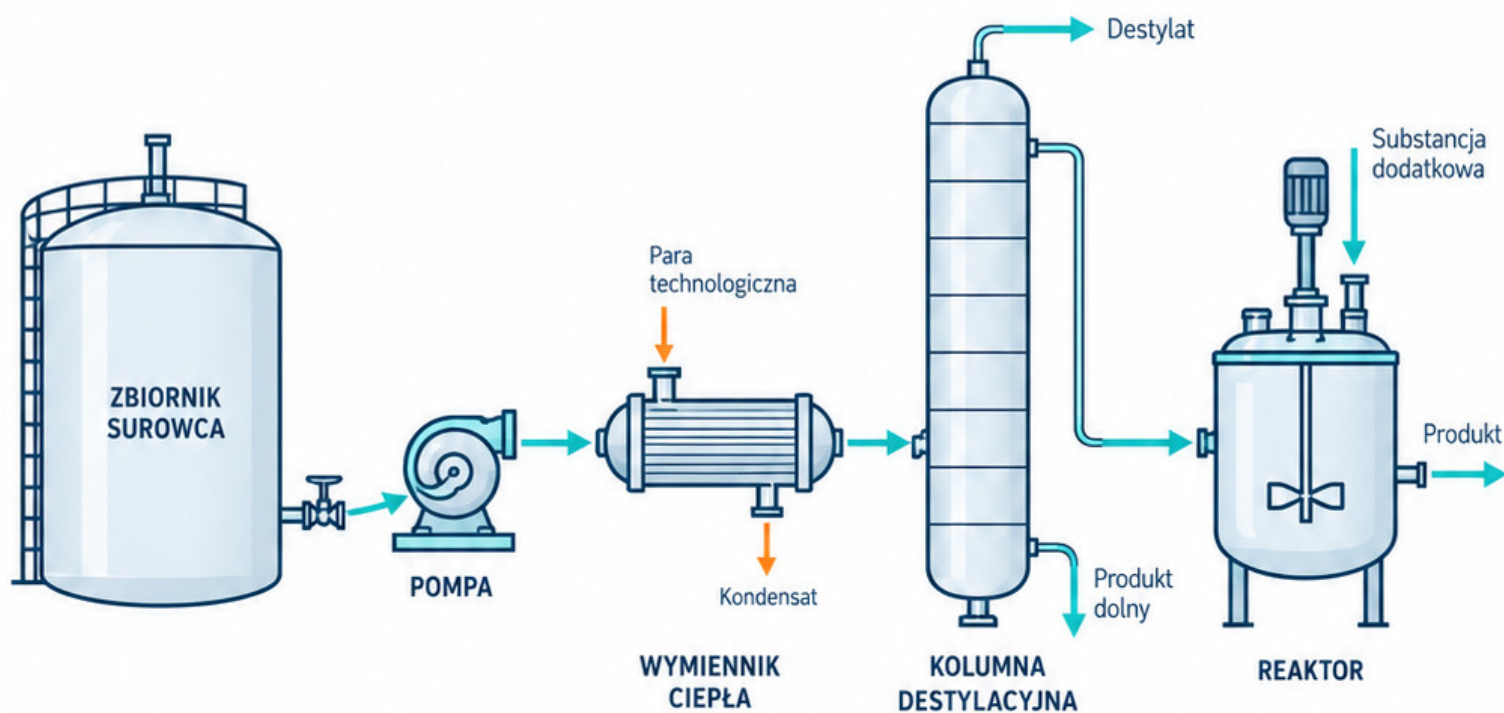


Praktyczne studia przypadków w inżynierii chemicznej

Od teorii do procesu: zobacz krok po kroku, jak inżynier rozwiązuje rzeczywiste problemy technologiczne.



BILANS



PROCES



OBLICZENIA



DECYZJA

Prawa autorskie i sposób korzystania

© 2026 Praktyczne studia przypadków w inżynierii chemicznej.
Wszelkie prawa zastrzeżone.

Materiał przeznaczony jest do indywidualnego użytku edukacyjnego.
Kopiowanie, rozpowszechnianie, odsprzedaż lub publikowanie całości
albo części materiału bez zgody właściciela praw jest zabronione.



Ważna informacja

Przedstawione studia przypadków mają charakter edukacyjny.
Dane procesowe zostały dobrane tak, aby jasno pokazać sposób rozumowania i wykonywania podstawowych obliczeń inżynierskich.

W rzeczywistych instalacjach należy dodatkowo uwzględniać między innymi właściwości fizyczne substancji, warunki pracy urządzeń, wymagania bezpieczeństwa, charakterystyki producentów oraz obowiązujące procedury zakładowe.

Jak korzystać z materiału?

- 1 | Najpierw spróbuj samodzielnie określić, czego szukamy.
- 2 | Następnie przeanalizuj schemat procesu.
- 3 | Dopiero potem przejdź do równań i obliczeń.
- 4 | Na końcu zawsze odpowiedz sobie na pytanie:



Co ten wynik oznacza dla rzeczywistego procesu?

Spis treści

Wprowadzenie

03	Jak pracować z tym materiałem	03
----	-------------------------------	----

01 Bilans masy w praktyce

04	Wprowadzenie do przypadku	04
05	Przygotowanie solanki o zadanym stężeniu	05
06	Od instalacji do schematu procesowego	06
07	Bilans całkowity	07
08	Bilans składnika	08
09	Obliczenia krok po kroku	09
10	Kontrola wyniku	10
11	Co zmienia rzeczywista instalacja?	11

02 Bilans energii i wymiennik ciepła

12	Wprowadzenie do przypadku	12
13	Chłodzenie gorącego strumienia procesowego	13
14	Schemat i dane procesowe	14
15	Obliczenie strumienia ciepła	15
16	Zapotrzebowanie na wodę chłodzącą	16
17	Logarytmiczna różnica temperatur	17
18	Powierzchnia wymiany ciepła	18
19	Diagnoza problemu operacyjnego	19

03 Rozdział mieszaniny przez destylację

20	Wprowadzenie do przypadku	20
21	Rozdział mieszaniny etanol-woda	21
22	Jak działa kolumna?	22
23	Bilans całkowity	23
24	Bilans etanolu	24
25	Równowaga ciecz-para	25
26	Refluks i zużycie energii	26
27	Problemy operacyjne kolumny	27

04 Kinetyka i reaktor CSTR

28	Wprowadzenie do przypadku	28
29	Wymagany stopień konwersji	29
30	Szybkość reakcji	30
31	Czas przebywania	31
32	Równanie projektowe	32
33	Objętość reaktora	33
34	Wpływ temperatury	34
35	Spadek konwersji	35

05 Absorpcja gazu i wymiana masy

36	Wprowadzenie do przypadku	36
37	Usuwanie CO ₂	37
38	Siła napędowa wymiany masy	38
39	Bilans absorbera	39
40	Ilość usuwanego CO ₂	40
41	Ciecz absorbująca	41
42	Wypełnienie i hydraulika kolumny	42
43	Utrata skuteczności absorbera	43

06 Przepływ płynu i problemy z pompą

44	Wprowadzenie do przypadku	44
45	Spadek wydajności pompy	45
46	Pompa i instalacja	46
47	NPSH i kawitacja	47
48	Diagnoza problemu	48
49	Checklista inżyniera procesu	49

Nie zaczynaj od wzoru. Zacznij od procesu.

W inżynierii chemicznej samo zapamiętanie równania rzadko wystarcza. Najważniejsza umiejętność zaczyna się chwilę wcześniej: trzeba spojrzeć na proces, rozpoznać strumienie, określić dane, znaleźć niewiadomą i dopiero wtedy wybrać właściwe równanie.

Właśnie w taki sposób będziemy pracować w każdym studium przypadku.

5 kroków inżyniera



Nie chodzi o to, aby wykonywać obliczenia szybciej. Chodzi o to, aby wiedzieć, dlaczego wykonujesz właśnie te obliczenia.

MODUŁ 01

Bilans masy w praktyce

Jak z kilku strumieni stworzyć produkt o wymaganym składzie?



Cel modułu

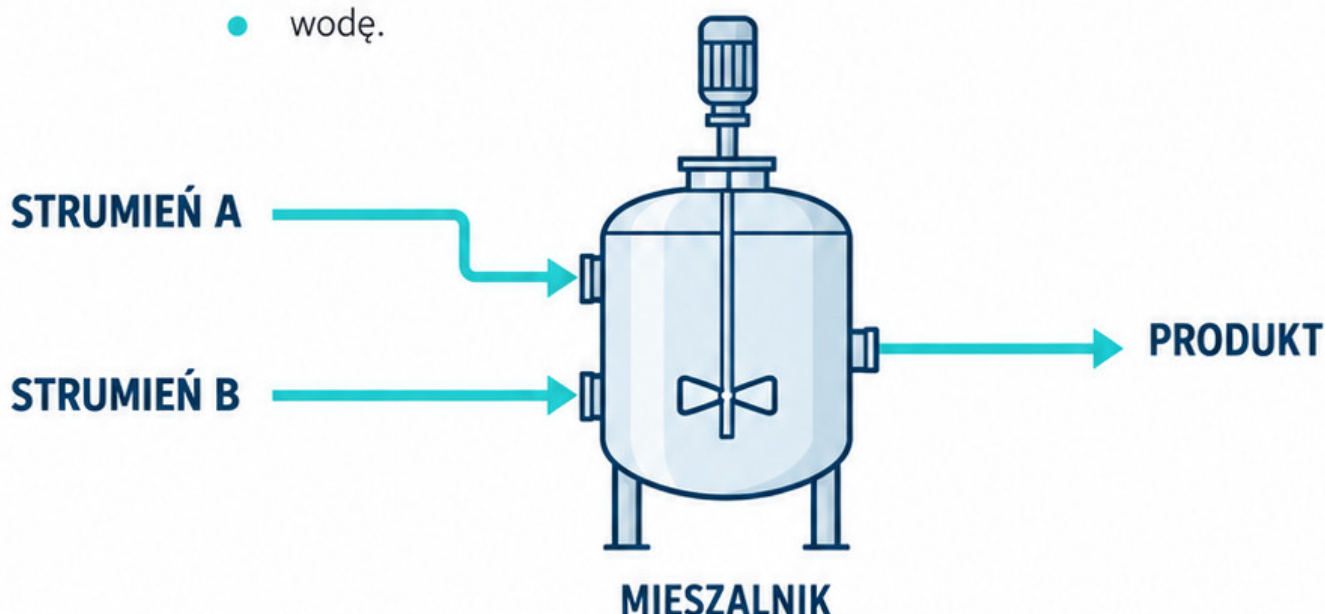
Pokazać, że bilans masy nie jest abstrakcyjnym równaniem. Jest narzędziem pozwalającym określić, ile surowca należy podać do procesu, ile produktu otrzymamy i gdzie znajduje się każdy składnik.



Wprowadzenie

W tym przypadku przygotujemy strumień solanki o określonym stężeniu poprzez zmieszanie dwóch roztworów. Będziemy śledzić osobno:

- całkowitą masę,
- NaCl,
- wodę.



Zasada modułu:

masa nie znika — trzeba tylko wiedzieć, dokąd płynie.

Przypadek 01: przygotowanie solanki o zadanym stężeniu

Sytuacja procesowa

W instalacji potrzebny jest ciągły strumień roztworu NaCl o stężeniu 10% mas.

Do przygotowania roztworu dostępne są dwa strumienie:

A

Strumień A

Przepływ: 1000 kg/h
Stężenie NaCl: 5% mas.

B

Strumień B

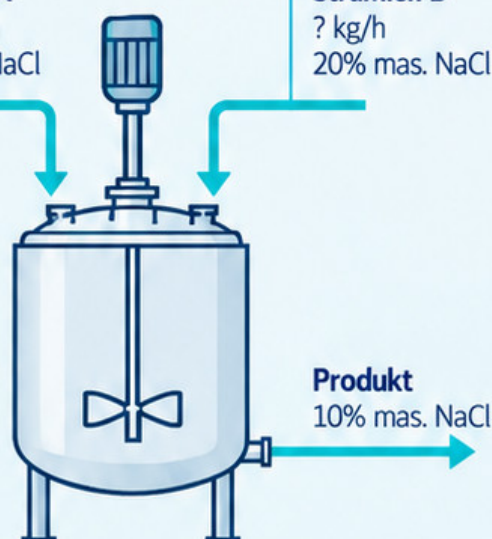
Przepływ: ? kg/h
Stężenie NaCl: 20% mas.

Po zmieszaniu obu strumieni produkt powinien mieć:

Stężenie NaCl = 10% mas.

Strumień A
1000 kg/h
5% mas. NaCl

Strumień B
? kg/h
20% mas. NaCl



Główne pytanie inżynierskie:

Ile roztworu B należy dozować w ciągu godziny?

Zanim policzysz

?

Czy potrzebujemy informacji o objętości zbiornika?
Nie.

?

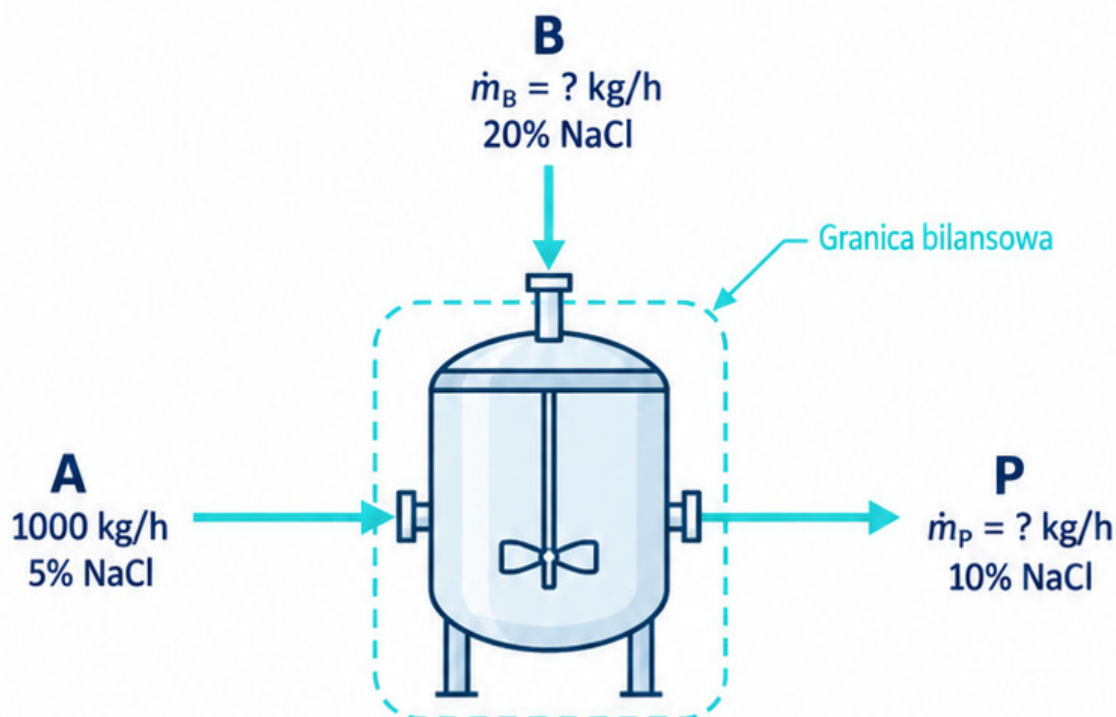
Czy potrzebujemy gęstości?
Nie, ponieważ wszystkie dane zapisano na podstawie masy.

?

Czy musimy śledzić zarówno sól, jak i wodę?
Możemy, ale do rozwiązania wystarczy bilans całkowity oraz bilans jednego niezależnego składnika.

Krok 1 — Zamień opis procesu w prosty schemat

Pierwszym krokiem rozwiązywania zadania jest przedstawienie sytuacji w formie prostego schematu. Dzięki temu łatwiej zidentyfikować strumienie, wielkości znane i niewiadome oraz granicę bilansową.



Objaśnienie symboli:

$\dot{m}$ — strumień masy, czyli masa przepływająca przez dany punkt w jednostce czasu.

w_{NaCl} — udział masowy NaCl, czyli część całkowitej masy strumienia przypadająca na sól.

Przykład:

5% mas. NaCl = 0,05 kg NaCl na 1 kg roztworu.

Co wchodzi, a co wychodzi?

