPŁO JAWNE

Dla ogrzewania lub chłodzenia bez zmiany fazy, przy prawie stałym c_p :

$$\Delta h \approx c_p \Delta T$$

Dla ilości masy:

$$Q \approx mc_p(T_2 - T_1)$$

Dla przepływu:

$$\dot{Q} \approx \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

PRZYKŁAD — PODGRZEWANIE WODY

Dane:

$$m = 2 \text{ kg}$$

$$c_p = 4,18 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$T_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 50^\circ\text{C}$$

Obliczenia:

$$Q = 2 \times 4,18 \times 30$$

$$Q = 250,8 \text{ kJ}$$



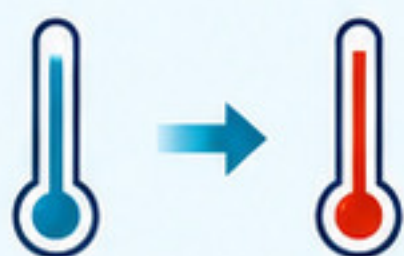
Temperatura rośnie,
faza pozostaje ta sama.

CIEPŁO JAWNE A UTAJONE

CIEPŁO JAWNE

zmienia temperaturę

$$\Delta T \neq 0$$



$T_1 \rightarrow T_2$
faza bez zmian

CIEPŁO UTAJONE

wiąże się ze zmianą fazy

$$\Delta T = 0$$

(podczas przemiany)



→ następna karta

c_p a c_v

- c_p — pojemność cieplna przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)]
- c_v — pojemność cieplna przy stałej objętości [J/(kg·K)]

dla gazu idealnego:

$$c_p > c_v$$

WAŻNE



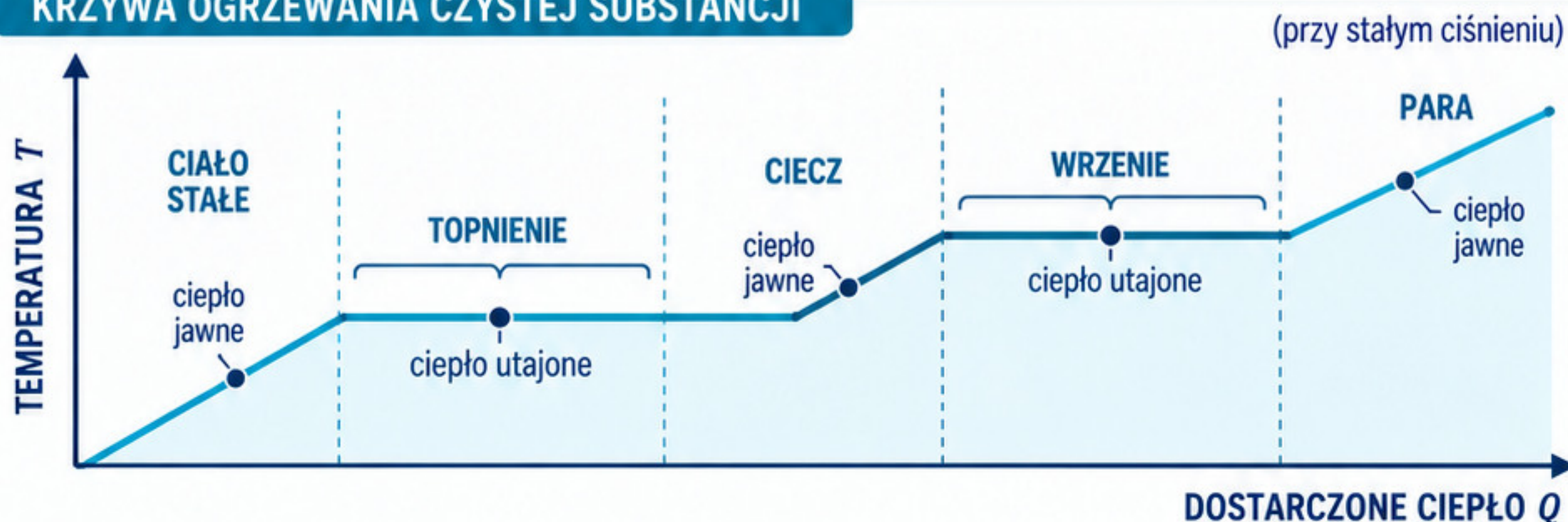
Entalpia absolutna zależy od przyjętego poziomu odniesienia. W obliczeniach procesowych najczęściej interesuje nas zmiana entalpii Δh .



KARTA 24 — PRZEMIANY FAZOWE I CIEPŁO UTAJONE

Podczas przemiany fazowej energia może być dostarczana lub odbierana bez zmiany temperatury układu.

KRZYWA OGRZEWANIA CZYSTEJ SUBSTANCJI



CIEPŁO JAWNE

Energia zmienia temperaturę substancji bez zmiany jej fazy.



$$Q = m c_p \Delta T$$

m — masa substancji (kg)
 c_p — ciepło właściwe (J/(kg·K))
 ΔT — zmiana temperatury (K)

CIEPŁO UTAJONE

Energia jest związana ze zmianą fazy przy stałej temperaturze.



$$Q = m \Delta h_{\text{przemiany}}$$
$$Q = m \Delta h_{\text{vap}}$$
$$Q = m \Delta h_{\text{fus}}$$

Δh_{vap} — entalpia parowania (J/kg)
 Δh_{fus} — entalpia topnienia (J/kg)

MODELE MOLEKULARNE FAZ



PORÓWNANIE PROCESÓW

OGRZEWANIE CIECZY

$T \uparrow$



brak zmiany fazy

WRZENIE

$T \approx \text{const.}$



energia $\rightarrow$ zmiana fazy

PRZYKŁAD — PAROWANIE

1 kg cieczy $\rightarrow$ 1 kg pary
Jeśli $\Delta h_{\text{vap}} = 2000 \text{ kJ/kg}$,
to:

$$Q = 1 \times 2000$$
$$Q = 2000 \text{ kJ}$$



W idealizowanym procesie parowania przy stałym ciśnieniu nie ma potrzeby zwiększania temperatury podczas przemiany fazowej.

WAŻNE



Temperatura wrzenia nie jest stałą uniwersalną — zależy od ciśnienia.

$P \downarrow \rightarrow$ temperatura wrzenia $\downarrow$
 $P \uparrow \rightarrow$ temperatura wrzenia $\uparrow$



KARTA 25 — TERMODYNAMIKA GAZU DOSKONAŁEGO

Dla gazu doskonałego energia wewnętrzna i entalpia zależą przede wszystkim od temperatury.

ZMIANA ENERGII WEWNĘTRZNEJ

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

$$\Delta U = m c_v \Delta T$$

- u — energia wewnętrzna właściwa [J/kg]
- U — energia wewnętrzna [J]
- c_v — ciepło właściwe przy stałej objętości [J/(kg·K)]
- m — masa [kg]



$$PV = nRT$$

dla gazu doskonałego

$$u = u(T)$$

$$h = h(T)$$

ZMIANA ENTALPII

$$\Delta h = c_p \Delta T$$

$$\Delta H = m c_p \Delta T$$

- h — entalpia właściwa [J/kg]
- H — entalpia [J]
- c_p — ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [J/(kg·K)]
- m — masa [kg]

WAŻNA ZALEŻNOŚĆ

$$c_p - c_v = R \quad \left| \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}\right.$$

γ — wykładnik adiabaty

CZTERY TYPOWE PRZEMIANY

IZOCHORYCZNA

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



Objętość nie zmienia się, praca objętościowa $W = 0$.

IZOBARYCZNA

$$P = \text{const.}$$



Ciśnienie pozostaje stałe, np. dzięki stałemu obciążeniu.

IZOTERMICZNA

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



Temperatura pozostaje stała, układ w kontakcie z rezerwuarem ciepła.

ADIABATYCZNA

$$Q = 0$$



Brak wymiany ciepła z otoczeniem (izolacja cieplna).

SZCZEGÓLNY PRZYPADEK — PRZEMIANA IZOTERMICZNA



Dla gazu doskonałego w przemianie izotermicznej:

$$\Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U = 0$$

To nie oznacza, że Q i W muszą być równe zero. W przemianie izotermicznej odwracalnej energia może być dostarczana do układu w postaci ciepła, a następnie oddawana w postaci pracy ($Q \neq 0$, $W \neq 0$).



TYPOWY BŁĄD

Stała temperatura nie oznacza braku przepływu energii. Oznacza jedynie, że energia wewnętrzna gazu doskonałego się nie zmienia.



KARTA 26 — DRUGA ZASADA I ENTROPIA

Pierwsza zasada mówi, że energia jest zachowana. Druga mówi, dlaczego procesy mają preferowany kierunek.



Ciepło samorzutnie przepływa od wyższej temperatury do niższej.

DEFINICJA ENTROPII

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

● S — entropia [J/K]



Entropia pomaga opisać, jak energia jest rozproszona i jak duża część procesu jest nieodwracalna.

DRUGA ZASADA

Dla układu izolowanego:

$$\Delta S_{całk} \geq 0$$

PROCES
ODWRACALNY



$$\Delta S_{całk} = 0$$

Stan równowagi może być osiągnięty bez wytwarzania entropii.

PROCES RZECZYWISTY /
NIEODWRACALNY



$$\Delta S_{całk} > 0$$

Występuje wytwarzanie entropii (nieodwracalność procesu).

PROCES NIEMOŻLIWY



$$\Delta S_{całk} < 0$$

Sprzeczny z drugą zasadą termodynamiki — nie może zachodzić.

ŹRÓDŁA NIEODWRACALNOŚCI



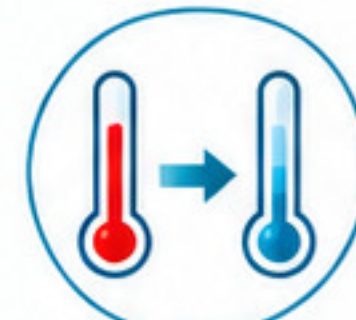
tarcie
(dysypacja energii mechanicznej)



mieszanie
(samoistne wyrównywanie stężeń)



przepływ przez dużą różnicę ciśnień
(straty ciśnienia)

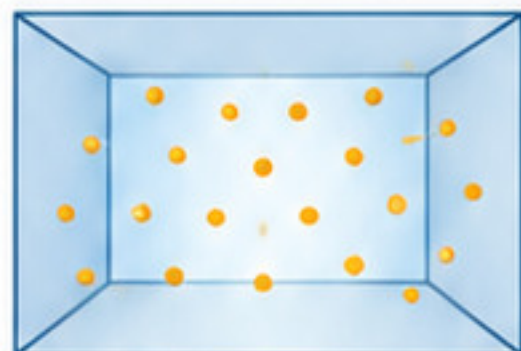


wymiana ciepła przy skończonej różnicy temperatur
(przenoszenie ciepła z gradientem T)

PRZYKŁAD – ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ ZAPACHU



Stan początkowy:
cząsteczki skupione
(wysokie stężenie lokalne)



Stan końcowy:
cząsteczki rozproszone
(równomierne rozmieszczenie)

Proces może zajść samorzutnie w jednym kierunku, ale jego spontaniczne odwrócenie jest skrajnie nieprawdopodobne.

NIE UPRASZCZAJ ZA BARDZO



Entropia nie jest po prostu „miarą bałaganu”. W termodynamice jest precyzyjną funkcją stanu związaną z rozkładem energii i liczbą dostępnych stanów mikroskopowych.

KARTA 27 — ENERGIA SWOBODNA GIBBSA

Przy stałej temperaturze i ciśnieniu energia Gibbsa pomaga przewidzieć kierunek samorzutnej zmiany.

ENTALPIA H

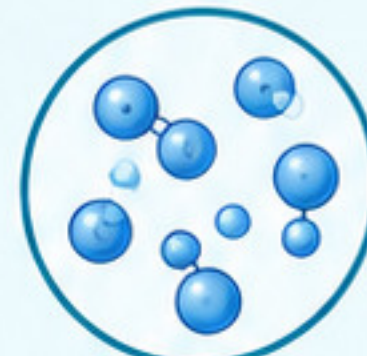


zmiana energii
związana z ciepłem



$$G = H - TS$$
$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

ENTROPIA TS



wkład nieuporządkowania
(rozproszenie energii)
ważony temperaturą

CO MÓWI ΔG ?

$$\Delta G < 0$$

proces może przebiegać
samorzutnie w zadanym
kierunku



$$\Delta G = 0$$

równowaga



$$\Delta G > 0$$

zadany kierunek nie jest
samorzutny w danych
warunkach



„SAMORZUTNY” NIE OZNACZA „SZYBKİ”



TERMODYNAMIKA
czy proces
jest możliwy?



KINETYKA
jak szybko
zachodzi?



Reakcja może być termodynamicznie
korzystna, ale przebiegać bardzo wolno
bez katalizatora.

RÓWNOWAGA CHEMICZNA

W stanie równowagi:

$$\Delta G = 0$$

Związek ze stałą równowagi:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

● K — stała
równowagi
(-)

INTERPRETACJA WARTOŚCI K

$$K \gg 1$$

produkty są silnie faworyzowane
w stanie równowagi



$$K \ll 1$$

reagenty są silnie faworyzowane
w stanie równowagi



WAŻNE



Energia Gibbsa mówi
o kierunku i równowadze,
ale nie mówi bezpośrednio
o szybkości reakcji.

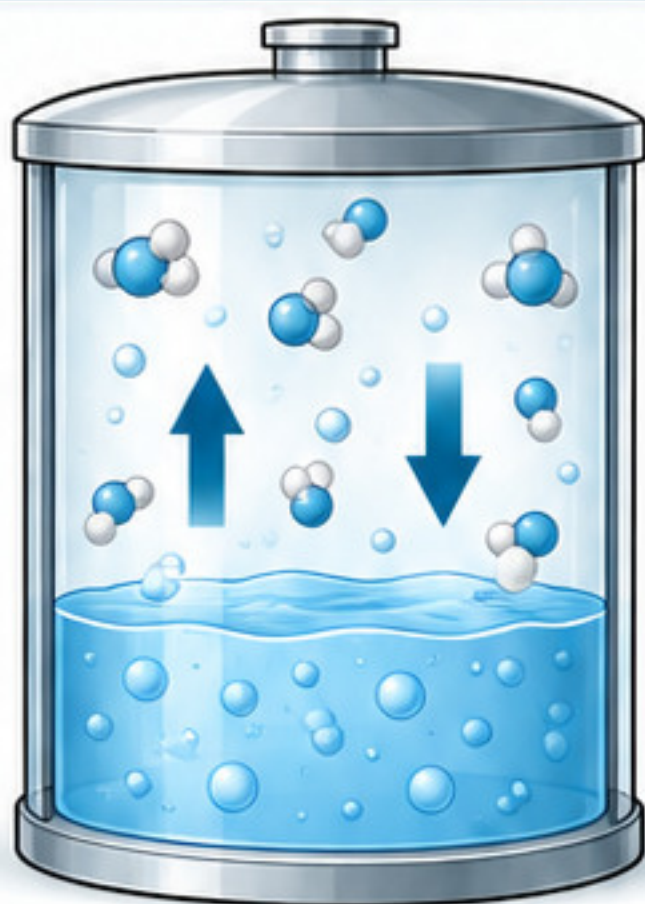
KARTA 28 — RÓWNOWAGA FAZOWA

W stanie równowagi fazy mogą współistnieć bez netto przepływu materii z jednej fazy do drugiej.

RÓWNOWAGA PAROWANIE-SKRAPLANIE

PAROWANIE

cząsteczki opuszczają ciecz

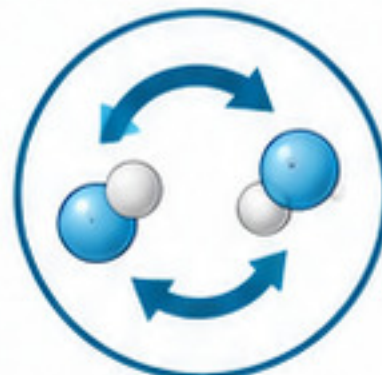


SKRAPLANIE

cząsteczki wracają do cieczy

w równowadze:
szybkość parowania = szybkość skraplania

RÓWNOWAGA NIE OZNACZA BRAKU RUCHU

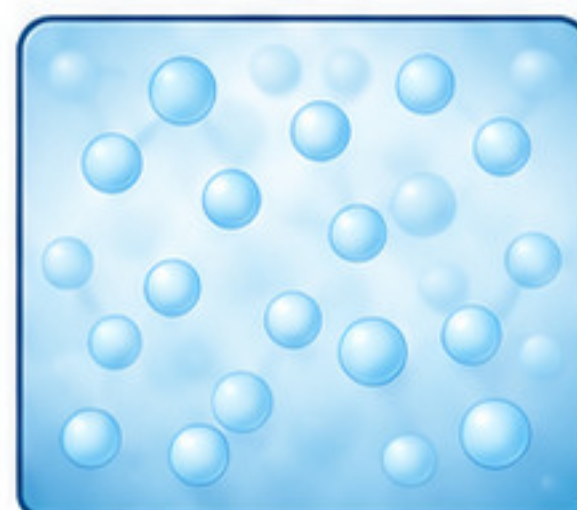


Cząsteczki nadal przechodzą między fazami, ale średnio nie zmienia się ilość każdej fazy.

RÓWNOWAGA DYNAMICZNA

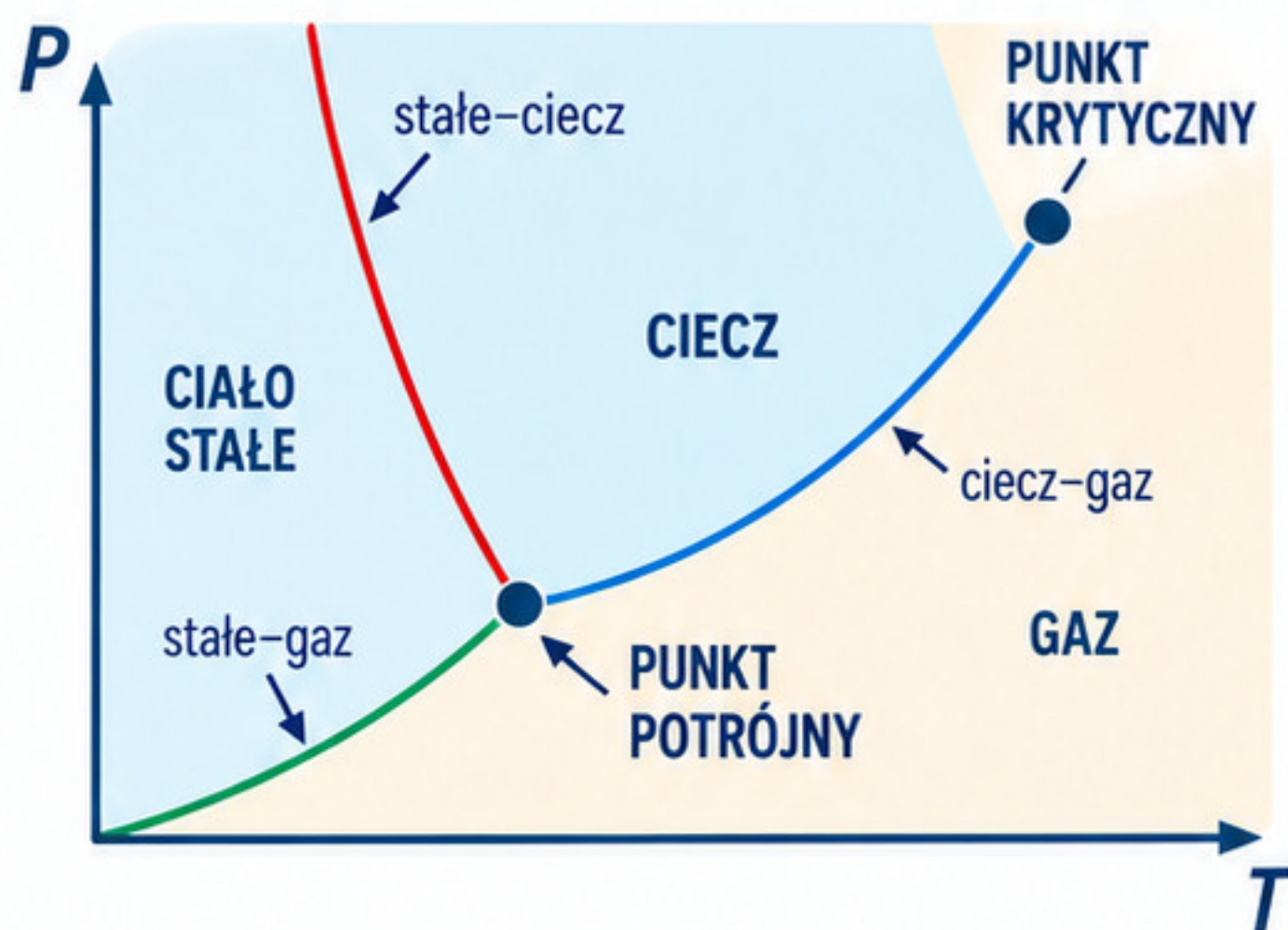
PUNKT KRYTYCZNY

Powyżej punktu krytycznego znika wyraźna granica między cieczą i gazem.



PŁYN NADKRYTYCZNY

DIAGRAM FAZOWY (SUBSTANCJA CZYSTA)



DLACZEGO TO WAŻNE?



RÓWNOWAGA FAZOWA

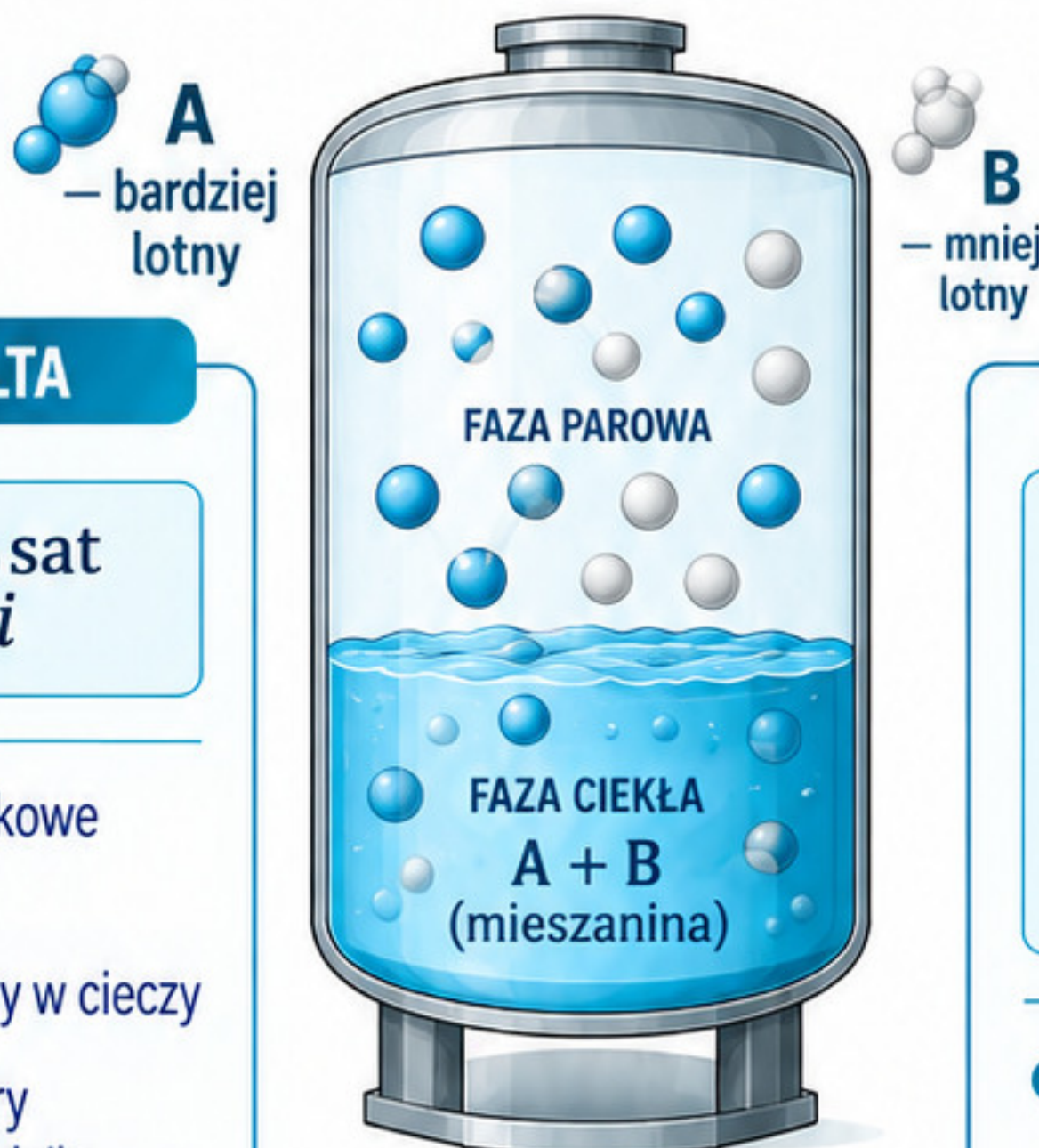
→ destylacja, odparowanie, kondensacja, flash

ZAPAMIĘTAJ



Zmiana ciśnienia może zmienić temperaturę, przy której zachodzi wrzenie lub kondensacja.

W idealnej mieszaninie równowaga ciecz–para wynika z połączenia składu cieczy, prężności par i ciśnienia całkowitego.



Para jest zwykle wzbogacona w składnik bardziej lotny.

PRAWO RAOULTA

$$p_i = x_i P_i^{\text{sat}}$$

- p_i — ciśnienie cząstkowe składnika i
- x_i — ułamek molowy w cieczy
- P_i^{sat} — prężność pary czystego składnika

PRAWO DALTONA

$$P = \sum p_i$$

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

- y_i — ułamek molowy składnika w fazie parowej

$$y_i P = x_i P_i^{\text{sat}}$$

CIECZ
 x_i



PARA
 y_i

PRZYKŁAD — UKŁAD DWUSKŁADNIKOWY

Dane:

$$\begin{aligned} x_A &= 0,40 \\ x_B &= 0,60 \\ P_A^{\text{sat}} &= 100 \text{ kPa} \\ P_B^{\text{sat}} &= 40 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Obliczenia:

$$\begin{aligned} p_A &= 0,40 \times 100 = 40 \text{ kPa} \\ p_B &= 0,60 \times 40 = 24 \text{ kPa} \\ \hline P &= 64 \text{ kPa} \end{aligned}$$

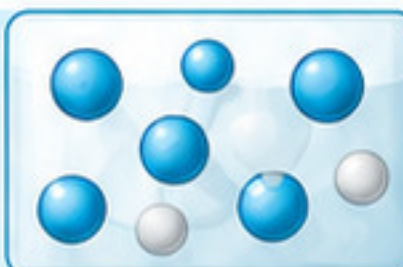
Skład fazy parowej:

$$y_A = \frac{40}{64} = 0,625$$

ciecz:
40% A



para:
62,5% A



Para została wzbogacona w bardziej lotny składnik A.

WARUNEK STOSOWALNOŚCI



Prosta postać prawa Raoult'a opisuje najlepiej mieszaniny bliskie idealnym. Dla mieszanin silnie nieidealnych potrzebne są poprawki aktywności.

→ następna karta:
fugacity i aktywność

KARTA 30 — FUGACITY I AKTYWNOŚĆ

Fugacity i aktywność są „skorygowanymi” miarami używanymi wtedy, gdy rzeczywiste układy odchodzą od zachowania idealnego.

FUGACITY f

Dla gazu rzeczywistego fugacity pełni rolę skorygowanego ciśnienia.

Gaz idealny:

$$f = P$$

Gaz rzeczywisty:

$$f = \phi P$$

- ϕ — współczynnik fugacity
- $\phi \rightarrow 1$ dla zachowania idealnego

IDEALNY



$$P = f$$

RZECZYWISTY



$$f = \phi P$$



Fugacity jest wielkością termodynamiczną o wymiarze ciśnienia, a nie bezpośrednio mierzalnym ciśnieniem.

AKTYWNOŚĆ a_i

Aktywność uwzględnia nieidealne oddziaływania między składnikami w mieszaninie.

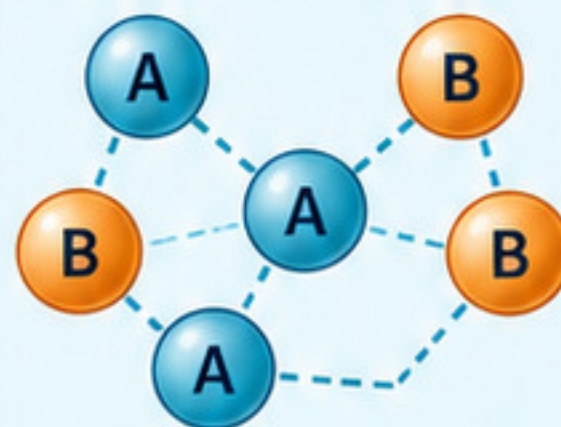
$$a_i = \gamma_i x_i$$

- γ_i — współczynnik aktywności
- x_i — ułamek molowy

Dla zachowania idealnego:

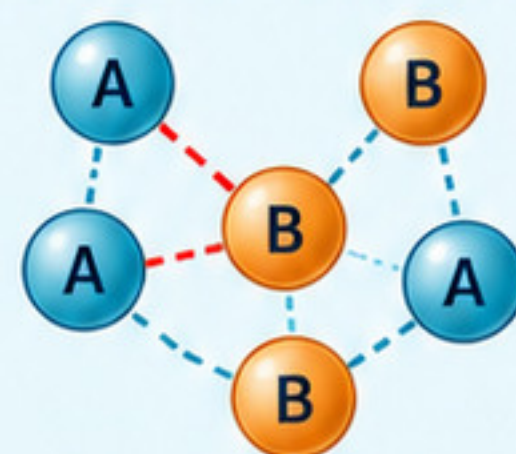
$$\gamma_i = 1 \rightarrow a_i = x_i$$

MIESZANINA IDEALNA



Oddziaływania A-A, B-B i A-B są podobne.

MIESZANINA NIEIDEALNA



Oddziaływania A-B różnią się od A-A i B-B.

PO CO TE POPRAWKI?

IDEALNY MODEL

P, x

RZECZYWISTE
ODDZIAŁYWANIA

f, a

Pozwalają zachować formalizm równowagi termodynamicznej także dla rzeczywistych gazów i cieczy.

WARUNEK RÓWNOWAGI

$$f_i^{(\alpha)} = f_i^{(\beta)}$$

W równowadze fugacity danego składnika jest takie samo w współistniejących fazach.



NIE PANIKUJ

Na poziomie podstawowym najważniejsze jest zrozumienie roli: Z , ϕ i γ korygują modele idealne, gdy rzeczywisty układ zachowuje się inaczej.

PODSUMOWANIE – SPÓJNY OBRAZ



ENERGIA
ciepło, praca



ENTALPIA
wymiana ciepła



ENTROPIA
nieuporządkowanie



GIBBS
spontanizność



RÓWNOWAGA
kryterium



**RZECZYWISTE
UKŁADY**
 f, a, Z, γ

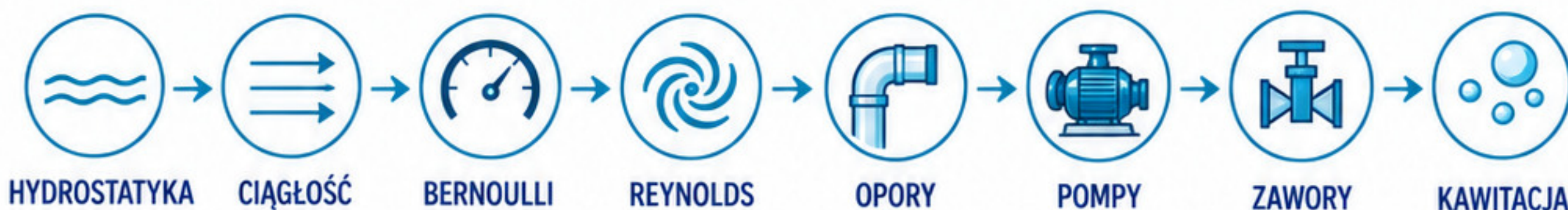
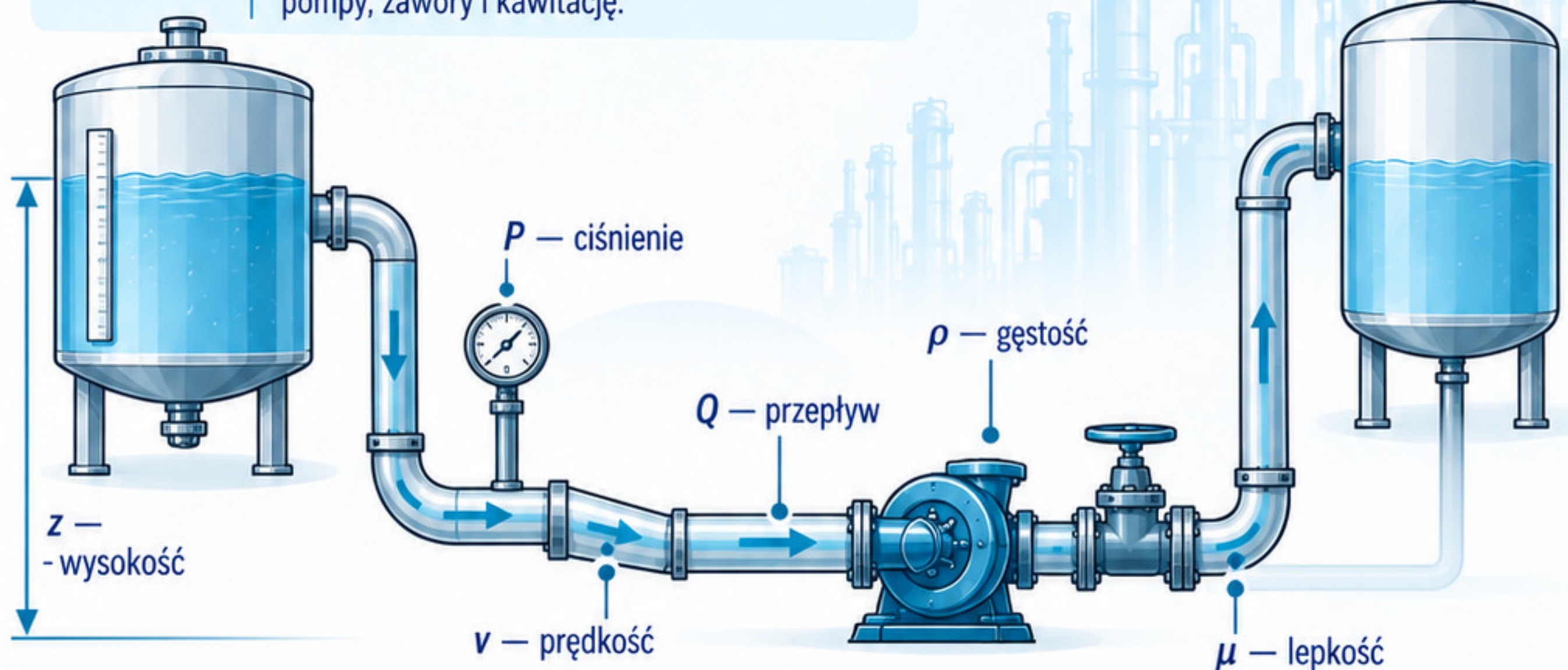
MODUŁ 04

MECHANIKA PŁYNÓW

Ciśnienie wprawia płyn w ruch, lepkość stawia opór, a geometria instalacji decyduje o skutkach.



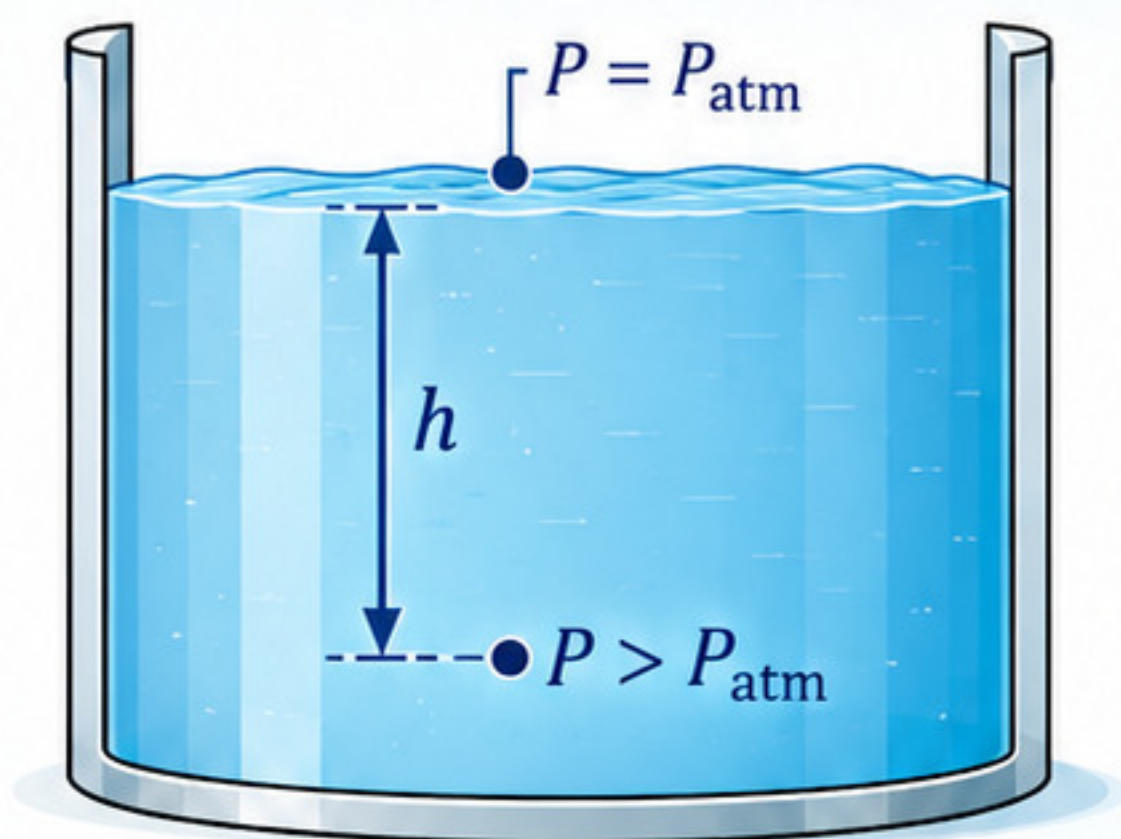
Po tym module będziesz potrafić interpretować ciśnienie hydrostatyczne, równanie ciągłości i Bernoulliego, rozróżniać przepływ laminarny i turbulentny oraz analizować straty ciśnienia, pompy, zawory i kawitację.