- 1 Do granicy bilansowej wchodzi dwa strumienie: A i B.
- 2 Z granicy bilansowej wychodzi jeden strumień: P.
- 3 Jeżeli proces pracuje w stanie ustalonym i nie dochodzi do gromadzenia materiału:

masa wpływająca = masa wypływająca

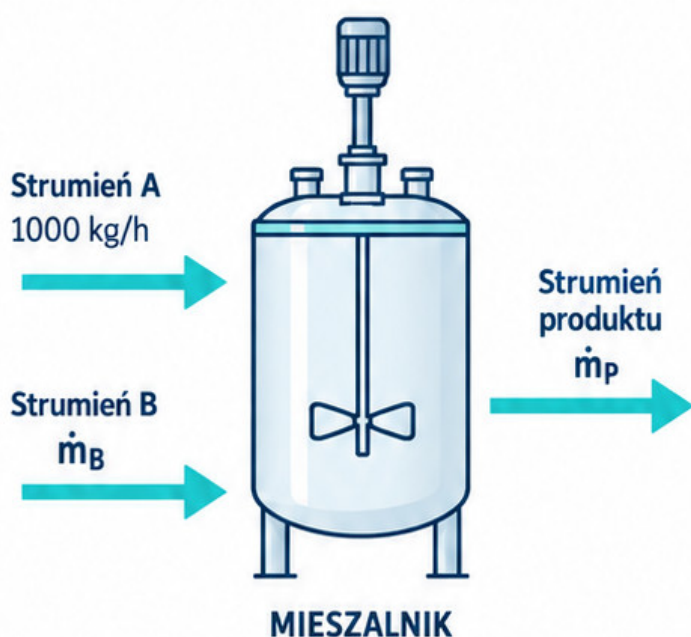


Która wielkość jest naszą główną niewiadomą?

$\dot{m}_B$

Krok 2 – Najpierw policz całą masę

Bilans całkowity nie pyta jeszcze, ile mamy soli lub wody.
Patrzymy wyłącznie na to, ile kilogramów materiału wchodzi do mieszalnika i ile kilogramów go opuszcza.



WEJŚCIE = WYJŚCIE

Dla naszego procesu:

$$\dot{m}_A + \dot{m}_B = \dot{m}_p$$

Po podstawieniu znanej wartości:

$$1000 + \dot{m}_B = \dot{m}_p$$

Na tym etapie mamy **dwie niewiadome**:

$\dot{m}_B$

oraz

$\dot{m}_p$

Jedno równanie nie wystarcza do wyznaczenia dwóch niewiadomych.
Potrzebujemy więc jeszcze jednego niezależnego bilansu.



Co możemy śledzić niezależnie?



NaCl



Bilans całkowity mówi, ile materiału przepływa.
Bilans składnika mówi, co znajduje się w tym materiale.

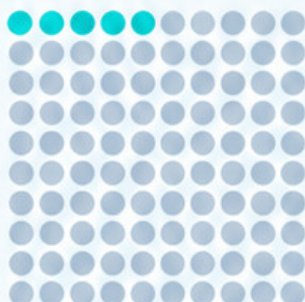
Krok 3 – Śledź tylko sól

Teraz ignorujemy na chwilę całkowitą ilość roztworu.
Interesuje nas wyłącznie NaCl przechodzący przez mieszalnik.
Jeżeli sól nie powstaje, nie znika i nie gromadzi się w urządzeniu:

$$\text{NaCl na wejściu} = \text{NaCl na wyjściu}$$

Strumień A:

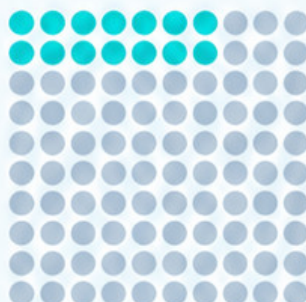
1000 kg/h roztworu
 $\times 0,05 \text{ kg NaCl/kg roztworu}$
 $= 50 \text{ kg NaCl/h}$



● NaCl (5%) ● H₂O (95%)

Strumień B:

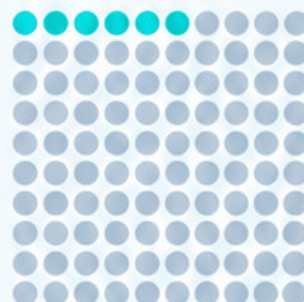
$\dot{m}_B$ kg/h roztworu
 $\times 0,20 \text{ kg NaCl/kg roztworu}$
 $= 0,20 \cdot \dot{m}_B \text{ kg NaCl/h}$



● NaCl (20%) ● H₂O (80%)

Produkt:

$\dot{m}_P$ kg/h roztworu
 $\times 0,10 \text{ kg NaCl/kg roztworu}$
 $= 0,10 \cdot \dot{m}_P \text{ kg NaCl/h}$



● NaCl (10%) ● H₂O (90%)

Bilans NaCl

Suma strumieni NaCl na wejściu musi być równa strumieniowi NaCl na wyjściu:

$$50 + 0,20\dot{m}_B = 0,10\dot{m}_P$$

Z poprzedniego kroku pamiętamy równanie bilansu całkowitego strumienia:

$$\dot{m}_P = 1000 + \dot{m}_B$$



Uwaga na błąd

10% = 0,10, a nie 10.

To jeden z najczęstszych błędów podczas podstawiania stężeń procentowych do bilansu.

Krok 4 – Rozwiąż równania

A | Krok A – wykorzystaj bilans całkowity

$$\dot{m}_P = 1000 + \dot{m}_B$$

B | Krok B – podstaw do bilansu NaCl

$$50 + 0,20\dot{m}_B = 0,10(1000 + \dot{m}_B)$$

C | Krok C – rozwiń prawą stronę

$$50 + 0,20\dot{m}_B = 100 + 0,10\dot{m}_B$$

D | Krok D – przenieś wyrazy

$$\begin{aligned}0,20\dot{m}_B - 0,10\dot{m}_B &= 100 - 50 \\0,10\dot{m}_B &= 50\end{aligned}$$

E | Krok E – oblicz przepływ

$$\dot{m}_B = 500 \text{ kg/h}$$

F | Krok F – oblicz strumień produktu

$$\begin{aligned}\dot{m}_P &= 1000 + 500 \\ \dot{m}_P &= 1500 \text{ kg/h}\end{aligned}$$



1000 kg/h
@ 5%



500 kg/h
@ 20%



1500 kg/h
@ 10%



Należy dozować 500 kg/h roztworu B.

Wtedy instalacja wytworzy:

1500 kg/h solanki o stężeniu 10% mas. NaCl.



Nie kończ na liczbie

Wynik matematyczny to dopiero część odpowiedzi.
Na kolejnej stronie należy sprawdzić:

- 1 Czy zachowuje się całkowita masa?
- 2 Czy zachowuje się masa NaCl?
- 3 Czy wynik ma sens fizyczny?

Krok 5 – Sprawdź, czy wynik naprawdę ma sens

Rozwiązanie równania to nie koniec analizy inżynierskiej. Każdy wynik należy zweryfikować, sprawdzając bilans całkowity, bilans składnika oraz czy ma sens fizyczny.



1. Kontrola bilansu całkowitego

Strumień A = 1000 kg/h

Strumień B = 500 kg/h

Łączny przepływ na wejściu: $1000 + 500 = 1500$ kg/h

Przepływ produktu: 1500 kg/h

**MASA NA WEJŚCIU =
MASA NA WYJŚCIU**

Wynik bilansu całkowitego jest poprawny.



2. Kontrola bilansu NaCl

NaCl w strumieniu A: $1000 \times 0,05 = 50$ kg NaCl/h

NaCl w strumieniu B: $500 \times 0,20 = 100$ kg NaCl/h

Łącznie: $50 + 100 = 150$ kg NaCl/h

NaCl w produkcie: $1500 \times 0,10 = 150$ kg NaCl/h

150 kg/h = 150 kg/h

Bilans NaCl również się zamyka.



3. Test zdrowego rozsądku

Stężenie produktu wynosi 10%.

Jest ono wyższe niż 5% w strumieniu A oraz niższe niż 20% w strumieniu B. To ma sens.

Podczas mieszania dwóch roztworów bez reakcji chemicznej stężenie produktu powinno znajdować się pomiędzy stężeniami strumieni wejściowych.



Szybki test inżyniera

Jeżeli po zmieszaniu roztworu 5% i roztworu 20% otrzymałbyś wynik: **2% albo 28%**, należałoby natychmiast sprawdzić obliczenia.



Dobry inżynier nie ufa wynikowi tylko dlatego, że kalkulator go wyświetlił.

Obliczenie jest proste. Instalacja już nie zawsze.

W naszym przykładzie założyliśmy idealne mieszanie oraz stałe stężenie obu strumieni. W rzeczywistości te warunki nie zawsze pozostają niezmiennie. Dlatego wynik 500 kg/h należy traktować jako wartość wynikającą z aktualnych założeń procesowych.

Co może się zmienić?

1



Stężenie surowca

Jeżeli rzeczywiste stężenie strumienia B spadnie z 20% do 18%, dozowanie 500 kg/h nie wystarczy już do uzyskania produktu o stężeniu 10%.

2



Dokładność przepływomierza

Przepływ wskazywany przez przyrząd może różnić się od przepływu rzeczywistego. Nawet niewielki błąd pomiaru może wpływać na skład produktu.

3



Nieidealne mieszanie

W dużym zbiorniku mogą pojawić się lokalne różnice stężenia, zwłaszcza podczas rozruchu lub przy niewystarczającym mieszaniu.

4



Akumulacja materiału

Jeżeli poziom cieczy w zbiorniku rośnie lub spada, proces nie znajduje się w idealnym stanie ustalonym.

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

5



Zmiany gęstości

Gdy pomiary wykonywane są objętościowo, a bilans prowadzony masowo, może być konieczne uwzględnienie gęstości roztworów.



BILANS
TEORETYCZNY



POMIAR



STEROWANIE



WERYFIKACJA
PRODUKTU

Od obliczenia do sterowania

Wynik bilansu może służyć jako:

- wartość zadana dla przepływu,
- punkt początkowy dla regulatora,
- wartość referencyjna dla operatora,
- podstawa do wykrywania nieprawidłowości procesu.



Zapamiętaj

Bilans masy odpowiada na trzy podstawowe pytania: Ile materiału wchodzi? Ile materiału wychodzi? Gdzie znajduje się interesujący nas składnik?

Jeżeli potrafisz odpowiedzieć na te trzy pytania, rozumiesz podstawę bardzo wielu obliczeń procesowych.

MODUŁ 02

Bilans energii i wymiennik ciepła

Ile energii trzeba odebrać z procesu i jak przekłada się to na pracę wymiennika?



Cel modułu

Pokazać, jak przejść od prostej zmiany temperatury strumienia procesowego do rzeczywistego problemu inżynierskiego obejmującego obciążenie cieplne, zużycie medium chłodzącego, siłę napędową wymiany ciepła oraz powierzchnię aparatu.



W wielu procesach przemysłowych produkt opuszczający reaktor, kolumnę lub inny aparat jest zbyt gorący, aby można było skierować go do kolejnego etapu. Trzeba więc odebrać od niego energię.

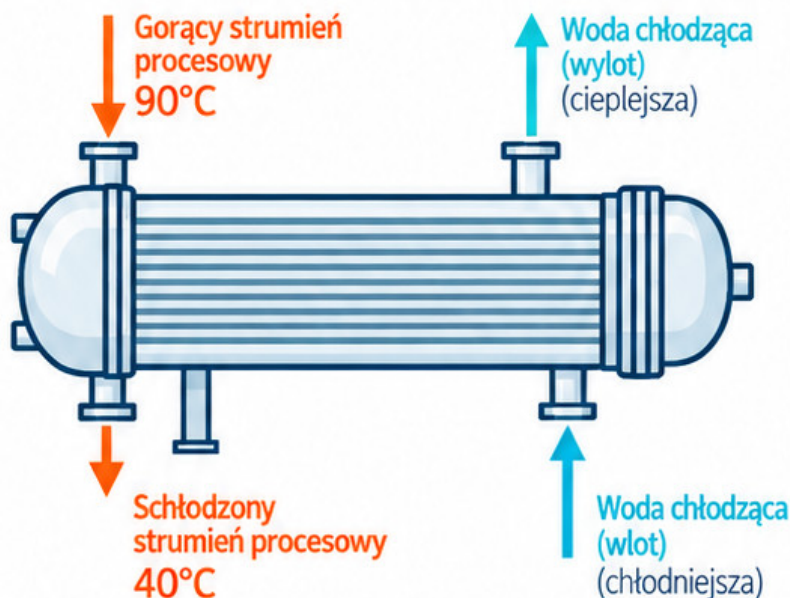
TEMPERATURA → ENERGIA → WODA CHŁODZĄCA → WYMIENNIK → DIAGNOZA



Gorący strumień procesowy należy schłodzić:
z 90°C do 40°C
za pomocą wody chłodzącej.



Główne pytanie inżynierskie:
Jak dużą moc cieplną musi odebrać wymiennik i ile wody chłodzącej będzie potrzebne?



Ciepło nie znika.

Przechodzi z jednego strumienia do drugiego.

Przypadek 02: chłodzenie gorącego strumienia procesowego

Sytuacja procesowa

Z instalacji wychodzi ciekły strumień produktu o temperaturze: **90°C**.
Przed skierowaniem produktu do magazynowania należy obniżyć jego temperaturę do: **40°C**. Do chłodzenia dostępna jest woda przemysłowa.



GORĄCY STRUMIEŃ

Przepływ masowy:
 $\dot{m}_P = 5000 \text{ kg/h}$
Temperatura na wejściu:
 $T_{P,in} = 90^\circ\text{C}$
Temperatura na wyjściu:
 $T_{P,out} = 40^\circ\text{C}$
Ciepło właściwe produktu:
 $c_{p,P} = 3,8 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$



WODA CHŁODZĄCA

Temperatura wejściowa:
 $T_{W,in} = 20^\circ\text{C}$
Dopuszczalna temperatura wyjściowa:
 $T_{W,out} = 30^\circ\text{C}$
Ciepło właściwe wody:
 $c_{p,W} = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$



WARUNKI

- Brak przemiany fazowej.
- Ciepła właściwe traktujemy jako stałe.
- Pomijamy straty ciepła do otoczenia.
- Proces pracuje w stanie ustalonym.

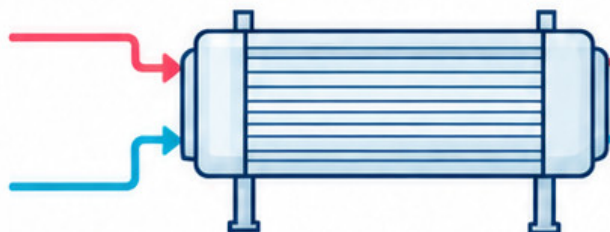


SZUKAMY

- 1 Jaką ilość ciepła trzeba odebrać od produktu w ciągu godziny?
- 2 Jaki strumień wody chłodzącej będzie potrzebny?

Produkt (gorący)
 $T_{P,in} = 90^\circ\text{C}$
 $\dot{m}_P = 5000 \text{ kg/h}$

Woda chłodząca
 $T_{W,in} = 20^\circ\text{C}$



Produkt (schłodzony)
 $T_{P,out} = 40^\circ\text{C}$

Woda ogrzana
 $T_{W,out} = 30^\circ\text{C}$

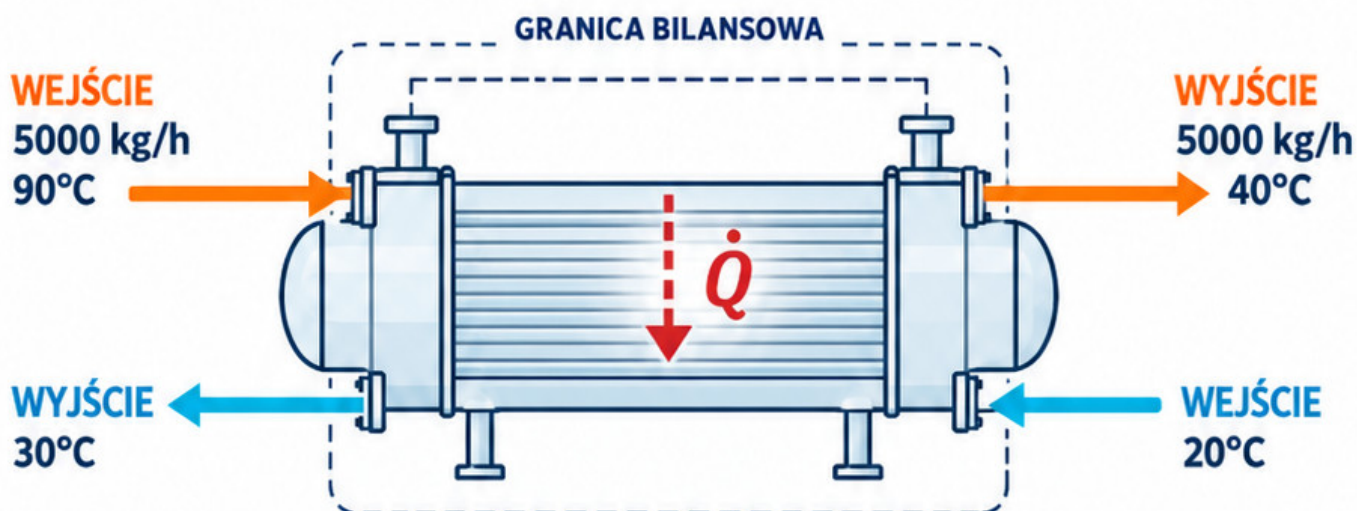


Najpierw fizyka

Produkt stygnie o: $90 - 40 = 50 \text{ K}$
Woda może ogrzać się tylko o: $30 - 20 = 10 \text{ K}$
Już przed rozpoczęciem obliczeń możemy przewidzieć, że przepływ wody będzie stosunkowo duży.

Krok 1 – Zobacz, którądy płynie energia

Nauczyć czytelnika rozdzielania strumieni materiałowych od przepływu energii.



$\dot{Q}$ oznacza szybkość przepływu energii cieplnej, często nazywaną mocą cieplną lub obciążeniem cieplnym wymiennika.

Co naprawdę się dzieje?



Gorący produkt:
traci energię



Woda chłodząca:
zyskuje energię

**ENERGIA ODDANA PRZEZ PRODUKT =
ENERGIA POBRANA PRZEZ WODĘ**

Przeciwprąd

W układzie przeciwprądowym gorący i zimny strumień przemieszczają się w przeciwnych kierunkach. Taki układ zwykle pozwala lepiej wykorzystać dostępną różnicę temperatur.

Legenda

—→ masa → przepływa strumieniami
- - -→ energia → może przechodzić pomiędzy strumieniami



Nie mylić dwóch rzeczy:

Masa produktu nie przechodzi do wody chłodzącej.
Energia przechodzi przez powierzchnię oddzielającą oba strumienie.

Krok 2 — Oblicz obciążenie cieplne

Jeżeli substancja nie zmienia fazy, ilość ciepła związana ze zmianą temperatury możemy obliczyć za pomocą zależności:

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

$\dot{Q}$ — szybkość wymiany ciepła
 $\dot{m}$ — strumień masowy
 c_p — ciepło właściwe
 ΔT — zmiana temperatury

A Krok A — zmiana temperatury produktu

$$\Delta T_p = 90 - 40 = 50 \text{ K}$$

Różnica temperatur wyrażona w kelwinach ma tę samą wartość liczbową co różnica temperatur w stopniach Celsjusza.

B Krok B — podstawienie danych

$$Q = 5000 \text{ kg/h} \times 3,8 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times 50 \text{ K}$$

C Krok C — skrócenie jednostek

kg oraz K skracają się, pozostawiając: kJ/h.

D Krok D — wynik

$$Q = 950\,000 \text{ kJ/h}$$

To ilość energii, którą należy odebrać od produktu w każdej godzinie pracy.

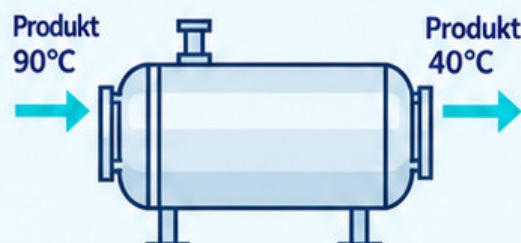
Przeliczenie na kW:

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

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

$$\dot{Q} = \frac{950\,000}{3600}$$

$$\dot{Q} \approx 264 \text{ kW}$$



Wymiennik musi odbierać około 264 kW ciepła.

?

Co oznacza 264 kW?

To nie jest temperatura. To tempo przekazywania energii. Jeżeli strumień produktu lub różnica temperatur wzrośnie, wymagane obciążenie cieplne również wzrośnie.

większy $\dot{m}$ → większe $\dot{Q}$

większe ΔT → większe $\dot{Q}$

większe c_p → większe $\dot{Q}$

Krok 3 — Energia odebrana od produktu musi trafić do wody



W idealnym wymienniku bez strat ciepła: $\dot{Q}_{\text{produkt}} = \dot{Q}_{\text{woda}}$.

Wiemy już, że trzeba odebrać: 950 000 kJ/h. Teraz pytamy: ile kilogramów wody na godzinę może przejąć tę energię, jeżeli jej temperatura wzrośnie tylko z 20°C do 30°C?

A

Krok A — wzrost temperatury wody

$$\Delta T_W = 30 - 20$$

$$\Delta T_W = 10 \text{ K}$$

B

Krok B — równanie dla wody

$$Q = \dot{m}_W \cdot c_{p,W} \cdot \Delta T_W$$

$$\dot{m}_W = \frac{Q}{c_{p,W} \cdot \Delta T_W}$$

C

Krok C — podstawienie danych

$$\dot{m}_W = \frac{950\,000}{4,18 \times 10}$$

$$\dot{m}_W = \frac{950\,000}{41,8}$$

D

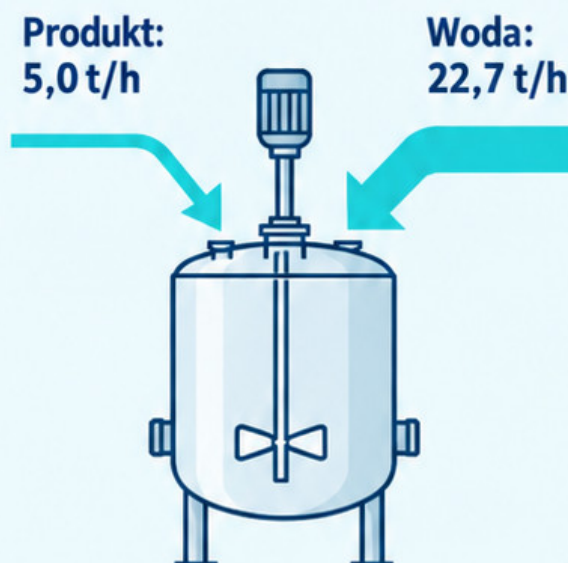
Krok D — wynik

$$\dot{m}_W \approx 22\,727 \text{ kg/h}$$

22,7 t/h wody chłodzącej

22,7 m³/h

dla uproszczonego oszacowania przyjęto gęstość wody około 1000 kg/m³.



Dlaczego aż tyle?

Produkt stygnie o 50 K. Woda ogrzewa się tylko o 10 K. Oznacza to, że każdy kilogram wody może odebrać ograniczoną ilość energii. Dlatego potrzebny jest stosunkowo wysoki przepływ medium chłodzącego.



Co stanie się, jeśli instalacja może dostarczyć tylko 15 m³/h wody?

Produkt prawdopodobnie nie zostanie schłodzony do wymaganych 40°C przy tych samych pozostałych warunkach.

Krok 4 – Wymiennik potrzebuje siły napędowej

Samo stwierdzenie, że jeden strumień jest gorący, a drugi zimny, nie wystarcza do określenia wielkości wymiennika. Szybkość przekazywania ciepła zależy między innymi od różnicy temperatur pomiędzy strumieniami. Problem polega na tym, że ta różnica zmienia się wzdłuż urządzenia.

Dla przeciwprądu:

Gorący produkt: $90^{\circ}\text{C} \rightarrow 40^{\circ}\text{C}$

Woda: $30^{\circ}\text{C} \leftarrow 20^{\circ}\text{C}$

Różnica temperatur na jednym końcu:

$$\Delta T_1 = 90 - 30 = 60 \text{ K}$$

Różnica temperatur na drugim końcu:

$$\Delta T_2 = 40 - 20 = 20 \text{ K}$$

Średnia logarytmiczna różnica temperatur:

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

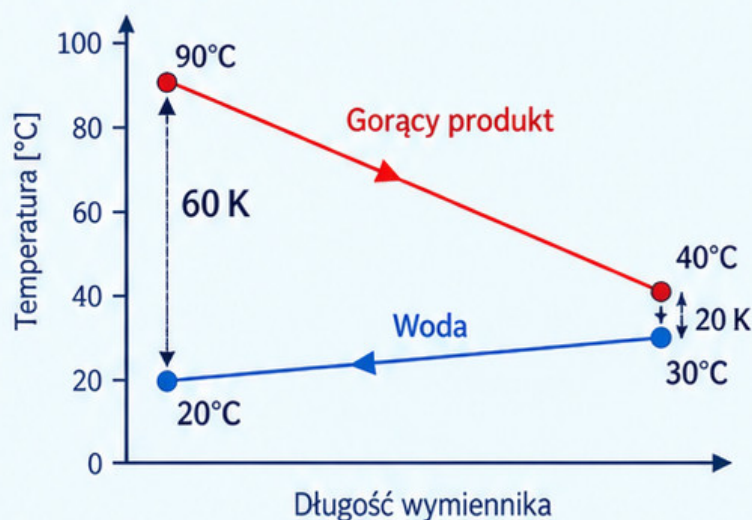
Podstawienie wartości:

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

$$\Delta T_{lm} = \frac{40}{\ln(3)}$$

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

Profile temperatur dla przeciwprądu



Wynik:

Średnia logarytmiczna różnica temperatur wynosi około 36,4 K.



Co to oznacza?

ΔT_{lm} jest reprezentatywną średnią siłą napędową wymiany ciepła dla całego wymiennika. Im większa wartość ΔT_{lm} , tym łatwiej przekazywać tę samą ilość ciepła przy danej powierzchni i współczynniku przenikania ciepła.



Uwaga

Średnia arytmetyczna: $\frac{60 + 20}{2} = 40 \text{ K}$

nie jest tym samym co: $\Delta T_{lm} \approx 36,4 \text{ K}$

W projektowaniu wymienników stosuje się średnią logarytmiczną, ponieważ różnica temperatur nie zmienia się liniowo w sposób pozwalający zawsze użyć prostej średniej.

Krok 5 – Jak duża musi być powierzchnia wymiennika?

Gdy znamy: obciążenie cieplne, średnią różnicę temperatur oraz zdolność wymiennika do przenoszenia ciepła, możemy oszacować wymaganą powierzchnię.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

- $\dot{Q}$ – obciążenie cieplne [W]
- U – całkowity współczynnik przenikania ciepła [W/(m²·K)]
- A – powierzchnia wymiany ciepła [m²]
- ΔT_{lm} – średnia logarytmiczna różnica temperatur [K]

Założenie do przykładu:

$U = 500 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

Wiemy: $\dot{Q} \approx 264\,000 \text{ W}$
 $\Delta T_{lm} \approx 36,4 \text{ K}$

A

Krok A –
przekształcenie
równania

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_{lm}}$$

B

Krok B –
podstawienie

$$A = \frac{264\,000}{500 \times 36,4}$$
$$A = \frac{264\,000}{18\,200}$$

C

Krok C –
wynik

$$A \approx 14,5 \text{ m}^2$$



W tych uproszczonych warunkach potrzebujemy około **14,5 m²** efektywnej powierzchni wymiany ciepła.

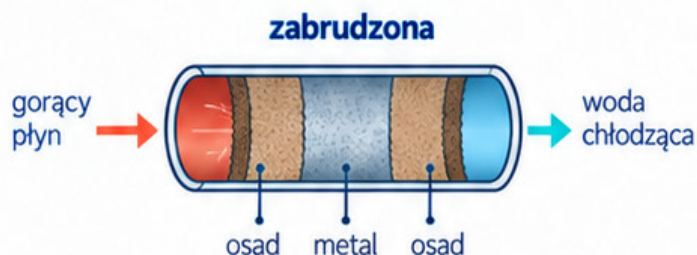
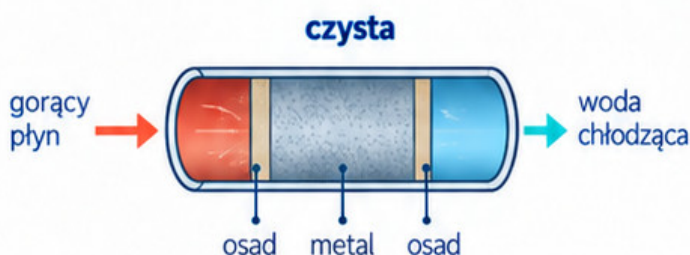
Ale co oznacza U?

Współczynnik U opisuje, jak łatwo ciepło może przejść: od gorącego płynu, przez warstwę przyścienną, przez ściankę metalową, przez ewentualne osady, do zimnego płynu.

Zabrudzenie wymiennika

Osady, produkty korozji, kamień oraz pozostałości procesowe tworzą dodatkowy opór dla przepływu ciepła.

OSAD → WIĘKSZY OPÓR → MNIEJSZE U → GORSZE CHŁODZENIE



i

Jeżeli wymiennik przez wiele miesięcy osiągał 40°C na wyjściu, a teraz przy tych samych przepływach produkt opuszcza go w temperaturze 48°C, zabrudzenie powierzchni może być jedną z możliwych przyczyn.

Diagnoza operacyjna — produkt ma 52°C zamiast 40°C

Zamienić poznane równania w logiczną procedurę diagnostyczną. Czytelnik powinien zobaczyć, że nieprawidłowa temperatura produktu może mieć wiele różnych przyczyn i że dobra diagnoza zaczyna się od danych procesowych.



Sytuacja procesowa

W normalnych warunkach:

- produkt na wejściu = 90°C
- produkt na wyjściu = 40°C

temperatura produktu na wyjściu = 52°C

Co sprawdzić?

Drzewo diagnostyczne



Kroki diagnostyczne

1

Czy wzrósł przepływ gorącego produktu?

Jeżeli $\dot{m}_p \uparrow$, to wymiennik musi odebrać więcej energii w tej samej jednostce czasu. Przy niezmienniej wydajności urządzenia temperatura wyjściowa może wzrosnąć.

2

Czy produkt wpływa do wymiennika cieplejszy?

Jeżeli temperatura wejściowa wzrosła z 90°C do 105°C, obciążenie cieplne również wzrosło.

3

Czy przepływ wody chłodzącej spadł?

Możliwe przyczyny: częściowo zamknięty zawór, problem z pompą, zablokowany filtr, spadek ciśnienia sieci. Mniejszy przepływ wody oznacza mniejszą zdolność odbioru energii.

4

Czy woda chłodząca jest cieplejsza?

Jeżeli latem woda dopływa w temperaturze 28°C zamiast 20°C, dostępna różnica temperatur jest mniejsza. Spada siła napędowa wymiany ciepła.

5

Czy powierzchnia jest zabrudzona?

Osady powodują spadek współczynnika U , a więc zmniejszenie zdolności do przekazywania ciepła.

6

Czy pomiar jest wiarygodny?

Zanim podjęta zostanie decyzja o zatrzymaniu instalacji, należy również sprawdzić: czujnik temperatury, miejsce pomiaru, kalibrację, sygnał w systemie sterowania.



Myślenie inżynierskie

Nie zaczynaj od:

„Wymiennik jest za mały.”



Zaczynij od:

„Który parametr zmienił się względem warunków, w których układ działał poprawnie?”



Po tym przypadku czytelnik powinien potrafić połączyć:

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

z:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm}$$

i rozumieć, że rzeczywista wydajność wymiennika wynika jednocześnie z:

- strumieni, • temperatur, • właściwości płynów, • powierzchni, • stanu technicznego urządzenia.



W kolejnym przypadku zobaczymy, jak różnica lotności składników umożliwia ich rozdzielenie w: **kolumnie destylacyjnej.**

MODUŁ 03

Rozdział mieszaniny przez destylację

Jak wykorzystać różnicę lotności składników, aby rozdzielić mieszaninę?



Cel modułu

Pokazać, że destylacja to nie zwykłe gotowanie cieczy, lecz kontrolowany proces rozdziału mieszaniny, w którym wykorzystuje się różnice w składzie fazy ciekłej i parowej.



Wprowadzenie

W poprzednich modułach śledziliśmy bilans masy i energii. Teraz dodajemy trzeci wymiar – rozdział składników między fazę ciekłą i parową, czyli operacje rozdzielania mieszanin.