***W przepływie zawsze pytaj:
co napędza płyn, co mu przeszkadza
i gdzie traci energię?***

W nieruchomym płynie ciśnienie rośnie wraz z głębokością.

CISNIENIE W NIERUCHOMYM PŁYNIE



PODSTAWOWE RÓWNANIA

Równanie hydrostatyczne:

$$P = P_0 + \rho gh$$

Dla zbiornika otwartego ($P_0 = P_{\text{atm}}$):

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

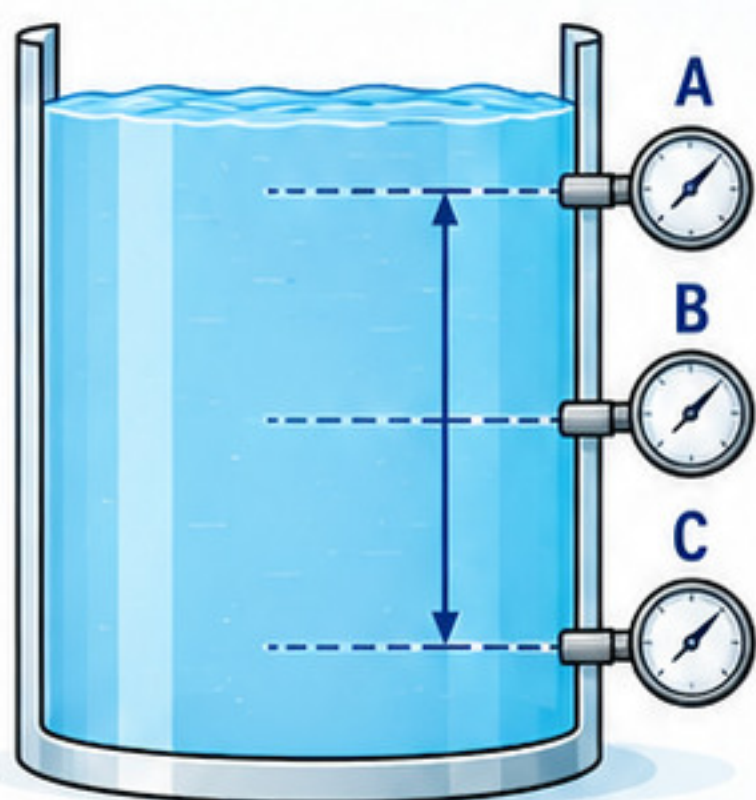
Ciśnienie manometryczne (względne):

$$P_{\text{gauge}} = \rho gh$$

OZNACZENIA

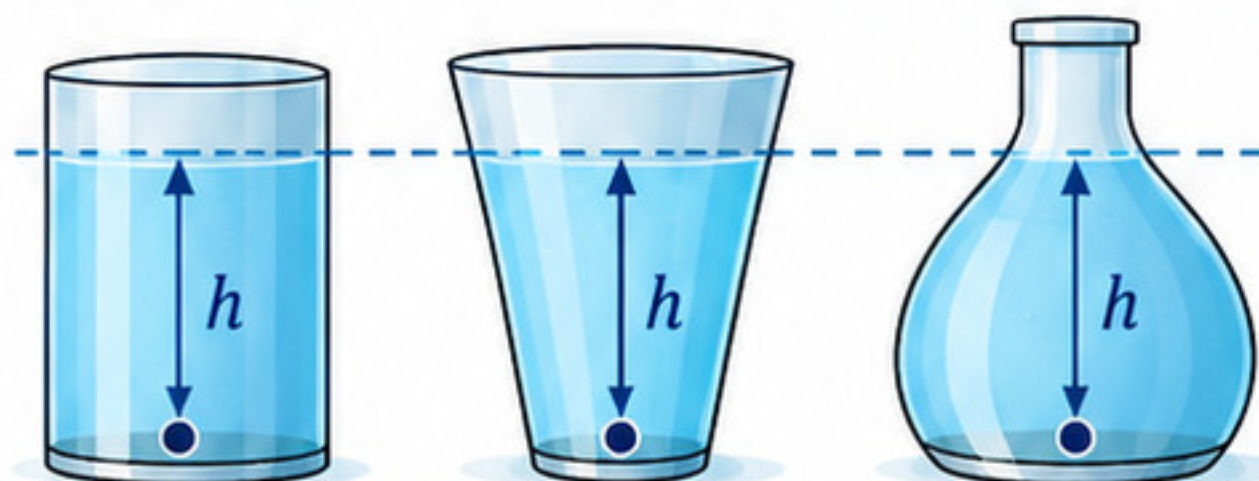
- ρ — gęstość płynu [kg/m^3]
- g — przyspieszenie ziemskie [m/s^2]
- h — różnica wysokości [m]

GŁĘBIEJ = WIĘKSZE CIŚNIENIE



$$P_A < P_B < P_C$$

GEOMETRIA ZBIORNIKA NIE MA ZNACZENIA



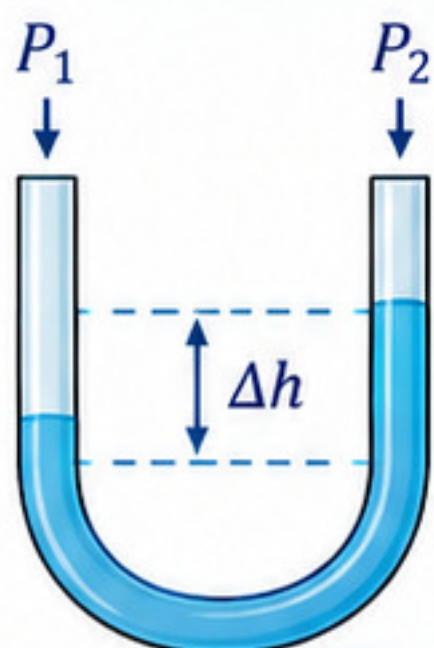
$$P = P_0 + \rho gh$$

$$P = P_0 + \rho gh$$

$$P = P_0 + \rho gh$$

Ciśnienie hydrostatyczne zależy od głębokości, gęstości i ciśnienia na powierzchni — nie od kształtu zbiornika.

MANOMETR U-RURKOWY



Różnica poziomów cieczy może zostać użyta do pomiaru różnicy ciśnień.

$$\Delta P = \rho_m g \Delta h$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Ciśnienie hydrostatyczne w wodzie

Dane:

$$\rho \approx 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 5 \text{ m}$$

Obliczenia:

$$\Delta P = \rho gh$$

$$\Delta P \approx 1000 \times 9,81 \times 5$$

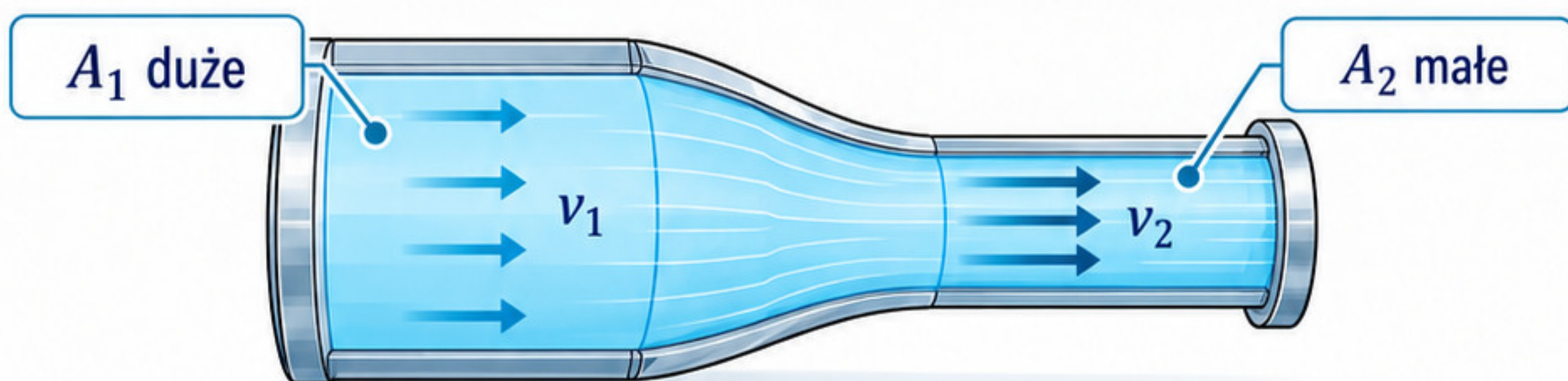
$$\Delta P \approx 49 \text{ kPa}$$

TYPOWY BŁĄD



W równaniu hydrostatycznym liczy się pionowa różnica wysokości, a nie długość drogi wzdłuż zbiornika lub rury.

Jeśli masa nie gromadzi się w przewodzie, tyle samo masy musi przepłynąć przez każdy jego przekrój.



OGÓLNE RÓWNANIA

(stan ustalony, jedno wejście – jedno wyjście)

$$\dot{m} = \rho A v$$

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

- $\dot{m}$ — masowe natężenie przepływu [kg/s]
- ρ — gęstość [kg/m³]
- A — pole przekroju [m²]
- v — średnia prędkość [m/s]

NIEŚCIŚLIWA CIECZ

($\rho_1 \approx \rho_2$)

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$Q = A v$$

- Q — objętościowe natężenie przepływu [m³/s]
- Dla cieczy nieściśliwych Q jest stałe w całym przewodzie.

NAJWAŻNIEJSZY WNIOSEK

$$A \downarrow \Rightarrow v \uparrow$$

Dla stałego przepływu objętościowego nieściśliwej cieczy.

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Dane:

$$D_1 = 0,10 \text{ m}$$

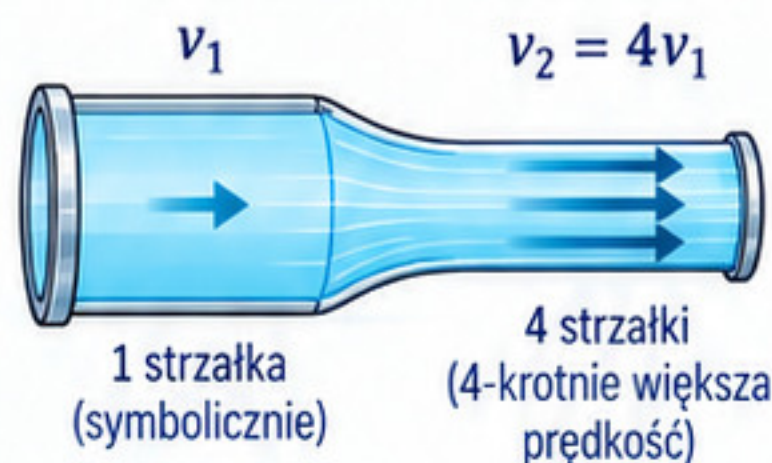
$$D_2 = 0,05 \text{ m}$$

Ponieważ $A \propto D^2$:

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{0,10}{0,05}\right)^2 = 4$$

Z równania ciągłości:

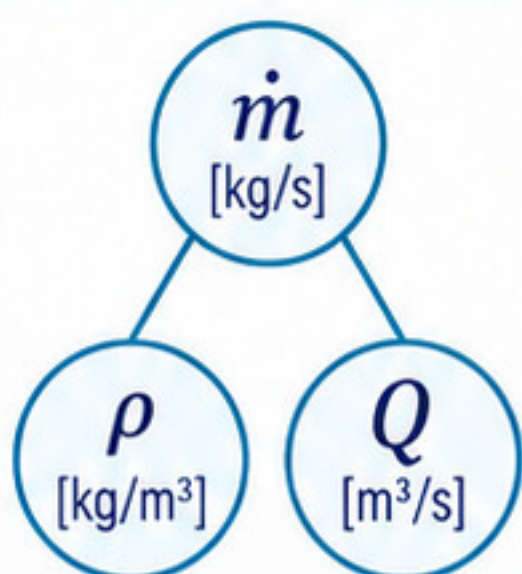
$$v_2 = 4v_1$$

MASOWE A OBJĘTOŚCIOWE
NATĘŻENIE PRZEPŁYWU

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

$$Q = A v$$

$$\dot{m} = \rho A v$$

GAZ NIE ZAWSZE JEST
„NIEŚCIŚLIWY”

Dla gazów gęstość może znacząco zmieniać się wzdłuż przewodu, dlatego nie wolno automatycznie skracać ρ_1 i ρ_2 .

TYPOWY BŁĄD



Mniejsza średnica nie oznacza mniejszego przepływu masowego w stanie ustalonym. Często oznacza większą prędkość.

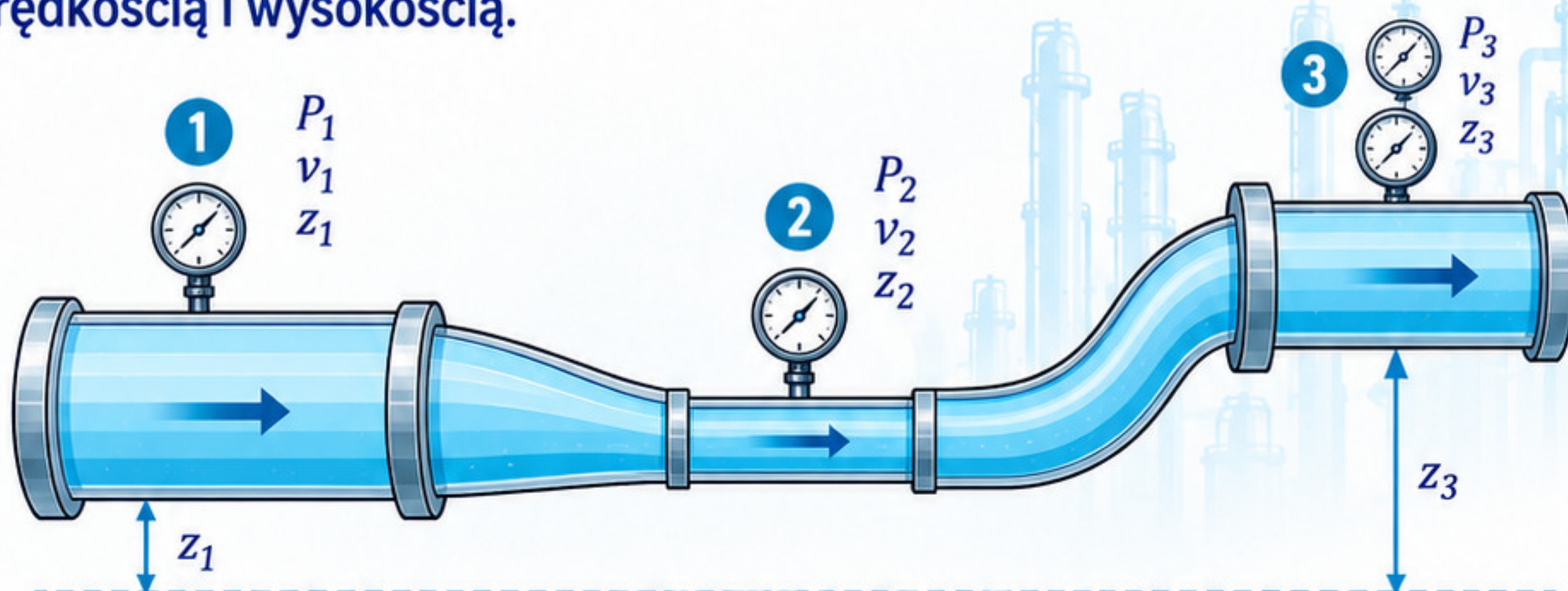


Ciągłość mówi, jak zmienia się prędkość.

Równanie Bernoulliego pokaże, jak wiąże się to z ciśnieniem i wysokością.

KARTA 33 — RÓWNANIE BERNOULLIEGO

W przepływie energia płynu może zmieniać formę między ciśnieniem, prędkością i wysokością.



RÓWNANIE BERNOULLIEGO

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

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

ZNACZENIE POSZCZEGÓLNYCH SKŁADNIKÓW

$$\frac{P}{\rho g}$$

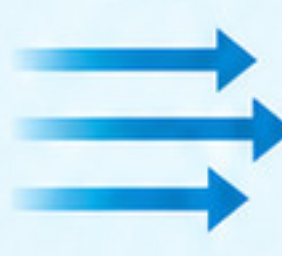
— wysokość ciśnienia



[m]

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

— wysokość prędkości



[m]

$$z$$

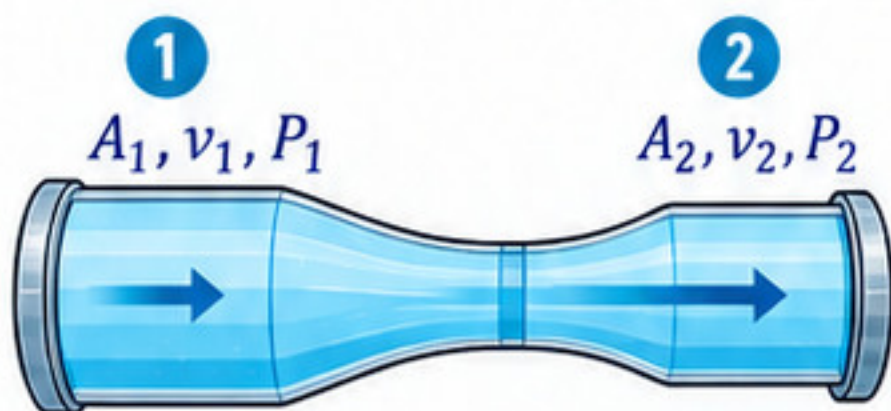
— wysokość położenia



[m]

ZWĘŻENIE RURY (EFEKT VENTURIEGO)

Dla poziomego przewodu: $z_1 = z_2$
 $A_1 v_1 = A_2 v_2$



Jeśli $A_2 < A_1$, to:

- $v_2 > v_1$ (z równania ciągłości)
- $P_2 < P_1$ (dla przepływu idealnego)

ROZSZERZONA POSTAĆ W PRAKTYCE

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_p =$$

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_t + h_L$$

- h_p — energia dodana przez pompę
- h_t — energia odebrana przez turbinę
- h_L — straty hydrauliczne

ALÉ UWAGA



„Większa prędkość = mniejsze ciśnienie” nie jest uniwersalną regułą dla każdego przepływu. Wynik zależy od geometrii, wysokości, pomp, strat i warunków brzegowych.

ZAPAMIĘTAJ



Bernoulli jest bilansem energii mechanicznej płynu — nie tylko równaniem między ciśnieniem i prędkością.

KARTA 34 — LICZBA REYNOLDSA

Liczba Reynoldsa pomaga przewidzieć, czy w przepływie dominują siły lepkościowe, czy bezwładność.

DEFINICJA

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

- ρ — gęstość [kg/m³]
- v — średnia prędkość [m/s]
- D — średnica charakterystyczna [m]
- μ — lepkość dynamiczna [Pa·s]
- ν — lepkość kinematyczna [m²/s]

RÓWNOWAŻNA POSTAĆ

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

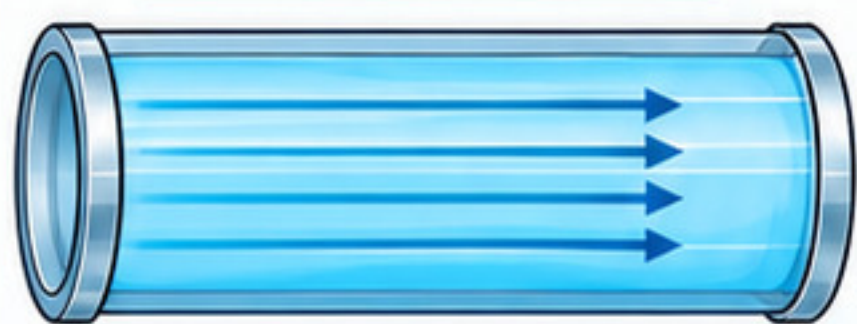
ZNACZENIE FIZYCZNE

$$Re = \frac{\text{siły bezwładności}}{\text{siły lepkościowe}}$$

Liczba Reynoldsa określa stosunek wpływu sił bezwładności do sił lepkościowych w przepływie. Gdy Re jest małe, lepkość dominuje, a gdy duże — bezwładność.

STRUKTURA PRZEPŁYWU W RURZE

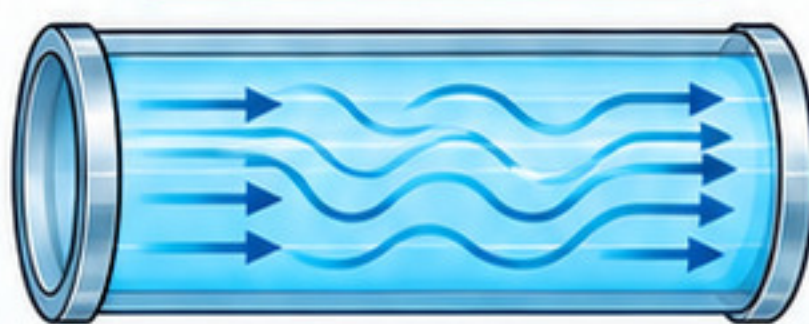
MAŁE Re



lepkość dominuje

Przepływ laminarny — uporządkowane, równoległe linie prądu.

POŚREDNIE Re



obszar przejściowy

Linie prądu zaczynają się odchylać i oscylować.

DUŻE Re



bezwładność dominuje

Przepływ turbulentny — wiry i intensywne mieszanie.

ZAKRESY Re DLA PRZEPŁYWU WEWNĘTRZNEGO W RURZE KOŁOWEJ

$Re \lesssim 2300$ — przepływ laminarny

$2300 \lesssim Re \lesssim 4000$ — obszar przejściowy

$Re \gtrsim 4000$ — przepływ turbulentny

Granice są orientacyjne i zależą od warunków przepływu oraz zaburzeń na wlocie.

CO ZWIĘKSZA Re ?

$$\rho \uparrow \rightarrow Re \uparrow$$

$$v \uparrow \rightarrow Re \uparrow$$

$$D \uparrow \rightarrow Re \uparrow$$

$$\mu \uparrow \rightarrow Re \downarrow$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Dane (woda):

- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 1,0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- $v = 1 \text{ m/s}$
- $D = 0,05 \text{ m}$

Obliczenia:

$$Re = \frac{1000 \times 1 \times 0,05}{1,0 \times 10^{-3}} = 50\,000$$

Wniosek:

PRZEPŁYW TURBULENTNY



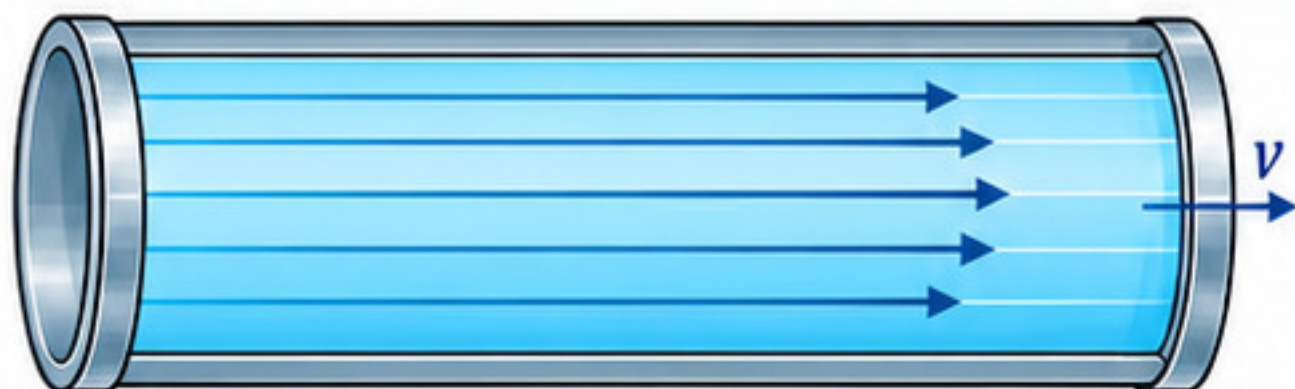
WAŻNE

Liczba Reynoldsa jest bezwymiarowa. To właśnie dlatego może być używana do porównywania przepływów o różnych rozmiarach i właściwościach płynu.

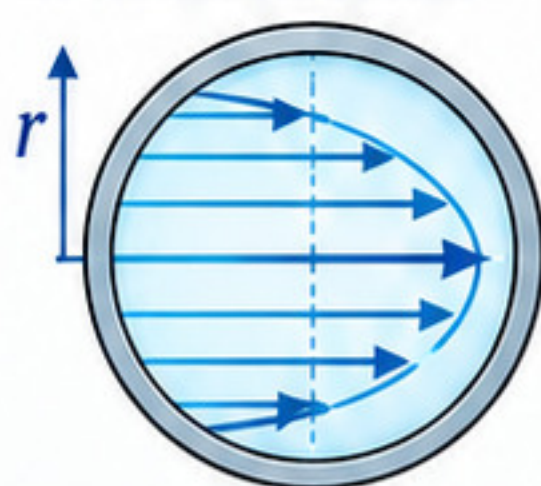
Ten sam płyn w tej samej rurze może płynąć spokojnie lub bardzo chaotycznie — zależnie od warunków.

PRZEPŁYW LAMINARNY

Warstwy płynu przesuwają się względem siebie bez intensywnego mieszania poprzecznego.



PROFIL PRĘDKOŚCI W RURZE KOŁOWEJ



profil paraboliczny

$$v_{max} = 2v_{avg}$$

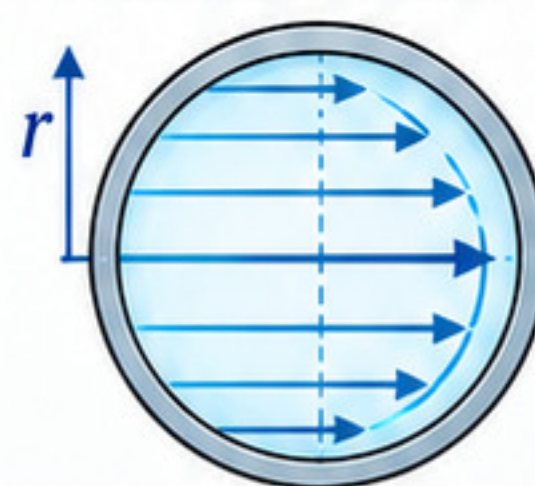
- uporządkowany ruch
- dominują efekty lepkościowe
- słabe mieszanie poprzeczne
- typowo niskie Re

PRZEPŁYW TURBULENTNY

Na ruch średni nakładają się nieregularne fluktuacje prędkości.



PROFIL PRĘDKOŚCI W RURZE KOŁOWEJ

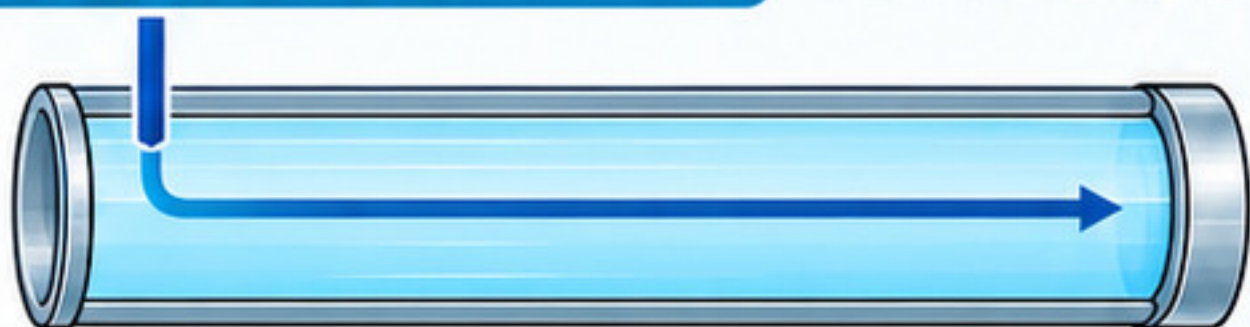


bardziej płaski profil

- silne mieszanie
- duże fluktuacje prędkości
- zwykle większe opory przepływu
- intensywniejsza wymiana ciepła i masy

EKSPERYMENT REYNOLDSA

Zmiana charakteru przepływu obserwowana na podstawie zachowania barwnika w rurze.



LAMINARNY — barwnik pozostaje cienką linią.



TURBULENTNY — barwnik szybko miesza się z cieczą.

PORÓWNANIE CECH

	Przepływ laminarny	Przepływ turbulentny
 Ruch	uporządkowany	nieregularny
 Mieszanie	słabe	intensywne
 Profil prędkości	silnie zakrzywiony	bardziej płaski
 Opory	zwykle mniejsze	zwykle większe

TURBULENCJA NIE JEST ZAWSZE „ZŁA”



Większe opory oznaczają większy koszt pompowania, ale turbulencja często zwiększa współczynniki wymiany ciepła i masy.

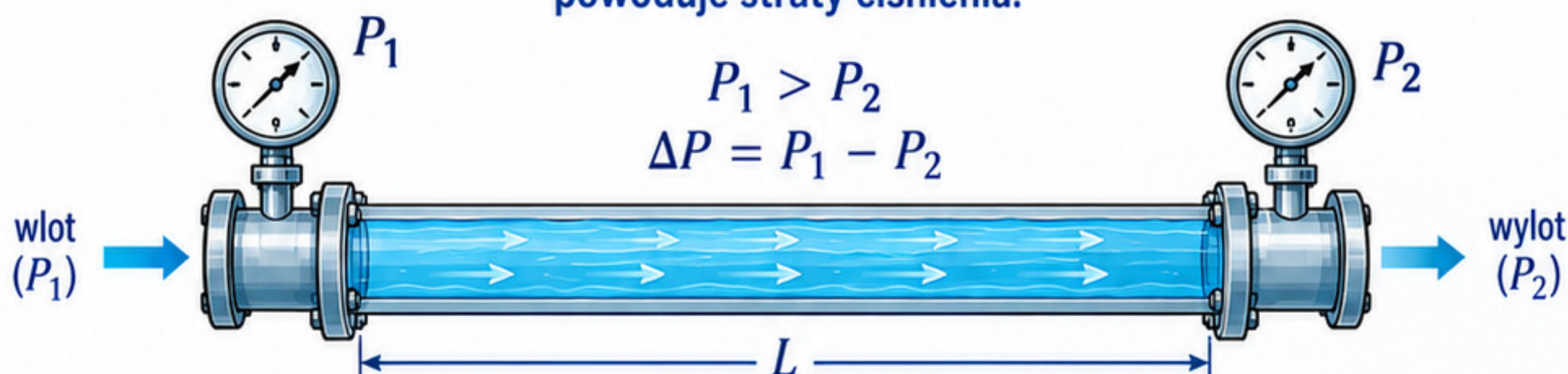
PAMIĘTAJ!



Przepływ turbulentny zwiększa mieszanie, ale ceną jest większa strata energii mechanicznej.

KARTA 36 — SPADEK CIŚNIENIA — DARCY-WEISBACH

Przepływ przez rurę wymaga energii, ponieważ tarcie płynu o ściany i wewnątrz płynu powoduje straty ciśnienia.



RÓWNANIE DARCY-WEISBACHA

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

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

- f — współczynnik tarcia Darcy'ego
- L — długość rury [m]
- D — średnica wewnętrzna [m]
- ρ — gęstość płynu [kg/m^3]
- v — średnia prędkość [m/s]
- g — przyspieszenie ziemskie ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- h_f — strata wysokości ciśnienia [m]

CO ZWIĘKSZA STRATY?

$L \uparrow \rightarrow \Delta P \uparrow$

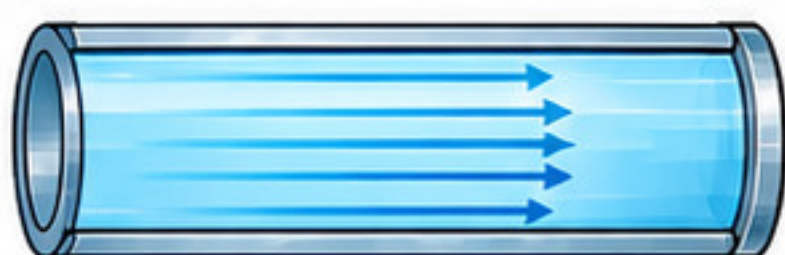
$v \uparrow \rightarrow \Delta P \text{ silnie } \uparrow$

$D \downarrow \rightarrow \Delta P \uparrow$

chropowatość $\uparrow \rightarrow$ zwykle $f \uparrow$ w przepływie turbulentnym

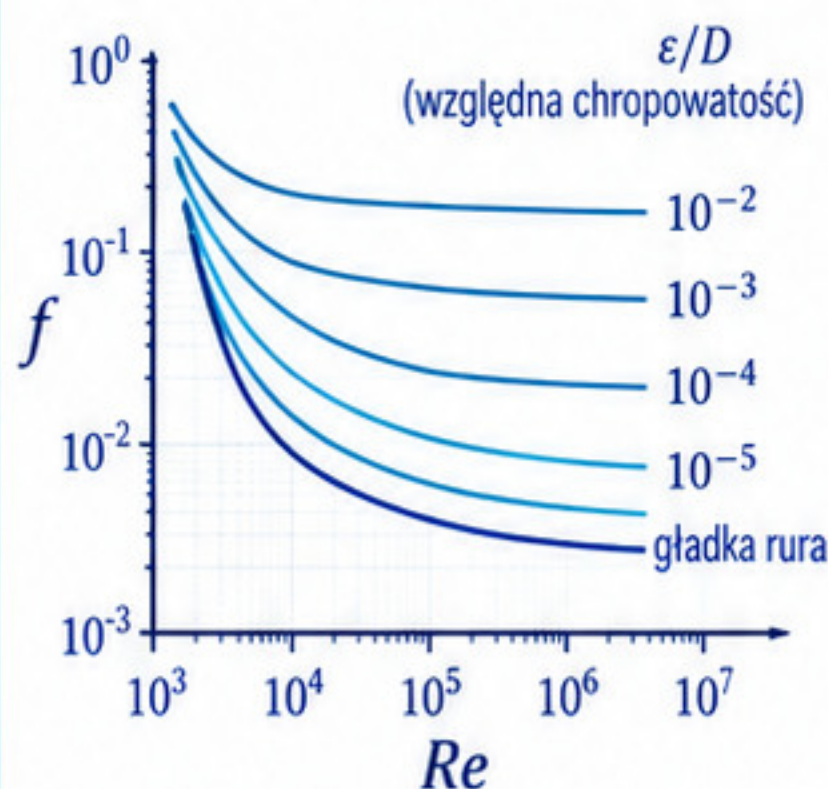
PRZEPŁYW LAMINARNY

$$f = \frac{64}{Re}$$



W przepływie laminarnym chropowatość ściany nie wpływa na f w taki sam sposób jak w turbulentnym przepływie rozwiniętym.

PRZEPŁYW TURBULENTNY



PORÓWNANIE: WPŁYW ŚREDNICY

RURA A (większa średnica)

$D = D$
 $Q = Q$
 $v = v$
 $\Delta P = \Delta P$

RURA B (połowa średnicy)

$D = 0,5 D$
 $Q = Q$
 $v = 4 v$
 $\Delta P = 16 \Delta P$

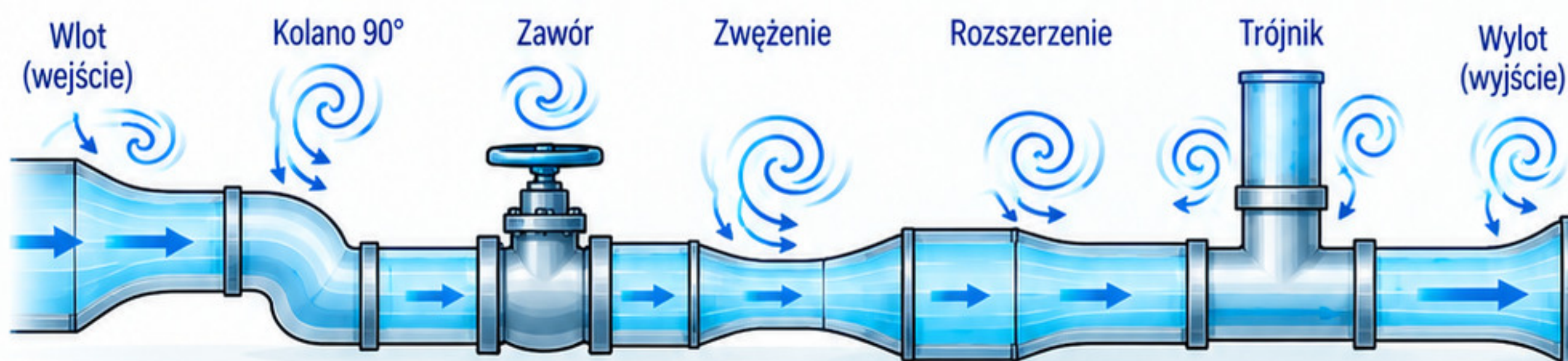
Zmniejszenie średnicy może dramatycznie zwiększyć wymagane ciśnienie pompowania.

TYPOWY BŁĄD



Spadek ciśnienia nie oznacza utraty masy. Oznacza degradację energii mechanicznej wskutek oporów przepływu.

Nie tylko długa rura powoduje straty — każde kolano, zawór, zwężenie i rozszerzenie zaburza przepływ.



PODSTAWOWE RÓWNANIA

$$h_L = K \frac{v^2}{2g}$$

$$\Delta P_L = K \frac{\rho v^2}{2}$$

- K — współczynnik straty miejscowej

K NIE JEST JEDNAKOWE DLA KAŻDEGO ELEMENTU



Nie istnieje uniwersalna wartość K — zależy ona od geometrii, wymiarów i warunków przepływu.