Rozważany przypadek

etanol + woda



W tym przypadku wyjaśnimy:

- 1 Jak wykonać całkowity bilans kolumny.
- 2 Jak śledzić tylko etanol.
- 3 Dlaczego para jest bogatsza w składnik bardziej lotny.
- 4 Czym jest refluks.
- 5 Jak warunki hydrauliczne wpływają na pracę kolumny.

F — zasilanie

etanol + woda
(średnie stężenie)



D — destylat

więcej etanolu
(wyższe stężenie składnika bardziej lotnego)

B — produkt dolny

mniej etanolu
(niższe stężenie składnika bardziej lotnego)

ZASILANIE



KOLUMNA



DESTYLAT + PRODUKT DOLNY



Główne pytanie inżynierskie:

**Jak z mieszaniny o średnim stężeniu
uzyskać dwa strumienie o wyraźnie różnych składach?**



**Destylacja działa dzięki różnicy lotności,
a nie dzięki samej temperaturze.**

Przypadek 03: rozdział mieszaniny etanol-woda

Sytuacja procesowa

Ciągły strumień mieszaniny etanol-woda o określonym składzie doprowadzany jest do kolumny destylacyjnej. W wyniku rozdziału otrzymujemy dwa strumienie: destylat bogaty w etanol oraz produkt dolny ubogi w etanol.



ZASILANIE F

$F = 1000 \text{ kg/h}$
40% mas. etanolu



DESTYLAT D

$D = ? \text{ kg/h}$
85% mas. etanolu

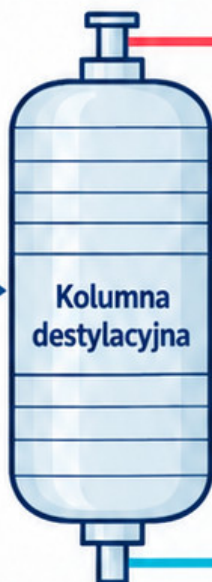


PRODUKT DOLNY B

$B = ? \text{ kg/h}$
5% mas. etanolu

Zasilanie F

$F = 1000 \text{ kg/h}$
40% mas. etanolu



Destylat D

$D = ? \text{ kg/h}$
85% mas. etanolu

Produkt dolny B

$B = ? \text{ kg/h}$
5% mas. etanolu



Założenia do obliczeń

- Stan ustalony (brak akumulacji masy w kolumnie).
- Brak reakcji chemicznych.
- Pomijamy straty materiałowe do otoczenia.
- Podane składy są ułamkami masowymi etanolu.



Główne pytania inżynierskie

- 1 Ile destylatu otrzymujemy?
- 2 Ile produktu dolnego opuszcza kolumnę?
- 3 Ile etanolu znajduje się w każdym ze strumieni?



Zanim policzysz

Etanol nie powstaje ani nie znika w kolumnie destylacyjnej. Jest tylko rozdzielany pomiędzy destylat i produkt dolny.

Najpierw zrozum aparat — potem równania

Zbuduj intuicyjne zrozumienie pracy kolumny przed rozpoczęciem obliczeń.



Cel modułu

Pokazać, jak działa kolumna destylacyjna, jak zmieniają się składy faz wzdłuż jej wysokości oraz jakie czynniki wpływają na skuteczność rozdzielu, zanim przejdziemy do równań i obliczeń.



W kolumnie destylacyjnej ciecz i para wielokrotnie się ze sobą kontaktują. Na kolejnych półkach (lub w wypełnieniu) część cieczy odparowuje, a część pary ulega skropleniu, dzięki czemu skład obu faz zmienia się stopniowo wzdłuż wysokości aparatu.

Co dzieje się z etanolem?



Etanol jest bardziej lotny niż woda, dlatego para poruszająca się ku górze staje się coraz bogatsza w etanol.

Ciecz spływająca w dół staje się coraz uboższa w etanol, a coraz bogatsza w wodę.

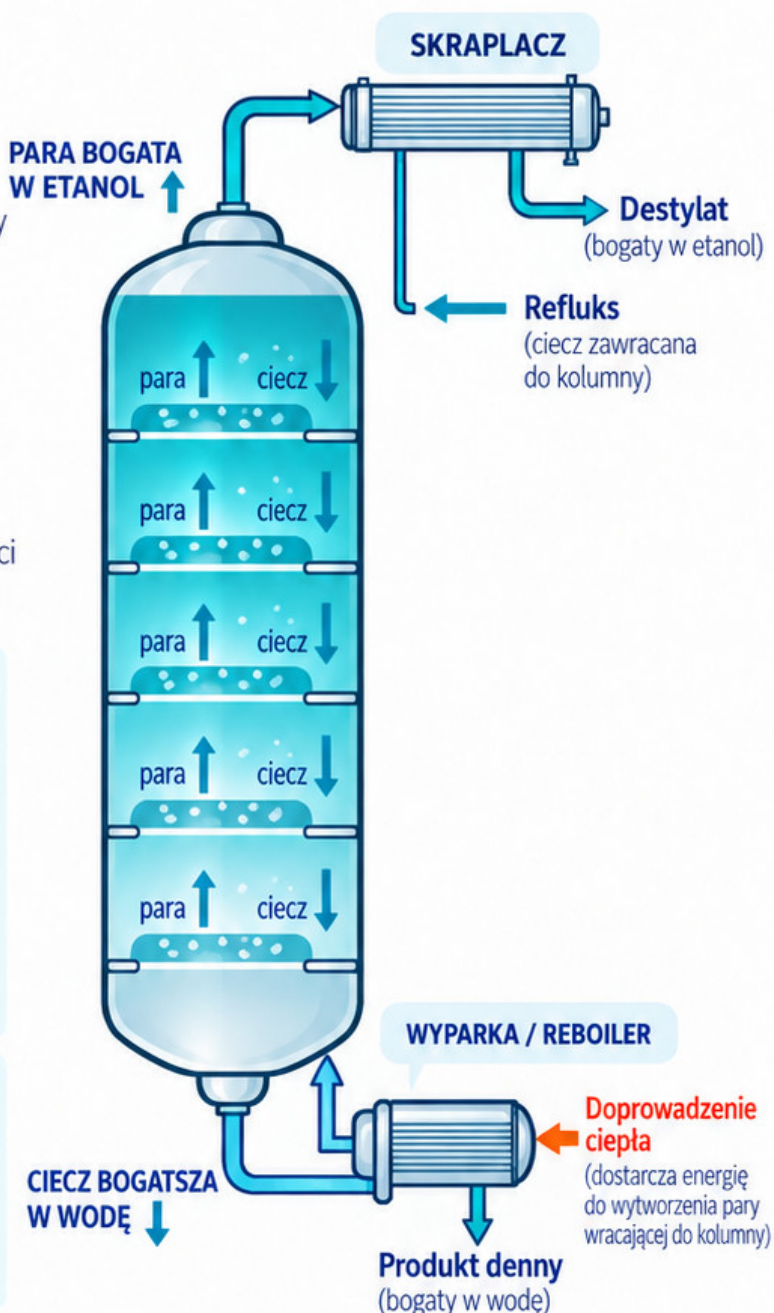


W rezultacie u góry kolumny otrzymujemy parę o wysokiej zawartości etanolu (która po skropleniu daje destylat), a na dole ciecz bogatszą w wodę (która stanowi produkt denny).



Kluczowa idea

Kolumna nie wykonuje jednego rozdzielu, ale wiele powtarzających się kontaktów ciecz–para, które stopniowo przesuwają skład w kierunku pożądanego rozdzielu.



Nie myl pojęć

Wyższa temperatura nie oznacza automatycznie wyższej czystości produktu. Skuteczność rozdzielu zależy od:

- równowagi fazowej,
- liczby efektywnych stopni kontaktu,
- współczynnika refluksu,
- natężeń przepływu,
- ciśnienia.

Krok 1 – Ile materiału opuszcza kolumnę?

Na początek wykonujemy całkowity bilans masy, pomijając skład produktów. Do kolumny wprowadza się jeden strumień zasilający F , a opuszczają ją dwa strumienie produktów: destylat D i produkt dolny B . Zakładamy, że nie ma akumulacji masy w kolumnie (stan ustalony).



Bilans masy całkowitej

W stanie ustalonym całkowita masa wpływająca do kolumny musi być równa całkowitej masie wypływającej z kolumny.

WEJŚCIE = WYJŚCIE

$$F = D + B$$

Dla tego przypadku:

$$1000 = D + B$$

Zasilanie (F)
1000 kg/h



Destylat (D)
 $D = ?$

Produkt dolny (B)
 $B = ?$

Wynik bilansu:

$$D + B = 1000 \text{ kg/h}$$



Co już wiemy?

Całkowita masa produktów (destylatu i produktu dolnego) musi wynosić 1000 kg/h. Nadal mamy dwie niewiadome: D i B , więc jedno równanie nie wystarcza. Potrzebujemy drugiego, niezależnego bilansu, aby wyznaczyć oba strumienie.



Który składnik najlepiej śledzić?

ETANOL

Do drugiego bilansu wybieramy bilans składnika. Najlepiej śledzić etanol, ponieważ jego rozdział między destylat i produkt dolny pozwoli wyznaczyć oba nieznane strumienie.



Dlaczego nie potrzebujemy jeszcze temperatur?

Do tego uproszczonego bilansu masy wystarczą informacje o strumieniach i składach. Temperatury oraz strumień ciepła są potrzebne do głębszej analizy energetycznej lub projektowej kolumny, ale nie są konieczne do podstawowego rozdziału strumieni.



Wniosek

Bilans całkowity mówi nam, ile materiału jest rozdzielane, a bilans składnika pokaże, gdzie trafia etanol.

Krok 2 – Śledź tylko etanol

Zamiast analizować cały strumień, skupiamy się tylko na jednym składniku – etanolu. Bilans składnika jest prostszy i pozwala bezpośrednio obliczyć strumienie produktów oraz sprawdzić, ile etanolu odzyskujemy w destylacji.

1

Etanol w strumieniu zasilającym:

$$1000 \times 0,40 = 400 \text{ kg/h etanolu}$$



400 kg etanolu



2

Bilans etanolu (składnika):

$$F \cdot w_F = D \cdot w_D + B \cdot w_B$$



3

Podstawiamy dane:

$$1000 \times 0,40 = 0,85D + 0,05B$$

$$400 = 0,85D + 0,05B$$



4

Z bilansu całkowitego:

$$B = 1000 - D$$



5

Podstawiamy:

$$400 = 0,85D + 0,05(1000 - D)$$

$$400 = 0,85D + 50 - 0,05D$$

$$400 = 0,80D + 50$$

$$350 = 0,80D$$



6

Wynik:

$$D = 437,5 \text{ kg/h}$$

$$B = 562,5 \text{ kg/h}$$



Wynik końcowy

Destylat: 437,5 kg/h

Produkt dolny: 562,5 kg/h



Kontrola obliczeń

Sprawdzamy, czy bilans etanolu zamyka się:

$$437,5 \times 0,85 = 371,875 \text{ kg/h etanolu}$$

$$562,5 \times 0,05 = 28,125 \text{ kg/h etanolu}$$

$$371,875 + 28,125 = 400 \text{ kg/h}$$



Bilans zamyka się dokładnie.

Cały etanol zasilający został rozdzielony między destylat i produkt dolny.



Ile etanolu odzyskailiśmy w destylacji?

Etanol w strumieniu zasilającym:

400 kg/h

Etanol w destylacie:

371,875 kg/h

Stopień odzysku etanolu:

$$\frac{371,875}{400} \times 100\% \approx 93,0\%$$



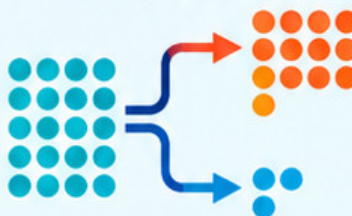
93% etanolu zasilającego trafia do destylatu.



Graficzny podział etanolu

Z 400 umownych jednostek etanolu w zasilaniu:

400
jednostek
etanolu



≈ 372
do destylatu
(93%)

≈ 28
do produktu
dolnego (7%)



Interpretacja

Wysoka czystość destylatu i wysoki stopień odzysku etanolu to dwa różne kryteria:

- 85% etanolu w destylacie opisuje, jaki jest skład destylatu (jego czystość).
- 93% odzysku etanolu opisuje, jaka część etanolu z zasilania została odzyskana w destylacji.

Krok 3 – Dlaczego para zawiera więcej etanolu?

Bilans masy mówi nam, ile materiału znajduje się w poszczególnych strumieniach, ale nie wyjaśnia, dlaczego destylacja pozwala rozdzielić etanol i wodę. Do tego potrzebujemy pojęcia „równowaga ciec–para”.



Proste wyjaśnienie

Wyobraź sobie ciekłą mieszaninę etanolu i wody. Po dostarczeniu energii część cieczy zamienia się w parę. Ponieważ etanol jest bardziej lotny od wody, jego udział w parze jest zwykle wyższy niż w cieczy, z której ta para powstała.



CIECZ: mniej etanolu

np. mieszanina
etanol + woda

częściowe
odparowanie



PARA: więcej etanolu

para wzbogacona
w etanol

To uproszczony, poglądowy schemat. Nie oznacza on stałej, uniwersalnej wartości wzbogacenia, ponieważ rzeczywiste składy zależą od temperatury, ciśnienia i składu mieszaniny.

x i y

x – udział bardziej lotnego składnika w fazie ciekłej,

y – udział bardziej lotnego składnika w fazie parowej,

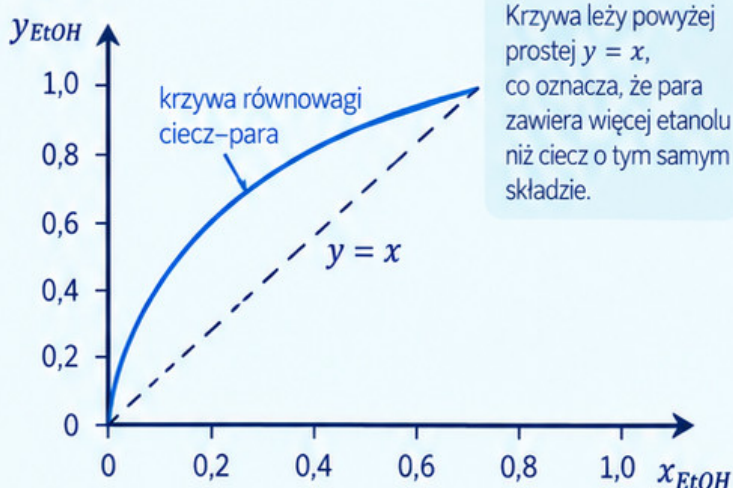
x_{EtOH} – skład cieczy (mole lub masa),

y_{EtOH} – skład pary (mole lub masa).

$$y_{EtOH} > x_{EtOH}$$

Para jest wzbogacona w etanol.

Wykres równowagi x-y



Ważna uwaga

Dokładne obliczenia równowagi ciec–para często wykorzystują ułamki molowe, a nie masowe. Dlatego zawsze należy sprawdzić, na jakiej podstawie (molowej czy masowej) podany jest skład mieszaniny.



Uwaga na etanol–wodę

Układ etanol–woda nie jest idealny w całym zakresie składu. Przy wysokich stężeniach etanolu występuje ograniczenie związane z azeotropem, co oznacza, że klasyczna destylacja przy danym ciśnieniu nie pozwala dowolnie zwiększać czystości etanolu.

Krok 4 — Dlaczego część destylatu wraca do kolumny?

Para wychodząca z górnej części kolumny trafia do skraplacza. Po skropleniu cieczy powstają dwa strumienie: produkt — destylat D oraz refluks L , czyli ciecz zawracana na szczyt kolumny.



SKROPLONA CIECZ

D — produkt
(destylat)

L — refluks
do kolumny



Po co zawracamy refluks?

Refluks zwiększa kontakt między cieczą spływającą w dół kolumny a parą unoszącą się w górę. Dzięki temu możliwy jest lepszy rozdział składników i uzyskanie wyższej czystości produktu.



Współczynnik refluksu

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

R — współczynnik refluksu
(bez jednostek)
 L — strumień refluksu
(zawracany do kolumny)
 D — strumień destylatu
(produktu)

W obliczeniach projektowych należy jednoznacznie określić podstawę obliczeń. Najczęściej stosuje się strumienie molowe.



Więcej refluksu — co zyskujemy?