SUMA STRAT MIEJSCOWYCH

$$h_{L,\text{miejscowe}} = \sum K_i \frac{v_i^2}{2g}$$

PORÓWNANIE RODZAJÓW STRAT

STRATY LINIOWE

$$f \frac{L}{D}$$

- występują wzdłuż przewodu
- zależą od długości i chropowatości

STRATY MIEJSCOWE

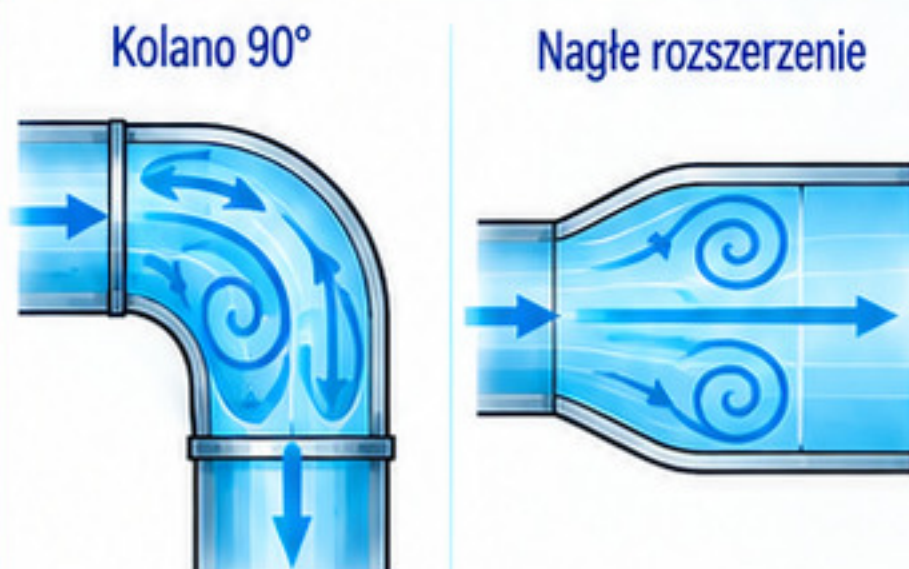
$$K$$

- występują w armaturze i przy zmianach geometrii
- zależą od kształtu i szczegółowych wymiarów

CAŁKOWITA STRATA CIŚNIENIA

$$h_L = h_f + \sum h_{L,i}$$

DLACZEGO POWSTAJĄ?



Nagłe zmiany kierunku lub przekroju powodują separację strugi, wiry i dodatkową dyssypację energii.

PRZYKŁAD PRAKTYCZNY

WARIANT A (więcej elementów)



WARIANT B (bardziej bezpośredni)



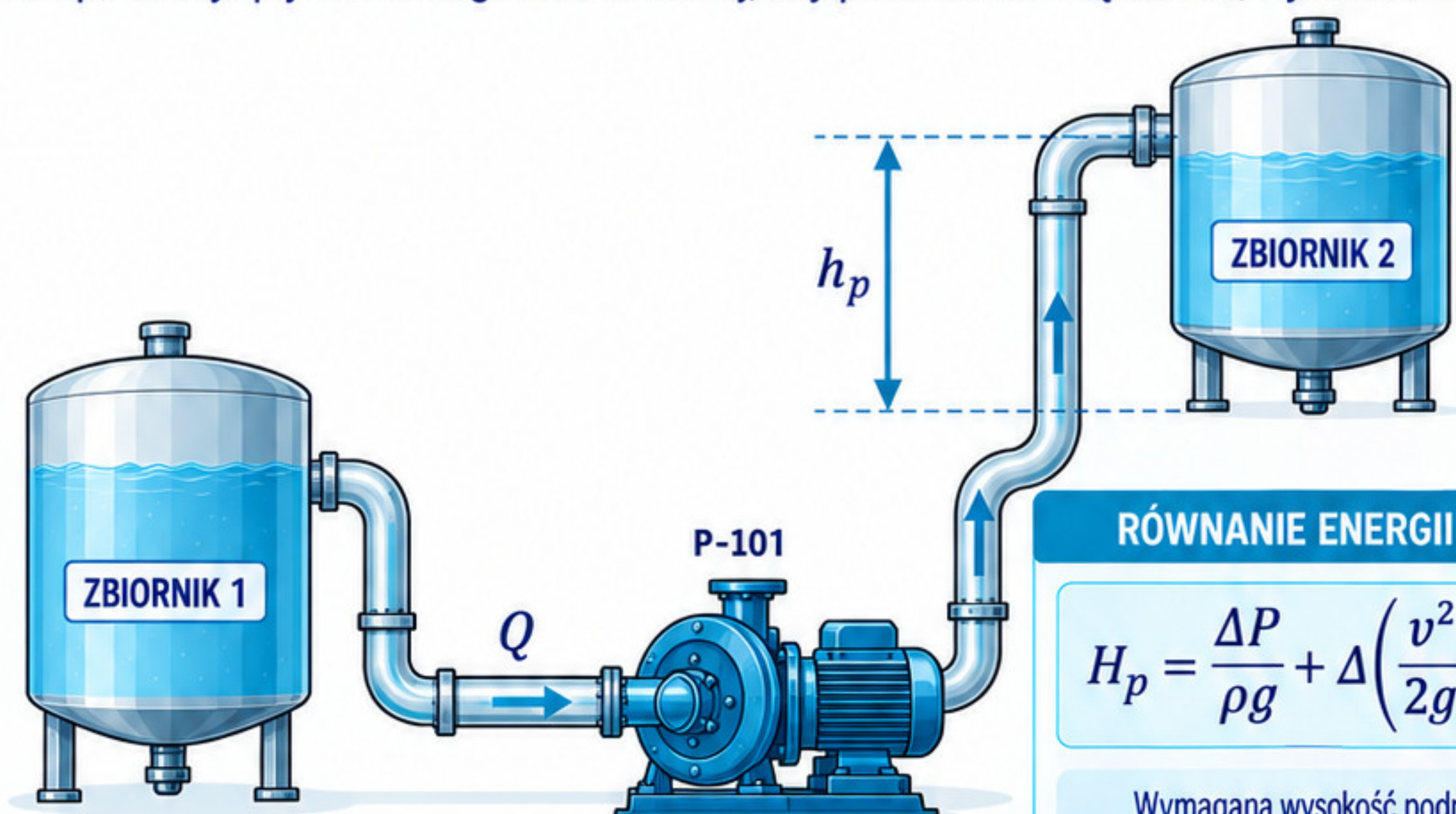
Układ o mniejszej liczbie niepotrzebnych elementów może wymagać mniej energii pompowania.

WAŻNE



Określenie „strata miejscowa” nie oznacza, że efekt jest zawsze mały. Zawór lub gwałtowna zmiana geometrii może powodować bardzo istotny spadek ciśnienia.

Pompa dodaje płynowi energii mechanicznej, aby pokonać różnicę ciśnień, wysokości i opory instalacji.



RÓWNANIE ENERGII DLA POMPY

$$H_p = \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \Delta z + h_L$$

Wymagana wysokość podnoszenia zależy od całego układu, nie tylko od różnicy poziomów.

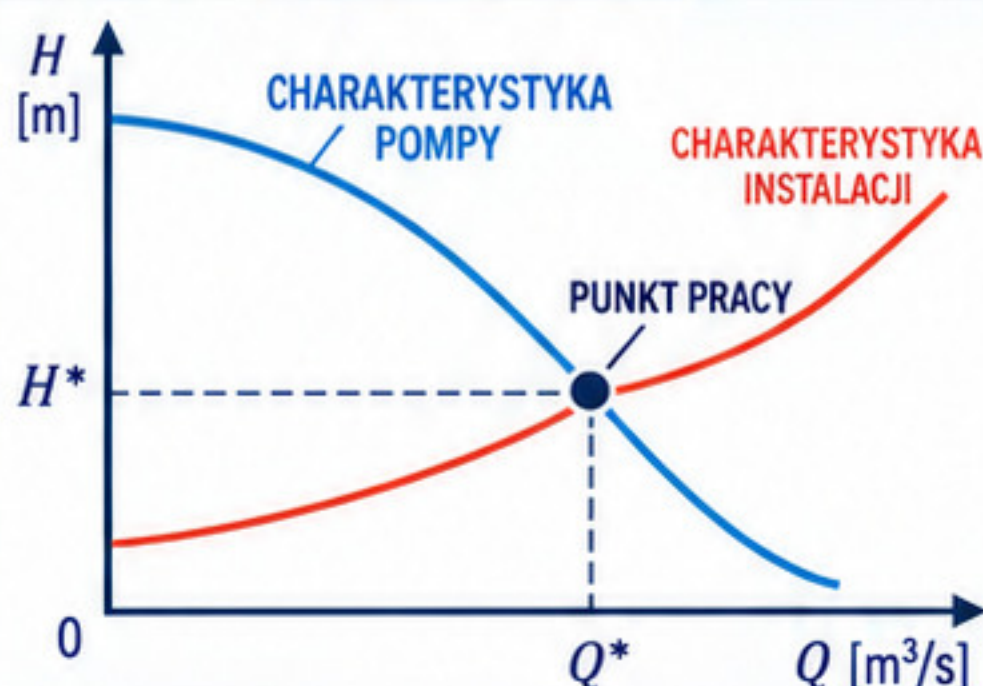
MOC POMPY

$$P_{hyd} = \rho g Q H$$

$$P_{shaft} = \frac{\rho g Q H}{\eta}$$

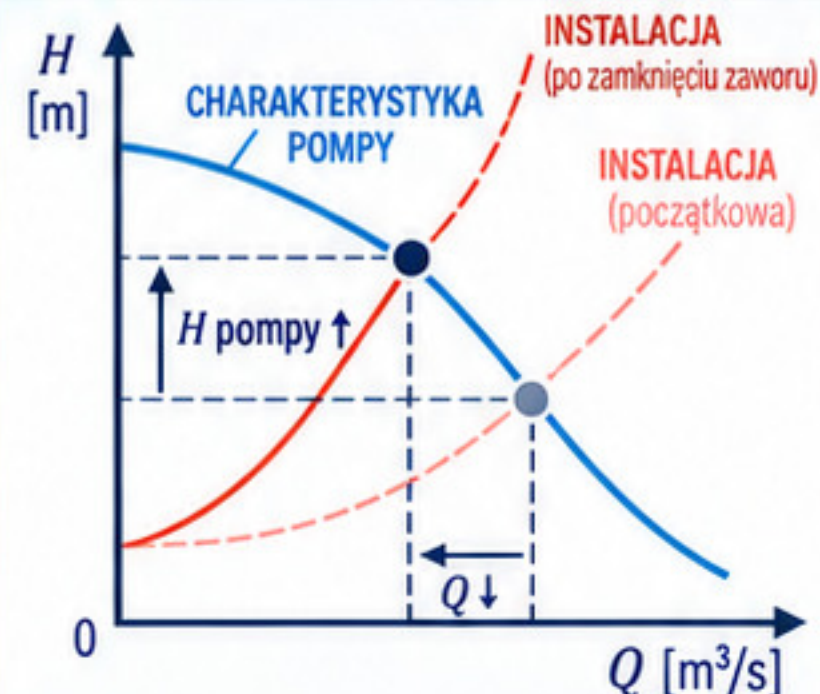
- Q — przepływ objętościowy [m^3/s]
- H — wysokość podnoszenia [m]
- η — sprawność pompy [—]

KRZYWA POMPY I INSTALACJI



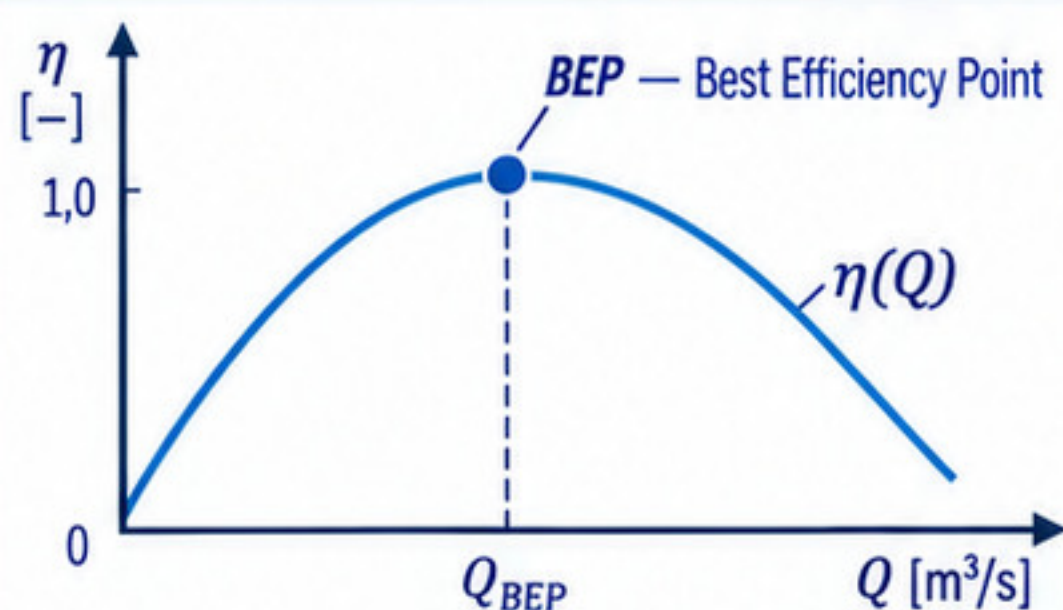
Pompa nie „wybiera” niezależnie przepływu i ciśnienia. Rzeczywisty punkt pracy wynika z przecięcia charakterystyki pompy i instalacji.

CO SIĘ DZIEJE, GDY ZAMYKAMY ZAWÓR?



Zamykanie zaworu zwiększa opory instalacji (krzywa staje się bardziej stroma), dlatego przepływ maleje, a wysokość podnoszenia pompy zwykle rośnie.

SPRAWNOŚĆ POMPY



Pompa powinna pracować możliwie blisko obszaru zalecanego przez producenta.

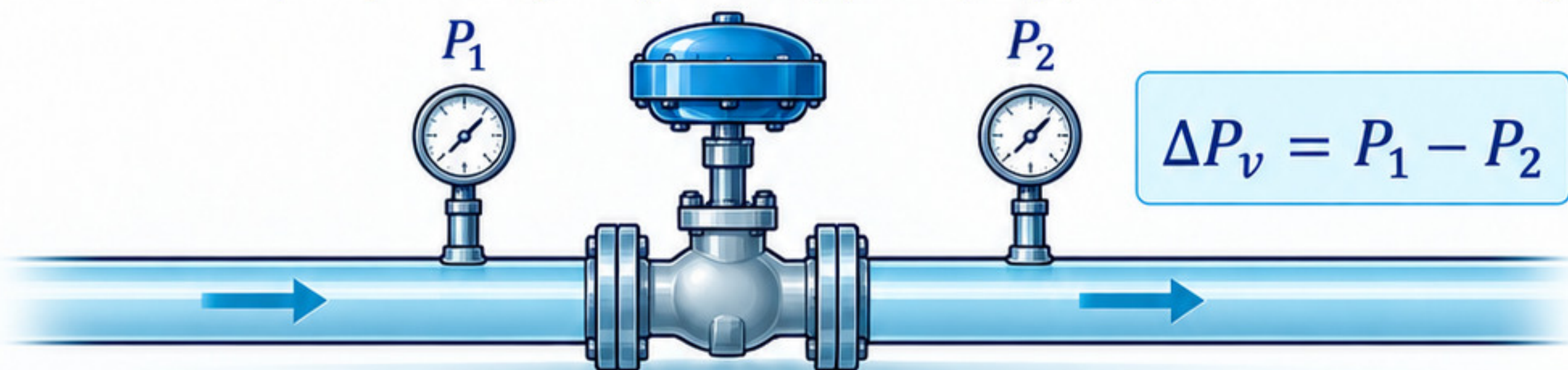
ZAPAMIĘTAJ



Dobór pompy wymaga znajomości zarówno pompy, jak i oporów całej instalacji.

KARTA 39 — ZAWORY I REGULACJA PRZEPŁYWU

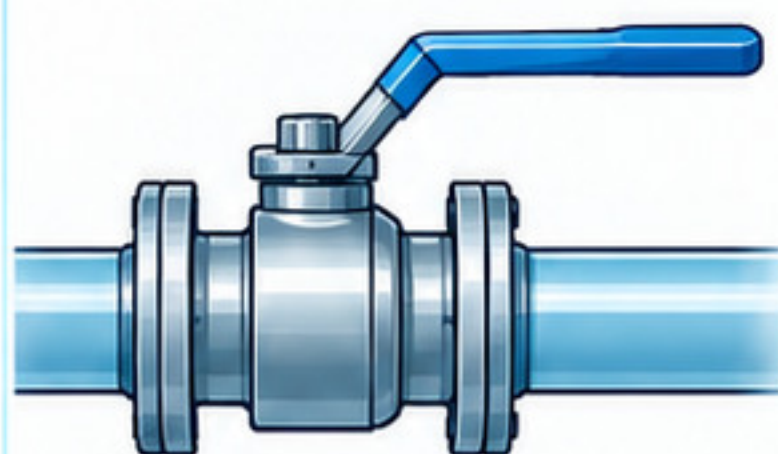
Zawór zmienia opór hydrauliczny, a dzięki temu wpływa na przepływ i spadek ciśnienia w instalacji.



TRZY FUNKCJE ZAWORÓW

ODCIĘCIE

otwarty / zamknięty



DŁAWIENIE

regulacja przepływu przez zmianę oporu

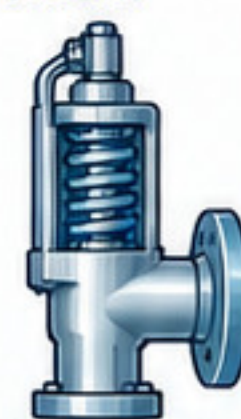


ZABEZPIECZENIE

ochrona przed niepożądanym kierunkiem lub ciśnieniem



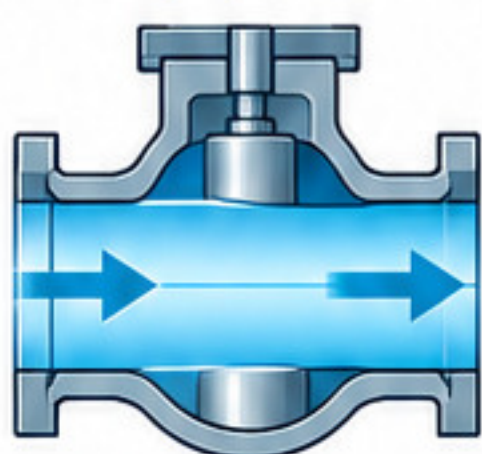
zawór zwrotny
(kierunek przepływu)



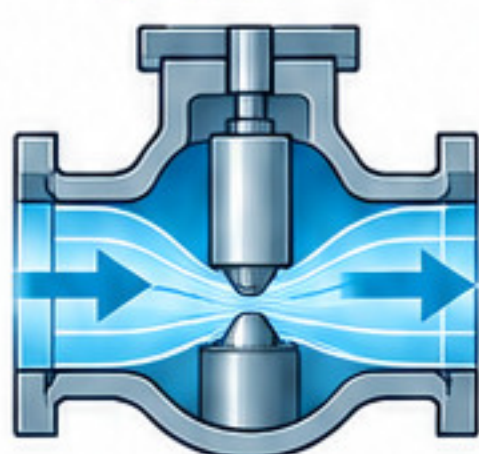
zawór bezpieczeństwa
(ciśnienie)

OTWARCIE A OPÓR

ZAWÓR OTWARTY
mały opór, $K \downarrow$



ZAWÓR PRZYMKNĘTY
większy opór, $K \uparrow$



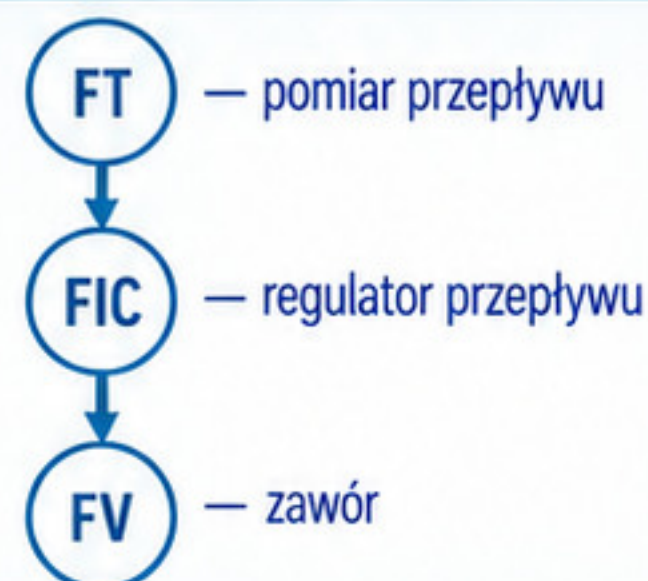
dla tej samej instalacji przepływ zwykle maleje

K_v — współczynnik przepływu zaworu

Większy K_v oznacza większą zdolność przepuszczania cieczy przy zadanym spadku ciśnienia.

Dokładne równania zależą od przyjętej definicji K_v , jednostek oraz rodzaju płynu.

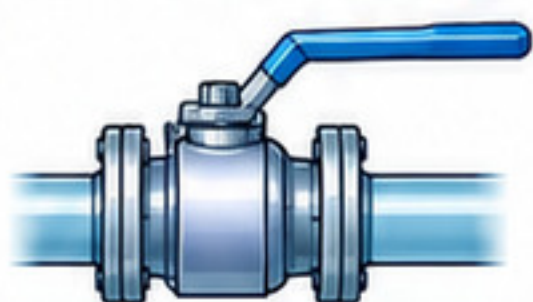
ZAWÓR REGULACYJNY



Regulator porównuje zmierzony przepływ z wartością zadaną i odpowiednio zmienia otwarcie zaworu.

PORÓWNANIE ZAWORÓW

ZAWÓR ODCINAJĄCY



ON / OFF

ZAWÓR REGULACYJNY



kontrolowana zmiana położenia

TYPOWY BŁĄD



Dławienie zaworu obniża ciśnienie przez zwiększenie strat energii mechanicznej — zawór nie odzyskuje tej energii.

Jeśli lokalne ciśnienie cieczy spadnie zbyt nisko, ciecz może zacząć parować wewnątrz pompy.



KAWITACJA



To powstawanie i gwałtowne zapadanie się pęcherzyków pary wskutek lokalnych zmian ciśnienia.

SKUTKI



hałas



drgania



spadek wydajności



erozja wirnika



WAŻNE

Kawitacja nie jest tym samym co zasysanie powietrza. W kawitacji pęcherzyki powstają z pary samej pompowanej cieczy.

NPSH

NPSH określa zapas ciśnienia po stronie ssawnej względem ciśnienia parowania cieczy.

NPSH dostępne — $NPSH_A$ 

Wynika z warunków instalacji (ciśnienie, wysokość, straty w przewodzie ssawnym).

NPSH wymagane — $NPSH_R$ 

Podawane przez producenta pompy (wynika z jej konstrukcji i badań).

Warunek poprawnej pracy:

$$NPSH_A > NPSH_R$$

z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa (zwykle 10–30%).

WZÓR NA NPSH DOSTĘPNE

$$NPSH_A = \frac{P_{suction,abs}}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} - \frac{P_{vap}}{\rho g}$$

- $P_{suction,abs}$ — ciśnienie bezwzględne na króćcu ssawnym [Pa]
- ρ — gęstość cieczy [kg/m³]
- g — przyspieszenie ziemskie [m/s²]
- v_s — średnia prędkość w przewodzie ssawnym [m/s]
- P_{vap} — ciśnienie parowania cieczy [Pa]

Dokładna postać wzoru zależy od przyjętego punktu odniesienia i sposobu opisu układu.

CO ZMNIJSZA RYZYKO KAWITACJI?



zwiększenie ciśnienia na ssaniu



zmniejszenie strat w przewodzie ssawnym



obniżenie temperatury cieczy, jeśli proces na to pozwala



odpowiednie położenie pompy względem zbiornika



właściwy dobór pompy

DOBRA INSTALACJA SSĄCA



- krótki przewód ssawny
- odpowiednia średnica
- niewiele elementów oporowych



RYZYKOWNA INSTALACJA



- długi przewód ssawny
- mała średnica
- wiele kolan i armatury
- duże straty ciśnienia



PRZEPŁYW



OPORY



POMPA



CIŚNIENIE SSANIA



KAWITACJA

MODUŁ 05

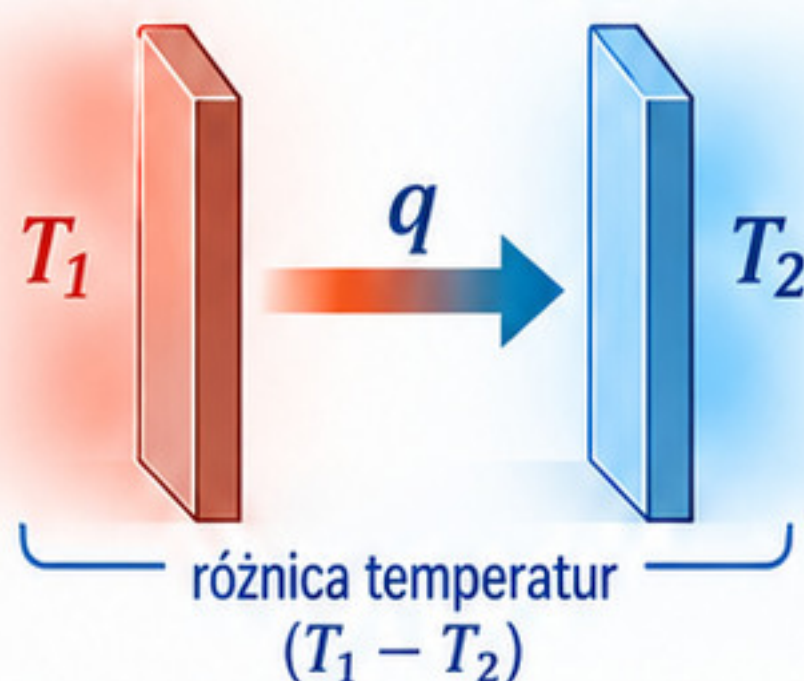
WYMIANA CIEPŁA I MASY

Transport zachodzi, gdy istnieje siła napędowa:
różnica temperatury lub różnica stężenia.



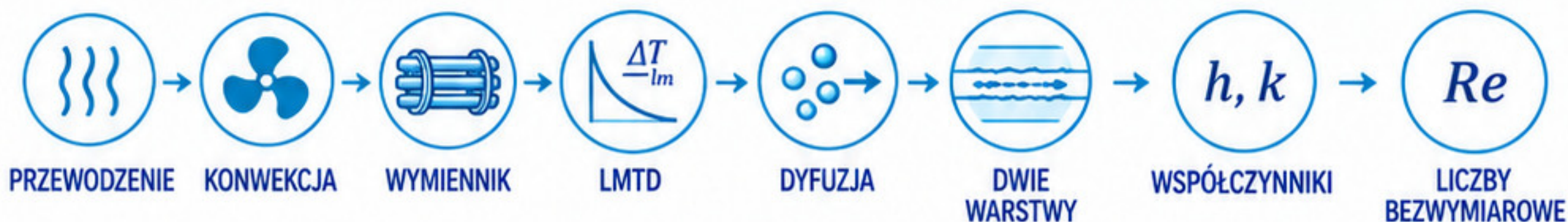
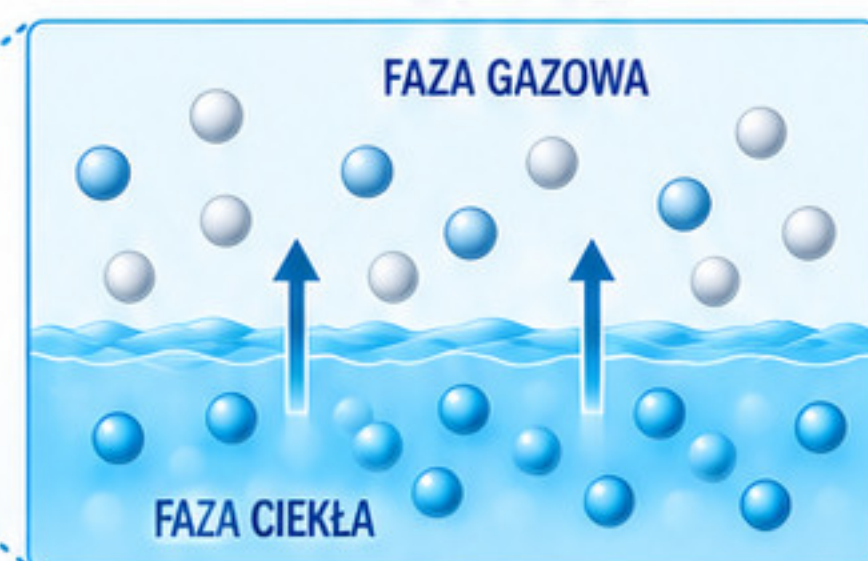
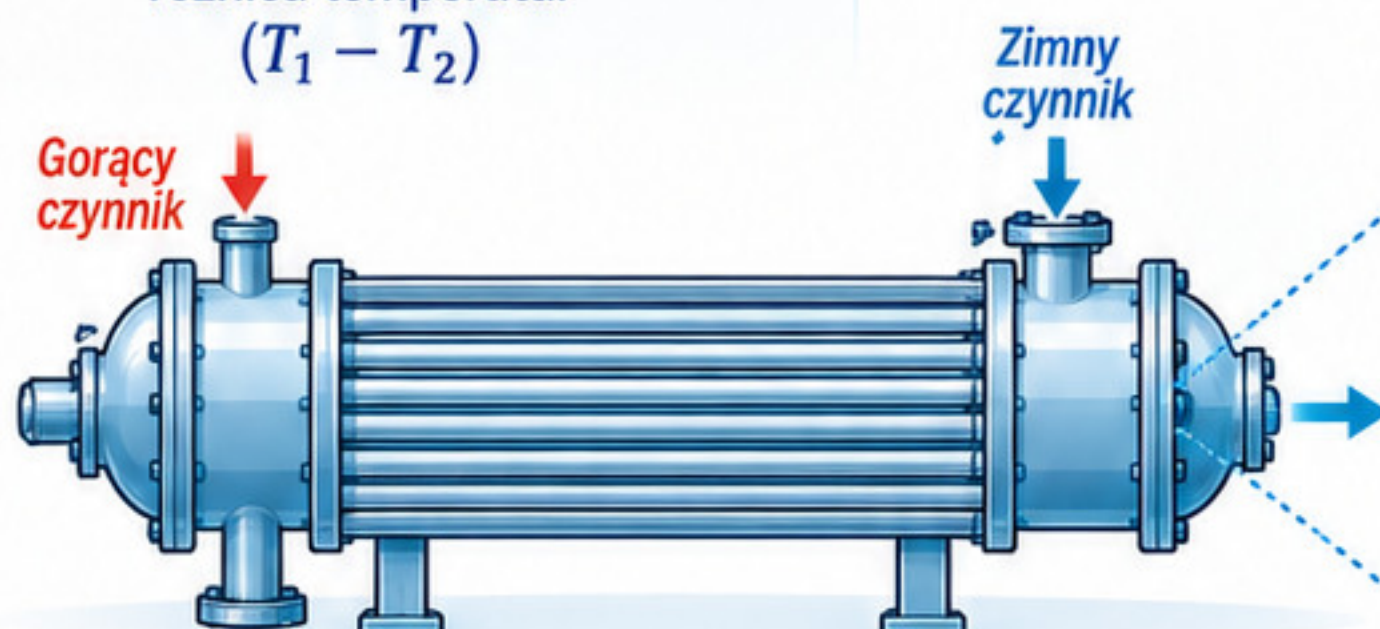
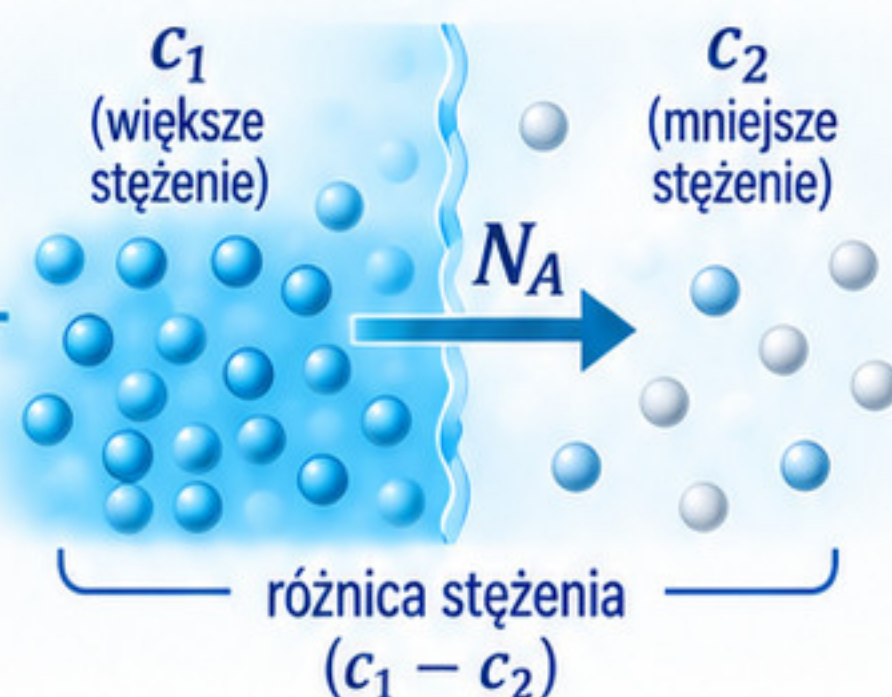
Po tym module będziesz potrafić rozpoznawać mechanizmy wymiany ciepła i masy, interpretować prawa Fouriera i Ficka, rozumieć działanie wymienników oraz korzystać z podstawowych współczynników i liczb bezwymiarowych opisujących transport.

CIEPŁO



SIŁA NAPĘDOWA
→
TRANSPORT

MASA

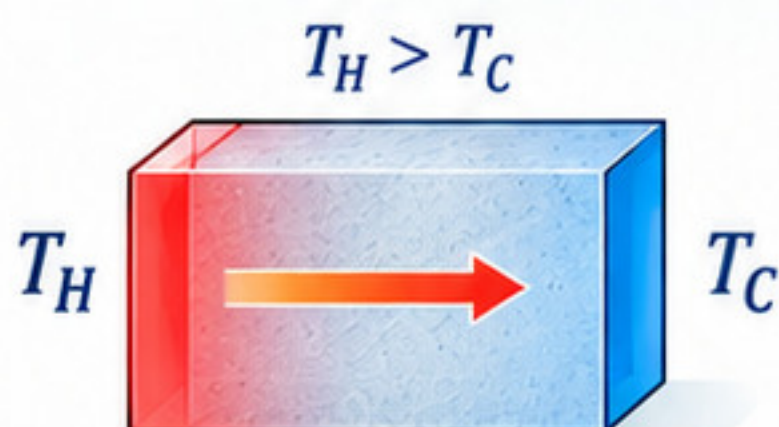


*Temperatura napędza wymianę ciepła.
Różnica potencjału chemicznego lub składu napędza wymianę masy.
Opory transportu decydują o szybkości.*

KARTA 41 — PRZEWODZENIE, KONWEKCJA I PROMIENIOWANIE

Ciepło może być transportowane przez materiał, ruch płynu lub promieniowanie elektromagnetyczne.

PRZEWODZENIE



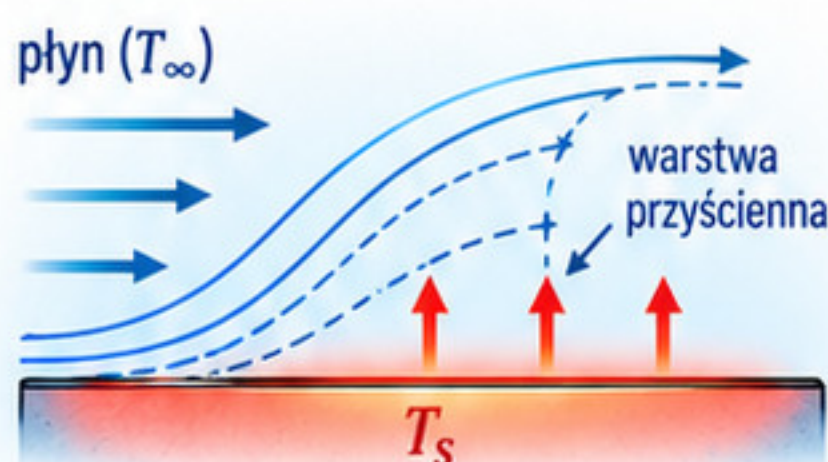
Energia jest przekazywana wskutek oddziaływań wewnątrz materiału, bez makroskopowego przepływu materii.

k — przewodność cieplna

Przykłady:

- ściana wymiennika
- metalowa płyta
- izolacja

KONWEKCJA



Wymiana ciepła między powierzchnią a poruszającym się płynem.

h — współczynnik przejmowania ciepła

konwekcja wymuszona



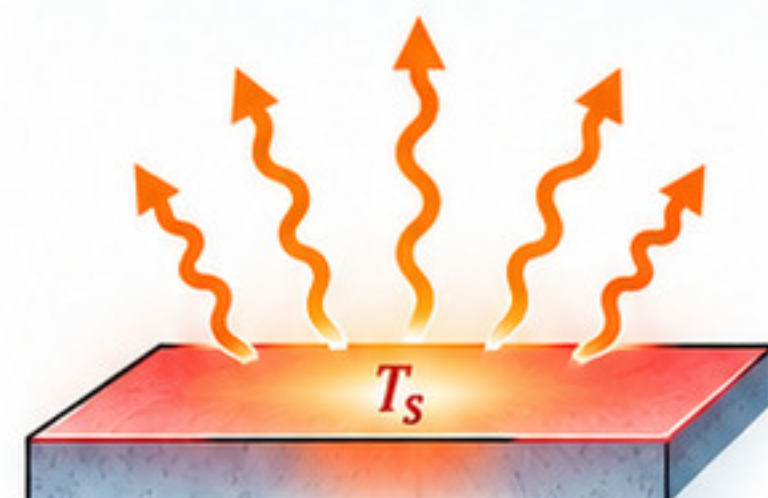
np. wentylator,
pompa

konwekcja swobodna



ruch płynu wywołany
różnicami gęstości

PROMIENIOWANIE



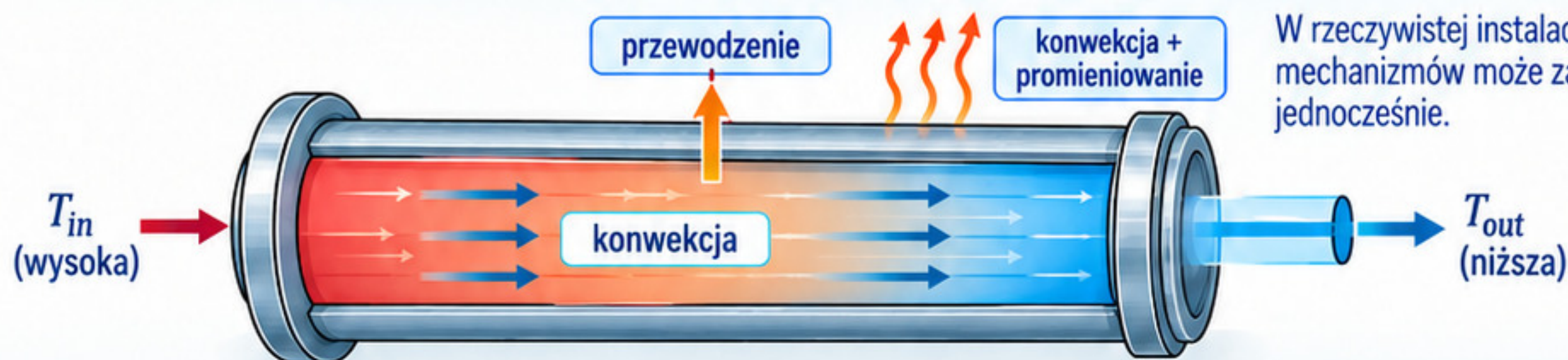
Energia jest przenoszona przez fale elektromagnetyczne i nie wymaga ośrodka materialnego.