- Lepszy kontakt faz (ciecz–para).
- Łatwiejsze osiągnięcie wymaganej czystości produktu.
- Mniejszą liczbę stopni teoretycznych potrzebnych do danego rozdziału.



Jaki jest koszt?

Więcej cieczy zawracanej do kolumny należy ponownie podgrzać i częściowo odparować. W rezultacie zapotrzebowanie na energię w przekotle zazwyczaj rośnie, a obciążenie skraplacza często również wzrasta.

WIĘKSZY REFLUKS

łatwiejszy rozdział

większe zużycie energii



KOMPROMIS



Myślenie procesowe

Nie zaczynaj od pytania:

„Jaki jest największy możliwy refluks?”.

Zaczynij od pytania:

„Jaki refluks pozwala osiągnąć wymaganą jakość produktu przy rozsądnym zużyciu energii i stabilnej pracy kolumny?”.



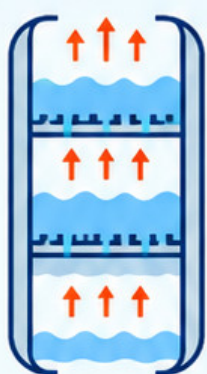
Jakie mogą być skutki zmiany refluksu?

- Czystość destylatu (produktu).
- Profil temperatury w kolumnie.
- Wewnętrzne obciążenie kolumny (strumień cieczy i pary).
- Spadek ciśnienia w kolumnie.
- Stabilność hydrauliczna półek lub wypełnienia (ryzyko zalania lub zbyt małego obciążenia).

Kolumna ma granice — za duży i za mały przepływ mogą być problemem

Kolumna destylacyjna działa poprawnie tylko w określonym zakresie obciążeń. Zarówno zbyt duży, jak i zbyt mały przepływ pary lub cieczy mogą prowadzić do problemów hydraulicznych, które pogarszają jakość rozdziłu i zakłócają stabilną pracę instalacji.

1 Zalewanie kolumny zalewanie — flooding



Pojawia się, gdy przepływ pary i/lub cieczy jest tak duży, że ciecz nie może swobodnie spływać w dół, a silny strumień pary zaczyna zatrzymywać lub unosić ciecz do góry.

Typowe objawy:

- gwałtowny wzrost spadku ciśnienia,
- niestabilne poziomy cieczy,
- gorsza jakość rozdziłu,
- zwiększone wynoszenie cieczy do góry,
- niestabilne temperatury.

Łańcuch przyczynowy:

za duże obciążenie → utrudniony przepływ cieczy
→ wzrost ΔP → utrata stabilnej pracy

2 Przesączenie przez półki przesączenie — weeping



Pojawia się, gdy przepływ pary jest zbyt mały, aby odpowiednio podtrzymać ciecz na półce. Ciecz może przeciekać przez otwory zamiast spływać po przewidzianej drodze.

Typowe objawy:

- gorszy kontakt ciecz–para,
- niższa sprawność póltek,
- gorsza jakość rozdziłu,
- nietypowo niski spadek ciśnienia.

Łańcuch przyczynowy:

za mały przepływ pary → słaby kontakt faz
→ niższa sprawność rozdziłu

Porównanie problemów hydraulicznych

Parametr	Zalewanie	Przesączenie
Przepływ pary	zbyt wysoki	zbyt niski
Spadek ciśnienia	często wysoki	często niski
Kontakt faz	zakłócony	niewystarczający
Jakość rozdziłu	pogarsza się	pogarsza się

Operator widzi problem — co sprawdzić?



1 Spadek ciśnienia (ΔP) kolumny



2 Przepływ zasilania



3 Obciążenie wyparki



4 Refluks



5 Temperatury wzdłuż kolumny



6 Jakość produktów



Ten sam objaw jakości produktu może mieć różne przyczyny.

Diagnoza nie powinna opierać się na jednym parametrze. Należy analizować łącznie: przepływy + temperatury + ciśnienie + skład produktu.



Podsumowanie modułu

Po tym przypadku czytelnik powinien rozumieć: całkowity bilans kolumny, bilans etanolu, podstawową ideę równowagi ciecz–para, rolę refluksu oraz związek między hydrauliką a jakością rozdziłu.



Co dalej?

Teraz przechodzimy od mieszania i rozdzielania do sytuacji, w której składnik chemicznie przekształca się w inny składnik.

MODUŁ 04

Kinetyka i reaktor CSTR

Jak szybkość reakcji przekłada się na wielkość reaktora i osiąganą konwersję?



Cel modułu

Połączyć trzy zagadnienia, które często są omawiane oddzielnie: kinetykę reakcji, czas przebywania i objętość reaktora. Zrozumieć, że reaktor to nie tylko zbiornik, w którym zachodzi reakcja — jego wielkość i warunki pracy determinują, ile czasu reagenty mają na reakcję.



CSTR — Continuous Stirred-Tank Reactor

ciągły reaktor zbiornikowy z idealnym mieszaniem

W idealnym reaktorze CSTR zawartość jest doskonale wymieszana, dlatego skład wewnątrz reaktora jest taki sam jak skład strumienia wylotowego.

KINETYKA → SZYBKOŚĆ REAKCJI → CZAS PRZEBYWANIA → OBJĘTOŚĆ → KONWERSJA

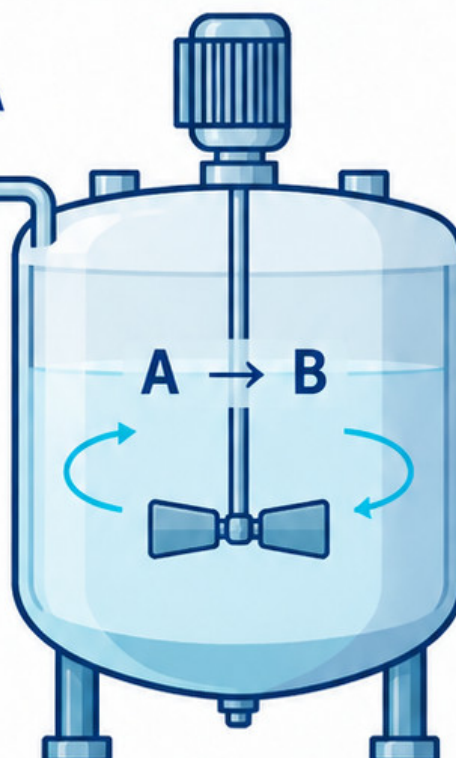
Rozpatrywany przypadek

Reakcja:



Celem jest uzyskanie wymaganej konwersji reagenta A.

ZASILANIE A
(wejście)



A + B
(wyjście)



Główne pytanie inżynierskie:

Jak duży musi być reaktor, aby osiągnąć wymaganą konwersję?



Reakcja potrzebuje nie tylko reagentów.
Potrzebuje również czasu.

Przypadek 04: jak duży reaktor pozwoli osiągnąć 75% konwersji?

Sytuacja procesowa

W instalacji zachodzi reakcja w fazie ciekłej: $A \rightarrow B$ i jest prowadzona w ciągłym reaktorze idealnie mieszanym (CSTR). Dla uproszczenia przyjmujemy reakcję pierwszego rzędu względem A:

$$-r_A = k \cdot C_A$$



Natężenie przepływu objętościowego

$$\dot{V} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$$



Stała szybkości reakcji
(w temperaturze roboczej)

$$k = 0,60 \text{ h}^{-1}$$



Wymagany stopień konwersji

$$X_A = 75\%$$
$$X_A = 0,75$$



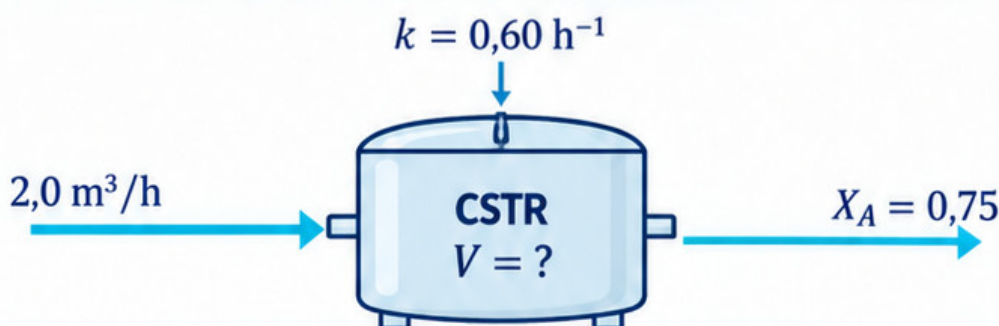
Założenia

- stan ustalony,
- idealne mieszanie,
- stała gęstość cieczy,
- pomijalna zmiana objętości w trakcie reakcji,
- stała temperatura,
- reakcja pierwszego rzędu.



Główne pytanie inżynierskie:

Jaką minimalną objętość idealnego reaktora CSTR przewiduje uproszczony model dla tych warunków?



Najpierw zrozum konwersję

Konwersja określa, jaka część reagenta A dostarczonego do reaktora została przekształcona.

Jeżeli $X_A = 0,75$, to 75% cząstek A ulega reakcji, a 25% pozostaje w strumieniu wylotowym.

Przy stałej gęstości cieczy stężenie A na wyjściu opisuje zależność:

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A)$$

Dla 75% konwersji:

$$C_A = 0,25C_{A0}$$



Wizualizacja konwersji

Na wlocie:
100 cząstek A



Na wylocie:



25 cząstek A
(pozostaje)



75 jednostek
przekształconych
w B



Co będziemy musieli połączyć?

- 1 bilans molowy A
- 2 równanie szybkości reakcji
- 3 stężenie A na wyjściu
- 4 wymagany stopień konwersji
- 5 czas przebywania materiału w aparacie



Najważniejsze pytanie przed obliczeniami

Jeżeli reakcja potrzebuje czasu, aby zużyć reagent A:
jak długo ciecz musi średnio przebywać w reaktorze, aby osiągnąć 75% konwersji?

Krok 1 – Jak szybko znika reagent A?



Cel tego kroku

Wyjaśnić, czym jest szybkość reakcji i dlaczego sama konwersja nie wystarcza do określenia wielkości reaktora.



Punkt wyjścia

Rozpatrujemy reakcję $A \rightarrow B$ opisaną kinetyką pierwszego rzędu:

$$-r_A = k \cdot C_A$$

$-r_A$ – szybkość zaniku reagenta A
 k – stała szybkości reakcji
 C_A – stężenie reagenta A



Dlaczego przed symbolem r_A znajduje się znak minus?

Reagent A jest zużywany w reakcji, jego ilość (stężenie) maleje w czasie. Dlatego szybkość zaniku definiujemy z minusem, dzięki czemu $-r_A > 0$.



Co oznacza reakcja pierwszego rzędu?

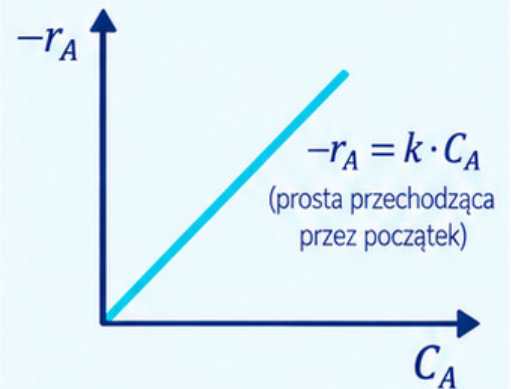
Szybkość reakcji jest wprost proporcjonalna do stężenia reagenta A. Im wyższe C_A , tym szybsza reakcja, im niższe C_A , tym wolniejsza reakcja.

Przykład porównawczy:

- Jeśli $C_A = C_{A0}$, to $-r_A = kC_{A0}$
- Jeśli $C_A = 0,5C_{A0}$, to $-r_A = 0,5kC_{A0}$

Przy tej samej wartości k szybkość reakcji jest o połowę mniejsza, jeśli stężenie A spada dwukrotnie.

Wykres szybkości reakcji dla kinetyki pierwszego rzędu



Powiązanie z naszym przypadkiem

Wymagana konwersja wynosi $X_A = 0,75$. Dla cieczy o stałej gęstości obowiązuje zależność:

$$\begin{aligned}C_A &= C_{A0}(1 - X_A) \\C_A &= C_{A0}(1 - 0,75) \\C_A &= 0,25C_{A0}\end{aligned}$$

Na wyjściu z reaktora pozostaje tylko 25% początkowego stężenia A.



Szybkość reakcji na wyjściu

Dla stężenia na wyjściu $C_A = 0,25C_{A0}$:

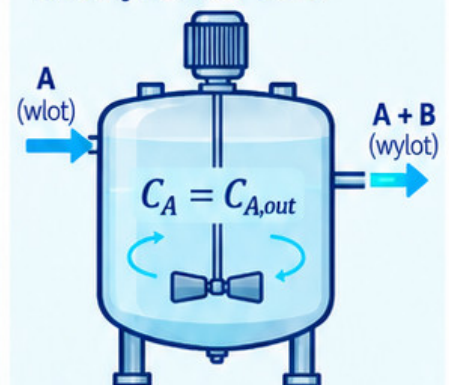
$$-r_A = k \cdot 0,25C_{A0}$$

Dla $k = 0,60 \text{ h}^{-1}$:

$$-r_A = 0,15C_{A0} \text{ na godzinę}$$

Kluczowe jest nie tyle uzyskanie konkretnej wartości stężenia, lecz fakt, że w idealnym reaktorze CSTR cały reaktor pracuje przy stężeniu równym stężeniu na wylocie.

Idealny reaktor CSTR



W idealnym CSTR cała zawartość reaktora ma jednakowe stężenie: $C_A = C_{A,out}$.



To ważne

W reaktorze CSTR zawartość jest idealnie wymieszana, dlatego nie mamy strefy o wysokim stężeniu A na wlocie i strefy o niskim stężeniu A na wylocie wewnątrz aparatu. W całym idealnym reaktorze przyjmujemy $C_A = C_{A,out}$, co bezpośrednio wpływa na wymaganą objętość reaktora.

Krok 2 – Reakcja potrzebuje czasu

Jeśli ciecz przepływa przez reaktor zbyt szybko, reagent może nie mieć wystarczająco dużo czasu, aby zareagować. Dlatego w analizie wykorzystujemy pojęcie czasu przebywania (czasu rezydencji) materiału w reaktorze.

1



Czas przebywania w reaktorze

Nominalny czas przebywania określa, jak długo materiał pozostaje w aparacie.

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

τ

nominalny czas przebywania

[h] średni czas, jaki ciecz pozostaje w reaktorze (dla modelu idealnego CSTR).

V

objętość reaktora

[m³] objętość cieczy w reaktorze.

$\dot{v}$

strumień objętościowy

[m³/h] objętość cieczy wpływającej do reaktora w jednostce czasu.

2



Przykład obliczeniowy

Reaktor ma objętość 10 m³, a strumień przepływu wynosi 2 m³/h. Czas przebywania wynosi:

$$\tau = \frac{10}{2} = 5 \text{ h}$$

Stosunek objętości reaktora do strumienia przepływu odpowiada pięciu godzinom.

3



W rzeczywistych aparatach

W realnych urządzeniach czasy przebywania cząstek mogą być rozłożone w pewnym zakresie (rozkład czasów przebywania). W tym przypadku stosujemy jednak uproszczony model idealnego reaktora zbiornikowego (CSTR) z jednym, średnim czasem przebywania.



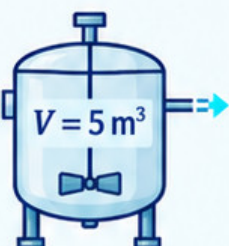
Sam czas to nie wszystko.

Pięć godzin może być wystarczająco długo dla bardzo szybkiej reakcji, ale zbyt krótko dla bardzo wolnej reakcji. Dlatego musimy zawsze łączyć

CZAS + KINETYKĘ

Mała objętość / szybki przepływ
→ **krótki τ**

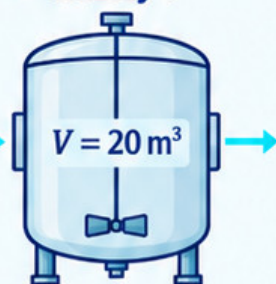
2 m³/h
(wejście)



krótki
czas przebywania

Większa objętość / ten sam przepływ
→ **dłuższy τ**

2 m³/h
(wejście)



dłuższy
czas przebywania

4



Co dzieje się, gdy τ rośnie?

Dla tego samego układu reakcji i temperatury większa objętość reaktora lub mniejszy strumień przepływu oznacza większy czas przebywania, co zwykle daje reagentowi więcej czasu na reakcję.