ε — emisyjność

Przykład:

- promieniowanie od gorącej powierzchni pieca

TRZY MECHANIZMY W JEDNYM PROCESIE



W rzeczywistej instalacji kilka mechanizmów może zachodzić jednocześnie.

GDZIE TO ZACHODZI?

PRZEWODZENIE

głównie w ciałach stałych i nieruchomych warstwach płynu

KONWEKCJA

na granicy powierzchnia–płyn, przy ruchu płynu

PROMIENIOWANIE

między powierzchniami poprzez emisję i absorpcję energii elektromagnetycznej

SIŁA NAPĘDOWA

PRZEWODZENIE

różnica temperatur
 ΔT

KONWEKCJA

różnica temperatur
 ΔT

PROMIENIOWANIE

$$q_{\text{rad}} \propto T^4$$

TYPOWY BŁĄD



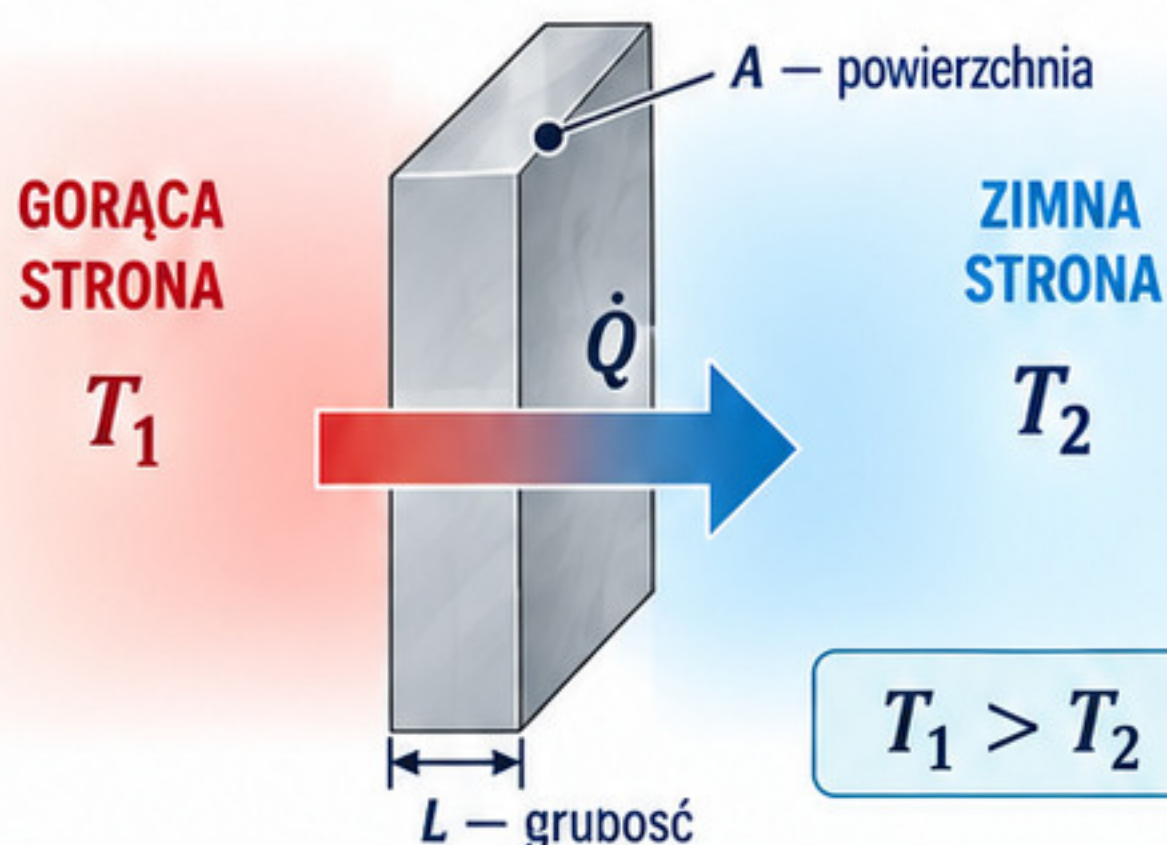
„Konwekcja” nie oznacza ciepła przemieszczającego się wyłącznie dlatego, że płyn się porusza. Jest to wymiana między powierzchnią a płynem połączona z transportem energii w warstwie przyściennej.



Następna karta: jak ilościowo opisać przewodzenie ciepła za pomocą prawa Fouriera.

Im większy gradient temperatury i przewodność materiału,
tym intensywniejsze przewodzenie ciepła.

PRZEWODZENIE CIEPŁA PRZEZ PŁASKĄ ŚCIANĘ



PRAWO FOURIERA

$$q'' = -k \frac{dT}{dx}$$

- q'' — strumień ciepła [W/m^2]
- k — przewodność cieplna [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
- dT/dx — gradient temperatury

Znak „-” oznacza, że ciepło płynie w kierunku malejącej temperatury.

PRZEPŁYW CIEPŁA PRZEZ PŁASKĄ ŚCIANĘ (stan ustalony, $k = \text{const}$)

$$\dot{Q} = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L}$$

$$k \uparrow \Rightarrow \dot{Q} \uparrow$$

$$A \uparrow \Rightarrow \dot{Q} \uparrow$$

$$\Delta T \uparrow \Rightarrow \dot{Q} \uparrow$$

$$L \uparrow \Rightarrow \dot{Q} \downarrow$$

OPÓR CIEPLNY

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

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{cond}}}$$

ANALOGIA

 różnica temperatur
napęd

 opór cieplny
przeszkoda

 strumień ciepła
wynik

PORÓWNANIE MATERIAŁÓW (te same wymiary, to samo ΔT)

METAL

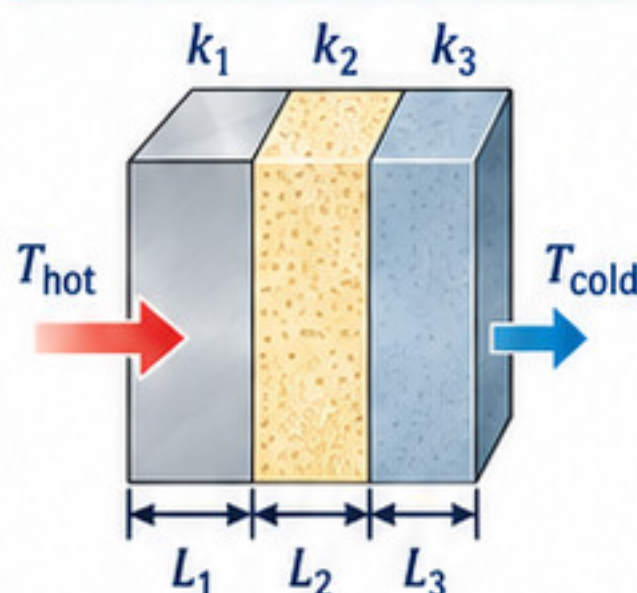


IZOLACJA



Materiał izolacyjny ogranicza wymianę ciepła głównie dzięki małej przewodności cieplnej.

ŚCIANA WIELOWARSTWOWA



$$R_{\text{całk}} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\dot{Q} = \frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{R_{\text{całk}}}$$

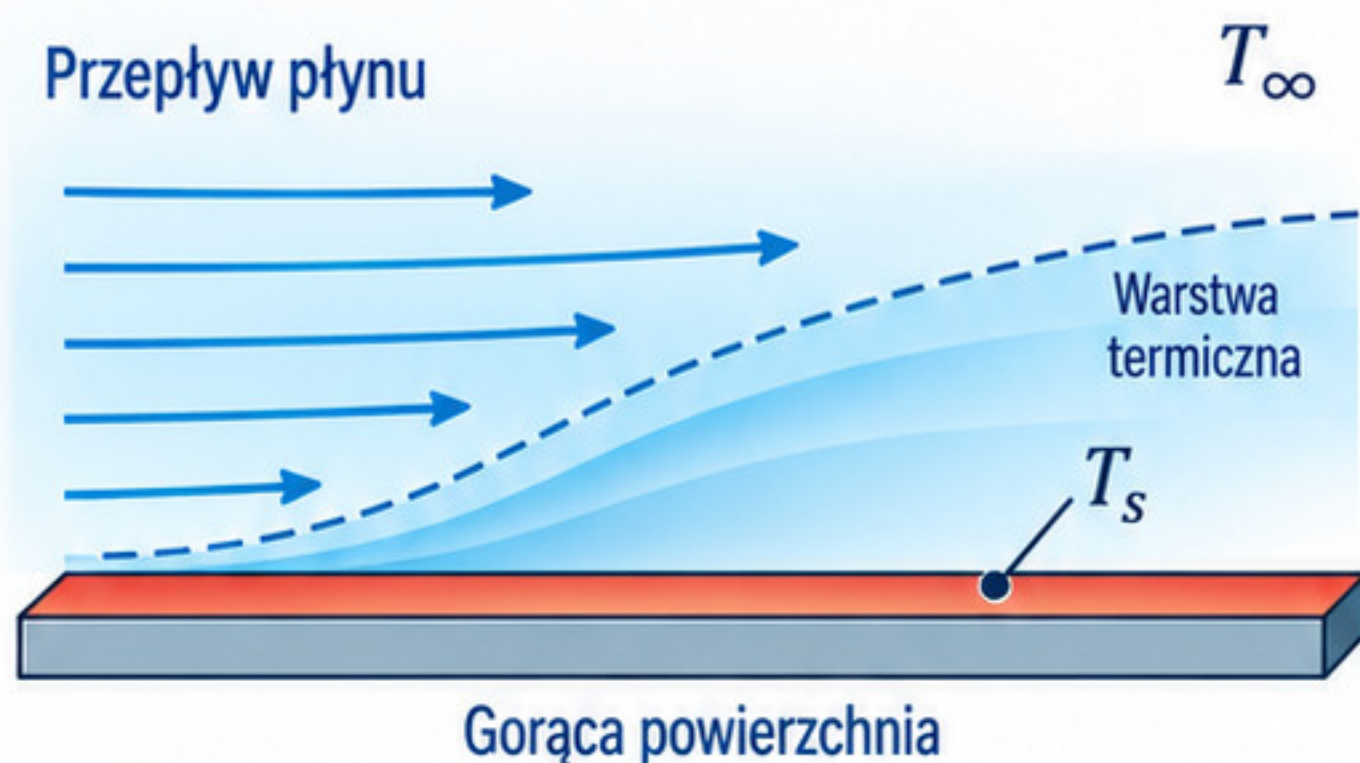


TYPOWY BŁĄD

Duża różnica temperatur nie oznacza automatycznie dużego przepływu ciepła. Jeśli opór cieplny jest duży, $\dot{Q}$ może pozostać małe.

Konwekcja opisuje wymianę ciepła między powierzchnią a płynem, a współczynnik h mówi, jak intensywna jest ta wymiana.

Przepływ płynu



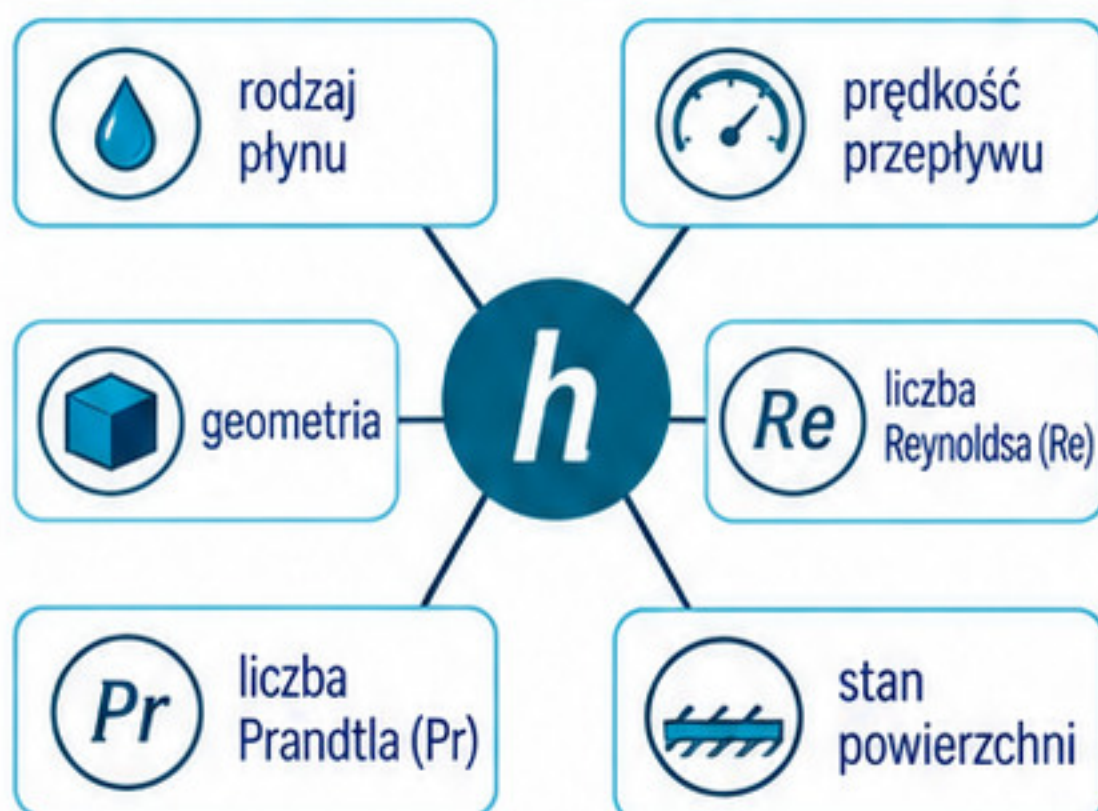
RÓWNANIA

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

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

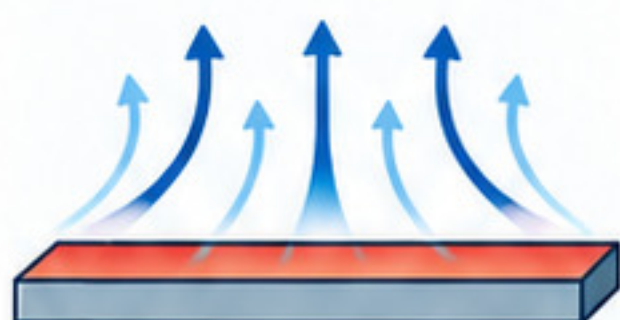
- h – współczynnik przejmowania ciepła [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
- A – powierzchnia wymiany
- T_s – temperatura powierzchni
- T_∞ – temperatura płynu poza warstwą przyścienną

CO WPŁYWA NA h ?



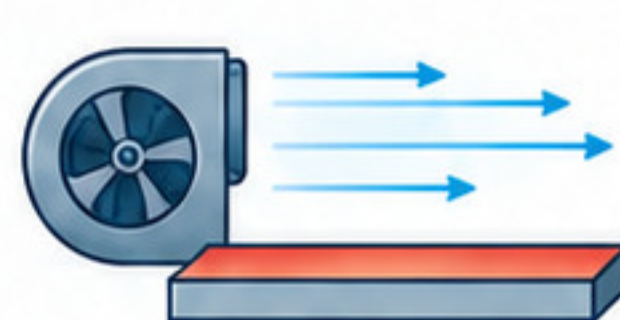
h nie jest wyłącznie właściwością materiału. Zależy od całego układu przepływu.

KONWEKCJA SWOBODNA



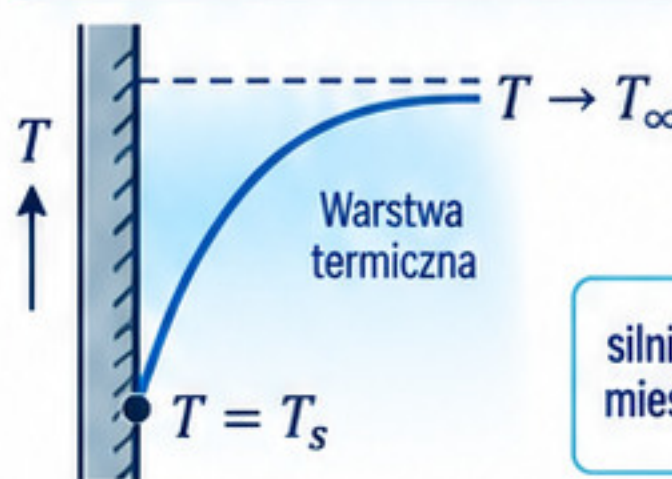
Ruch płynu wynika z sił wyporu.

KONWEKCJA WYMUSZONA



Ruch płynu jest wymuszany zewnętrznymi siłami.

WARSTWA PRZYŚCIENNA



Duża część oporu konwekcyjnego jest związana z cienką warstwą płynu przy powierzchni.

silniejsze mieszanie → cieńsza warstwa → większe h

OPÓR KONWEKCYJNY

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{conv}}$$

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY



$$h = 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$A = 2 \text{ m}^2$$

$$T_s - T_\infty = 30 \text{ K}$$

$$\dot{Q} = 200 \times 2 \times 30$$

$$\dot{Q} = 12\,000 \text{ W}$$

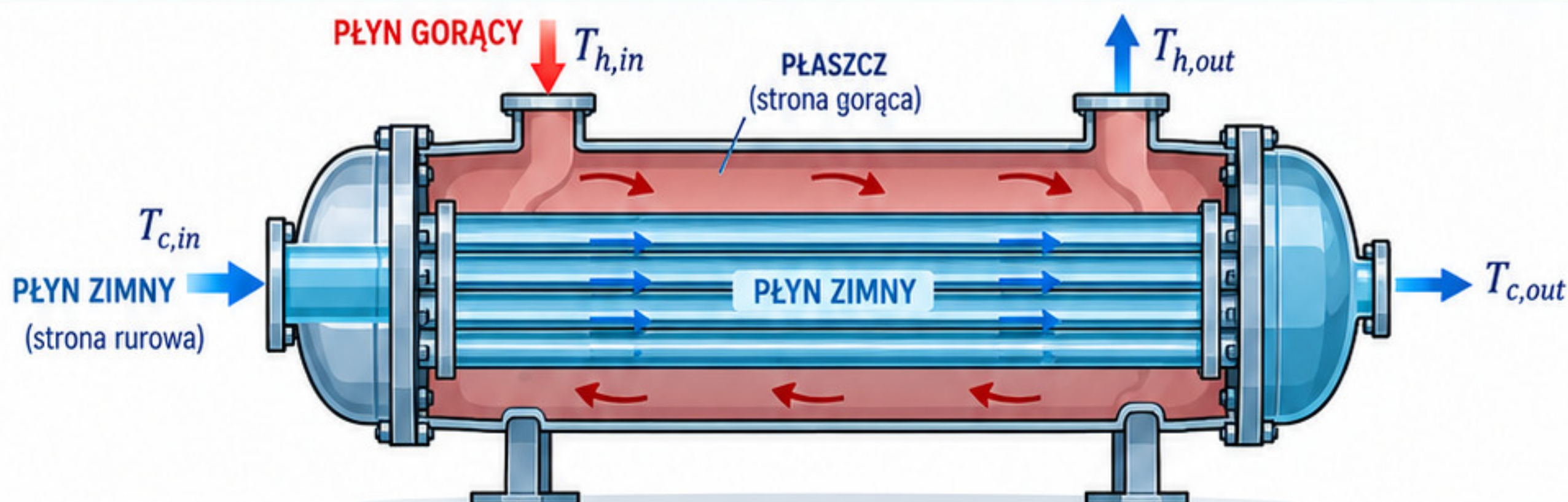
$$\dot{Q} = 12 \text{ kW}$$

WAŻNE



Ten sam materiał i ta sama różnica temperatur mogą dawać zupełnie inny przepływ ciepła, jeśli zmieniają się warunki przepływu i wartość h .

Wymiennik pozwala przekazać energię między dwoma płynami bez konieczności ich bezpośredniego mieszania.



BILANS ENERGII

$$\dot{Q}_{hot} + \dot{Q}_{cold} = 0 \quad | \quad |\dot{Q}_{hot}| = |\dot{Q}_{cold}|$$

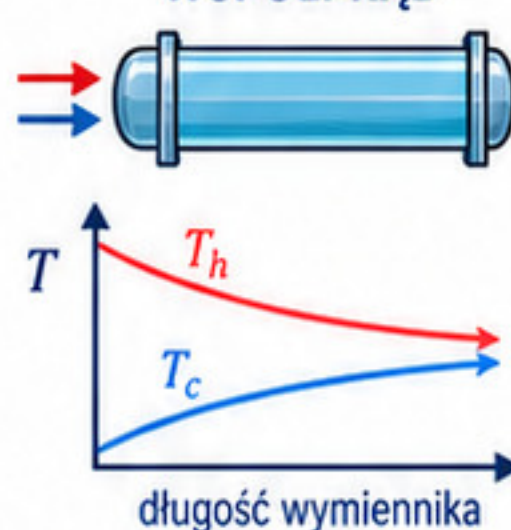
Jeśli nie występuje zmiana fazy, a c_p jest w przybliżeniu stałe:

$$\dot{Q} = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,in} - T_{h,out})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,out} - T_{c,in})$$

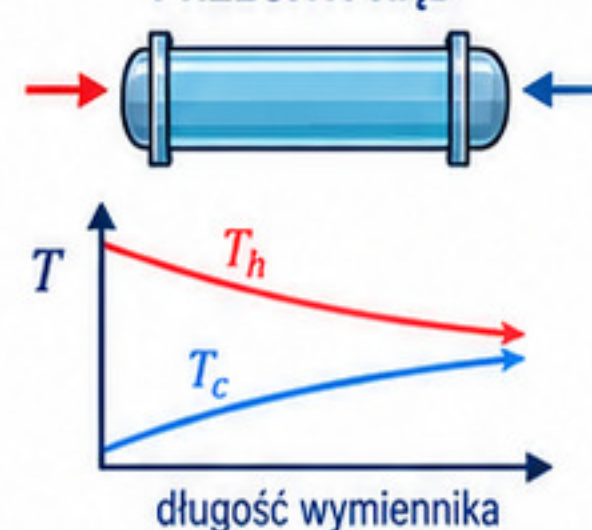
PRZECIWPŁĄD VS WSPÓŁPŁĄD

WSPÓŁPŁĄD



Szybkie zbliżanie się temperatur obu strumieni.

PRZECIWPŁĄD



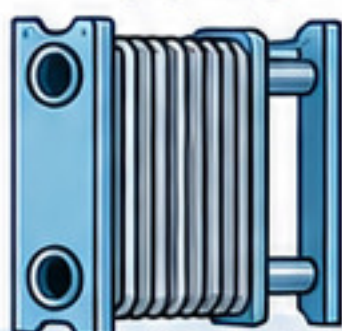
Układ przeciwpłądowy często umożliwia bardziej efektywne wykorzystanie różnicy temperatur.

NAJCZĘSTSZE TYPY

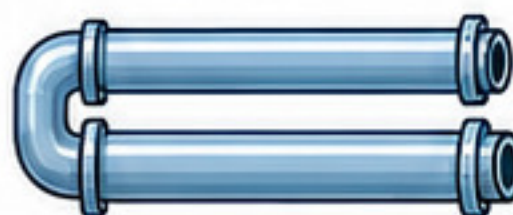
płaszczowo-rurowy



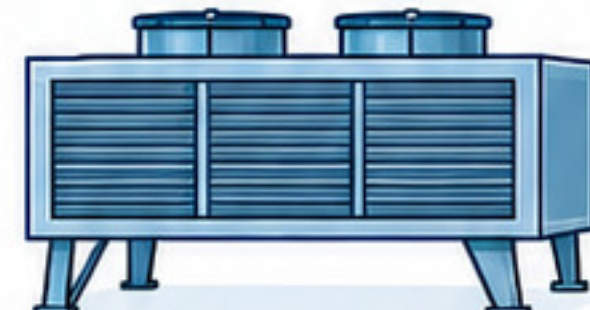
płytowy



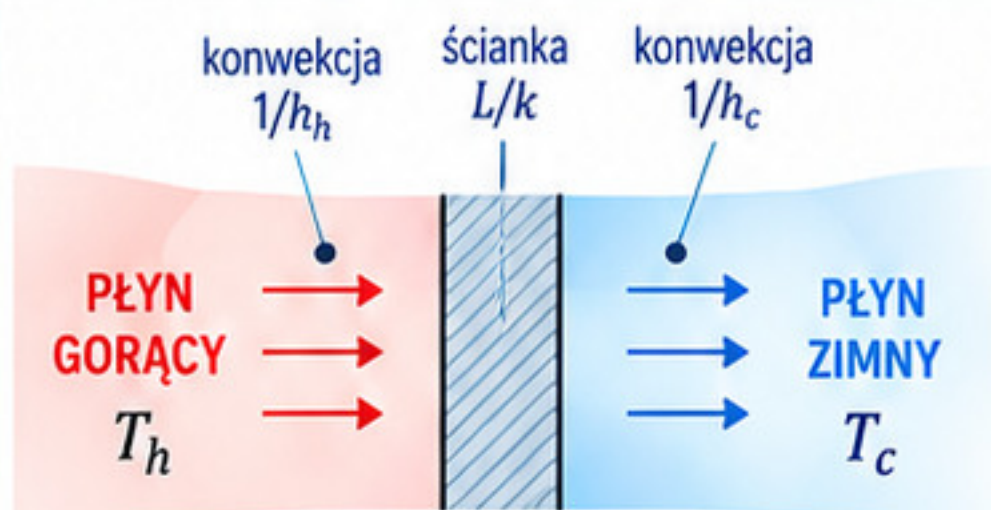
rura w rurze



chłodnica / skraplacz



OPORY W SZEREGU



Całkowity współczynnik przenikania ciepła:

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{napędowa}$$

U – całkowity współczynnik przenikania ciepła

TYPOWY BŁĄD



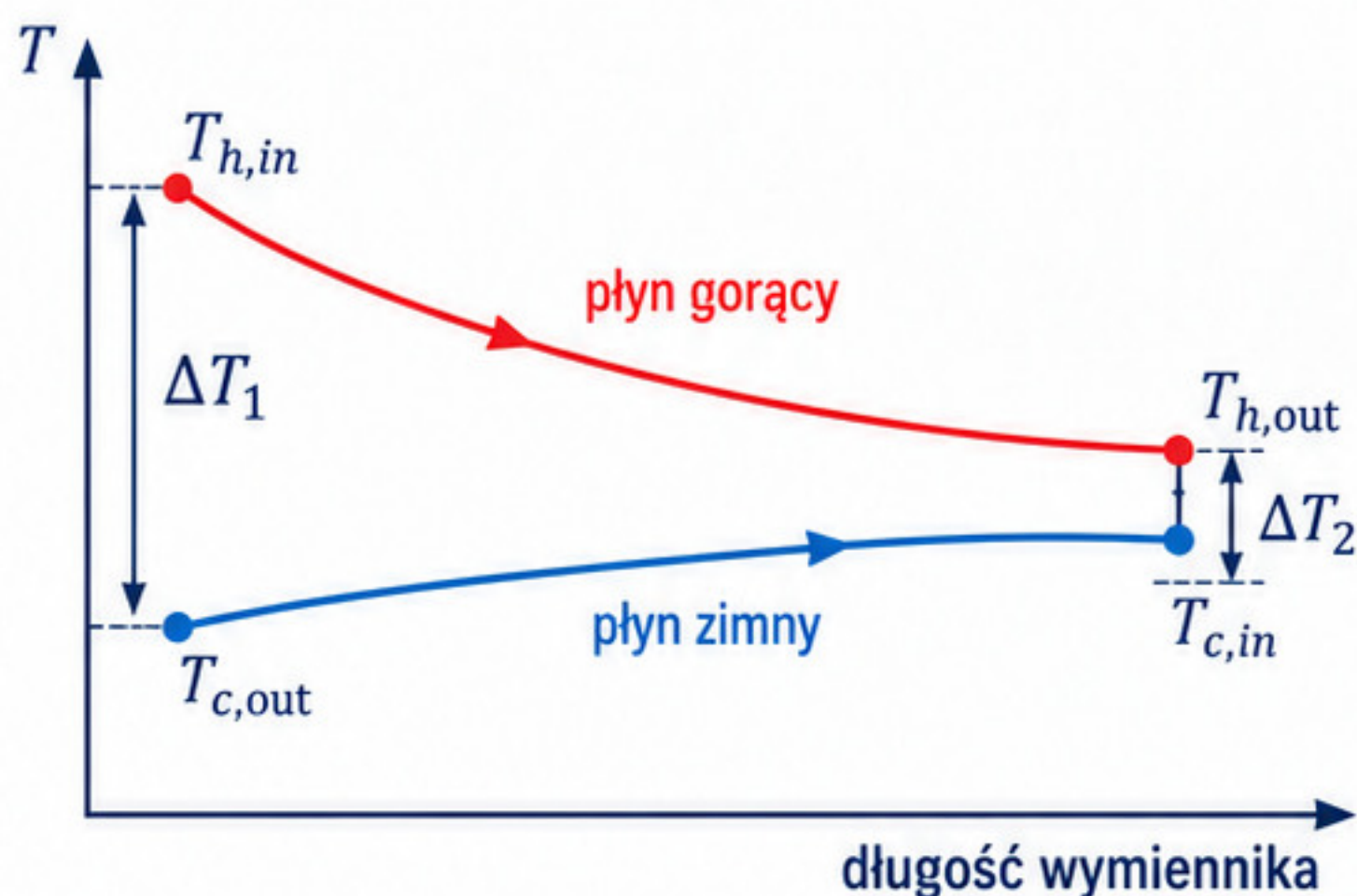
W wymienniku temperatura obu płynów zmienia się wzdłuż aparatu, więc zwykle nie wystarcza użycie jednej przypadkowej wartości ΔT .



Następna karta: logarytmiczna średnia różnica temperatur.

Ponieważ różnica temperatur zmienia się wzdłuż wymiennika, potrzebujemy właściwej średniej siły napędowej.

ROZKŁAD TEMPERATUR W WYMIENNIKU (PRZECIWPRĄD)



LMTD I STRUMIEŃ CIEPŁA

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

$$\dot{Q} = UA \Delta T_{lm}$$

$$\dot{Q} = UA F \Delta T_{lm}$$

F — współczynnik korekcyjny dla niektórych układów wieloprzebiegowych lub krzyżowych.

DLACZEGO NIE ZWYKŁA ŚREDNIA?



$$\frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2}$$

Rozkład temperatur w wymienniku ma charakter związany z bilansem energii, dlatego odpowiednią średnią jest średnia logarytmiczna.

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

$$\Delta T_1 = 60 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 20 \text{ K}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{60 - 20}{\ln \left(\frac{60}{20} \right)}$$

$$\Delta T_{lm} \approx 36,4 \text{ K}$$

METODA EFEKTYWNOŚĆ-NTU

GDY NIE ZNASZ TEMPERATUR WYJŚCIOWYCH

$$C = \dot{m}c_p$$

strumień pojemności cieplnej (W/K)

$$C_{min} = \min(C_h, C_c)$$

mniejszy strumień pojemności cieplnej

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in})$$

maksymalny możliwy strumień ciepła

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}}$$

efektywność wymiennika ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

liczba jednostek przenikania ciepła

Efektywność ε zależy od NTU, stosunku pojemności cieplnych i konfiguracji wymiennika.

PORÓWNANIE PODEJŚĆ



LMTD

znane lub wyznaczalne temperatury końcowe

- bezpośrednie obliczenie
- dokładne, gdy znane T_{in}, T_{out}
- wymaga geometrii (U, A)



ε-NTU

często wygodne, gdy temperatury wyjściowe są nieznane

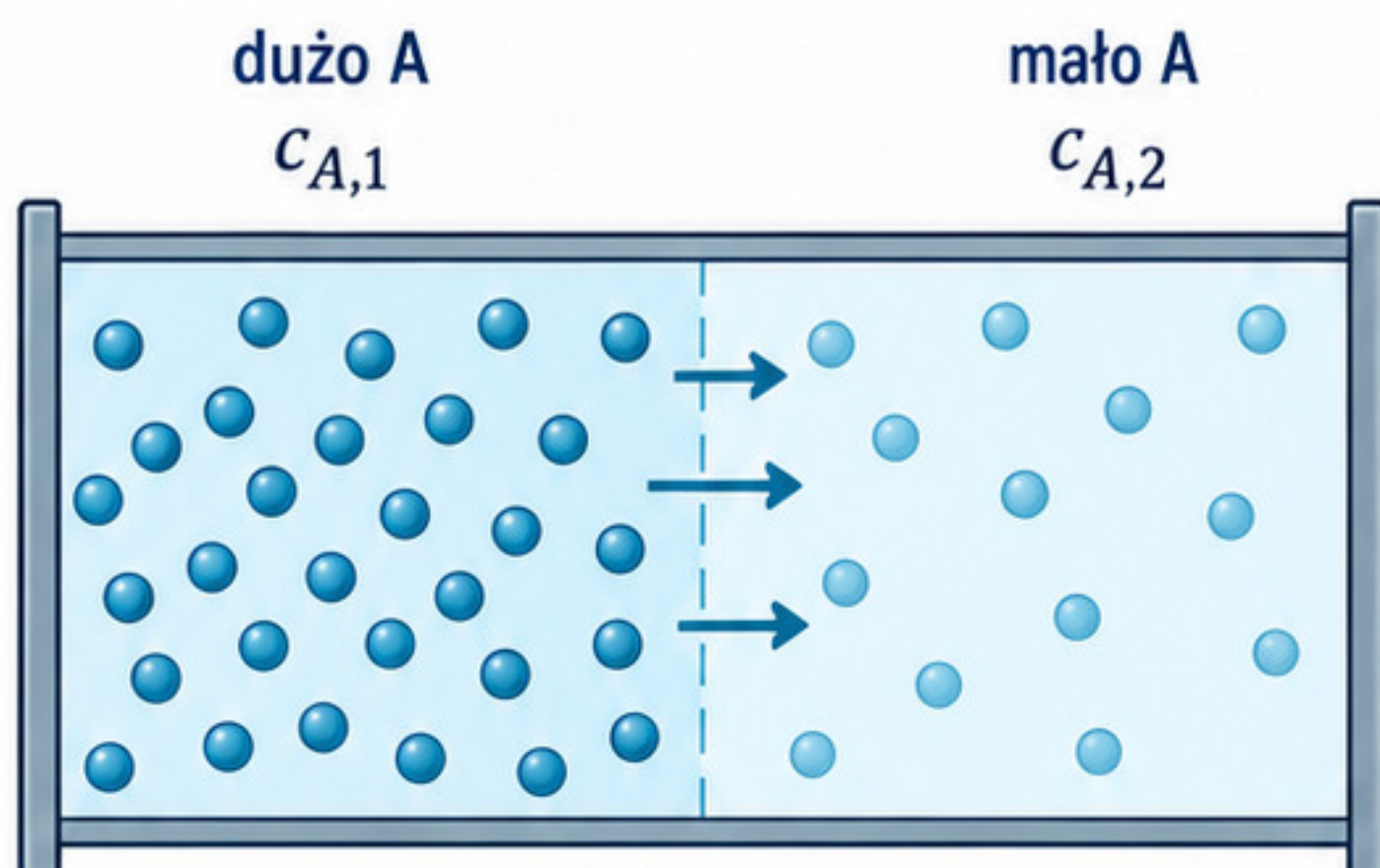
- nie wymaga T_{out}
- szerokie zastosowanie
- oparte na korelacjach dla danej konfiguracji



ZAPAMIĘTAJ

LMTD opisuje średnią siłę napędową wymiany ciepła, a efektywność mówi, jak blisko wymiennik dochodzi do maksymalnie możliwej wymiany.

Składnik ma naturalną tendencję do przemieszczania się z obszaru o wyższym potencjale stężeniowym do obszaru o niższym.



$$c_{A,1} > c_{A,2}$$

PRAWO FICKA (I)

$$J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$$

- J_A — strumień dyfuzyjny składnika A [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
- D_{AB} — współczynnik dyfuzji A w B [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
- $\frac{dc_A}{dz}$ — gradient stężenia [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-4}$]

Dyfuzja zachodzi w kierunku malejącego stężenia w tej uproszczonej interpretacji.

UPROSZCZONE RÓWNANIE (PROFIL LINIOWY)

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

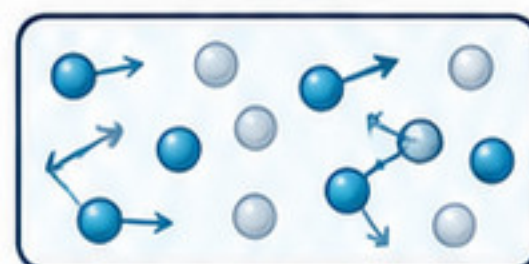
$$D_{AB} \uparrow \Rightarrow J_A \uparrow$$

$$\Delta c_A \uparrow \Rightarrow J_A \uparrow$$

$$L \uparrow \Rightarrow J_A \downarrow$$

DYFUZJA A KONWEKCJA MASY

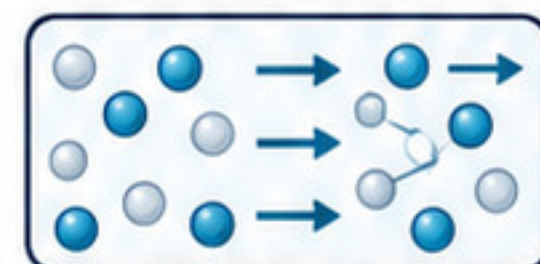
DYFUZJA



Składnik A przemieszcza się względem B z powodu różnicy składu (stężenia).

● A ● B

KONWEKCJA MASY



Cała mieszanina przemieszcza się jako makroskopowy strumień.

● A ● B

W rzeczywistym aparacie transport masy może obejmować jednocześnie dyfuzję i konwekcję.

ANALOGIA Z TRANSPORTEM CIEPŁA (FOURIER)

CIEPŁO

$$q'' = -k \frac{dT}{dx}$$

gradient temperatury



MASA

$$J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz}$$

gradient stężenia

CO WPŁYWA NA D_{AB} ?

temperatura



ciśnienie — szczególnie w gazach



rodzaj składników



faza

Dyfuzja jest zwykle dużo szybsza w gazach niż w cieczach.



WAŻNE

Różnica stężeń jest wygodną siłą napędową w wielu prostych modelach, ale pełny opis termodynamiczny transportu masy wiąże się z różnicami potencjału chemicznego.

Największy opór wymiany masy często skupia się w cienkich warstwach płynu po obu stronach granicy faz.

FAZA GAZOWA

(dobrze wymieszana)

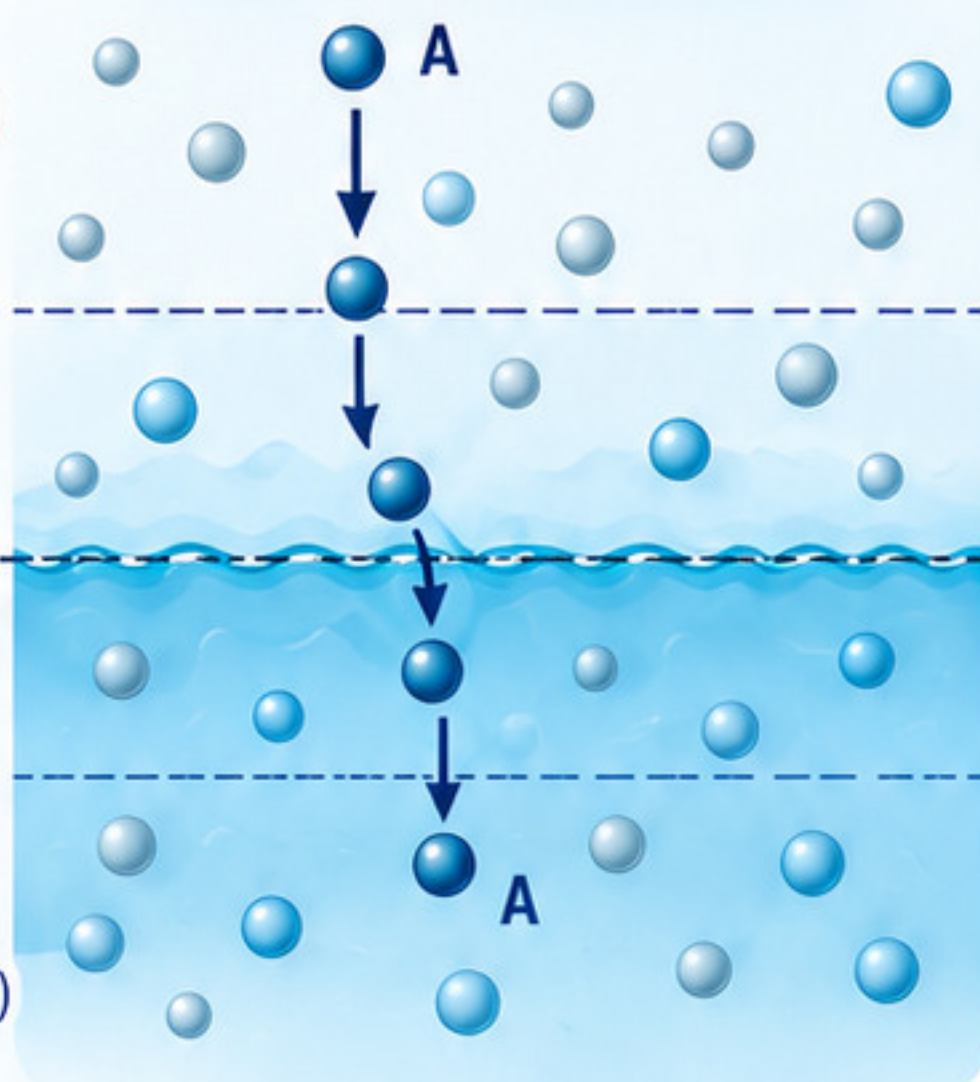
warstwa gazowa
(cienka warstwa)

GRANICA FAZ

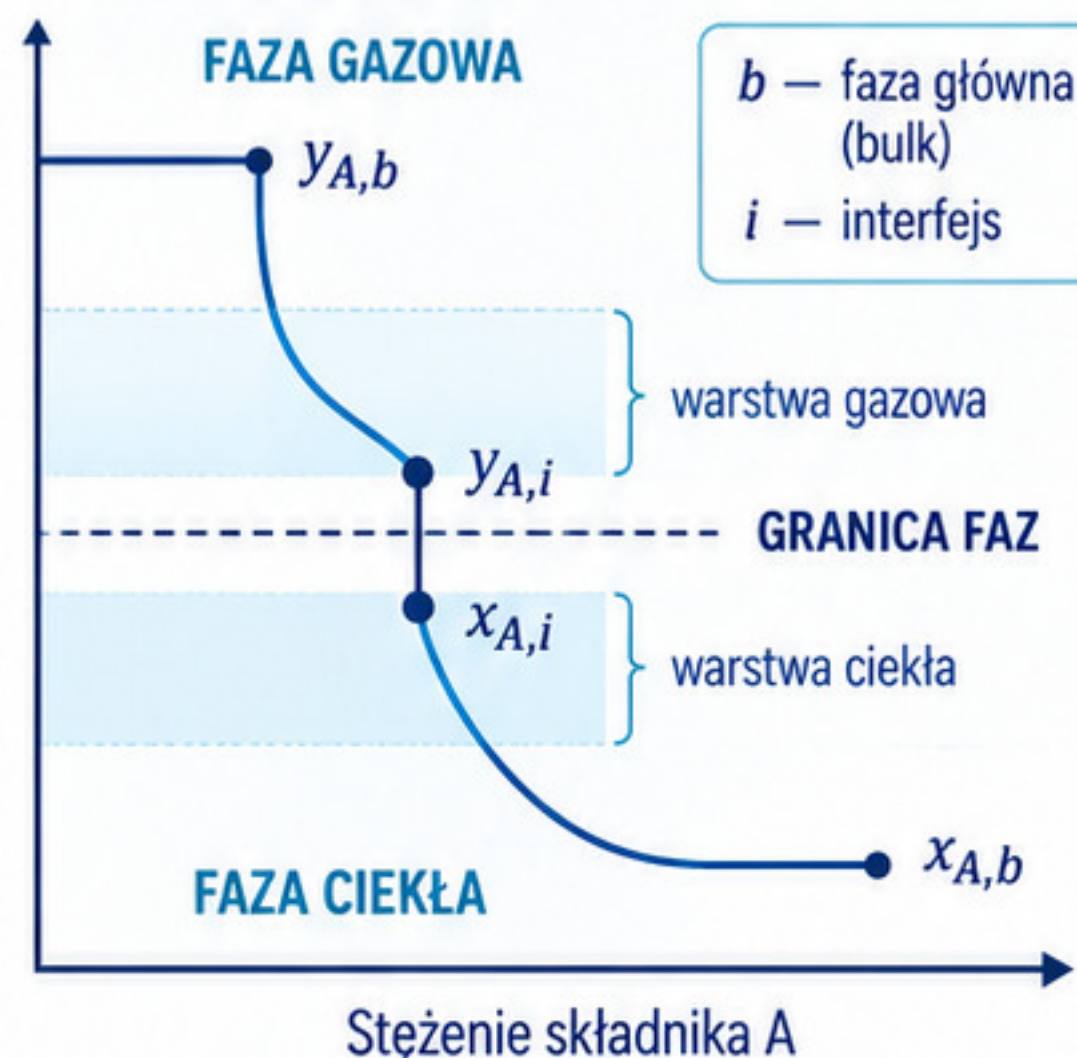
warstwa ciekła
(cienka warstwa)

FAZA CIEKŁA

(dobrze wymieszana)



PROFIL STĘŻENIA SKŁADNIKA A



KLUCZOWA IDEA

W dobrze wymieszanej części fazy skład jest prawie jednorodny. Największy gradient występuje w cienkiej warstwie przy granicy faz.

NA GRANICY FAZ

Zakłada się lokalną równowagę międzyfazową.

$$y_{A,i} \leftrightarrow x_{A,i}$$

Obowiązuje odpowiednia zależność równowagowa, np. prawo Henry'ego lub zależność równowagowa VLE.

DWA OPORY

Opory w szereg:

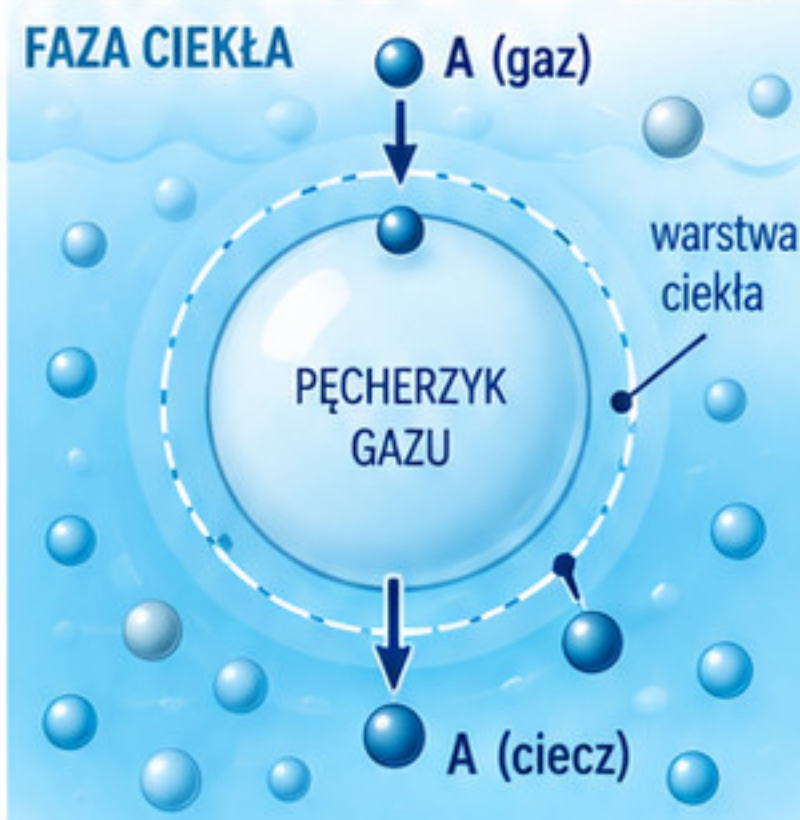


$$R_{calc} = R_G + R_L$$

Całkowity opór może być zdominowany przez stronę gazową, ciekłą lub obie.

PRZYKŁAD: PĘCHERZYK GAZU

FAZA CIEKŁA



WPŁYW ROZPUSTCZALNOŚCI



Gaz bardzo dobrze rozpuszczalny
→ opór może być bardziej istotny po stronie gazowej.



Gaz słabo rozpuszczalny
→ opór po stronie cieczy może mieć duże znaczenie.



Dokładny udział oporów zależy od układu i relacji równowagowej.

ZAPAMIĘTAJ



Granica faz sama nie musi być główną przeszkodą. Opór transportu często znajduje się w warstwach płynu tuż obok niej.

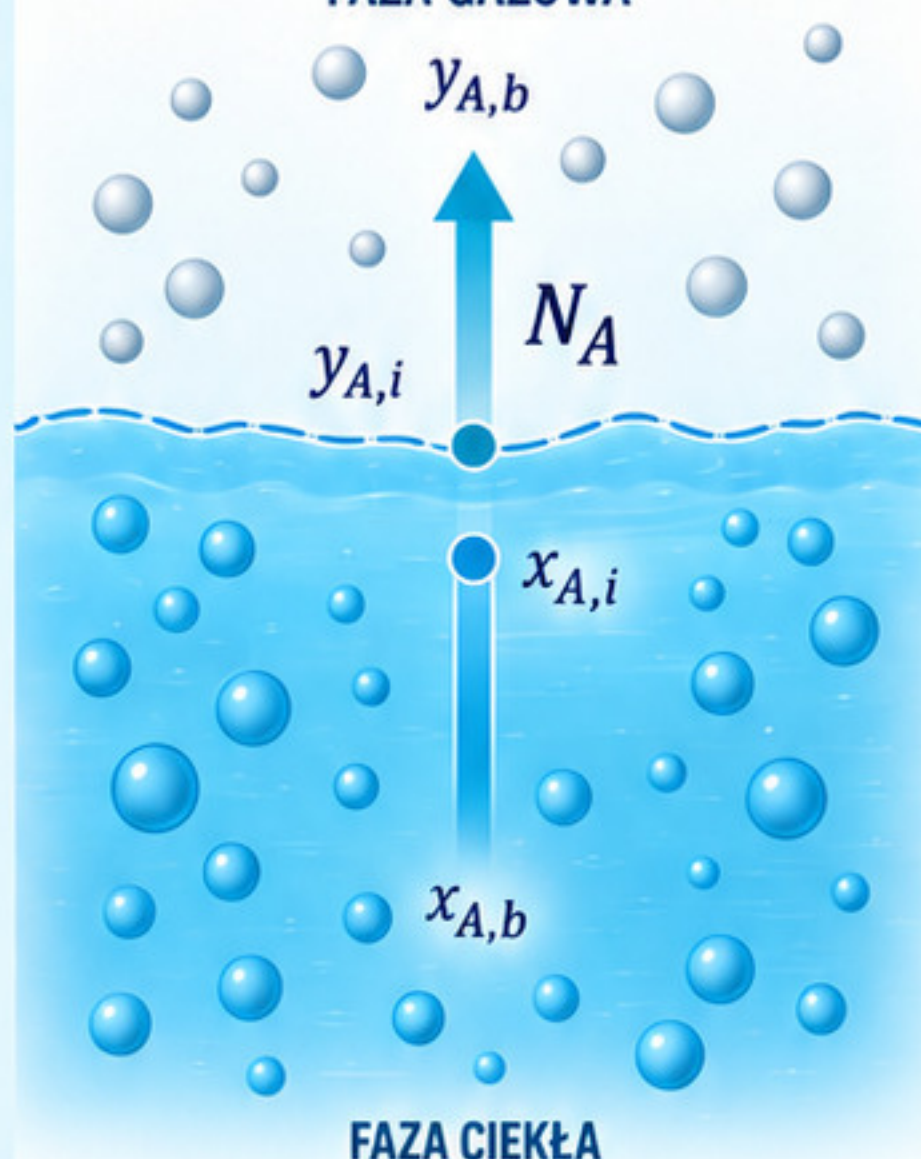
Współczynnik przenikania masy łączy siłę napędową ze szybkością transportu składnika.

STRONA GAZOWA

$$N_A = k_y (y_{A,b} - y_{A,i})$$

- N_A – strumień molowy składnika A ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- k_y – współczynnik przenikania masy po stronie gazowej ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- $y_{A,b}$ – ułamek molowy A w fazie gazowej, w fazie głównej
- $y_{A,i}$ – ułamek molowy A na granicy faz (od strony gazu)

FAZA GAZOWA



FAZA CIEKŁA

STRONA CIEKŁA

$$N_A = k_x (x_{A,i} - x_{A,b})$$

- N_A – strumień molowy składnika A ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- k_x – współczynnik przenikania masy po stronie ciekłej ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- $x_{A,i}$ – ułamek molowy A na granicy faz (od strony cieczy)
- $x_{A,b}$ – ułamek molowy A w fazie ciekłej, w fazie głównej

Dokładna postać równań zależy od wybranej podstawy siły napędowej. Nie należy mieszać niekompatybilnych jednostek.

MODEL OPORÓW W SZEREGU



DLACZEGO POTRZEBUJEMY WSPÓŁCZYNNIKA CAŁKOWITEGO?

Skład na granicy faz jest zwykle trudny do zmierzenia. Dlatego wygodnie jest zapisać strumień za pomocą wielkości w głównych fazach.

$$N_A = K_y (y_{A,b} - y_A^*)$$

y_A^* – skład gazu będący w równowadze ze składem cieczy w fazie głównej (na podstawie wybranej definicji równowagi).

ANALOGIA Z WYMIANĄ CIEPŁA



WYMIANA CIEPŁA:

$$\dot{Q} = UA \Delta T$$

WSPÓLNA LOGIKA:

szybkość =
współczynnik ×
powierzchnia ×
siła napędowa



WYMIANA MASY:

$$\dot{n}_A = K A \Delta(\text{siła napędowa})$$

CO ZWIĘKSZA SZYBKOŚĆ?

$K \uparrow$



lepsze
mieszanie

$A \uparrow$



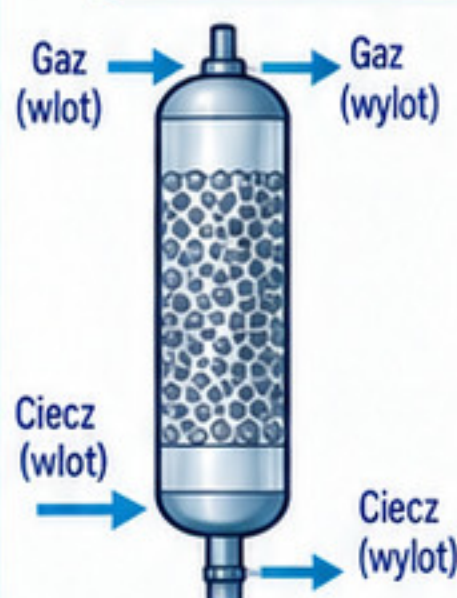
większa
powierzchnia
międzyfazowa

$\Delta \text{ driving force} \uparrow$



większa
różnica składu

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA



W absorpcji zwiększamy powierzchnię kontaktu gaz-ciecz przez wypełnienie, a przepływ obu faz wpływa na współczynniki przenikania masy.

TYPOWY BŁĄD



Nie łącz w jednym równaniu współczynnika zdefiniowanego na jednej podstawie stężenia z siłą napędową zdefiniowaną na innej podstawie bez współczynnika przeliczenia.

KARTA 49 — LICZBY BEZWYMIAROWE W TRANSPORCIE

Liczby bezwymiarowe pozwalają opisać podobieństwo przepływu, wymiany ciepła i masy niezależnie od skali urządzenia.



PRZEPŁYW

REYNOLDS

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



bezwładność / lepkość



Jaki jest charakter przepływu?



CIEPŁO

PRANDTL

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

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$



dyfuzja pędu / dyfuzja ciepła



Jak szybko rozprzestrzenia się pęd względem ciepła?



NUSSELT

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

konwekcyjny transport ciepła względem przewodzenia



Jak intensywna jest konwekcja?



MASA

SCHMIDT

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$$



dyfuzja pędu / dyfuzja masy



Jak szybko rozprzestrzenia się pęd względem masy?



SHERWOOD

$$Sh = \frac{k_m L}{D_{AB}}$$

konwekcyjny transport masy względem dyfuzji molekularnej



Jak intensywna jest konwekcja masy?

ANALOGIA CIEPŁO – MASA

Pr



Sc

Nu



Sh

Równania opisujące ciepło i masę często mają podobną strukturę.

KORELACJE

$$Nu = f(Re, Pr, \text{geometria})$$

$$Sh = f(Re, Sc, \text{geometria})$$



W praktyce współczynniki h i k_m często wyznacza się z korelacji empirycznych dopasowanych do konkretnej geometrii i zakresu pracy.

DLACZEGO TO WAŻNE PRZY SCALE-UP?

SKALA LABORATORYJNA



SKALA PRZEMYSŁOWA



Podobieństwo bezwymiarowe pomaga przenosić wyniki między skalami, jeśli zachowane są właściwe grupy opisujące zjawisko.



ZAPAMIĘTAJ

Liczba bezwymiarowa nie ma jednostki, ale niesie informację fizyczną o relacji między konkurującymi mechanizmami transportu.

KARTA 50 — JEDNOCZESNA WYMIANA CIEPŁA I MASY

W wielu procesach przemysłowych ciepło i masa są transportowane jednocześnie i wzajemnie na siebie wpływają.



KLUCZOWY WNIOSEK



Energia dostarczona do powierzchni może zostać zużyta na przemianę fazową, a transport masy zmienia skład otaczającego płynu.

PAROWANIE

$$\dot{Q} \approx \dot{m}_{vap} \Delta h_{vap}$$



Aby ciecz mogła odparować, zwykle trzeba dostarczyć energię potrzebną na zmianę fazy.

SUSZENIE



Usuwanie wilgoci z materiałów zachodzi dzięki jednoczesnemu dopływowi ciepła i transportowi masy do fazy gazowej.

CHŁODZENIE EWAPORACYJNE



Parowanie może obniżać temperaturę pozostałej cieczy lub powierzchni, ponieważ wymaga energii.

KONDENSACJA



ZASTOSOWANIA



WSPÓLNA LOGIKA

- RÓŻNICA TEMPERATUR** → transport ciepła
- RÓŻNICA SKŁADU / POTENCJAŁU** → transport masy
- RÓWNOWAGA FAZOWA** → określa warunki na granicy faz



WAŻNE

Nie można analizować każdego procesu wyłącznie jako „wymiany ciepła” albo wyłącznie jako „wymiany masy”. W operacjach z przemianą fazową oba mechanizmy są często sprzężone.



SIŁA NAPĘDOWA
($\Delta T, \Delta c, \Delta p$)



POWIERZCHNIA
(A)



OPORY
(opory transportu)



SZYBKOŚĆ
TRANSPORTU

CIEPŁO I MASA PODLEGAJĄ BARDZO PODOBNEJ LOGICE TRANSPORTU.

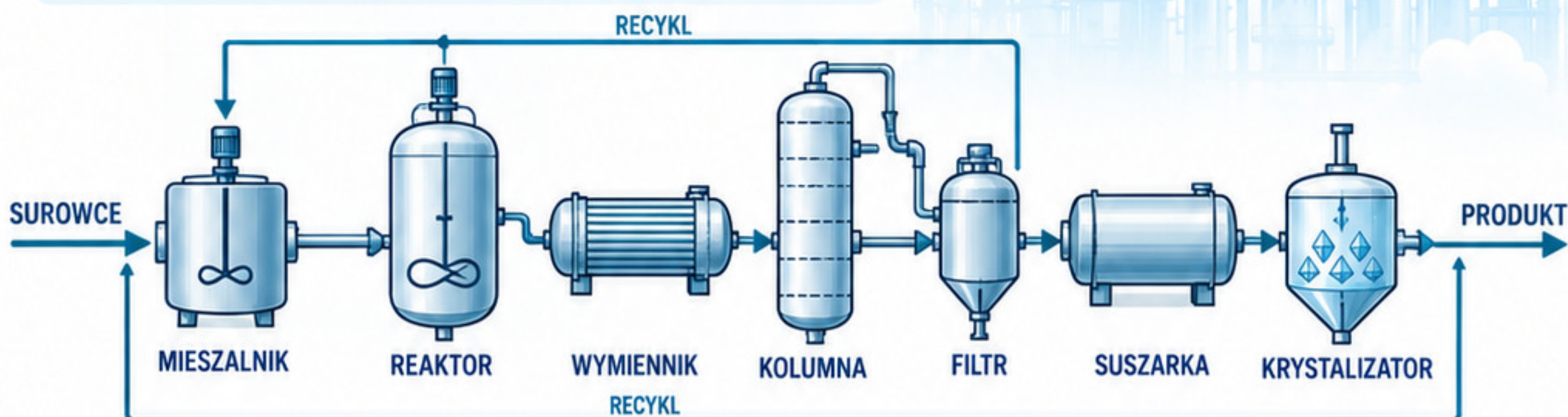
MODUŁ 06

OPERACJE JEDNOSTKOWE I INŻYNIERIA REAKCJI

Przemysł chemiczny łączy podstawowe zjawiska transportu w konkretne operacje: rozdzielanie, mieszanie i reakcję.



Po tym module będziesz potrafić rozpoznawać najważniejsze operacje jednostkowe, rozumieć ich podstawową zasadę działania oraz porównywać zachowanie reaktorów okresowych, CSTR i PFR.



CO CHCEMY OSIĄGNAĆ?



ZMIESZAĆ



ROZDZIELIĆ



PRZENIEŚĆ



PRZEREAGOWAĆ



Operacja jednostkowa nie opisuje konkretnego produktu. Opisuje uniwersalny sposób wykonania zadania procesowego.

destylacja może rozdzielać różne mieszaniny, ale podstawowa zasada pozostaje podobna: wykorzystuje różnice w lotności składników.



MECHANIKA
PŁYNÓW
 P, Q, Re



WYMIANA
CIEPŁA I MASY
 $U, K, \Delta T, \Delta x$



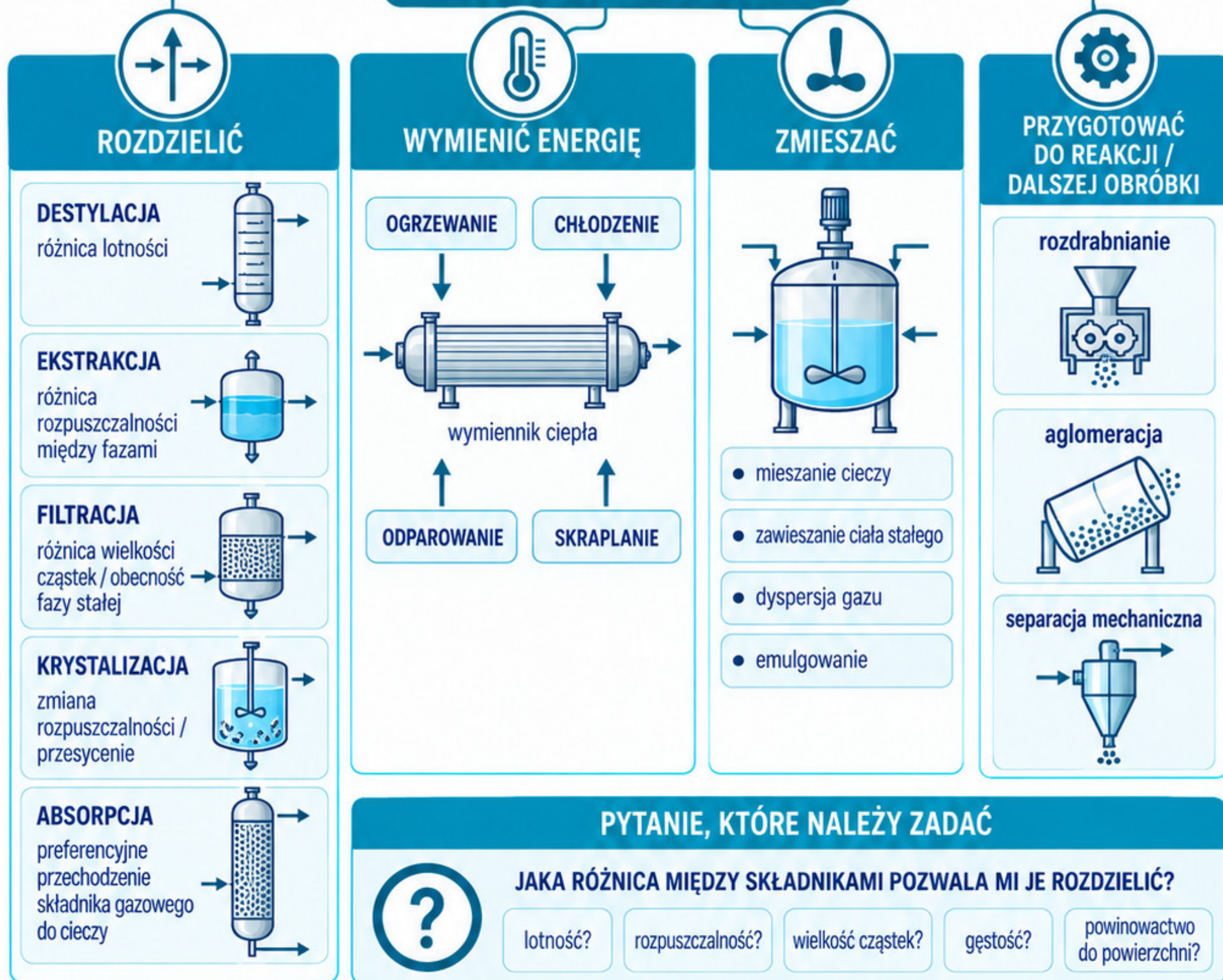
TERMODYNAMIKA
równowaga

OPERACJE
JEDNOSTKOWE

Od tego momentu atlas pokazuje, jak prawa poznane wcześniej zamieniają się w działające aparaty przemysłowe.

Operacja jednostkowa to powtarzalny sposób wykonania określonego zadania procesowego — niezależnie od tego, jaki produkt wytwarza instalacja.

CO CHCEMY ZROBIĆ ZE STRUMIENIEM?



PRZYKŁADY



ZAPAMIĘTAJ

Najlepsza operacja separacyjna wynika z właściwości mieszaniny. Nie wybieramy aparatu najpierw — najpierw pytamy, jaka różnica fizyczna może zostać wykorzystana.

KARTA 52 — DESTYLACJA

Destylacja rozdziela mieszaniny dzięki różnicom lotności składników między fazą ciekłą i parową.

ZASADA SEPARACJI

A — bardziej lotny

B — mniej lotny

CIECZ

skład:

x_A

PARA

skład:

y_A

$$y_A > x_A$$

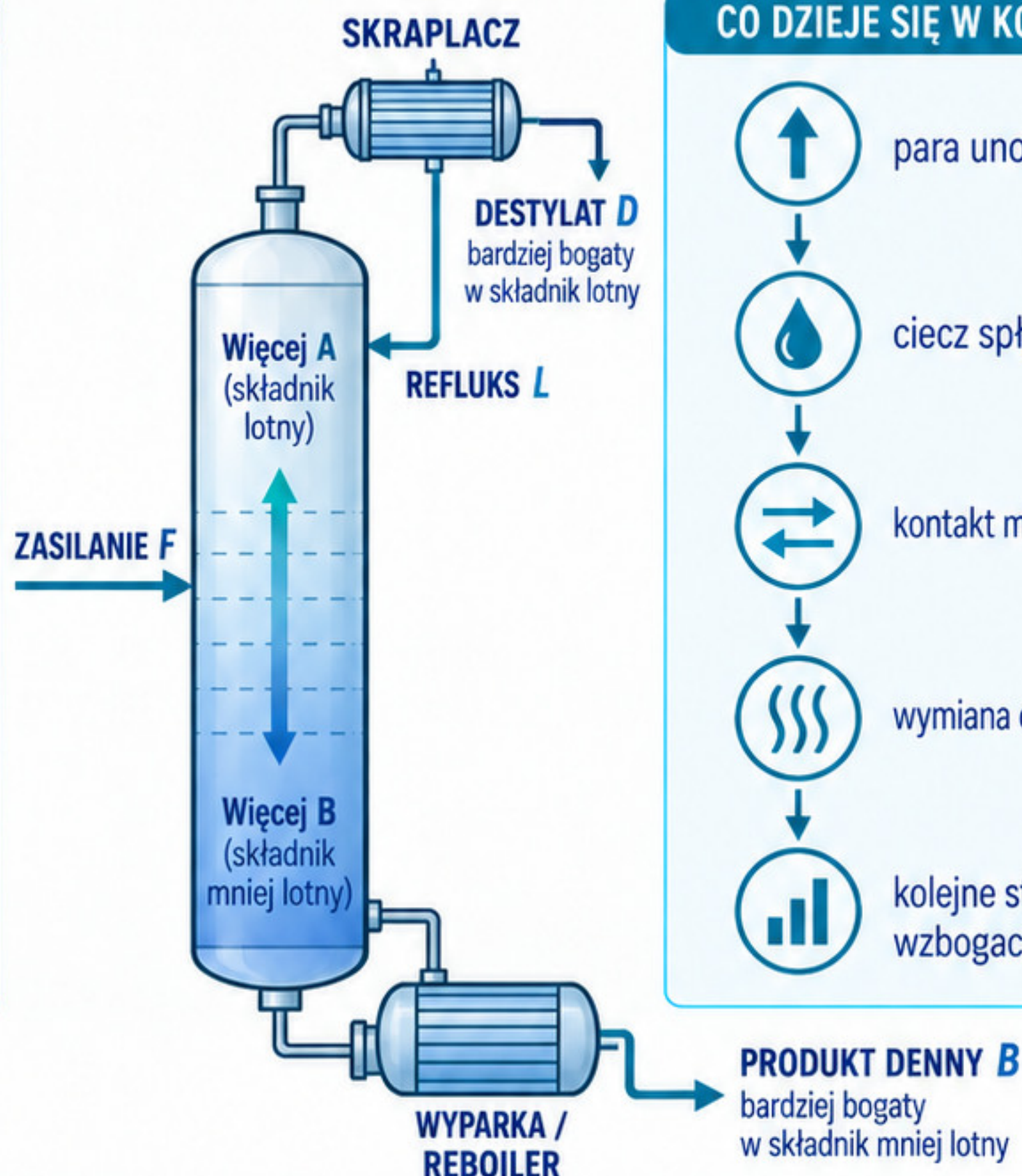
(w typowych warunkach separacji)

CIECZ

PAROWANIE

PARA

**BOGATSZA
W A**



CO DZIEJE SIĘ W KOLUMNIE?



ROLA REFLUKSU

Skroplona para

**DESTYLAT
D**

**REFLUKS
L**

Część skroplonej cieczy wraca do kolumny, zwiększając kontakt ciecz–para i umożliwiając lepszy rozdział.

BILANS CAŁKOWITY

$$F = D + B$$

$$F z_A = D x_D + B x_B$$

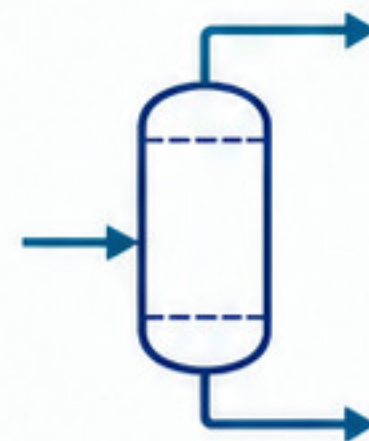
z — skład zasilania

x_D — skład destylatu

x_B — skład produktu dennego

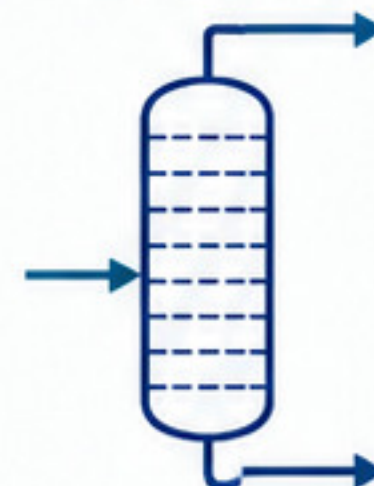
PORÓWNANIE PROCESÓW

PROSTA DESTYLACJA



jeden etap odparowania/skraplania

REKTYFIKACJA



wielokrotny kontakt pary i cieczy



TYPOWY BŁĄD

Kolumna nie rozdziela składników dlatego, że jeden „całkowicie wrze”, a drugi „nie wrze”. Oba składniki mogą występować w parze i cieczy — kluczowa jest różnica ich lotności.

KARTA 53 — ABSORPCJA A ADSORPCJA

Absorpcja zachodzi w objętości fazy, a adsorpcja – na powierzchni.

ABSORPCJA

Składnik gazowy rozpuszcza się w fazie ciekłej.



SIŁA NAPĘDOWA

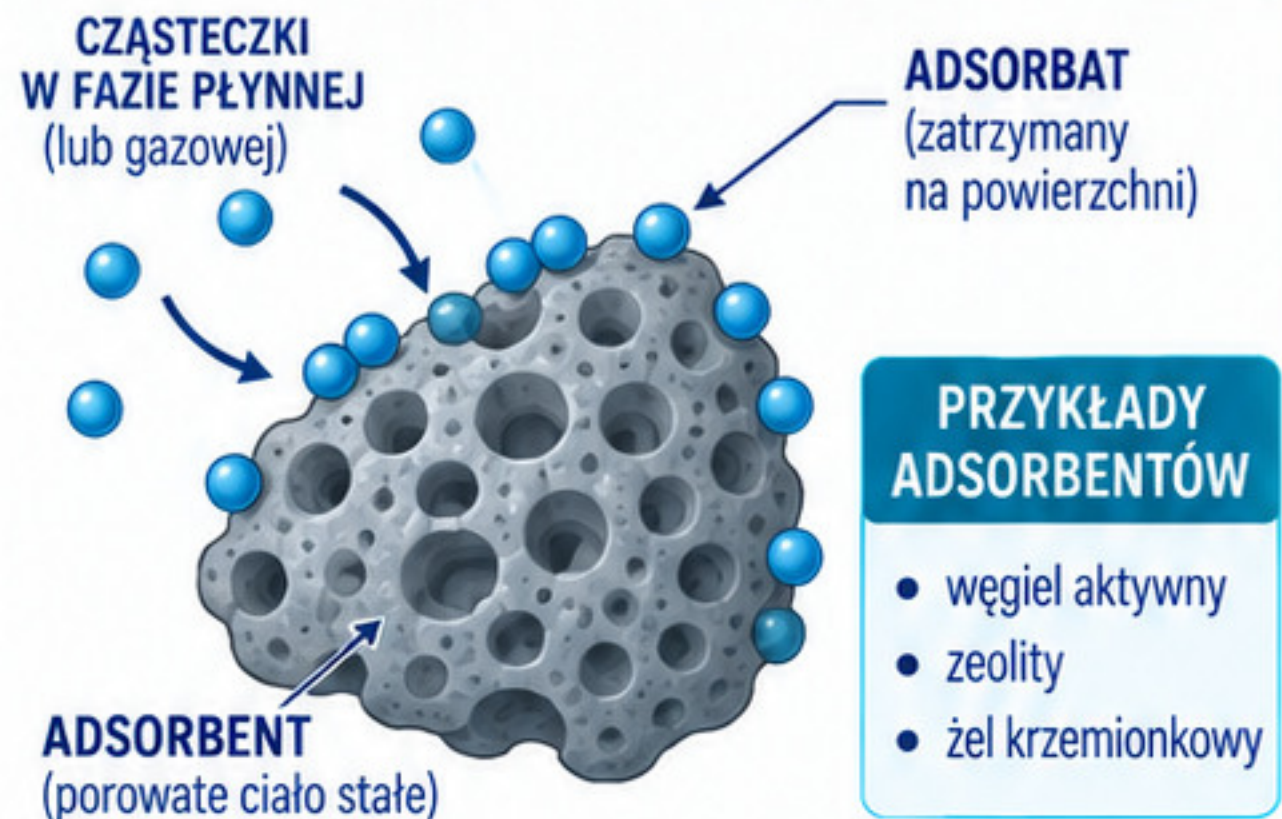


$$y_A - y_A^*$$

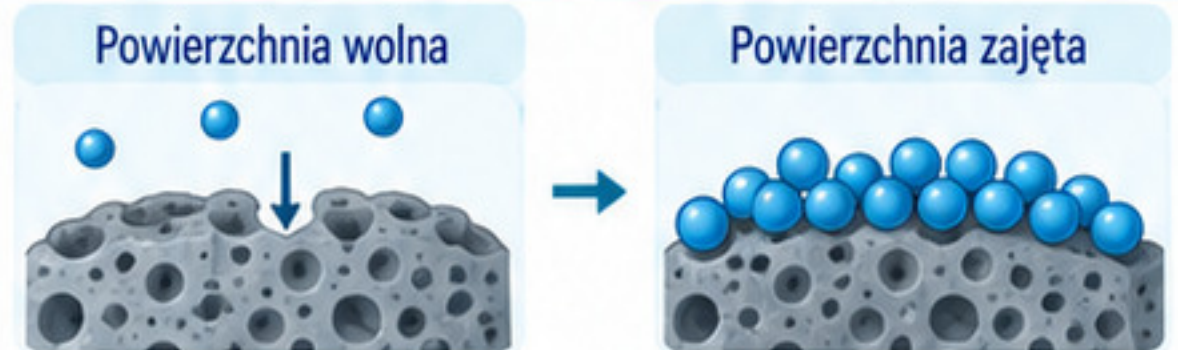
Transport zachodzi, gdy skład gazu różni się od składu odpowiadającego równowadze z cieczą.