$V \uparrow$



$\tau \uparrow$



możliwość uzyskania
większej konwersji

$\dot{v} \uparrow$



$\tau \downarrow$



konwersja może spaść

5



Dwie strony tego samego problemu



Kinetyka mówi:

jak szybko zachodzi przemiana.



Hydraulika reaktora mówi:

jak długo materiał pozostaje w aparacie.



Konwersja wynika z połączenia
obu tych informacji.

Krok 3 – Połącz bilans materiałowy z kinetyką

Skąd bierze się równanie projektowe reaktora CSTR?

Połączymy bilans materiałowy reagenta A z równaniem kinetycznym, aby uzyskać proste równanie projektowe reaktora CSTR. Dzięki temu zrozumiemy, jak kinetyka reakcji i czas przebywania wpływają na wymaganą objętość reaktora i osiąganą konwersję.

1 Bilans reagenta A w stanie ustalonym

W stanie ustalonym: $A \text{ NA WEJŚCIU} - A \text{ NA WYJŚCIU} - A \text{ ZUŻYTE W REAKCJI} = 0$

2 Postać molowa bilansu



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

3

Uwzględnienie znaku szybkości reakcji

Dla zanikania A: $r_A < 0$

$$F_{A0} - F_A = (-r_A) \cdot V$$

4

Definicja konwersji

$$X_A = \frac{F_{A0} - F_A}{F_{A0}}$$

Stąd:

$$F_{A0} - F_A = F_{A0} \cdot X_A$$

5

Podstawienie do bilansu

$$F_{A0} \cdot X_A = (-r_A) \cdot V$$

6

Równanie projektowe reaktora CSTR



$$V = \frac{F_{A0} \cdot X_A}{-r_A}$$



Równanie to pokazuje, że wymagana objętość zależy od strumienia zasilającego, pożądanej konwersji oraz szybkości reakcji.

2 Uproszczenie dla cieczy o stałej gęstości (reakcja I rzędu)

Dla ciekłych mieszanin o stałej gęstości można zapisać równanie projektowe w prostszej postaci.

1

Strumień molowy na wejściu

$$F_{A0} = \dot{v} \cdot C_{A0}$$

2

Równanie kinetyczne (I rząd)

$$-r_A = k \cdot C_A$$

3

Zależność stężenia od konwersji

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A)$$

4

Podstawienie do równania projektowego

$$V = \frac{\dot{v} C_{A0} X_A}{k C_{A0} (1 - X_A)}$$

Stężenia C_{A0} skracają się.

5

Uprozczone równanie projektowe (ciecz, I rząd)



$$V = \frac{\dot{v} \cdot X_A}{k(1 - X_A)}$$



Alternatywna postać z czasem przebywania

Ponieważ $\tau = \frac{V}{\dot{v}}$, otrzymujemy:

$$\tau = \frac{X_A}{k(1 - X_A)}$$



$$X_A = \frac{k\tau}{1 + k\tau}$$



Interpretacja

Konwersja rośnie, gdy:

- k rośnie (szybsza reakcja),
- τ rośnie (dłuższy czas przebywania, większa objętość).

Powiązanie kluczowych wielkości



Sens fizyczny

Przy wysokiej konwersji w CSTR stężenie A jest niskie w całej objętości reaktora. Dla reakcji I rzędu oznacza to mniejszą szybkość reakcji, dlatego osiągnięcie bardzo wysokiej konwersji w jednym reaktorze CSTR może wymagać dużej objętości.

Krok 4 – Ile metrów sześciennych potrzebujemy?

Na podstawie wyników z poprzedniego kroku obliczamy, jaką objętość powinien mieć idealny reaktor CSTR, aby uzyskać wymaganą konwersję 75%.

Dane wejściowe



Natężenie przepływu

$$\dot{v} = 2,0 \text{ m}^3/\text{h}$$



Stała szybkości reakcji

$$k = 0,60 \text{ h}^{-1}$$



Wymagany stopień konwersji

$$X_A = 0,75$$



Wzór na objętość CSTR

Dla reakcji pierwszego rzędu w idealnym CSTR:

$$V = \frac{\dot{v} \cdot X_A}{k(1 - X_A)}$$

Obliczenia krok po kroku

1 Krok A — oblicz część nieprzereagowaną

$$1 - X_A = 1 - 0,75 = 0,25$$

2 Krok B — podstaw dane

$$V = \frac{2,0 \times 0,75}{0,60 \times 0,25}$$

3 Oblicz licznik i mianownik

Licznik:

$$2,0 \times 0,75 = 1,50$$

Mianownik:

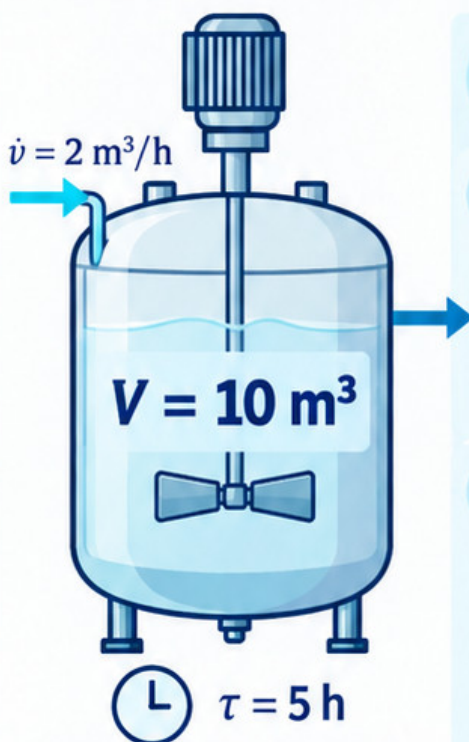
$$0,60 \times 0,25 = 0,15$$

4 Podstaw wyniki

$$V = \frac{1,50}{0,15}$$

5 Wynik końcowy

$$V = 10,0 \text{ m}^3$$



Sprawdzenie wyniku przez czas przebywania

1 Oblicz czas przebywania

$$\tau = \frac{V}{\dot{v}}$$
$$\tau = \frac{10}{2} = 5 \text{ h}$$

2 Zweryfikuj uzyskany stopień konwersji

$$X_A = \frac{k\tau}{1 + k\tau}$$

$$X_A = \frac{0,60 \times 5}{1 + (0,60 \times 5)}$$
$$= \frac{3}{4} = 0,75$$



Wynik

Idealny model przewiduje wymaganą objętość CSTR

równą **10 m³**.



Wynik się zgadza!

Dla $\tau = 5 \text{ h}$ otrzymujemy $X_A = 0,75$, zgodnie z założeniami.



Co oznacza wynik?

Dla przyjętego modelu (reakcja pierwszego rzędu w idealnym CSTR), strumienia $2 \text{ m}^3/\text{h}$, stałej szybkości reakcji $k = 0,60 \text{ h}^{-1}$ oraz wymaganego stopnia konwersji 75% otrzymujemy:

Nominalny czas przebywania $\rightarrow \tau = 5 \text{ h}$

Wymagana objętość reaktora $\rightarrow V = 10 \text{ m}^3$



Nie zaokrąglaj znaczenia wyniku

To nie oznacza, że od razu należy kupić zbiornik o dokładnie 10 m^3 . W rzeczywistym projektowaniu należy uwzględnić:

- objętość roboczą (zapas cieczy nad poziomem pracy),
- margines procesowy,
- wymagania dotyczące mieszania,
- wymianę ciepła,
- aspekty bezpieczeństwa,
- dynamikę rozruchu i zatrzymania,
- oraz możliwe odchylenia od przepływu idealnego.

Krok 5 – Kilka stopni może zmienić szybkość reakcji

Stała szybkości reakcji k nie musi być stała w każdych warunkach. Jednym z najważniejszych parametrów, który na nią wpływa, jest temperatura.



Równanie Arrheniusa

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



k — stała szybkości reakcji [h^{-1}]
 A — czynnik przedeksponencjalny [h^{-1}]
 E_a — energia aktywacji [J/mol]
 R — uniwersalna stała gazowa [$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$]
 T — temperatura bezwzględna w kelwinach [K]



Dla wielu reakcji podwyższenie temperatury zwiększa k , a zatem reakcja przebiega szybciej.



$T \uparrow$



$k \uparrow$



szybkość reakcji $\uparrow$



konwersja może wzrosnąć



$T \downarrow$



$k \downarrow$



reakcja wolniejsza



konwersja może spaść

Rozpatrywany przypadek

- W wyniku obniżenia temperatury stała szybkości reakcji spada z $0,60 \text{ h}^{-1}$ do $0,40 \text{ h}^{-1}$.
- Objętość reaktora pozostaje taka sama: $V = 10 \text{ m}^3$, a natężenie przepływu również się nie zmienia: $2 \text{ m}^3/\text{h}$, więc

$$\tau = V/\dot{V} = 10/2 = 5 \text{ h.}$$

- Nową konwersję obliczamy ze wzoru:

$$X_A = \frac{k\tau}{1 + k\tau}$$

- Dla $k = 0,40 \text{ h}^{-1}$:

$$X_A = \frac{0,40 \times 5}{1 + (0,40 \times 5)} = \frac{2}{3} \approx 0,667$$

czyli około **66,7%** zamiast wymaganych 75%.

Porównanie warunków w reaktorze



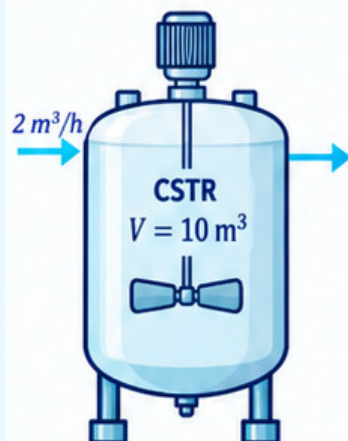
WARUNKI A
(wyższa temperatura)

$k = 0,60 \text{ h}^{-1}$
 $X = 75\%$



WARUNKI B
(niższa temperatura)

$k = 0,40 \text{ h}^{-1}$
 $X \approx 66,7\%$



Wniosek

Bez zmiany natężenia przepływu ani objętości reaktora, sama zmiana kinetyki może obniżyć konwersję.



Uwaga procesowa

Zwiększenie temperatury nie jest uniwersalnym rozwiązaniem. Wyższa temperatura może również:

- zwiększać szybkość reakcji ubocznych,
- pogarszać selektywność,
- podnosić ciśnienia par,
- przyspieszać degradację produktu,
- zwiększać wymagania bezpieczeństwa.

Diagnoza operacyjna – konwersja spadła z 75% do 62%

Jak wykorzystać równanie projektowe CSTR do analizy problemów operacyjnych?



Cel modułu

Pokazać, że równanie projektowe CSTR może być nie tylko narzędziem do projektowania, ale także praktycznym narzędziem diagnostycznym do identyfikacji przyczyn spadku konwersji.



Sytuacja procesowa

Reaktor przez długi czas pracował stabilnie, osiągając konwersję $X_A \approx 75\%$. Obecnie operatorzy obserwują spadek konwersji do $X_A \approx 62\%$. Receptura produktu nie została zmieniona.

Co sprawdzić?

1 KROK 1 — Przepływ zasilania



Jeśli $\dot{v} \uparrow$, to $\tau = V/\dot{v} \downarrow$. Składnik spędza w reaktorze mniej czasu, a konwersja może spaść.

Przykład:

$$V = 10 \text{ m}^3$$

$$\dot{v}: 2 \rightarrow 3 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\tau: 5 \rightarrow 3,33 \text{ h}$$

$$k = 0,60 \text{ h}^{-1}$$

$$X = \frac{0,60 \times 3,33}{1 + 0,60 \times 3,33} \approx 0,667 \text{ (66,7\%)}$$

2 KROK 2 — Temperatura reaktora



Niższa temperatura może zmniejszyć stałą szybkości reakcji k i spowolnić przebieg reakcji.

Sprawdź:

- czujnik temperatury (poprawność odczytu),
- układ grzewczy/chłodzący (wydajność),
- temperaturę zasilania.

3 KROK 3 — Aktywność katalizatora



Jeśli reakcja jest katalityczna, spadek aktywności katalizatora może obniżyć efektywną szybkość reakcji.

Możliwe przyczyny:

- dezaktywacja (np. spiekanie),
- zatrucie katalizatora,
- zanieczyszczenia w surowcu,
- starzenie się katalizatora.

4 KROK 4 — Jakość mieszania



Model CSTR zakłada idealne mieszanie. Problemy z mieszadłem mogą prowadzić do stref martwych, gradientów stężeń, gradientów temperatury i gorszego kontaktu reagentów.

Sprawdź:

- prędkość obrotowa mieszadła,
- pobór mocy (czy nie spadł),
- stan techniczny mieszadła (np. zużycie, uszkodzenia).

5 KROK 5 — Skład zasilania



Czy stężenie składnika A w zasilaniu naprawdę nie uległo zmianie?

Czy w surowcu pojawiły się zanieczyszczenia, inhibitory lub zmiany innych właściwości (np. temperatura, gęstość)?

6 KROK 6 — Pomiar konwersji



Zanim zmienisz warunki pracy reaktora, upewnij się, że obserwowany spadek konwersji jest rzeczywisty.

Sprawdź:

- metodę analityczną (czy nadal właściwa),
- miejsce poboru próbek,
- kalibrację analizatora,
- częstotliwość pobierania próbek.



Kolejność ma znaczenie

Zacznij od najprostszych i najbardziej prawdopodobnych przyczyn.

przepływ → temperatura → skład → mieszanie → analityka

Nie zakładaj od razu, że „chemia przestała działać” – często przyczyna tkwi w warunkach operacyjnych.



Kluczowe równania

$$-r_A = kC_A$$

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

$$V = \frac{\dot{v}X_A}{k(1 - X_A)}$$

Konwersja w reaktorze CSTR zależy nie tylko od chemii reakcji (stałej szybkości k), ale także od sposobu, w jaki prowadzony jest proces: czasu przebywania, temperatury, składu zasilania, jakości mieszania i poprawności pomiarów.



Co dalej?

W reaktorze obserwowaliśmy przemianę chemiczną składnika. W kolejnym module przejdziemy do procesu, w którym składnik może po prostu przejść z jednej fazy do drugiej.

MODUŁ 05

Absorpcja gazu i wymiana masy

Jak przenieść niepożądany składnik z gazu do cieczy?



Cel modułu

Pokazać praktyczne znaczenie wymiany masy na przykładzie oczyszczania strumienia gazu z CO_2 . Zrozumieć, że absorber nie usuwa gazu w sposób magiczny. CO_2 musi najpierw:

- 1 dotrzeć do powierzchni kontaktu z fazy gazowej,
- 2 przejść przez granicę faz,
- 3 a następnie zostać przeniesiony do cieczy absorbującej.

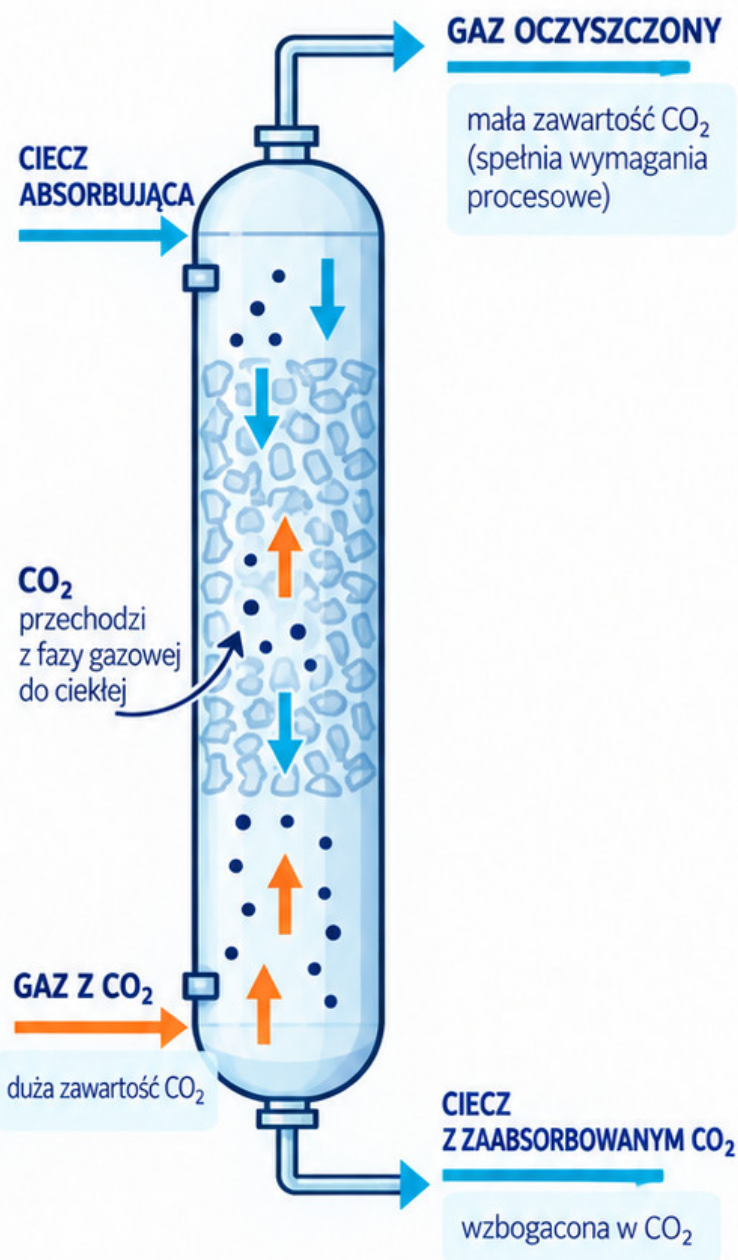


Rozważany przypadek

Do kolumny absorpcyjnej doprowadzany jest gaz zawierający CO_2 . Ciecz absorbująca powinna przejąć większość CO_2 , tak aby strumień gazu wychodzący z kolumny spełniał wymagania procesowe.