ADSORPCJA

Składnik gromadzi się na powierzchni ciała stałego.

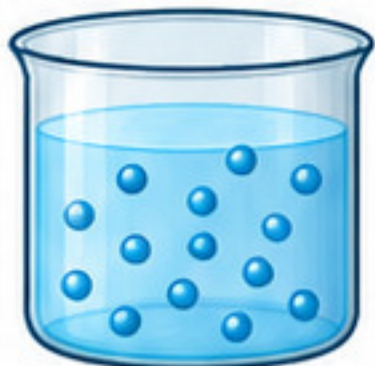


NASYCENIE



Adsorbent ma ograniczoną pojemność i po pewnym czasie wymaga regeneracji lub wymiany.

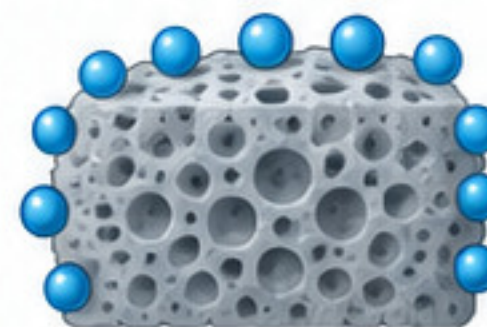
PORÓWNANIE — GDZIE JEST SKŁADNIK A?



ABSORPCJA

A wnika do objętości drugiej fazy.

Przykład: jak cukier rozpuszczający się w wodzie.



ADSORPCJA

A gromadzi się na powierzchni.

Przykład: jak zanieczyszczenia zatrzymywane na powierzchni gąbki.

CYKL ADSORPCJI



ADSORPCJA
zatrzymywanie na powierzchni



NASYCENIE
osiągnięcie pojemności



REGENERACJA
usuwanie adsorbentu (np. przez ogrzewanie, obniżenie ciśnienia)



PONOWNE UŻYCIE
odtworzony adsorbent



NIE MYL

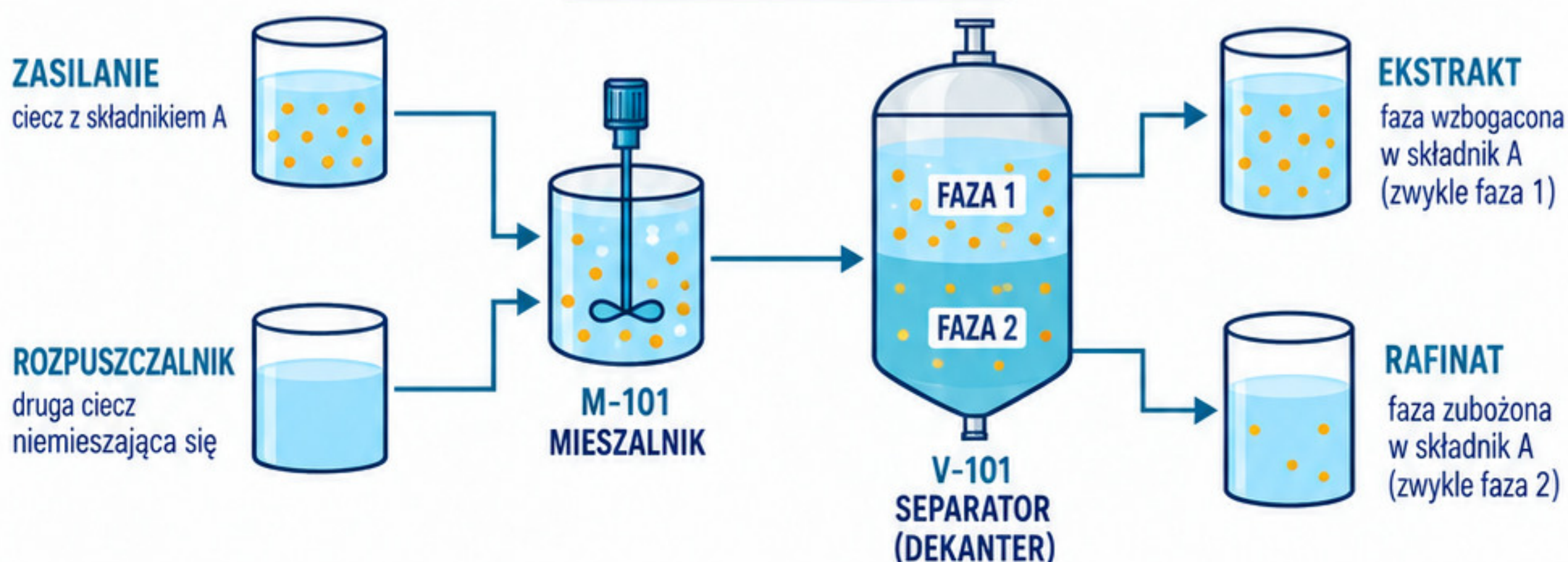
ABSORPCJA $\neq$ ADSORPCJA

Pytaj: czy składnik przechodzi do wnętrza fazy, czy zatrzymuje się na powierzchni?

KARTA 54 — EKSTRAKCJA CIECZ–CIECZ

Ekstrakcja przenosi składnik z jednej cieczy do drugiej dzięki różnicy jego powinowactwa do obu faz.

SCHEMAT PROCESU



DWA KROKI

1 KONTAKT



- większa powierzchnia kontaktu
- transport A między fazami

2 ROZDZIAŁ FAZ



- różnica gęstości
- dwie warstwy ciekłe

WSPÓŁCZYNNIK PODZIAŁU

$$K_D = \frac{C_A^{(\text{ekstrakt})}}{C_A^{(\text{rafinat})}}$$

dla ustalonej temperatury i konkretnego układu, w odpowiedniej definicji stężeń.

INTERPRETACJA:

$$K_D \gg 1$$

A preferuje fazę ekstrakcyjną

$$K_D \approx 1$$

rozdział jest słabszy

DOBRY ROZPUSTCZALNIK POWINIEN

- ✓ dobrze rozpuszczać składnik A
- ✓ słabo mieszać się z drugą fazą
- ✓ umożliwiać łatwe rozdzielenie po kontakcie
- ✓ być możliwy do odzysku, jeśli proces tego wymaga
- ✓ bezpieczeństwo i wpływ środowiskowy także mają znaczenie

PORÓWNANIE METOD ROZDZIAŁU

DESTYLACJA — lotność



rozdziel na podstawie różnic lotności (temperatur wrzenia)

EKSTRAKCJA



rozdziel na podstawie różnicy rozpuszczalności / podział między fazami

Gdy składniki mają zbliżone temperatury wrzenia (destylacja trudna)

→ ekstrakcja może być alternatywą

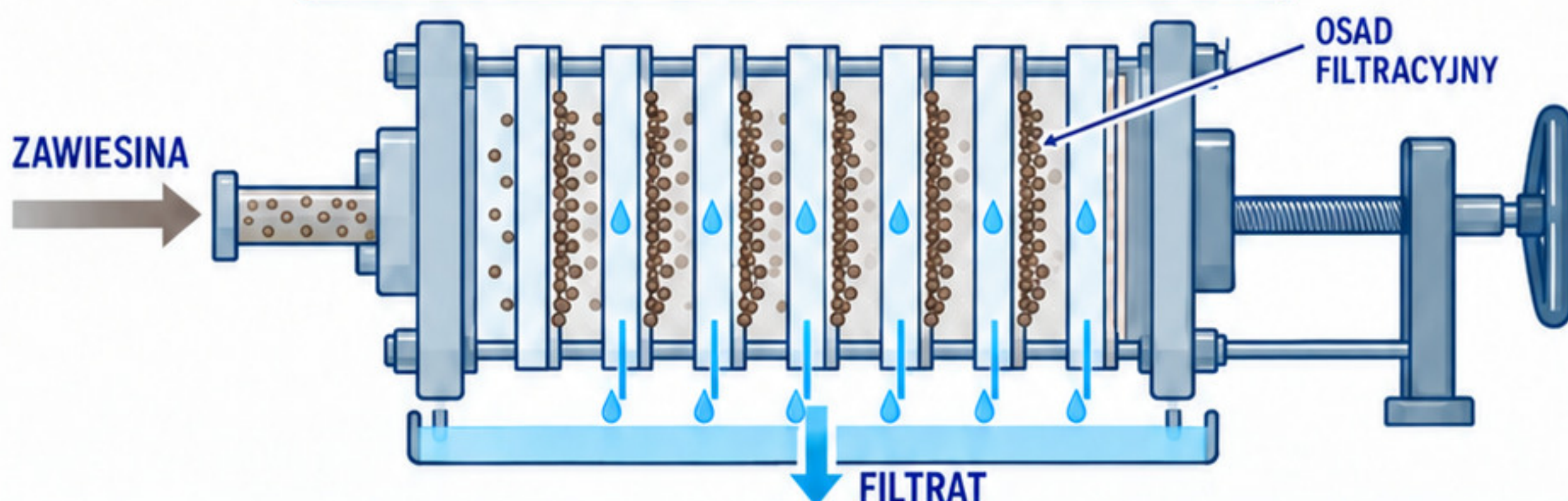
TYPOWY BŁĄD



Po intensywnym mieszaniu trzeba jeszcze umożliwić fazom ponowne rozdzielenie. Dobra ekstrakcja wymaga zarówno efektywnego kontaktu, jak i skutecznej dekantacji.

Filtracja oddziela cząstki stałe od płynu, przepuszczając fazę płynną przez porowatą przegrodę.

SCHEMAT PROCESU – FILTR PRASOWY (PŁYTOWY)



CO SIĘ DZIEJE?



NAPĘD PROCESU – RÓŻNICA CIŚNIEŃ



PODSTAWOWA ZALEŻNOŚĆ

$$Q \propto \frac{\Delta P}{\mu R}$$

Q — przepływ filtratu
 μ — lepkość płynu
 R — całkowity opór filtracji

CAŁKOWITY OPÓR

$$R = R_m + R_c$$

R_m — opór medium filtracyjnego
 R_c — opór placka filtracyjnego

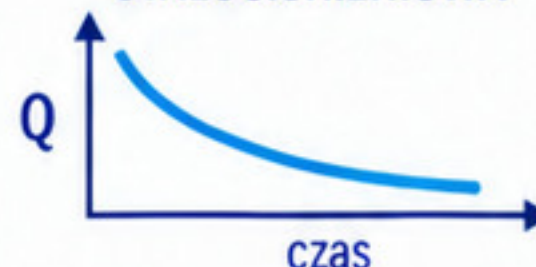
ZMIANY W CZASIE



Dla ciśnienia stałego przepływ filtratu zwykle maleje.

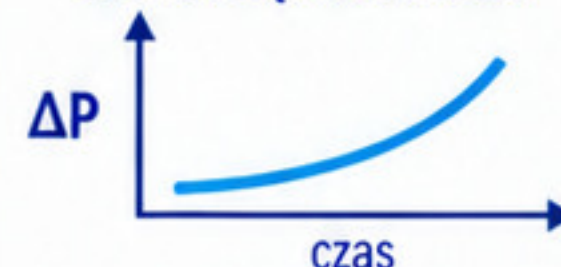
TRYBY FILTRACJI

FILTRACJA STAŁOCIŚNIEŃOWA



stałe ΔP — placek rośnie
 → przepływ maleje

FILTRACJA STAŁOPRĘDKOŚCIOWA



stały przepływ — placek rośnie
 → rośnie wymagane ciśnienie

PO FILTRACJI

Placek filtracyjny może być:

- produktem
- odpadem

Często wymaga przemycania (wypłukiwania).

Może wymagać suszenia (np. w suszarce).

TYPOWY BŁĄD

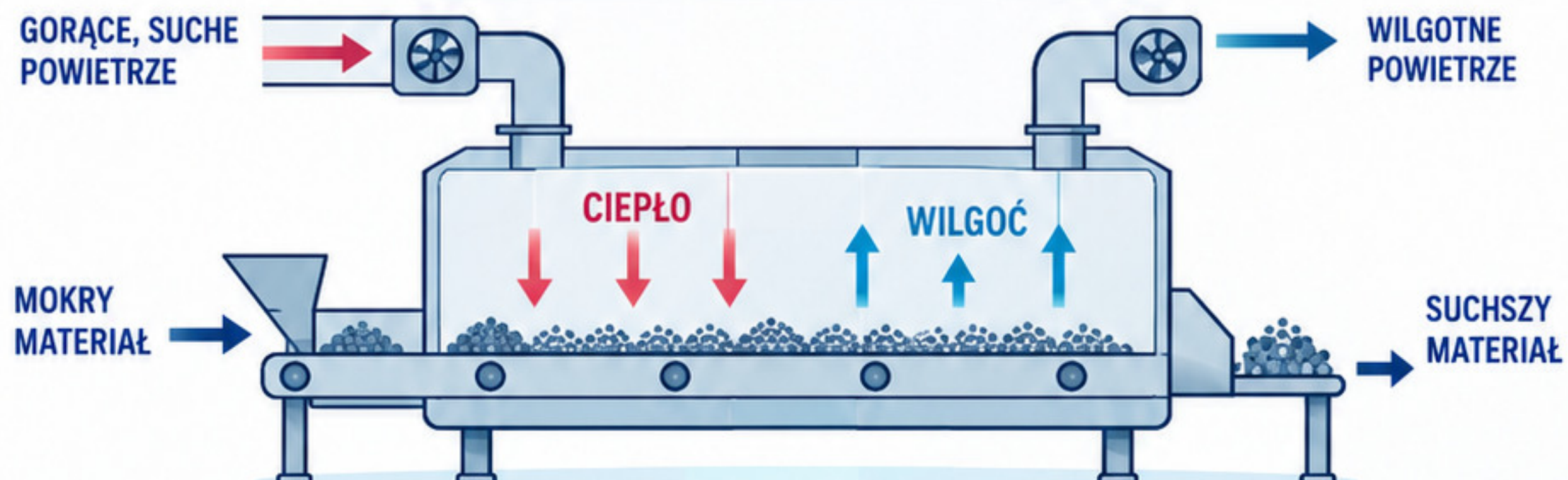


Filtr nie działa jak zwykłe sito tylko na podstawie wielkości porów. W wielu procesach utworzony placek filtracyjny również odgrywa kluczową rolę w separacji.

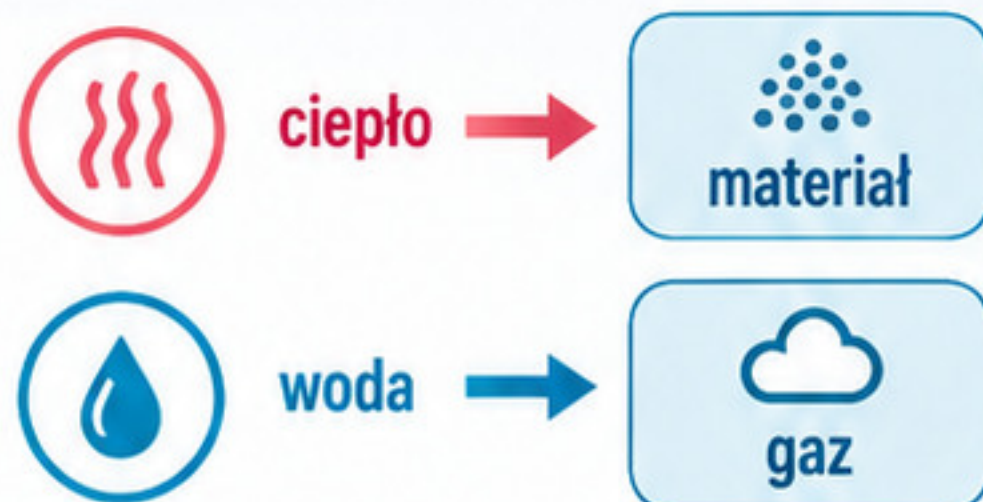
KARTA 56 — SUSZENIE

Suszenie łączy dostarczanie ciepła z usuwaniem wilgoci z materiału do otaczającego gazu.

SCHEMAT SUSZARKI KONWEKCYJNEJ



DWA PROCESY JEDNOCZEŚNIE



Dostarczone ciepło wspiera odparowanie wilgoci, a para wodna musi zostać odprowadzona przez gaz.

TYPOWA KRZYWA SUSZENIA



OKRES STAŁEJ SZYBKOŚCI

- powierzchnia pozostaje dostatecznie mokra
- transport z powierzchni może dominować

OKRES MALEJĄCEJ SZYBKOŚCI

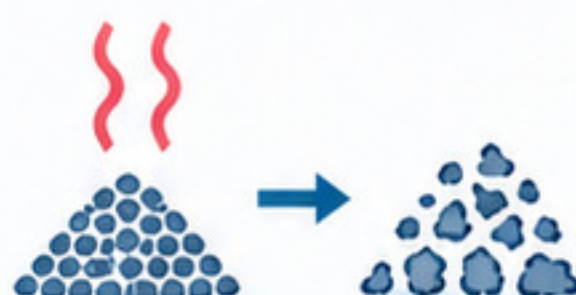
- wilgoć z wnętrza materiału musi dotrzeć do powierzchni
- opór wewnętrzny staje się coraz ważniejszy

Nie każdy materiał wykazuje wyraźny okres stałej szybkości.

CO PRZYSPIESZA SUSZENIE?



MATERIAŁ WRAŻLIWY



ZA WYSOKĄ $T \rightarrow$
degradacja / utrata jakości

WAŻNE



Suszenie nie polega tylko na „podgrzaniu produktu”. Jeśli para wodna nie jest skutecznie usuwana z otoczenia materiału, siła napędowa transportu masy maleje.

KARTA 57 — KRYSTALIZACJA

Kryształy powstają, gdy roztwór osiąga stan przesylenia, a cząsteczki lub jony zaczynają tworzyć uporządkowaną fazę stałą.

KRZYWA ROZPUSZCZALNOŚCI



$c > c^*(T) \rightarrow$ **PRZESYCENIE**
 c^* — stężenie nasycenia w danej temperaturze

JAK UTWORZYĆ PRZESYCENIE?



CHŁODZENIE

gdy rozpuszczalność maleje z temperaturą



**ODPAROWANIE
ROZPUSZCZALNIKA**

zwiększa stężenie



**REAKCJA /
ZMIANA SKŁADU**

może tworzyć składnik mniej rozpuszczalny



DWA ETAPY

NUKLEACJA

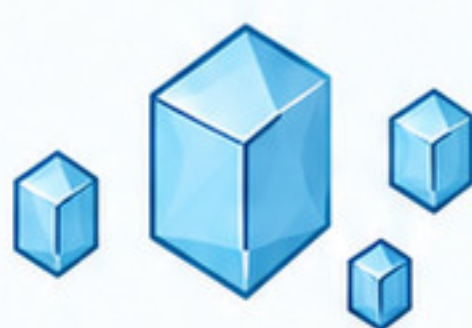
powstają nowe zarodki kryształów



Wiele małych zarodków

WZROST

substancja odkłada się na istniejących kryształach



Mniej, ale większe kryształy

TENDENCJE (NIE BEZWZGLĘDNE REGUŁY)

BARDZO SILNE PRZESYCENIE



dużo nukleacji



często więcej drobnych kryształów

KONTROLOWANE PRZESYCENIE



sprzyja kontrolowanemu wzrostowi istniejących kryształów

ZASZCZEPIANIE

KRYSZTAŁY ZARODKOWE / SEED



Dodanie kryształów zarodkowych może pomóc kontrolować moment rozpoczęcia krystalizacji i rozkład wielkości kryształów.

PROCES PRZEMYSŁOWY

KRYSTALIZATOR

FILTR

SUSZARKA



Po krystalizacji kryształy trzeba zwykle oddzielić od cieczy macierzystej i wysuszyć.



TYPOWY BŁĄD

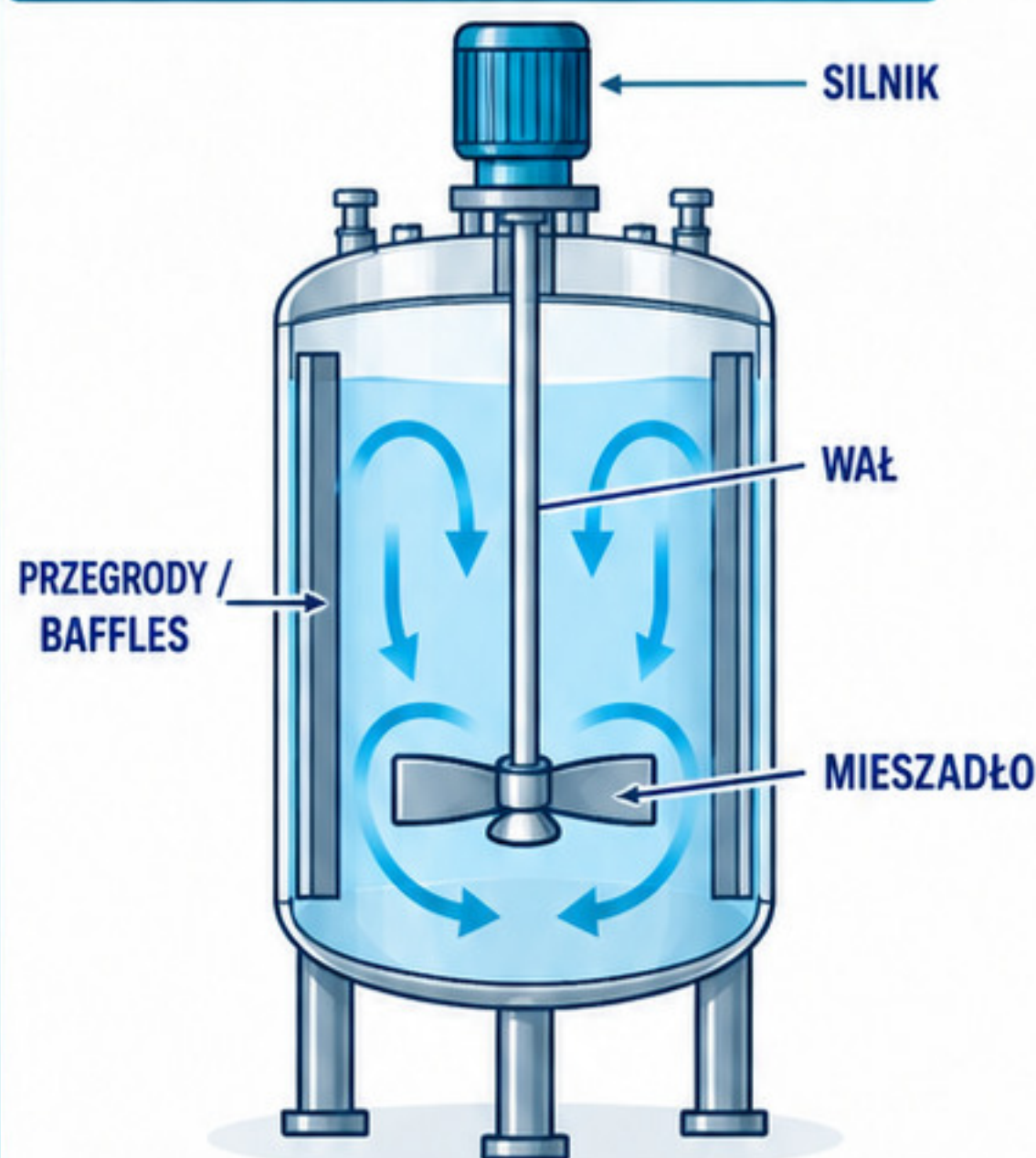
Nasycenie i przesylenie to nie to samo.

W stanie nasycenia roztwór jest w równowadze; przesylenie dostarcza siły napędowej do krystalizacji.

KARTA 58 — MIESZANIE I AGITACJA

Mieszadło nie tylko „kręci cieczą” — tworzy cyrkulację, rozprasza energię i wpływa na transport pędu, ciepła i masy.

SCHEMAT ZBIORNIKA MIESZANEGO



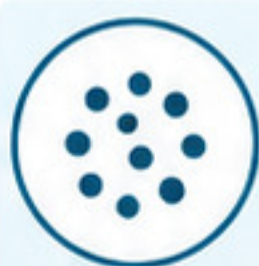
PO CO MIESZAMY?



ujednorodnienie
składu



ujednorodnienie
temperatury



zawieszanie
cząstek



dyspersja
gazu



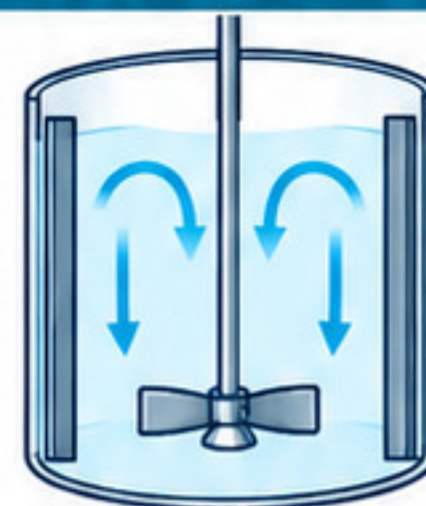
zwiększenie
wymiany
ciepła i masy

BEZ PRZEGRÓD



Znaczna część energii może iść w obrót całej cieczy zamiast w skuteczne mieszanie.

Z PRZEGRODAMI



Przegrody ograniczają wirowanie całej cieczy i wspierają bardziej użyteczną cyrkulację.

TYPY MIESZADEŁ

śmigłowe / osiowe



niska-umiarkowana
lepkość

turbinowe



dyspersja /
intensywne mieszanie

kotwicowe



ciecze bardziej
lepkie

Dobór zależy od zadania, geometrii i właściwości płynu.

LICZBA MOCY

$$N_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

P — moc mieszania [W]

N — prędkość obrotowa [1/s]

D — średnica mieszadła [m]

Liczba mocy pomaga opisywać zapotrzebowanie energetyczne mieszadła.

LICZBA REYNOLDSA AGITACJI

$$Re_M = \frac{\rho N D^2}{\mu}$$

Także w zbiorniku mieszanym lepkość i bezwładność decydują o charakterze przepływu.

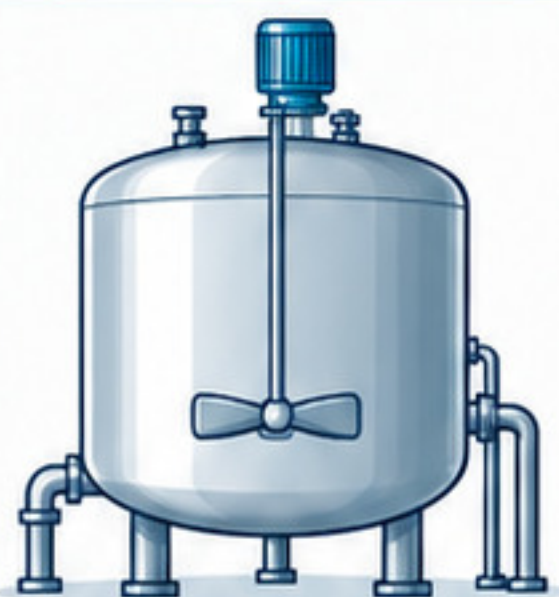
MOC A SCALE-UP



SKALA
LABORATORYJNA



SKALA
PRZEMYSŁOWA



Przy zmianie skali nie można zachować wszystkich parametrów jednocześnie. Projektant wybiera kryterium ważne dla procesu, np. moc na objętość, prędkość końcówki mieszadła lub czas mieszania.



ZAPAMIĘTAJ

Dobre mieszanie to osiągnięcie celu procesu przy rozsądnym zużyciu energii — nie maksymalna możliwa prędkość obrotowa.

KARTA 59 — BATCH, CSTR I PFR

Typ reaktora określa, jak materiał przebywa w aparacie i jak zmieniają się stężenie oraz szybkość reakcji.

REAKTOR OKRESOWY / BATCH



brak ciągłego dopływu i odpływu

Wsad jest ładowany, reaguje przez określony czas, a następnie produkt jest opróżniany.

DOMINUJĄCA ZMIENNA

$$C_A = C_A(t)$$

RÓWNANIE BILANSOWE (UPROSZCZONE)

$$\frac{dN_A}{dt} = r_A V$$

dla reagenta: $r_A < 0$

TYPOWE ZASTOSOWANIA



elastyczna produkcja



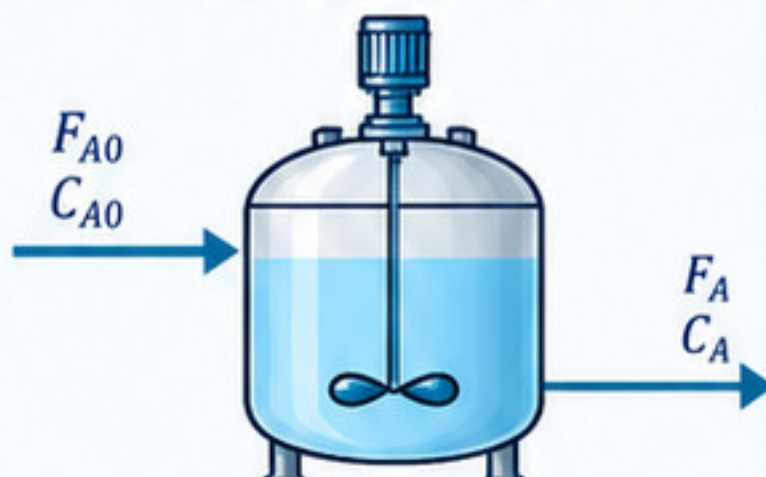
mniejsze partie



częste zmiany receptury

CSTR

CONTINUOUS STIRRED-TANK REACTOR



IDEALNE WYMIESZANIE

SKŁAD W REAKTORZE I NA WYLOCIE

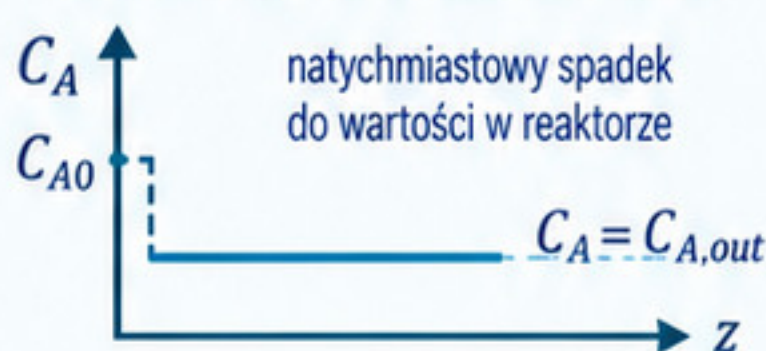
$$C_{A,out} = C_A \text{ w całym reaktorze}$$

BILANS W STANIE STACJONARNYM

$$F_{A0} - F_A + r_A V = 0$$

Skład wewnątrz reaktora jest taki sam jak na wylocie w modelu idealnym.

PROFIL STĘŻENIA (SCHEMATYCZNIE)



PFR

PLUG FLOW REACTOR



brak idealnego mieszania wzdłużnego

Mieszanie poprzeczne (promieniowe) jest zwykle idealizowane.

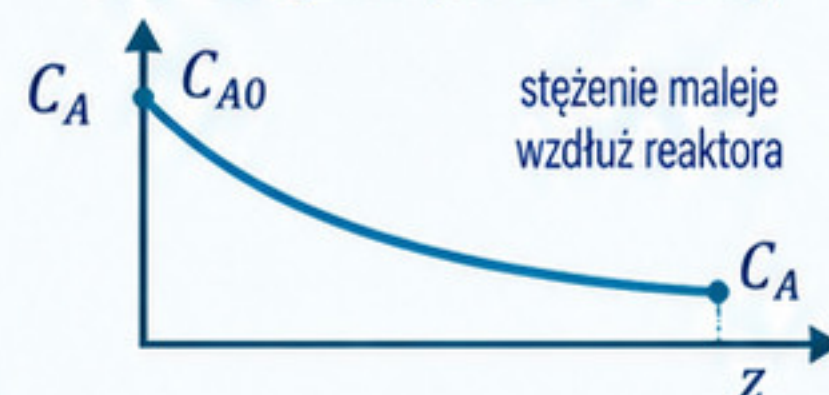
DOMINUJĄCA ZMIENNA

$$C_A = C_A(z)$$

RÓWNANIE RÓŻNICZKOWE

$$dF_A = r_A dV$$

PROFIL STĘŻENIA (SCHEMATYCZNIE)



PORÓWNANIE PROFILI STĘŻENIA

BATCH — zmiana z czasem



CSTR — jednorodny skład w objętości



$$C_A = C_{A,out} = \text{const.}$$

PFR — zmiana wzdłuż reaktora



stężenie maleje wzdłuż reaktora

CZAS PRZEBYWANIA

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

dla gęstości w przybliżeniu stałej

τ jest charakterystycznym czasem przebywania w idealnym modelu przepływowym.

KTÓRY REAKTOR JEST „LEPSZY”?



To zależy od kinetyki, wymiany ciepła, bezpieczeństwa, skali, selektywności i sposobu prowadzenia produkcji.

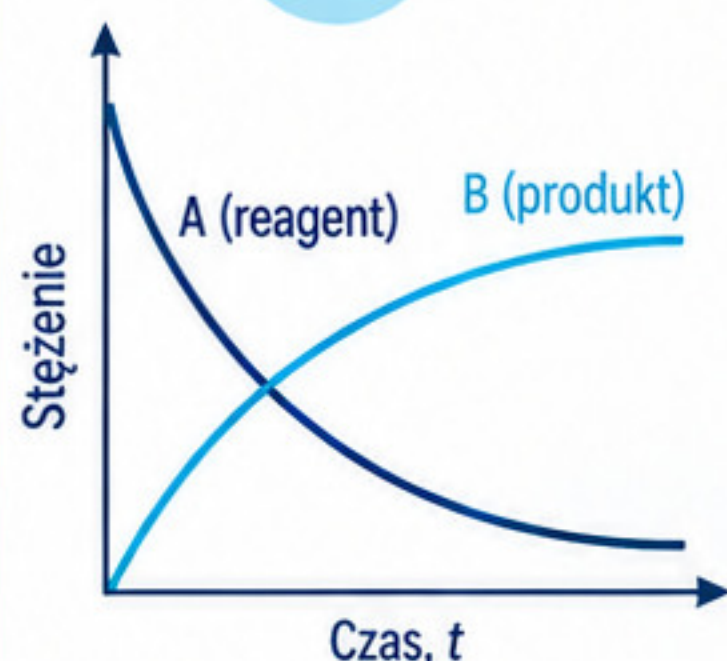
TYPOWY BŁĄD



CSTR i PFR to modele idealne. Rzeczywiste reaktory mogą odbiegać od idealnego mieszania lub idealnego przepływu tłokowego.

Termodynamika mówi, czy reakcja może być korzystna;
kinetyka mówi, jak szybko będzie przebiegać.

POSTĘP REAKCJI W CZASIE



W miarę upływu czasu stężenie reagenta A maleje, a stężenie produktu B rośnie.

SZYBKOŚĆ REAKCJI

$$r_A = -\frac{1}{V} \frac{dN_A}{dt}$$

$$-r_A = k C_A^n$$

k — stała szybkości
 C_A — stężenie reagenta
 n — rząd reakcji względem A

RZĄD REAKCJI

ZERO:

$$-r_A = k$$

nie zależy od C_A

PIERWSZY:

$$-r_A = k C_A$$

DRUGI:

$$-r_A = k C_A^2$$



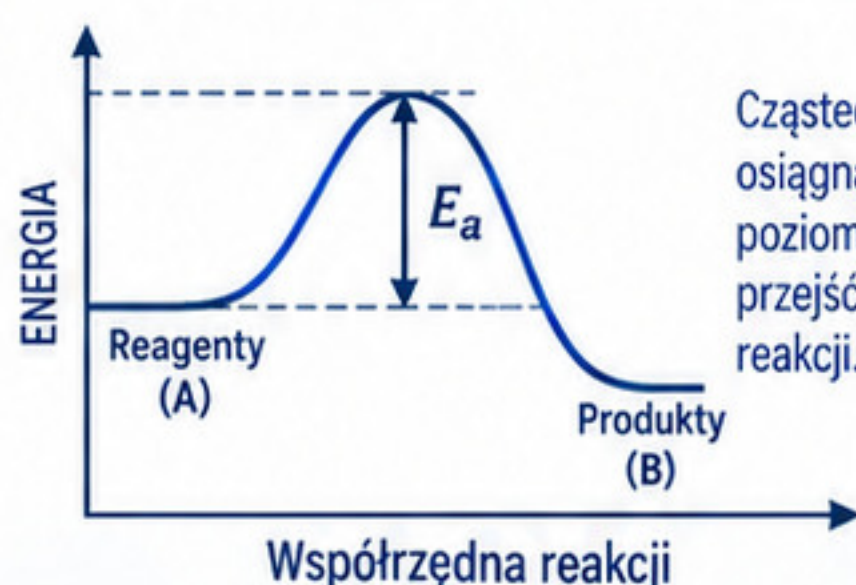
Rząd reakcji wynika z kinetyki i nie musi być równy współczynnikowi stechiometrycznemu.

RÓWNANIE ARRHENIUSA

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

A — czynnik przedwykładniczy
 E_a — energia aktywacji
 R — stała gazowa
 T — temperatura bezwzględna

BARIERA ENERGETYCZNA REAKCJI



Cząsteczki muszą osiągnąć odpowiedni poziom energii, aby przejść przez barierę reakcji.