Główne pytanie inżynierskie:
Ile CO_2 trzeba przenieść z fazy gazowej do ciekłej i co decyduje o skuteczności absorbera?



BILANS → SIŁA NAPĘDOWA → KONTAKT FAZ → WYMIANA MASY → SKUTECZNOŚĆ



Aby usunąć składnik z gazu, trzeba dać mu drogę do drugiej fazy.

Przypadek 05: usuwanie CO₂ w absorberze

Sytuacja procesowa

Strumień gazu zawierający CO₂ o określonym składzie doprowadzany jest do kolumny absorpcyjnej, w której CO₂ jest usuwany do cieczy absorbującej. To uproszczony przypadek dydaktyczny, który pozwala przećwiczyć podstawowy bilans materiałowy.



Strumień zasilający (gaz)

100 kmol/h
10 mol% CO₂

Pozostała część to gaz nośny, który w uproszczonym modelu nie ulega absorpcji.



Wymaganie procesowe

Usunąć
90% CO₂
ze strumienia gazu zasilającego.



Główne pytania inżynierskie

- 1 Ile kmoli CO₂ wpływa do kolumny?
- 2 Ile kmoli CO₂ należy zaabsorbować?
- 3 Ile kmoli CO₂ pozostaje w gazie oczyszczonym?
- 4 Jak zmienia się całkowity strumień gazu na wylocie?

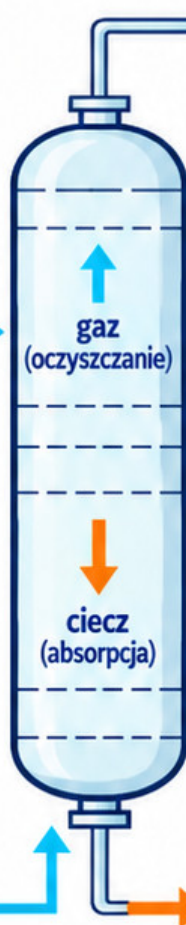
Gaz zasilający (wejscie)

100 kmol/h
10% CO₂

Gaz oczyszczony (wyjście)

? kmol/h
?% CO₂

Ciecz absorbująca (wejscie)



Ciecz bogata w CO₂ (wyjście)



Dane wejściowe

$G_0 = 100 \text{ kmol/h}$
 $y_{\text{CO}_2, \text{in}} = 0,10$
Gaz nośny (np. N₂) = 0,90



Ważne założenia dydaktyczne

- Gaz nośny nie ulega absorpcji.
- CO₂ nie reaguje w fazie gazowej.
- Szczegółowa równowaga fazowa i rodzaj cieczy absorbującej nie są jeszcze analizowane.
- Proces przebiega w stanie ustalonym.



Zanim policzysz

Po usunięciu części CO₂ całkowity strumień gazu na wylocie nie będzie już równy 100 kmol/h, ponieważ część składnika została fizycznie przeniesiona do fazy ciekłej. Dlatego stężenia CO₂ w gazie końcowym nie można otrzymać po prostu mnożąc „10% × 10%”, bez wykonania bilansu materiałowego.



Główne zadanie do rozwiązania:

Ile kmoli CO₂ wpływa do kolumny w ciągu godziny?

Zanim wykonamy bilans – dlaczego CO₂ przechodzi do cieczy?

W absorberze faza gazowa i ciekła mają ze sobą kontakt, ale sam kontakt nie gwarantuje, że CO₂ przejdzie do cieczy wystarczająco szybko. Potrzebna jest **siła napędowa wymiany masy** – różnica potencjału, która powoduje transport składnika między fazami.



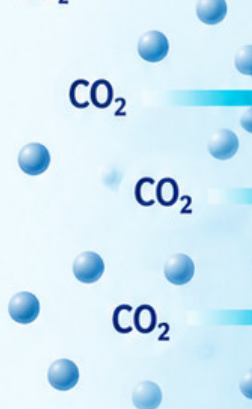
Główna idea

Jeśli faza gazowa zawiera więcej CO₂ niż odpowiadałoby stanowi równowagi z cieczą, pojawia się tendencja do transportu CO₂ z gazu do cieczy:

GAZ → CIECZ

Proces trwa tak długo, jak istnieje odpowiednia różnica potencjału transportu.

FAZA GAZOWA
wysoka tendencja
CO₂



FAZA CIEKŁA
niższa tendencja
CO₂

warstwa gazowa

granica faz

warstwa ciekła



Analogia – ten sam mechanizm

Wymiana ciepła:

różnica temperatur
→ przepływ ciepła



Wymiana masy:

różnica składu /
potencjału chemicznego
→ przepływ składnika



Uproszczony opis inżynierski

$$N_{CO_2} \propto \text{siła napędowa}$$

$$N_{CO_2} = K \cdot a \cdot \Delta$$

gdzie: K – współczynnik wymiany masy,
 a – powierzchnia międzyfazowa,
 Δ – odpowiednio zdefiniowana siła napędowa.

Tej zależności na tym etapie nie używamy jeszcze do obliczeń liczbowych.



**Większa powierzchnia kontaktu + dobra siła napędowa
= łatwiejszy transport masy.**



Co może zwiększyć powierzchnię kontaktu?

- wypełnienie kolumny (packing)
- dobre rozprowadzenie cieczy
- zwilżanie powierzchni
- odpowiednia hydraulika gaz-ciecz



Co może zmniejszyć skuteczność?

- suche obszary wypełnienia
- nierównomierny przepływ cieczy
- zbyt krótki czas kontaktu
- niższa zdolność absorpcyjna rozpuszczalnika
- niekorzystna temperatura



Absorpcja ≠ adsorpcja

Absorpcja – składnik przechodzi do objętości drugiej fazy (np. do cieczy).

Adsorpcja – składnik gromadzi się głównie na powierzchni ciała stałego.

**W tym module analizujemy
ABSORPCJĘ.**

Krok 1 – Ile CO₂ naprawdę trzeba przenieść do cieczy?

Zaczynamy od prostego bilansu molowego po stronie gazowej, aby określić, ile CO₂ musi zostać zaabsorbowane do cieczy i jakie będzie stężenie CO₂ w gazie wylotowym.

1



Dane wejściowe

Całkowity strumień gazu: 100 kmol/h

Ułamek molowy CO₂: 10% (0,10)

2



Strumienie na wejściu

Strumień CO₂ na wejściu:

$$\dot{n}_{\text{CO}_2, \text{in}} = 100 \times 0,10 = 10 \text{ kmol/h}$$

Gaz nośny (np. N₂):

$$100 \times 0,90 = 90 \text{ kmol/h}$$

3



Wymagany stopień usunięcia CO₂

Należy usunąć **90%** CO₂ ze strumienia gazu.

Ilość CO₂ do przeniesienia do cieczy:

$$10 \times 0,90 = 9 \text{ kmol CO}_2/\text{h}$$

CO₂ pozostający w gazie:

$$10 - 9 = 1 \text{ kmol/h}$$

4



Strumień gazu na wyjściu

Gaz nośny nie ulega absorpcji, więc na wyjściu pozostaje 90 kmol/h gazu nośnego oraz 1 kmol/h CO₂.

Całkowity strumień gazu na wyjściu:

$$90 + 1 = 91 \text{ kmol/h}$$

5

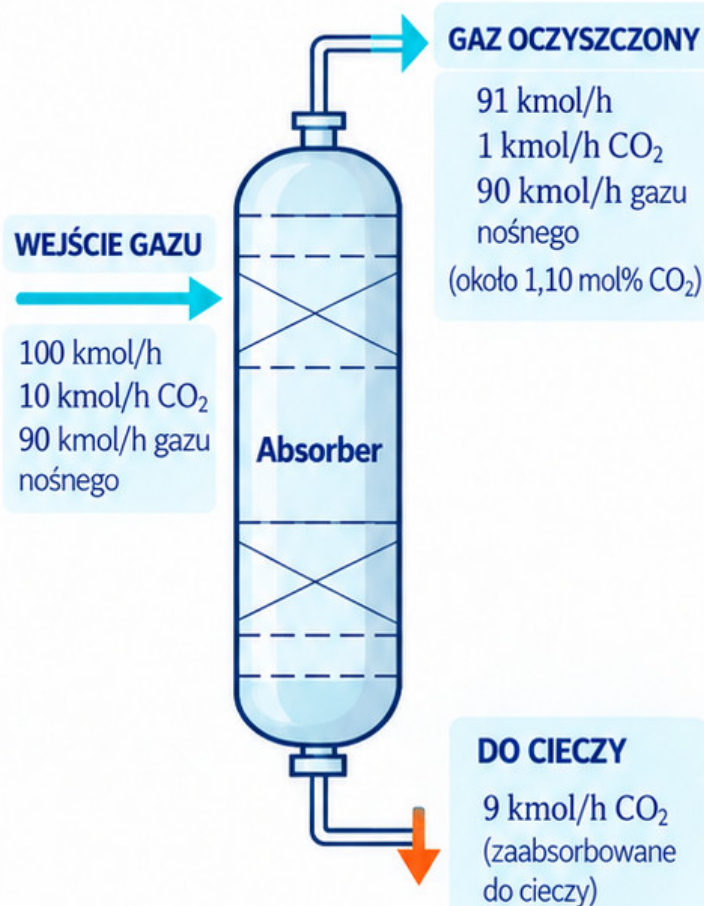


Stężenie CO₂ w gazie wylotowym

Ułamek molowy CO₂ na wyjściu:

$$y_{\text{CO}_2, \text{out}} = \frac{1}{91} \approx 0,0110$$

czyli około **1,10 mol% CO₂**.



Wiemy już, ile CO₂ trzeba usunąć.

Teraz trzeba zrozumieć, jak ilość cieczy, kontakt faz i warunki kolumny decydują o tym, czy absorber rzeczywiście osiągnie ten cel.



Dlaczego nie dokładnie 1%?

Częstym błędem jest założenie, że usunięcie 90% z początkowych 10% CO₂ da dokładnie 1% na wyjściu. Jednak zmienia się również mianownik. Po absorpcji całkowity strumień gazu zmniejsza się z 100 kmol/h do 91 kmol/h, dlatego poprawny ułamek molowy to $1/91 \approx 1,10\%$, a nie dokładnie 1%.



Podsumowanie wyników

Wejście:	100 kmol/h 10 mol% CO ₂
Usunięcie:	9 kmol CO ₂ /h
Wyjście gazowe:	91 kmol/h około 1,10 mol% CO ₂



Sprawdzenie bilansu

Bilans CO₂: $10 = 9 + 1$

Bilans po stronie gazowej:

$$100 = 91 + 9$$



Bilans się zamyka.

Krok 2 – Zamień bilans molowy na rzeczywistą masę CO₂

Wynik w kmol/h można przeliczyć na strumień masy, aby zrozumieć, jakie rzeczywiste obciążenie musi przenieść absorber.



Punkt wyjścia

Na poprzedniej stronie obliczyliśmy, że absorber musi usunąć:

$$9 \text{ kmol CO}_2/\text{h}$$



Wynik i interpretacja

Absorber musi przenieść z gazu do cieczy około 396 kg CO₂ w każdej godzinie pracy.



W przeliczeniu na dobę (24 h)

$$396 \times 24 = 9504 \text{ kg CO}_2$$

około 9,5 t CO₂/dobę



Masa molowa CO₂

Masa molowa ditlenku węgla wynosi:

$$M_{\text{CO}_2} = 44 \text{ kg/kmol}$$



Obliczenie strumienia masy

Strumień masy usuwanego CO₂ obliczamy ze wzoru:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = \dot{n}_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2}$$

Po podstawieniu wartości:

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 9 \times 44$$

$$\dot{m}_{\text{CO}_2} = 396 \text{ kg/h}$$



Dlaczego to ważne?

Znajomość strumienia masy CO₂ pozwala określić:

- zdolność absorpcyjną cieczy
- wymaganą cyrkulację rozpuszczalnika
- obciążenie układu regeneracji
- wielkość aparatów pomocniczych
- zużycie energii.



Skuteczność usuwania

Skuteczność usuwania CO₂ z gazu wyrażamy

jako ułamek usuniętego strumienia molowego:

$$\eta = \frac{\dot{n}_{in} - \dot{n}_{out}}{\dot{n}_{in}}$$

Po podstawieniu wartości:

$$\eta = \frac{10 - 1}{10}$$

$$\eta = 0,90 = 90\%$$



Co oznacza 90%?

90% skuteczności usunięcia nie oznacza 90% CO₂ w cieczy!

Oznacza, że 90% strumienia CO₂ z gazu wlotowego zostało usunięte z fazy gazowej i przeniesione do fazy ciekłej.



Podział strumienia CO₂

Dla strumienia wlotowego 10 kmol/h CO₂:

10 kmol/h
CO₂
(włot)

9 kmol/h
CO₂
→ ciecz
= 396 kg/h

1 kmol/h
CO₂
→ gaz
oczyszczony



Pytania kontrolne

1

Ile składnika trzeba usunąć?

2

W jakiej jednostce ta wartość będzie najbardziej użyteczna dla kolejnego etapu obliczeń?

Krok 3 – Sam absorber nie wystarczy. Potrzebna jest odpowiednia ciecz.

Aby CO₂ mógł przejść z fazy gazowej do ciekłej, ciecz musi mieć zdolność do jego przyjęcia. Nie każda ciecz jest jednak równie skuteczna. Ilość i właściwości cieczy absorbującej są tak samo ważne jak geometria kolumny.



Główne czynniki wpływające na skuteczność cieczy

O tym, jak dobrze ciecz pochłania CO₂ decyduje kilka kluczowych czynników:

- 1 rozpuszczalność CO₂
- 2 temperatura
- 3 ciśnienie
- 4 skład cieczy
- 5 stopień jej nasycenia

CIECZ UBOGA W CO₂
(wejście na górze)

CIECZ BOGATA W CO₂
(wyjście na dole)

Absorber

GAZ OCZYSZCZONY



Ciecz świeża i ciecz nasycona

Ciecz, która zawiera bardzo mało CO₂, ma wysoki potencjał absorpcyjny. Ciecz mocno obciążona CO₂ ma znacznie mniejszą zdolność do dalszego pochłaniania gazu, ponieważ maleje siła napędowa wymiany masy.

CIECZ ŚWIEŻA



duży potencjał absorpcji

absorpcja CO₂

CIECZ NASYCONA



mały potencjał absorpcji



Ważne pojęcia

ciecz uboga — *lean solvent*

ciecz zawierająca mało CO₂

ciecz bogata — *rich solvent*

ciecz zawierająca dużo CO₂



Dlaczego zwiększenie przepływu cieczy może pomóc?

Większa ilość cieczy często pozwala:

- zwiększyć zdolność układu do odbioru CO₂
- poprawić zwilżenie wypełnienia
- utrzymywać korzystniejszą siłę napędową.



Ale są też ograniczenia

Zbyt duży przepływ cieczy może prowadzić do:

- większego spadku ciśnienia
- większego obciążenia pomp
- większego ryzyka zalewania
- większego zużycia energii.