WPŁYW TEMPERATURY

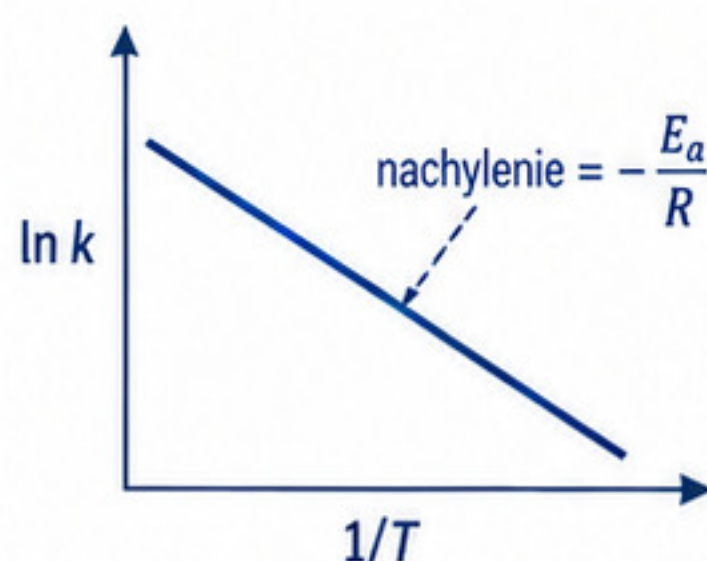
$$T \uparrow \Rightarrow k \uparrow$$

(dla $E_a > 0$)

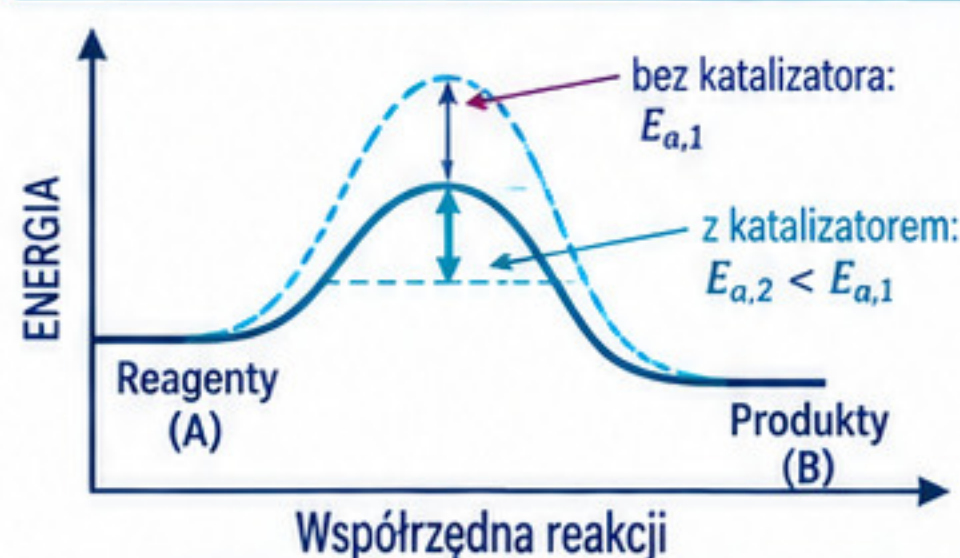
Niewielki wzrost T
→ znaczny wzrost k .

WYKRES ARRHENIUSA

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T}$$



WPŁYW KATALIZATORA



Katalizator umożliwia alternatywną drogę reakcji o niższej energii aktywacji.



Nie zmienia położenia równowagi termodynamicznej — przyspiesza osiągnięcie równowagi w obu kierunkach.

OD KINETYKI DO PROCESU

TERMODYNAMIKA
czy reakcja jest korzystna?

KINETYKA
jak szybko?

REAKTOR
gdzie i jak ją prowadzimy?

TRANSPORT
czy ciepło i masa docierają wystarczająco szybko?



WAŻNE

Szybkość obserwowana w rzeczywistym reaktorze może być ograniczana nie tylko kinetyką chemiczną, lecz także mieszaniem oraz transportem ciepła lub masy.

OPERACJE JEDNOSTKOWE + KINETYKA + TRANSPORT + TERMODYNAMIKA = DZIAŁAJĄCY PROCES

MODUŁ 07

PROCESY PRZEMYSŁOWE, STEROWANIE I BEZPIECZEŃSTWO

Prawdziwa instalacja chemiczna to nie pojedynczy aparat — to połączony system materii, energii, informacji i zabezpieczeń.



Po tym module będziesz potrafić spojrzeć na proces jako całość: od surowca i operacji jednostkowych, przez pomiary i automatyczną regulację, aż po bezpieczeństwo, media pomocnicze, integrację energetyczną i przenoszenie procesu do większej skali.



1 — MATERIA
strumienie procesowe



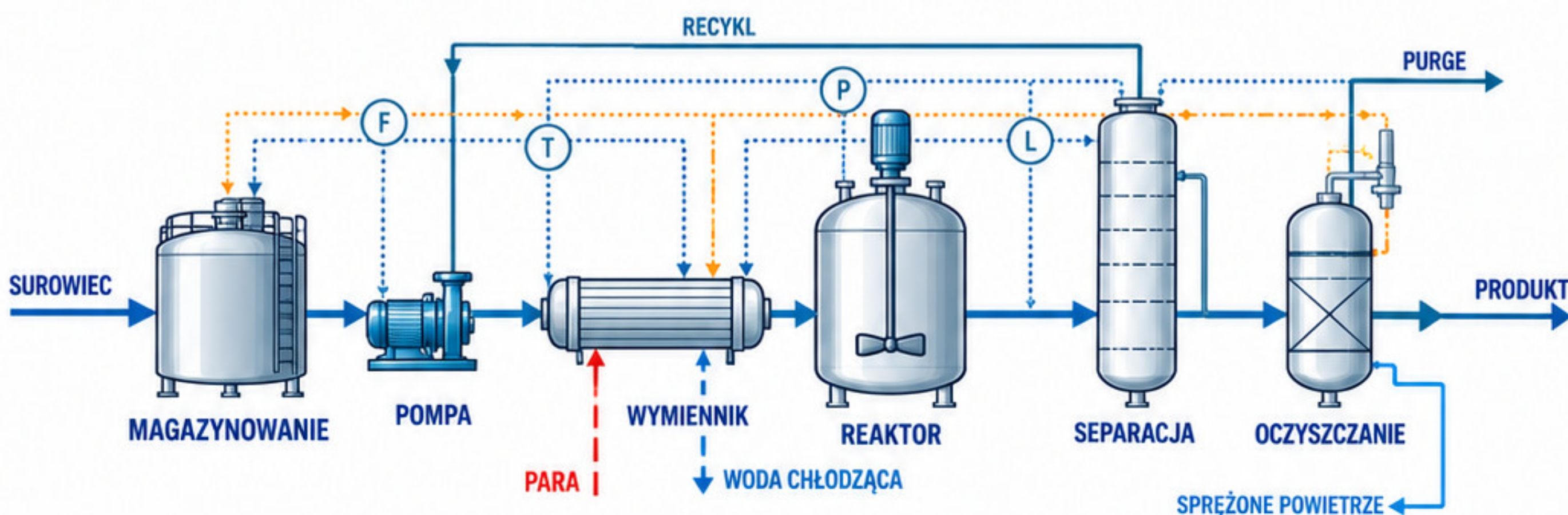
2 — ENERGIA
ogrzewanie, chłodzenie,
praca pomp



3 — INFORMACJA
T, P, F, L, skład



4 — BEZPIECZEŃSTWO
alarmy, blokady,
zawory bezpieczeństwa



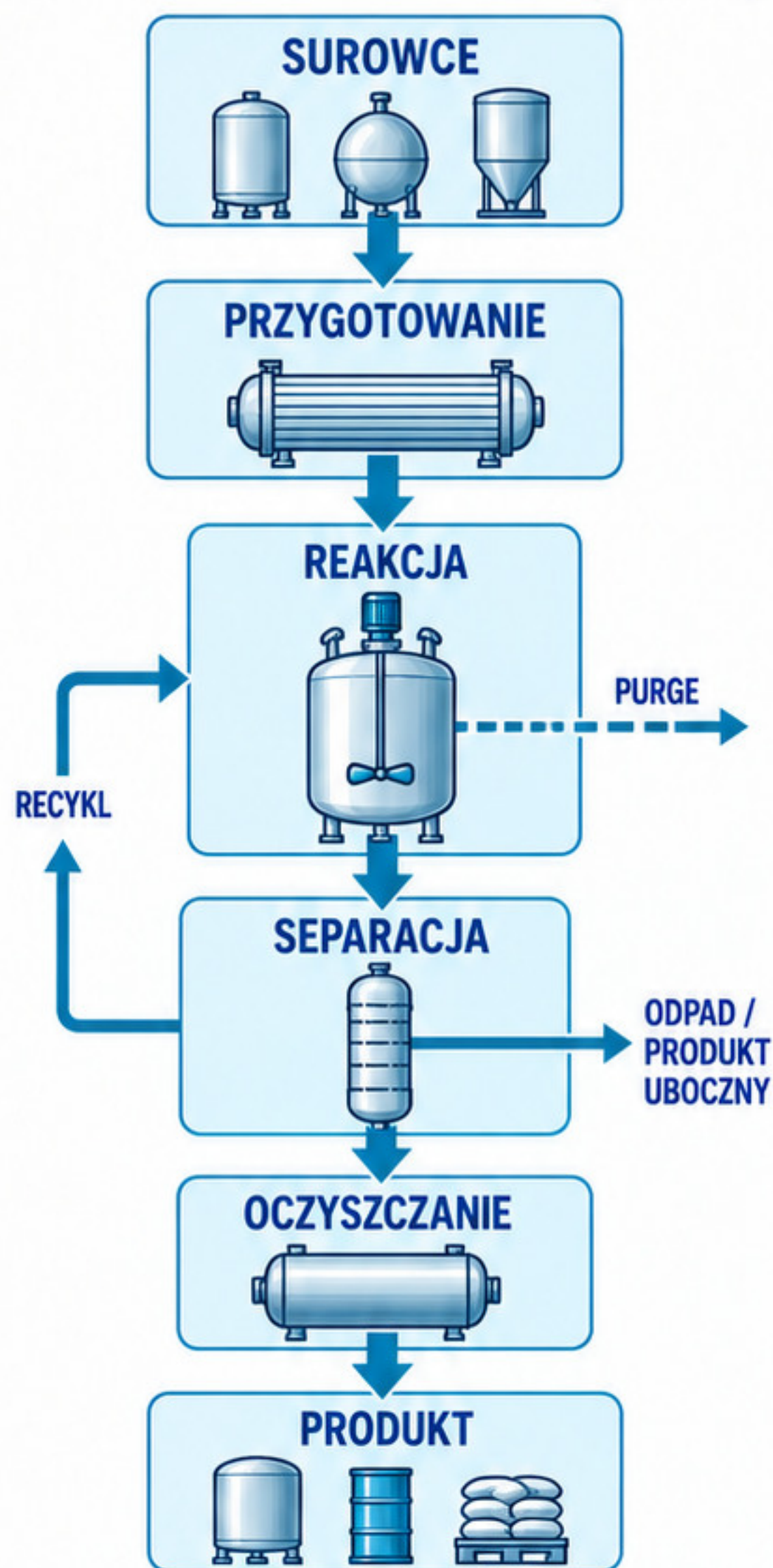
TEMATY MODUŁU



*Inżynier chemiczny musi jednocześnie rozumieć,
co dzieje się z materiałem, energią, aparaturą i bezpieczeństwem procesu.*

KARTA 61 — OD SUROWCA DO PRODUKTU

Proces przemysłowy to łańcuch operacji, w którym każda zmienia stan, skład, temperaturę, ciśnienie lub formę materiału.



BLOK 1 — PRZYGOTOWANIE SUROWCÓW



- ogrzewanie / chłodzenie
- pompowanie / sprężanie
- mieszanie
- oczyszczanie
- zmiana ciśnienia

Surowiec często musi osiągnąć odpowiednie warunki przed wejściem do reaktora.

BLOK 2 — REAKCJA

reagenty → produkty



temperatura



ciśnienie



kinetyka



czas przebywania

BLOK 3 — SEPARACJA



Po reakcji mieszanina może zawierać produkt, nieprzereagowane surowce, rozpuszczalnik i produkty uboczne.

destylacja

absorpcja

ekstrakcja

filtracja

krystalizacja

BLOK 4 — RECYKL



Nieprzereagowane składniki wracają do wcześniejszego etapu (najczęściej do reaktora).

Recykl może zwiększyć ogólne wykorzystanie surowca.

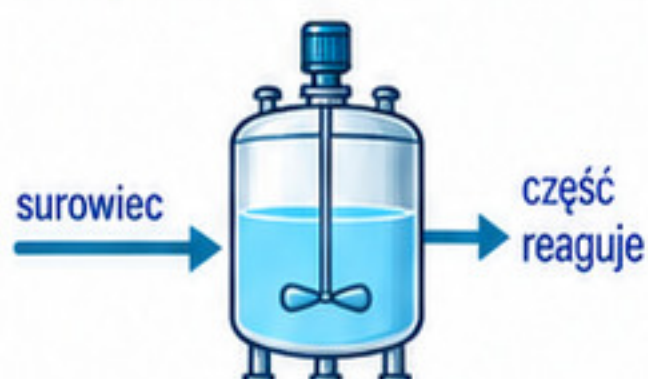
PURGE

Mały strumień usuwa nagromadzone zanieczyszczenia.

KONWERSJA JEDNOPRZEJŚCIOWA A CAŁKOWITA

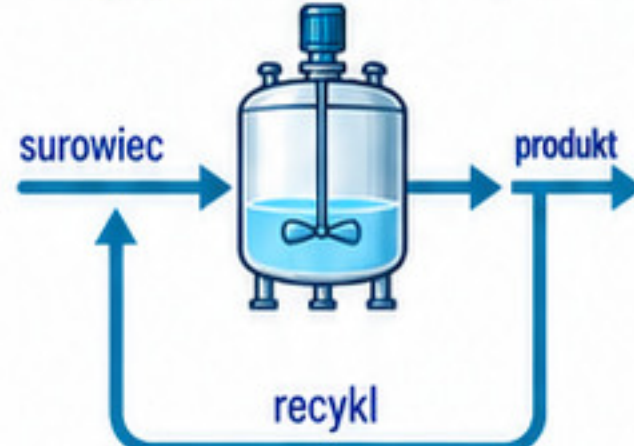
KONWERSJA JEDNOPRZEJŚCIOWA

To część surowca, która reaguje podczas jednego przejścia przez reaktor.



KONWERSJA CAŁKOWITA PROCESU

Uwzględnia również materiał zawracany w recyklu, który reaguje w kolejnych przejściach.



ZADAWAJ 5 PYTAŃ

- 1 Co wpływa?
- 2 Co dzieje się w każdym aparacie?
- 3 Co wypływa?
- 4 Co wraca?
- 5 Gdzie trafiają energia i odpady?

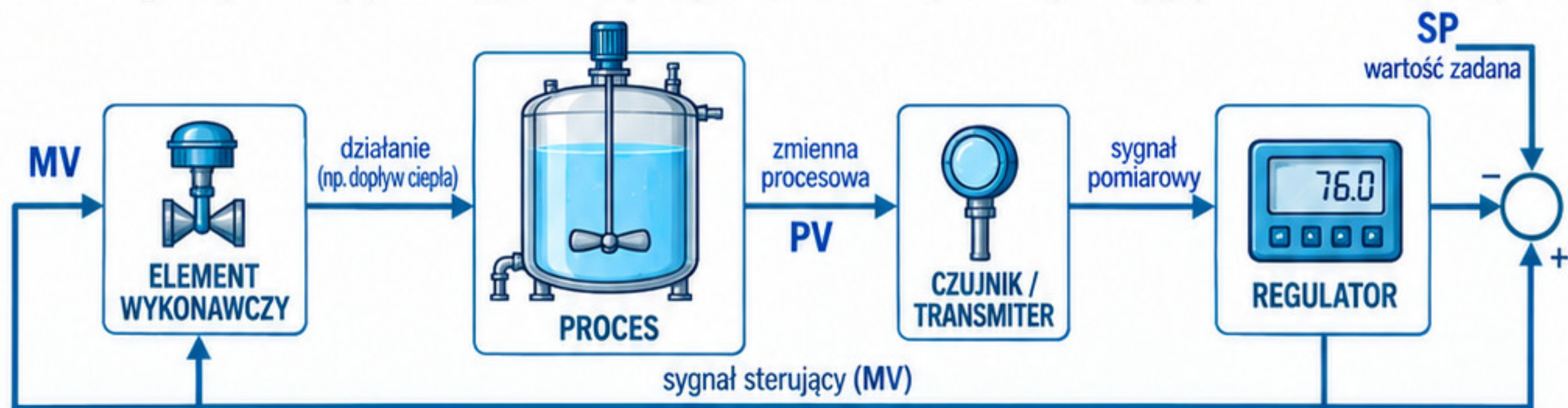


ZAPAMIĘTAJ

Złożona instalacja staje się prostsza, gdy rozbijesz ją na kolejne bloki funkcjonalne i śledzisz osobno materiał, energię oraz informację.

KARTA 62 — PĘTLA REGULACJI PROCESU

Układ regulacji mierzy proces, porównuje wynik z wartością zadaną i koryguje działanie instalacji.



SP — SET POINT

wartość zadana



Przykład:

$$T_{SP} = 80^{\circ}\text{C}$$

PV — PROCESS VARIABLE

wartość zmierzona



Przykład:

$$T_{PV} = 76^{\circ}\text{C}$$

MV — MANIPULATED VARIABLE

wielkość, którą regulator zmienia



Przykład:

otwarcie zaworu pary

BŁĄD REGULACJI

$$e(t) = SP - PV$$

Przykładowe obliczenie:

$$80 - 76 = 4^{\circ}\text{C}$$

→ regulator zwiększa sygnał grzania

SPRZĘŻENIE ZWROTNE

Regulator reaguje na efekt, który już został zmierzony.

zimniejszy strumień zasilania
(np. $T = 20^{\circ}\text{C}$ zamiast 40°C)

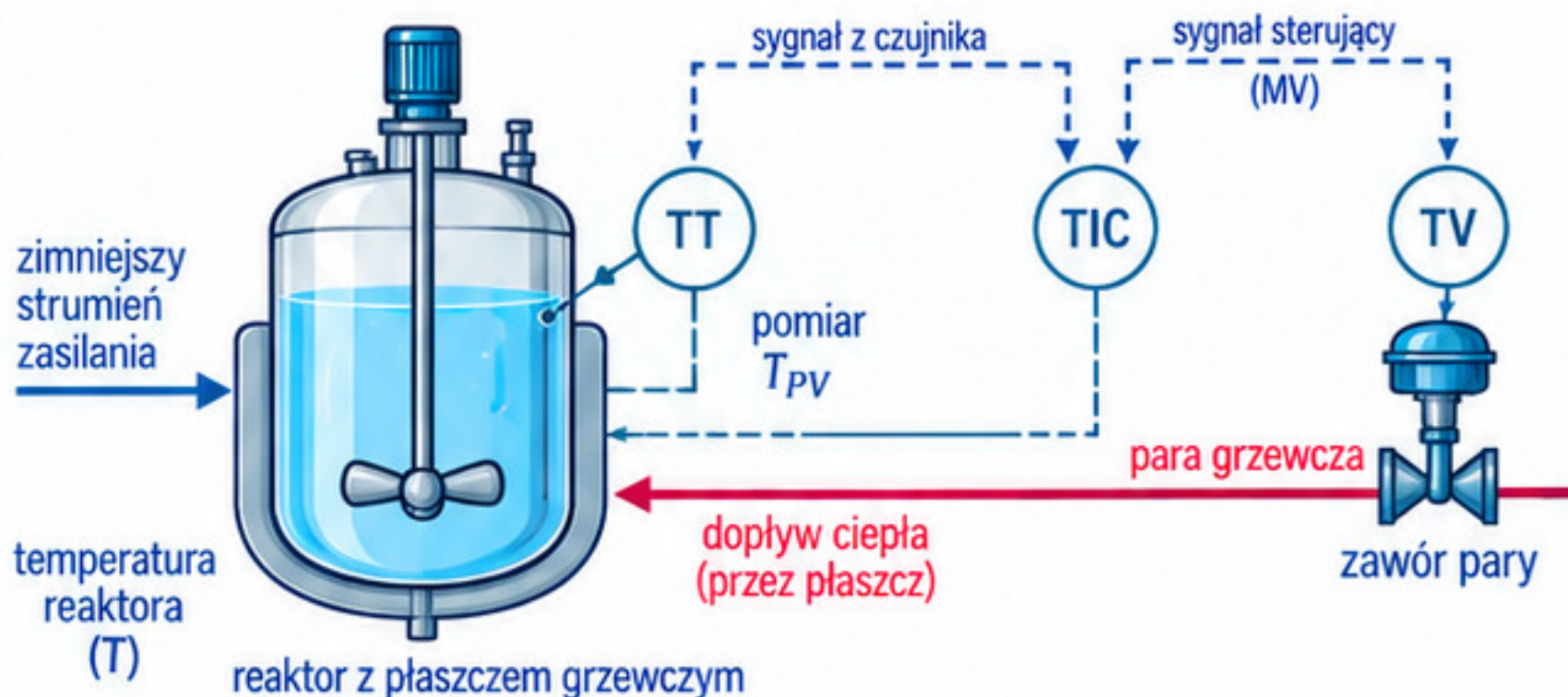


$$T_{PV} \downarrow$$



regulator zwiększa ogrzewanie (MV ↑)

REGULACJA TEMPERATURY — PRZYKŁAD



ZAKŁÓCENIE

Zakłócenie to zmiana, która wpływa na proces, ale nie jest bezpośrednio sterowana przez regulator.

Przykłady:



temperatura zasilania



skład surowca



ciśnienie medium grzewczego

STEROWANIE RĘCZNE

vs.

REGULACJA AUTOMATYCZNA



STEROWANIE RĘCZNE

Operator obserwuje proces i samodzielnie koryguje działanie instalacji (np. otwarcie zaworu).

vs.



REGULACJA AUTOMATYCZNA

Regulator automatycznie koryguje działanie instalacji w sposób ciągły, na podstawie pomiaru.



WAŻNE

Układ regulacji nie eliminuje fizyki procesu. Może sterować tylko tymi zmiennymi, na które rzeczywiście ma wpływ przez dostępny element wykonawczy.

KARTA 63 — CZUJNIKI I ZMIENNE PROCESOWE

Nie można sterować tym, czego nie potrafimy wiarygodnie zmierzyć.

T — TEMPERATURA



Mierzy temperaturę cieczy lub gazu w procesie.

Przykłady czujników:

- termopara
- RTD (rezystancyjny)

F — PRZEPŁYW



Mierzy przepływ cieczy, gazu lub pary.

Zasady pomiaru:

- różnica ciśnień
- Coriolis
- elektromagnetyczny

P — CIŚNIENIE



Mierzy ciśnienie w zbiorniku lub na rurociągu.

Pomiar ciśnienia może również pośrednio informować o poziomie lub przepływie.

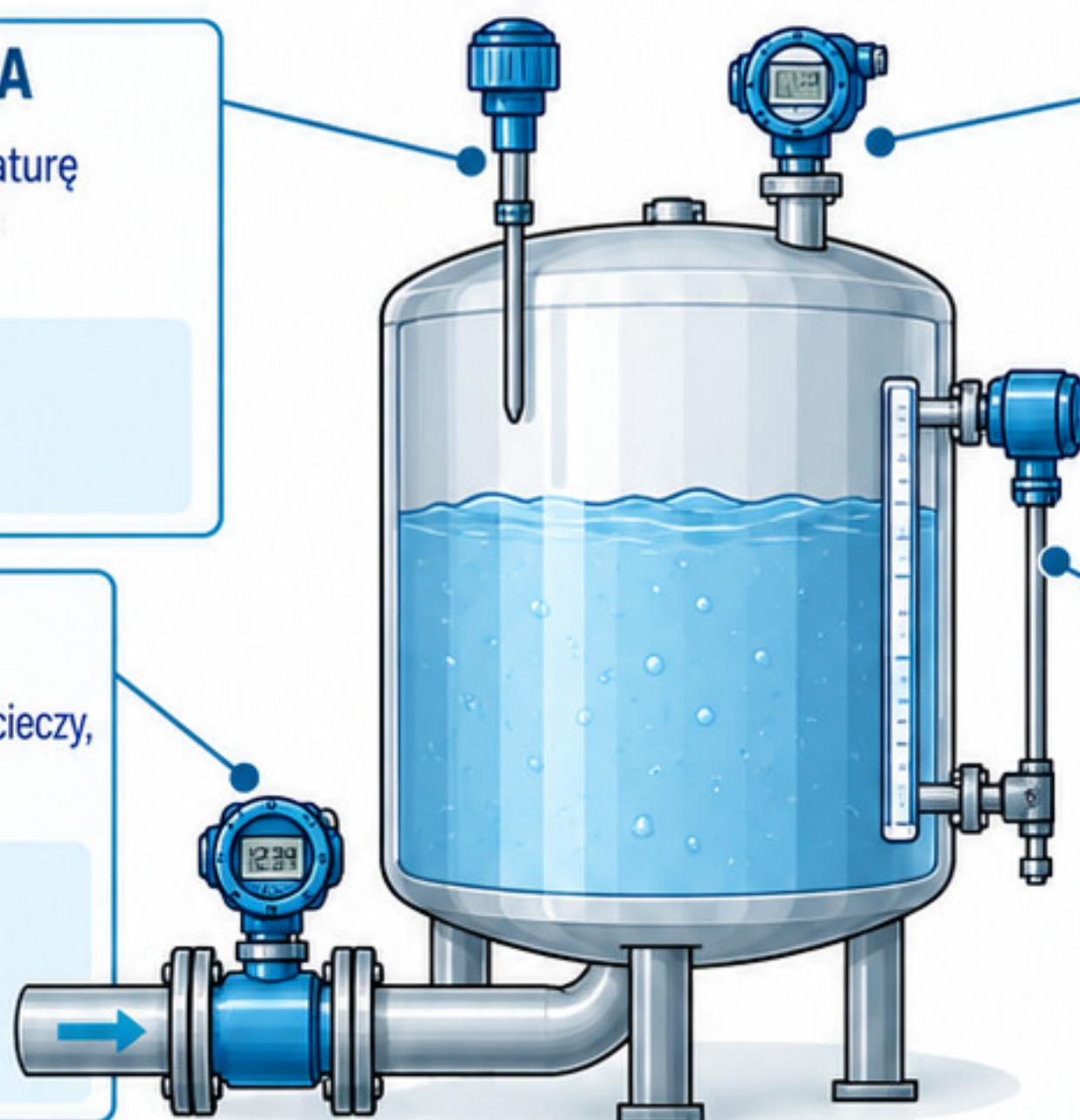
L — POZIOM



Mierzy poziom cieczy w zbiorniku.

Zasady pomiaru:

- różnica ciśnień
- radar
- pływak



OD ZJAWISKA DO LICZBY



WIELKOŚĆ FIZYCZNA

np. temperatura, ciśnienie, przepływ, poziom



CZUJNIK

reaguje na wielkość fizyczną



TRANSMITER

przetwarza sygnał z czujnika



SYGNAŁ

np. 4–20 mA, HART, Profibus



SYSTEM STEROWANIA

wykorzystuje sygnał do kontroli procesu

POMIAR NIE JEST IDEALNY



zakres

minimalna i maksymalna wartość pomiarowa



dokładność

jak blisko wartości rzeczywistej



powtarzalność

taka sama wartość przy powtórnych pomiarze



czas odpowiedzi

jak szybko czujnik reaguje na zmianę



kalibracja

porównanie z wzorcem i korekta odchyłek

PRZYKŁADOWE ODCZYT

Wartość rzeczywista (proces)



Czujnik A



Czujnik B



Który pomiar jest wiarygodny?

Sam odczyt nie wystarcza — trzeba znać jakość pomiaru.

CZUJNIK A TRANSMITER



CZUJNIK

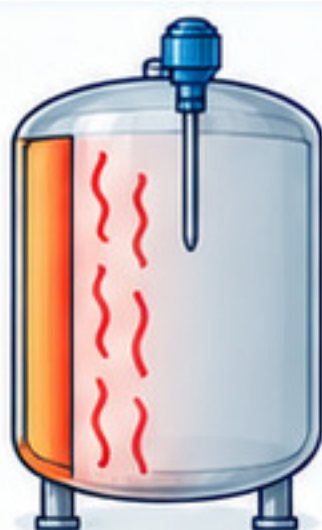
bezpośrednio reaguje na wielkość fizyczną (np. temperaturę, ciśnienie).



TRANSMITER

przetwarza pomiar na standardowy sygnał używany przez system sterowania (np. 4–20 mA).

DLACZEGO LOKALIZACJA MA ZNACZENIE?



Czujnik zbyt blisko ściany grzewczej może mierzyć zawyżoną temperaturę, nieodpowiednią dla całego procesu.



Prawidłowo umieszczony czujnik mierzy temperaturę reprezentatywną dla całej objętości cieczy.



TYPOWY BŁĄD

Duża liczba cyfr na wyświetlaczu nie oznacza automatycznie dużej dokładności pomiaru.

KARTA 64 — REGULATOR PID

PID łączy reakcję na błąd obecny, jego historię i tempo zmian.

RÓWNANIE REGULATORA PID

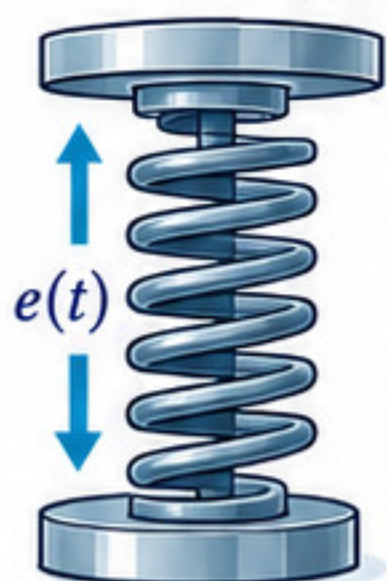
$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

OZNACZENIA

- $u(t)$ — sygnał sterujący
- $e(t)$ — uchyb
- K_c — wzmacnienie regulatora
- τ_I — czas całkowania
- τ_D — czas różniczkowania

P — PROPORCJONALNE

Jak duży jest błąd teraz?



$$u_P \propto e$$

duży błąd →
silniejsza reakcja

Działa proporcjonalnie do aktualnej wartości uchybu.

I — CAŁKUJĄCE

Jak długo błąd się utrzymuje?



$$u_I \propto \int e dt$$

usuwa trwały uchyb

Sumuje uchyb w czasie,
dzięki czemu eliminuje uchyb ustalony.

D — RÓŻNICZKUJĄCE

Jak szybko błąd się zmienia?



$$u_D \propto \frac{de}{dt}$$

reaguje na trend zmian
i może działać wyprzedzająco
względem samej wartości błędu

Reaguje na szybkość zmian uchybu,
przewidując przyszłe odchylenia.

CO ROBI KAŻDY CZŁON?

P

→ reaguje teraz

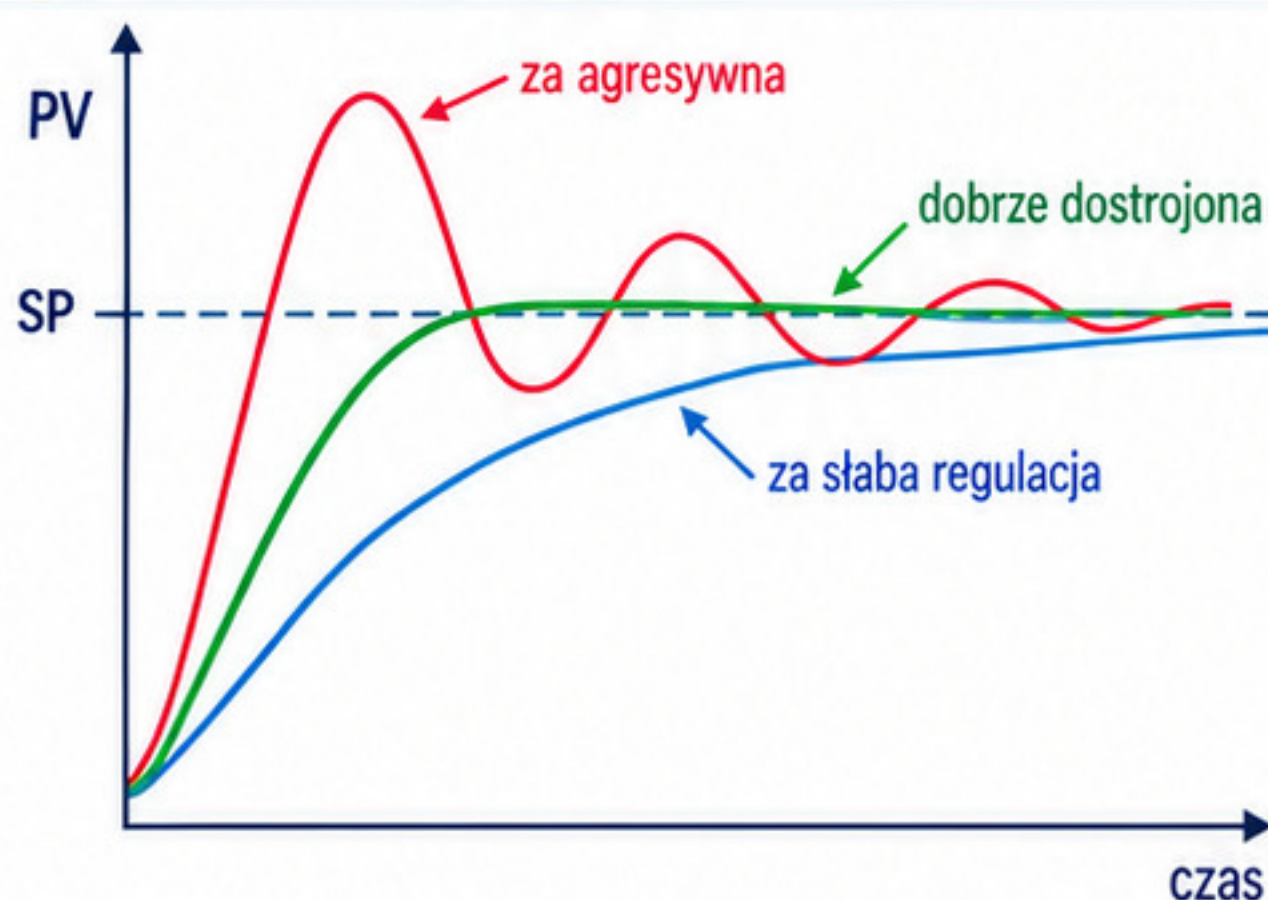
I

→ pamięta przeszłość

D

→ obserwuje tempo zmian

ODPOWIEŹ NA ZMIANĘ SP



STROJENIE

Dobór paramerów PID jest kompromisem między szybkością reakcji, przeregulowaniem, stabilnością i odpornością na zakłócenia.



Człon D może silnie reagować na szum pomiarowy, dlatego w praktyce wymaga ostrożnego użycia i filtracji.

PORÓWNANIE REGULATORÓW

P

proste, szybkie,
może zostawić
offset

PI

bardzo częste
w procesach
przemysłowych

PID

dodaje reakcję na trend
i może poprawić
niektóre układy



ZAPAMIĘTAJ

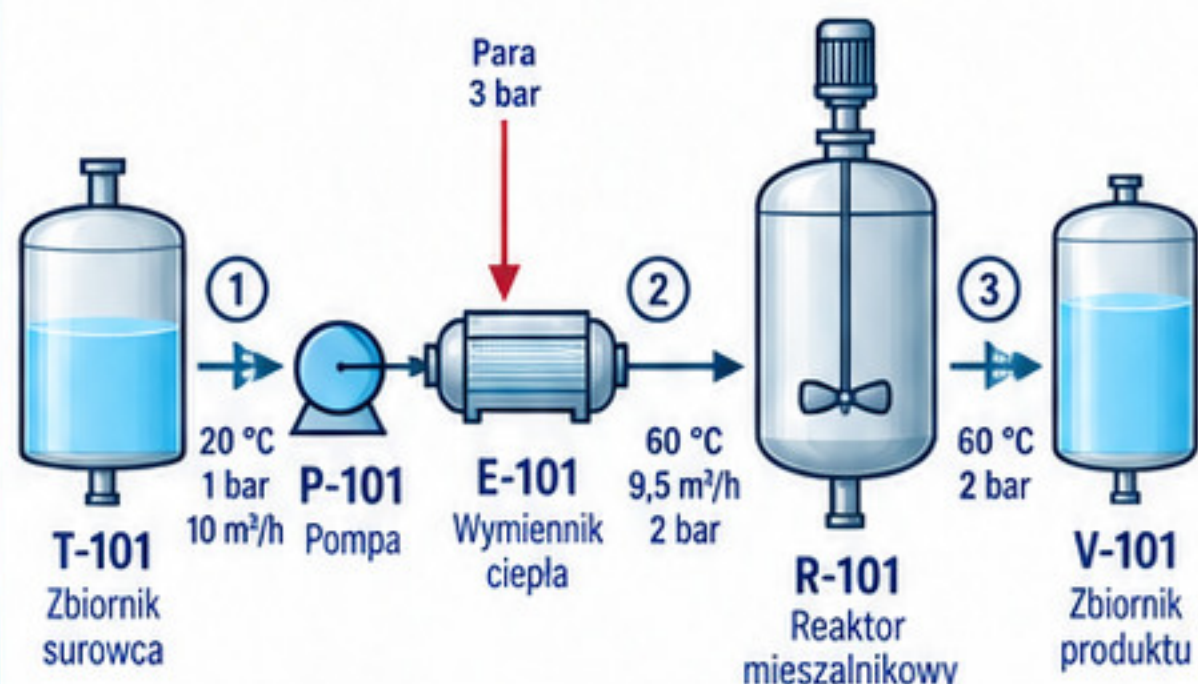
Więcej działania regulatora nie zawsze oznacza lepszą regulację.
Zbyt agresywne strojenie może powodować oscylacje lub niestabilność.

KARTA 65 — PFD A P&ID

PFD pokazuje logikę procesu. P&ID pokazuje, jak instalacja ma być połączona, mierzona, sterowana i zabezpieczana.

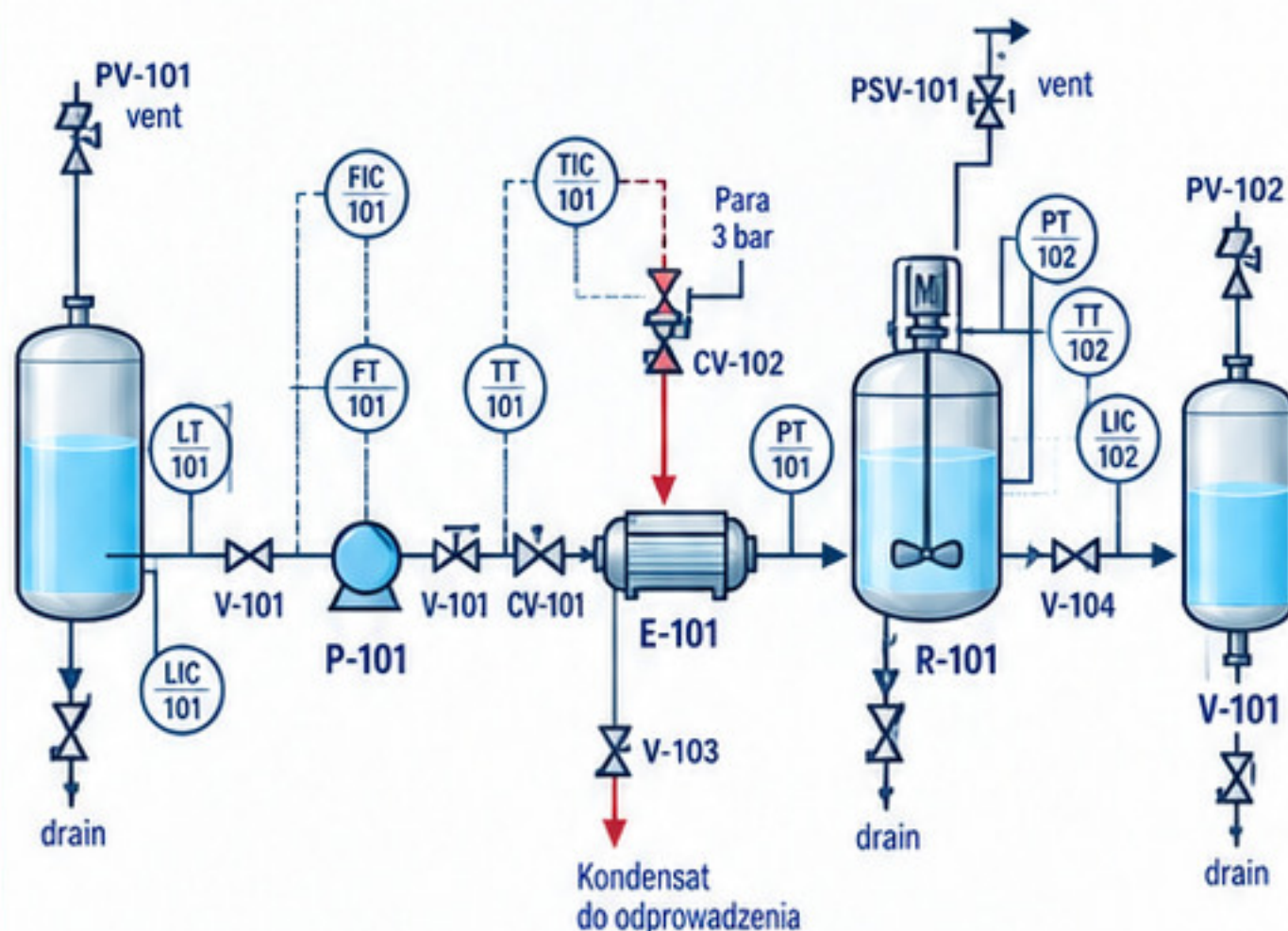
PFD — Process Flow Diagram

Najważniejsze urządzenia, główne strumienie i ogólna logika procesu.



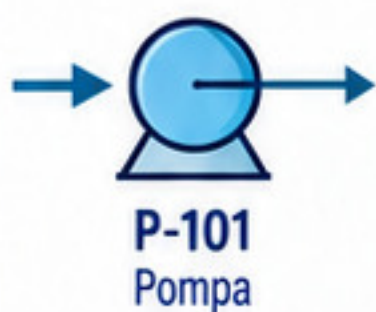
P&ID — Piping & Instrumentation Diagram

Szczegółowa informacja o rurociągach, armaturze, instrumentacji, regulacji i zabezpieczeniach.

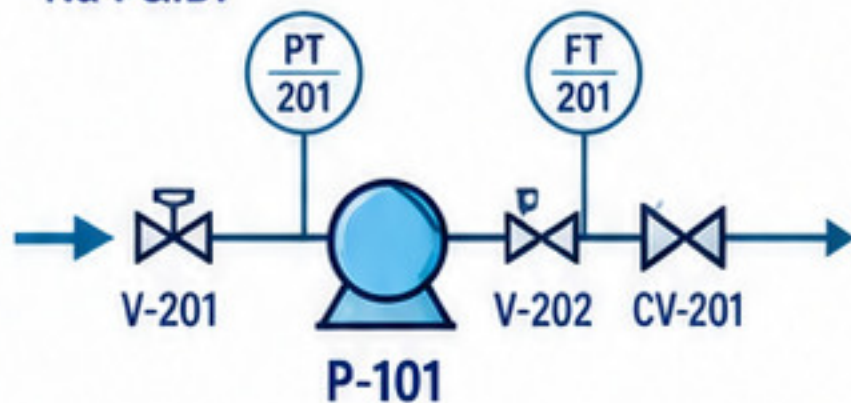


TO SAMO URZĄDZENIE, INNY POZIOM SZCZEGÓŁOWOŚCI

Na PFD:



Na P&ID:



Na PFD pokazujemy tylko urządzenie.
Na P&ID dodajemy armaturę, zabezpieczenia i instrumentację.

LEGENDA OZNACZEŃ URZĄDZEŃ

P — Pump (pompa)
E — Exchanger (wymiennik ciepła)
R — Reactor (reaktor)
V — Vessel (zbiornik)
T — Tank (zbiornik magazynowy)

Konwencje oznaczeń mogą różnić się między firmami i standardami projektowymi.

OZNACZENIA APARATURY POMIAROWEJ

T — temperatura
P — ciśnienie
F — przepływ
L — poziom
I — indication (wskazanie)
C — control (regulacja)
T — transmitter (przetwornik)

Przykłady:

TIC → Temperature Indicating Controller
FT → Flow Transmitter

KIEDY UŻYWAĆ KTÓREGO?



Chcesz zrozumieć proces?



PFD



Chcesz wiedzieć, jak instalacja jest fizycznie podłączona i sterowana?



P&ID



TYPOWY BŁĄD

P&ID nie jest mapą przestrzenną instalacji. Pokazuje zależności funkcjonalne i połączenia, a nie dokładne położenie rur w budynku.

KARTA 66 — BEZPIECZEŃSTWO PROCESU I HAZOP

Bezpieczeństwo procesu polega na przewidywaniu, co może pójść nie tak, zanim odchylenie przerodzi się w niebezpieczne zdarzenie.

NORMALNE ZMIENNE PROCESOWE



Temperatura:
T [°C]



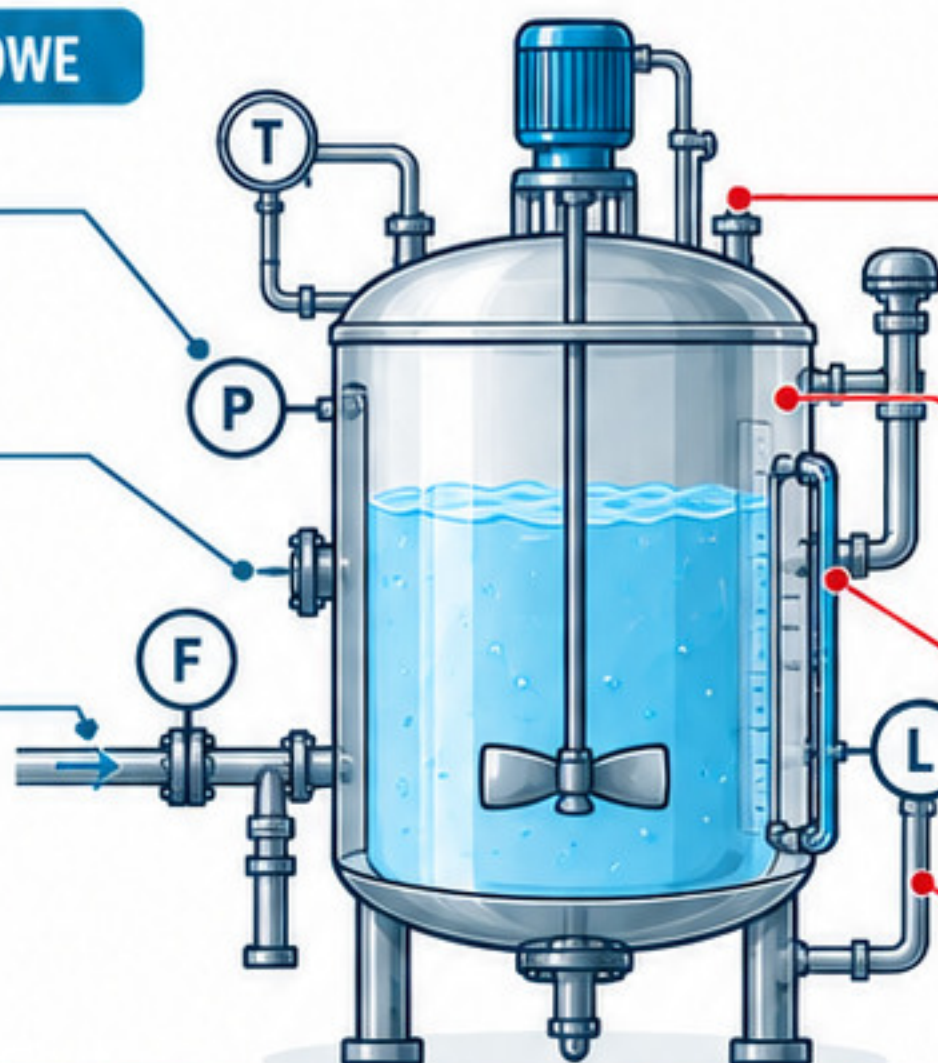
Ciśnienie:
P [bar]



Przepływ:
F [m³/h]



Poziom:
L [%]



MOŻLIWE ODCHYLENIA (PRZYKŁADY)



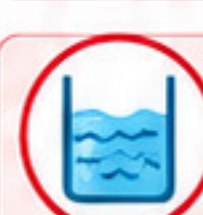
ZA WYSOKA T
np. awaria chłodzenia



ZA WYSOKIE P
np. zablokowany odpowietrznik



BRAK PRZEPŁYWU
np. awaria pompy



ZA WYSOKI POZIOM
np. zbyt duży dopływ

ŁAŃCUCH PRZYCZYNOWO-SKUTKOWY (SCHEMAT TYPU „BOW-TIE”)

ŹRÓDŁO



utrata
chłodzenia



ZDARZENIE



T rośnie



SKUTEK



szybsza reakcja
P może rosnać



BARRIERA



- alarm
- interlock
- zawór bezpieczeństwa

HAZOP — Hazard and Operability Study



Zespół systematycznie analizuje odchylenia od zamierzonego działania procesu i ocenia możliwe przyczyny, skutki oraz zabezpieczenia.

SŁOWA PRZEWODNIE (GUIDE WORDS)

BRAK

WIĘCEJ

MNIEJ

ODWROTNIE

INACZEJ

Przykład: **BRAK** + **PRZEPŁYW** → **BRAK PRZEPŁYWU**

? Dlaczego?

? Co się stanie?

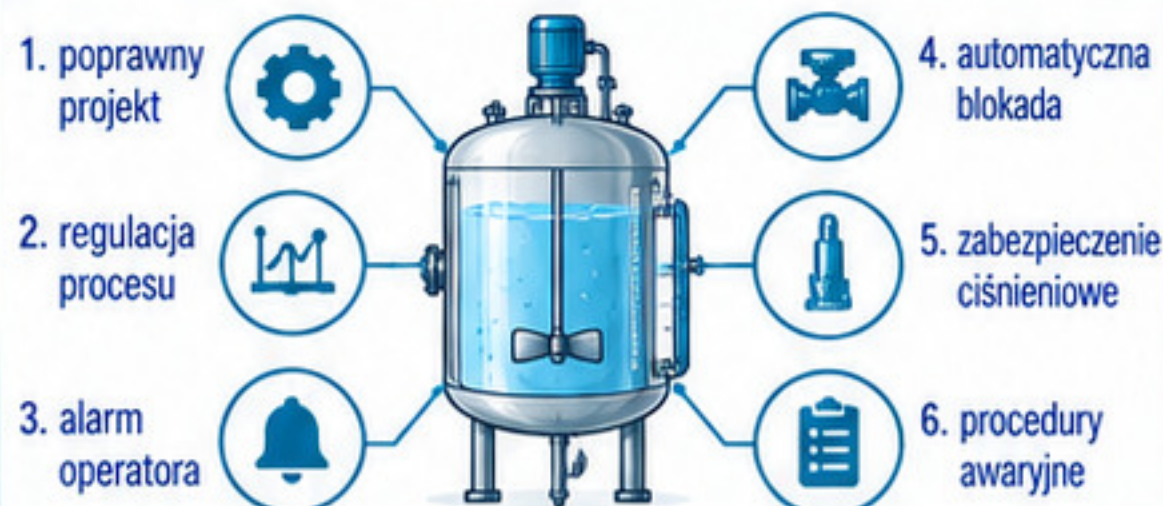
? Jak to wykryjemy?

? Co ograniczy skutki?

PRZYKŁADOWA TABELA HAZOP (UPROSZCZONA)

Węzeł (Node)	Odchylenie (Deviation)	Możliwe przyczyny	Możliwe skutki	Istniejące zabezpieczenia
dopływ chłodziwa do reaktora	BRAK PRZEPŁYWU	- zamknięty zawór - awaria pompy - zablokowana linia	- wzrost temperatury - wzrost szybkości reakcji	- alarm wysokiej temperatury - automatyczne odcięcie reagenta - niezależny system zabezpieczający

WARSTWY ZABEZPIECZEŃ (LAYER OF PROTECTION)



Bezpieczeństwo nie powinno zależeć od jednej bariery.



WAŻNE

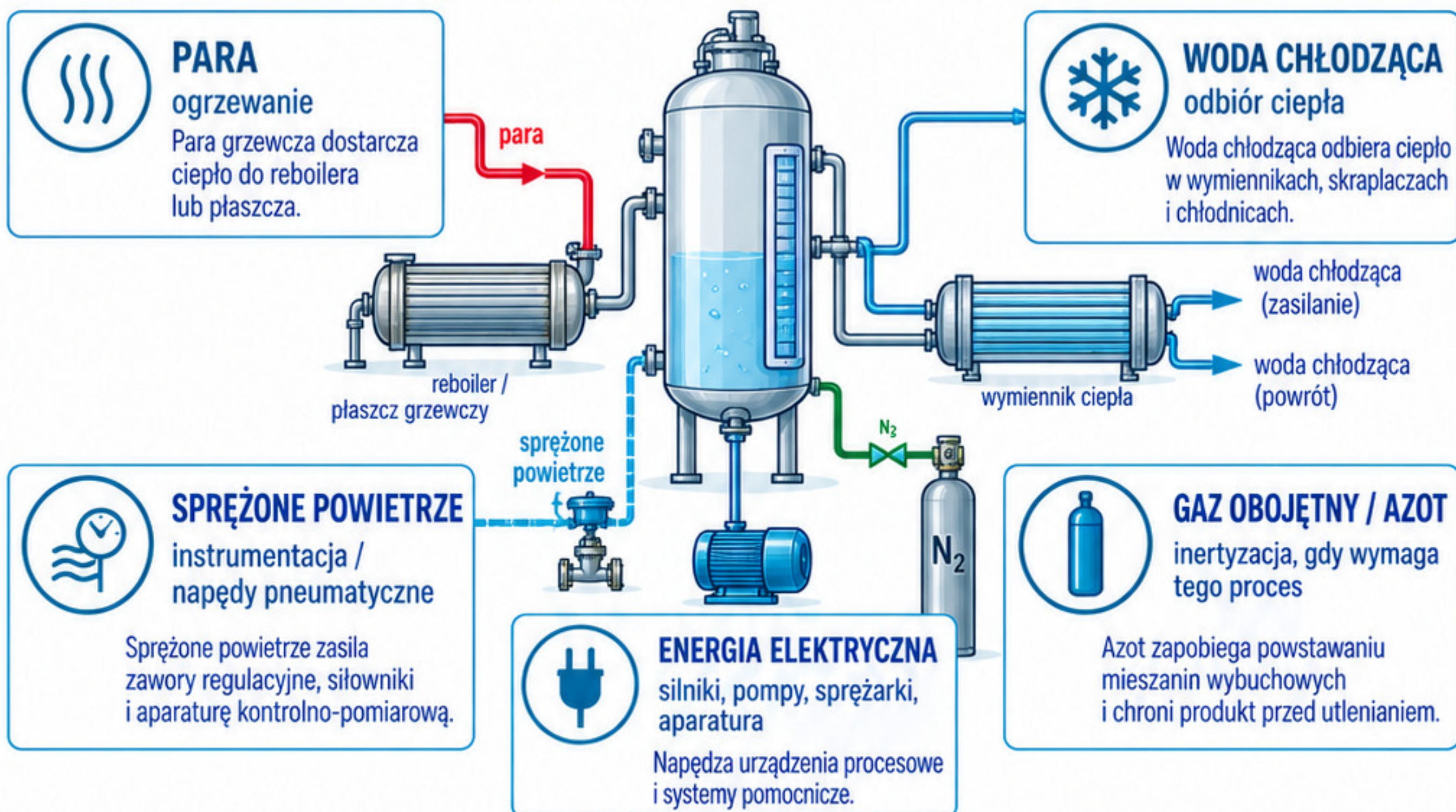
HAZOP nie udowadnia, że proces jest bezpieczny. To usystematyzowana metoda identyfikacji zagrożeń i problemów operacyjnych, która wspiera dalszą ocenę ryzyka.



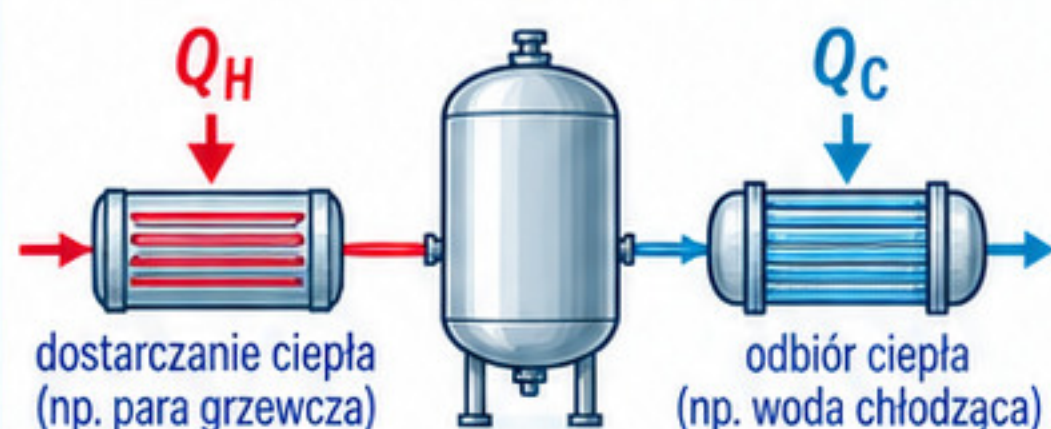
Schematy tej karty służą nauce zasad. Rzeczywiste systemy bezpieczeństwa muszą być projektowane zgodnie z obowiązującymi normami, analizą ryzyka i wymaganiami konkretnej instalacji.

KARTA 67 — MEDIA POMOCNICZE I INTEGRACJA ENERGII

Proces potrzebuje nie tylko surowców — potrzebuje także ciepła, chłodu, energii elektrycznej i wielu mediów pomocniczych.

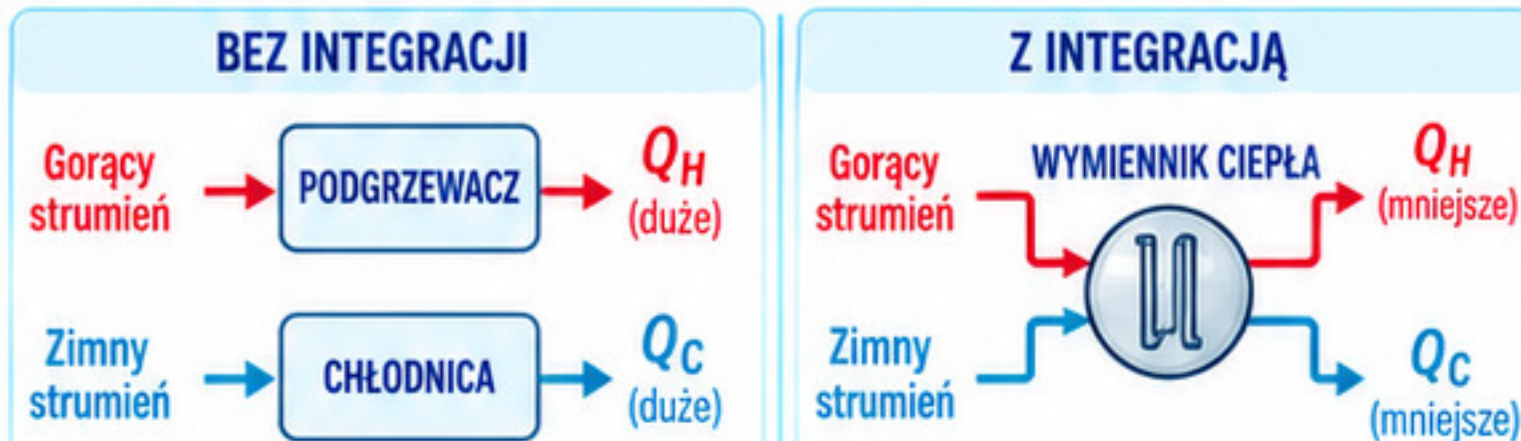


SKĄD BIERZE SIĘ KOSZT ENERGII?



Jeżeli jeden strumień trzeba schłodzić, a drugi ogrzać, warto zapytać, czy można wymienić energię bezpośrednio między nimi.

INTEGRACJA CIEPLNA

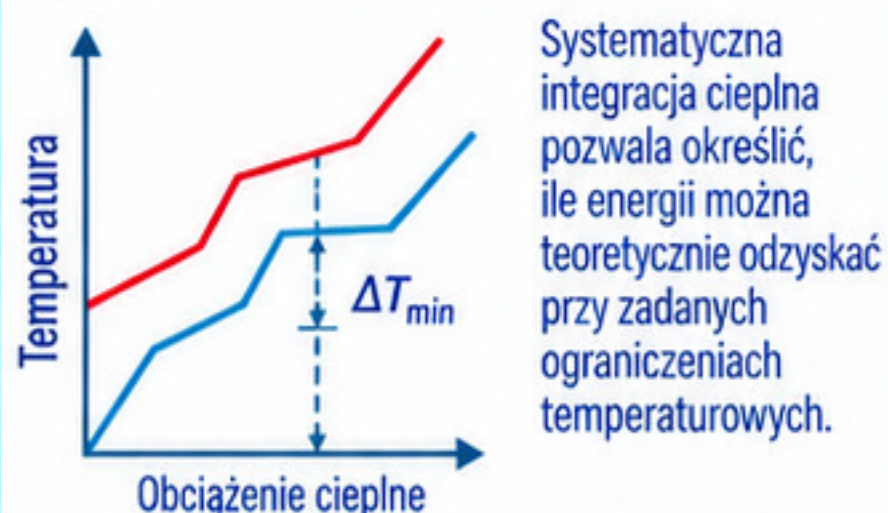


odzysk ciepła może ograniczyć zapotrzebowanie zarówno na ogrzewanie, jak i chłodzenie

BILANS ENERGII — IDEA



IDEA PINCH



MEDIA TEŻ MAJĄ PARAMETRY

- para → ciśnienie / temperatura
 - woda chłodząca → temperatura zasilania i powrotu
 - sprężone powietrze → ciśnienie i jakość
 - energia elektryczna → moc
- „Dostępne medium” nie jest nieskończonym źródłem energii.



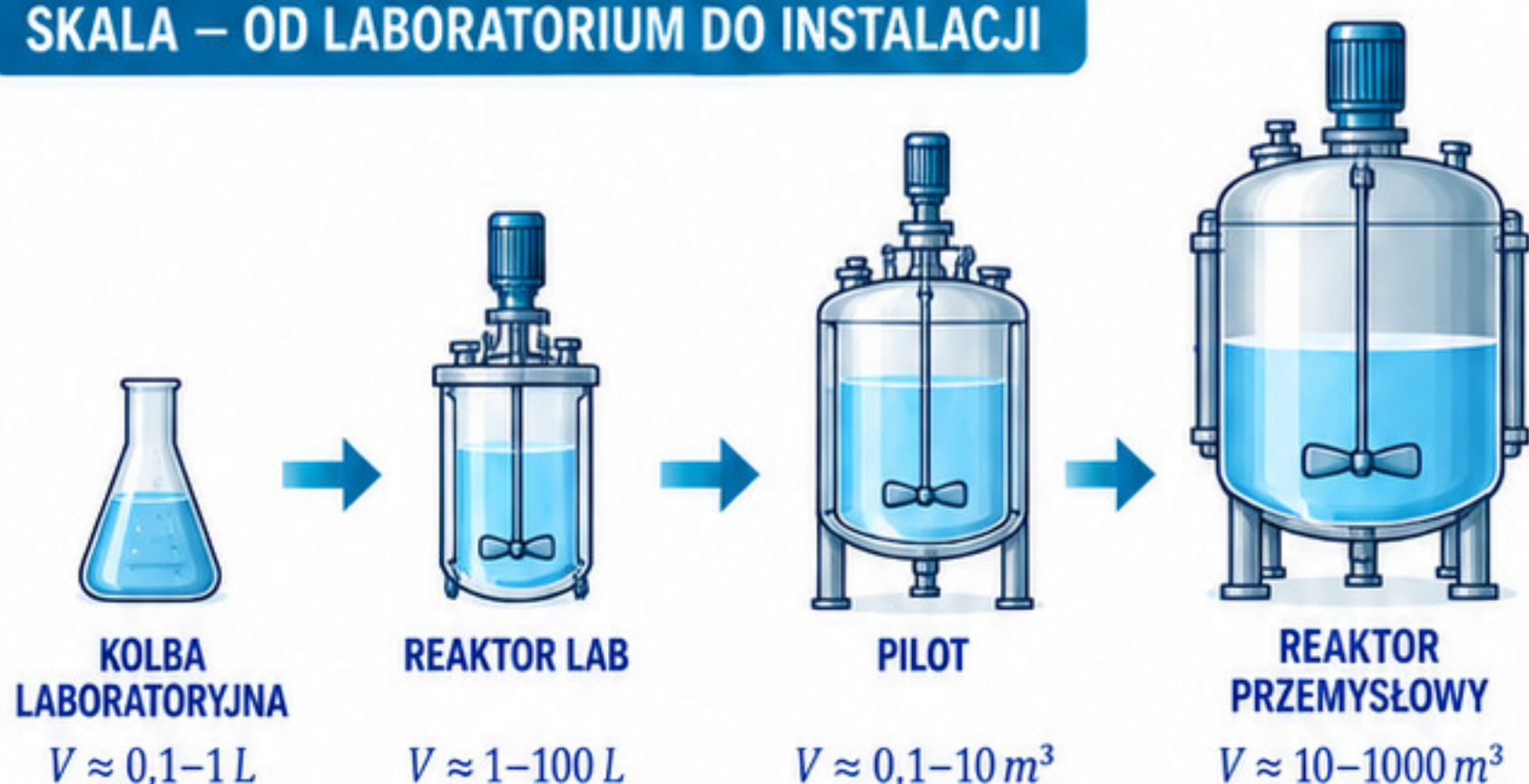
ZAPAMIĘTAJ

Sprawność procesu to nie tylko wysoka konwersja chemiczna. Liczy się również zużycie energii, wody i mediów pomocniczych na jednostkę produktu.

KARTA 68 — SCALE-UP: LABORATORIUM → INSTALACJA

Dziesięć razy większy reaktor nie zachowuje się jak dziesięć identycznych reaktorów laboratoryjnych.

SKALA – OD LABORATORIUM DO INSTALACJI

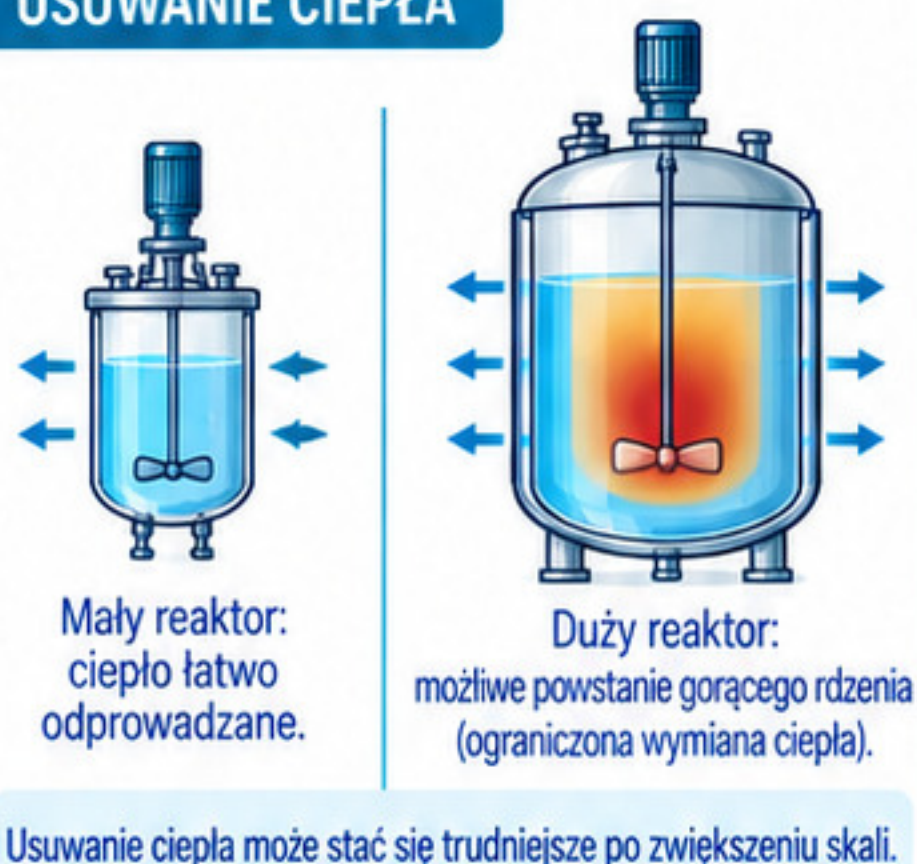


POWIERZCHNIA A OBJĘTOŚĆ

$$A \propto L^2 \quad V \propto L^3 \quad \frac{A}{V} \propto \frac{1}{L}$$

Im większy aparat, tym mniejsza powierzchnia wymiany przypada zwykle na jednostkę objętości.

USUWANIE CIEPŁA



CO NIE SKALUJE SIĘ AUTOMATYCZNIE?



KRYTERIA PODOBIENSTWA



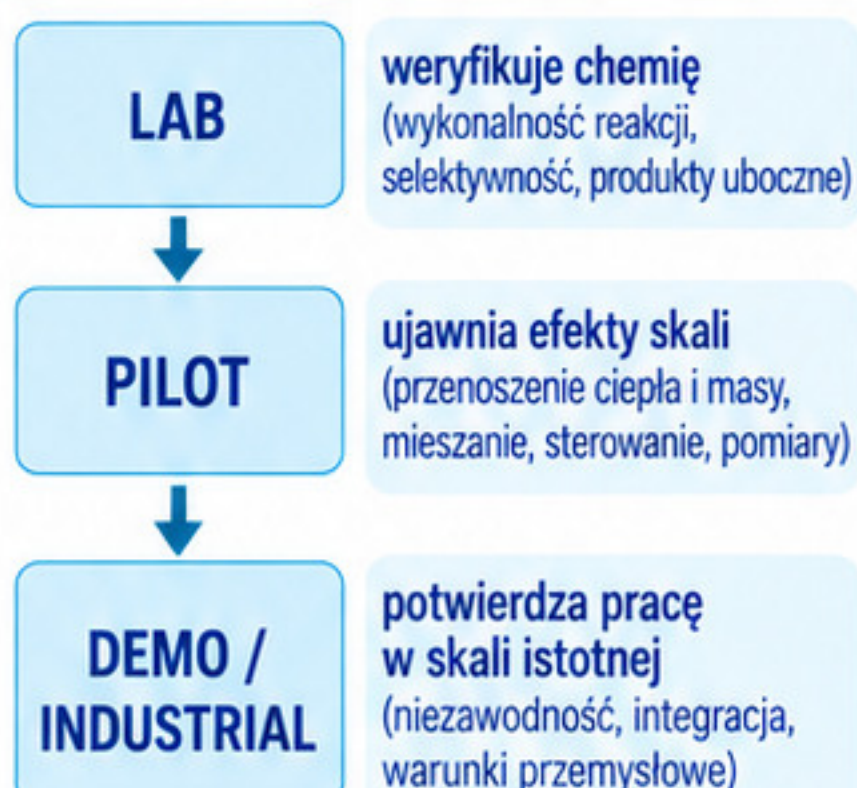
MIESZANIE

$$P \propto \rho N^3 D^5$$



Zależność dotyczy typowych mieszadeł i warunków dynamicznie podobnych, nie jest uniwersalna.

ROLA INSTALACJI PILOTAŻOWEJ



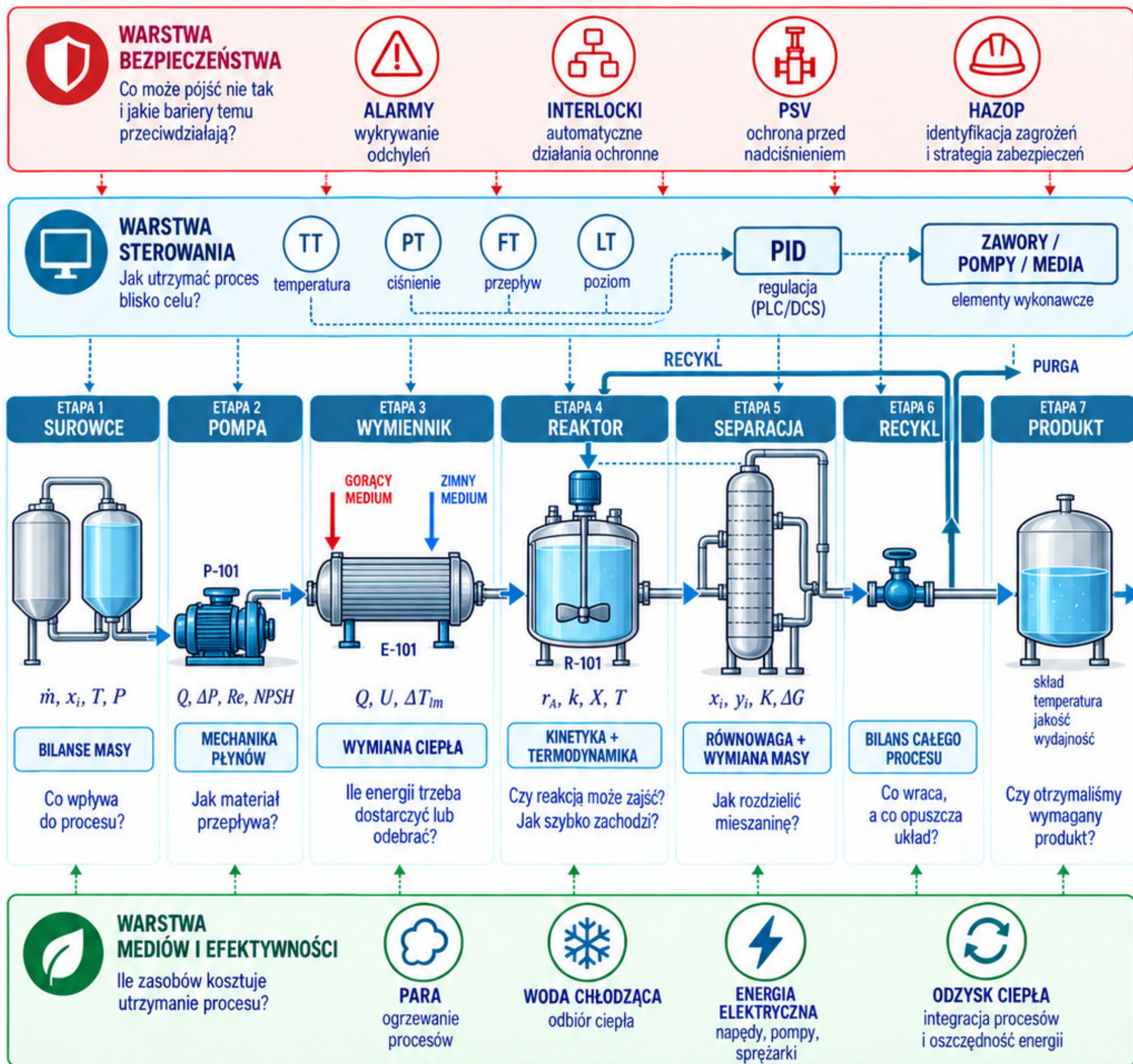
SCALE-UP REAKCJI EGZOTERMICZNEJ



WAŻNE

Scale-up oznacza zachowanie właściwego zachowania procesu — nie zachowanie każdej wielkości fizycznej na identycznym poziomie.

Inżynieria chemiczna łączy materię, energię, transport, reakcję, separację, sterowanie i bezpieczeństwo w jeden system.



7 PYTAŃ INŻYNIERA

1. →

CO WPŁYWA?

Jakie są strumienie, składy, warunki?

2. ⚙️

CO SIĘ ZMIENIA?

Jakie zjawiska zachodzą w procesie?

3. ⚡

CO NAPĘDZA ZMIANĘ?

Jakie są siły napędowe?

4. -|-

CO STAWIA OPÓR?

Jakie są opory i ograniczenia?

5. →

CO WYPŁYWA?

Jakie są produkty, straty, emisje?

6. ⚙️

JAK TO KONTROLUJEMY?

Jakie zmienne mierzymy i regulujemy?

7. ⚠️

CO SIĘ STANIE, GDY COŚ PÓJDZIE NIE TAK?

Jakie są ryzyka i konsekwencje?



NIE UCZ SIĘ KAŻDEGO WZORU W ODERWANIU.

Najpierw zobacz proces. Potem określ granice układu, strumienie, siły napędowe i opory. Dopiero wtedy równania zaczynają opisywać coś, co naprawdę rozumiesz.

ZOBACZ

ZROZUM

POŁĄCZ

OBLICZ

SPRAWDŹ

POWTÓRZ