WIĘCEJ CIECZY ≠ ZAWSZE LEPIEJ



Trzeba znaleźć kompromis

Celem jest takie dobranie ilości i parametrów cieczy, aby zapewnić jednocześnie:



wystarczająca absorpcja
(usunięcie wymaganej ilości CO₂)



stabilna hydraulika
i rozsądne zużycie energii.



Temperatura ma znaczenie

W wielu układach absorpcji fizycznej niższa temperatura cieczy sprzyja rozpuszczalności gazu, a więc ułatwia absorpcję CO₂. Wyższa temperatura cieczy może pogarszać zdolność absorpcyjną. Nie jest to jednak zasada uniwersalna i w niektórych przemysłowych układach chemicznych (np. z reakcją) zależność może być odwrotna.



Pytanie dla operatora

Jeśli absorber nagle nie spełnia wymaganej specyfikacji gazu, sprawdź nie tylko:

✗ przepływ gazu

ale także:

- ✓ przepływ cieczy absorbującej
- ✓ temperaturę cieczy
- ✓ stan (stopień nasycenia) cieczy.

Krok 4 – Kolumna musi zapewnić dobry kontakt gazu z cieczą

W kolumnie wypełnionej gaz i ciecz nie mogą po prostu przepływać obok siebie. Rolą wypełnienia jest zapewnienie **dużej powierzchni kontaktu faz** przy rozsądnym **spadku ciśnienia**.



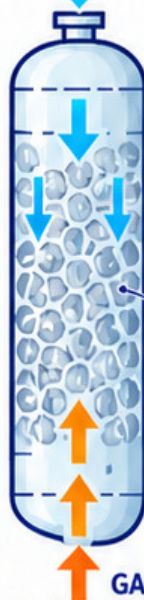
Cel modułu

Wyjaśnić, jak wypełnienie kolumny zapewnia kontakt między gazem a cieczą, na czym polega dobre zwilżenie oraz dlaczego ważny jest spadek ciśnienia.

CO₂: GAZ → CIECZ

Gaz (zawierający CO₂) przepływa w górę, a ciecz spływa w dół, kontaktując się na powierzchni wypełnienia.

CIECZ
(wejście, od góry)



WYPEŁNIENIE
(duża powierzchnia kontaktu faz)

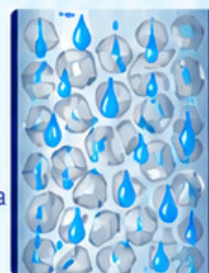
GAZ
(wejście, od dołu)



Co oznacza dobre zwilżenie?

Ciecz powinna rozprzodzać się możliwie równomiernie na powierzchni wypełnienia. Jeśli część kolumny pozostaje sucha, efektywna powierzchnia kontaktu maleje, a wykorzystanie wypełnienia pogarsza się.

DOBRE ROZPROWADZENIE



Ciecz równomiernie pokrywa powierzchnię wypełnienia.

ZŁE ROZPROWADZENIE



Ciecz płynie głównie przy jednej ścianie. Część wypełnienia pozostaje sucha.



Nierównomierne rozprzodzenie

- preferencyjne kanały przepływu
- część wypełnienia pracuje słabo
- wymiana masy może być gorsza od oczekiwanej.



Spadek ciśnienia

ΔP

Gaz przepływający przez wypełnienie napotyka opór przepływu. Spadek ciśnienia (ΔP) między dołem a górą kolumny zwykle rośnie wraz ze wzrostem przepływu gazu.



Dlaczego mierzymy ΔP ?

- zmiana obciążenia kolumny
- zalewanie
- zanieczyszczenie wypełnienia
- problem z przepływem.



Zalewanie

Jeśli przepływy gazu i cieczy są zbyt duże, ciecz ma trudności ze spływaniem w dół, ponieważ gaz utrudnia jej przepływ. Dochodzi do gromadzenia się cieczy w wypełnieniu, co pogarsza kontakt faz i może prowadzić do zalewania kolumny.

Objawy zalewania:

- gwałtowny wzrost ΔP
- niestabilność procesu
- pogorszenie skuteczności separacji.

spadek ciśnienia
 ΔP



Zakresy pracy kolumny

Zbyt mały lub zbyt duży przepływ gazu pogarsza pracę kolumny. Optymalny zakres zapewnia stabilną i skuteczną absorpcję.

mały przepływ

niewykorzystana kolumna



obszar roboczy

stabilna absorpcja



zbyt duży przepływ

ryzyko zalewania

Diagnoza operacyjna – CO_2 na wyjściu wzrósł z 1,1% do 3,0%

Jak zamienić teorię absorpcji na praktyczną procedurę rozwiązywania problemów?



Sytuacja procesowa

Normalnie absorber daje gaz z zawartością około 1,1 mol% CO_2 . Po pewnym czasie analizator pokazuje 3,0 mol% CO_2 . Absorber nie spełnia już wymaganego stopnia usunięcia CO_2 .



Cel modułu

Pokazać, jak krok po kroku zdiagnozować przyczyny wzrostu stężenia CO_2 na wyjściu z absorbera, wykorzystując wiedzę o bilansie, równowadze, wymianie masy i hydraulice oraz praktyczne obserwacje z instalacji.

1

Sprawdź strumień gazu

Czy strumień gazu wzrósł w porównaniu z warunkami normalnymi?

Większy strumień oznacza:

- więcej CO_2 do usunięcia,
- krótszy efektywny czas kontaktu,
- wyższe obciążenie hydrauliczne kolumny.



GAZ

za duży przepływ /
wyższe stężenie CO_2



CIECZ

za mały przepływ /
zbyt wysoka temperatura /
zbyt duże obciążenie



KOLUMNNA

złe zwilżenie /
zalewanie /
zanieczyszczenie

CO_2 OUT
ZA WYSOKIE



POMIAR

błąd analizatora

2

Sprawdź przepływ cieczy

Czy przepływ cieczy absorbującej nie zmniejszył się?

Możliwe przyczyny:

- problem z pompą,
- zamknięty zawór,
- zanieczyszczony filtr,
- błędne wskazanie przepływomierza.



Sprawdź jakość cieczy absorbującej

Czy ciecz jest prawidłowo regenerowana?

Czy jest bardziej obciążona CO_2 ?

Czy zmienił się jej skład (np. stężenie aminy)?

3

Sprawdź temperaturę cieczy

Czy temperatura cieczy absorbującej wzrosła?

Porównaj:

T_{aktualna} vs T_{normalna}



5

Sprawdź ΔP kolumny

Jeśli spadek ciśnienia wzrósł gwałtownie, rozważ problemy hydrauliczne, w tym zalewanie.

Jeśli ΔP zmienił się w nienaturalny sposób (np. spadł lub waha się), zbadaj przepływ lub stan wyposażenia.



7

Potwierdź pomiar

Czy wynik 3,0 mol% CO_2 jest wiarygodny?

Sprawdź:

- kalibrację analizatora,
- linię poboru próbki,
- warunki kondycjonowania próbki,
- porównanie z drugim pomiarem (np. laboratorium lub drugi analizator).



GAZ OCZYSZCZONY
(zbyt dużo CO_2)

GAZ
z CO_2



CIECZ
absorbująca

6

Sprawdź dystrybucję cieczy

Czy dystrybutor cieczy nie jest zanieczyszczony lub uszkodzony?

Może to powodować:

- nierównomierne zwilżenie,
- kanałowanie,
- spadek efektywnej powierzchni kontaktu.



Skuteczność absorbera wynika z jednoczesnego działania:

**bilansu + równowagi +
wymiany masy + hydrauliki.**



Co dalej?

W ostatnim przypadku przeanalizujemy urządzenie, które często odpowiada za utrzymanie przepływu cieczy absorbującej — **pompę**.

MODUŁ 06

Przepływ cieczy i problemy z pompą

Dlaczego pompa nie zawsze dostarcza taki przepływ, jakiego oczekujemy?



Cel modułu

Pokazać, że przepływ w instalacji nie jest wyznaczany wyłącznie przez pompę. Rzeczywisty punkt pracy wynika z interakcji między **charakterystyką pompy** a **oporem całej instalacji**.

Poznasz pojęcie **NPSH** i zrozumiesz mechanizm **kawitacji**.

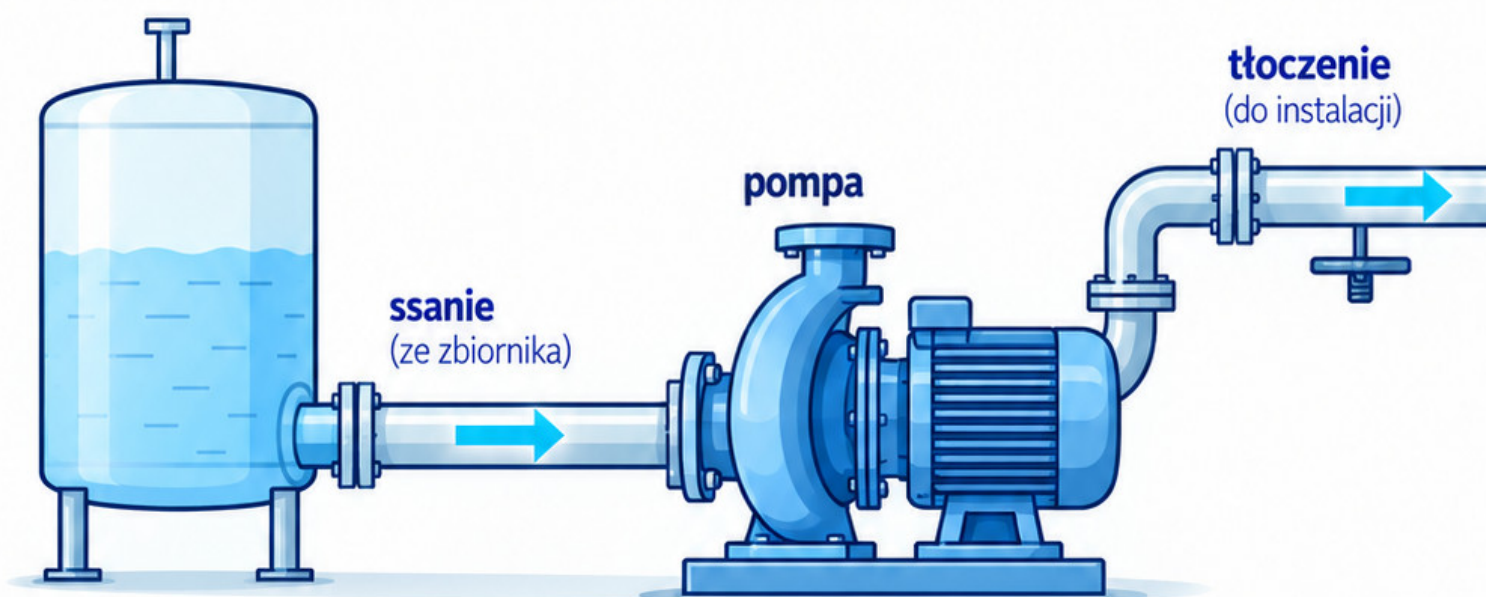


Sytuacja procesowa

Pompa przez długi czas tłoczyła ciecz z wydajnością **40 m³/h**. Operator zauważył spadek przepływu do **28 m³/h**. Jednocześnie pojawiają się:

- hałas,
- drgania,
- niestabilne wskazania ciśnienia.

Co jest tego przyczyną?



Główne pytanie inżynierskie:

Czy problem leży w pompie, w instalacji, czy w warunkach na ssaniu?

OBJAW



PUNKT PRACY



OPORY



NPSH



DIAGNOZA



Pompa i instalacja pracują jako jeden układ.

Przypadek 06: przepływ spadł z 40 do 28 m³/h

Sytuacja procesowa

Pompa odśrodkowa tłoczy ciecz ze zbiornika procesowego do pozostałej części instalacji. Normalnie instalacja pracowała stabilnie, przy przepływie $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$. Po pewnym czasie zaobserwowano spadek przepływu do $Q = 28 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz pojawiły się dodatkowe objawy: nietypowy hałas, drgania pompy i wahania ciśnienia tłoczenia.



Przepływ (nominalny)

$Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$

Stabilna praca instalacji.



Przepływ (po zmianie)

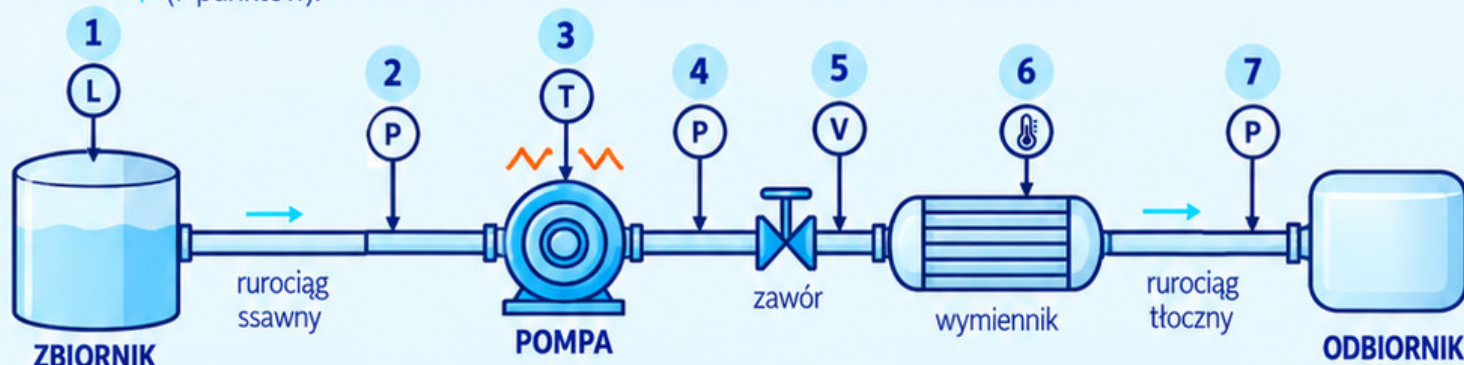
$Q = 28 \text{ m}^3/\text{h}$

Nietypowy hałas, drgania pompy, wahania ciśnienia tłoczenia.



Schemat instalacji i punkty pomiarowe

Uproszczony schemat instalacji z zaznaczonymi głównymi punktami pomiarowymi (7 punktów).



Co może spowodować tak duży spadek przepływu?

Spadek przepływu może wynikać z różnych przyczyn – zarówno po stronie instalacji, pompy, jak i warunków pracy. Poniżej najczęstsze grupy przyczyn.



1. Zwiększony opór instalacji

- przymknięty zawór
- zanieczyszczony filtr
- osady w wymienniku
- zwężenie przewodu.



2. Problem z pompą

- zużycie wirnika
- nieprawidłowe obroty
- uszkodzenie mechaniczne.



3. Problem po stronie ssawnej

- niski poziom cieczy
- zatkany filtr ssawny
- zbyt duże straty ciśnienia
- zasysanie gazu.



4. Kawitacja

- zbyt niskie ciśnienie cieczy przy wejściu do pompy.



5. Błąd pomiarowy

- niewiarygodny przepływomierz lub przetwornik ciśnienia.



Nie zaczynaj od demontażu pompy

Spadek przepływu nie oznacza automatycznie, że pompa jest uszkodzona. Najpierw sprawdź, czy zmieniła się charakterystyka instalacji (np. większe opory, zmiana ustawienia zaworów, zanieczyszczenia, inne warunki pracy).



Jakie dane zbierzemy?

Aby znaleźć przyczynę spadku przepływu, należy zebrać i przeanalizować następujące dane procesowe:

- przepływ
- ciśnienie na ssaniu
- ciśnienie na tłoczeniu
- poziom w zbiorniku
- położenie zaworów
- temperaturę cieczy
- prędkość obrotową
- drgania i hałas.

Krok 1 — Punkt pracy powstaje na przecięciu dwóch krzywych

Pompa i instalacja tworzą jeden układ. Rzeczywisty przepływ (punkt pracy) wynika z przecięcia charakterystyki pompy z charakterystyką instalacji.



Krzywa pompy

Dla typowej pompy odśrodkowej pracującej ze stałą prędkością obrotową, wraz ze wzrostem przepływu dostępna wysokość podnoszenia zwykle maleje.

$$H_{pompy} = f(Q)$$

Kształt krzywej zależy od typu pompy i średnicy wirnika.



Krzywa instalacji

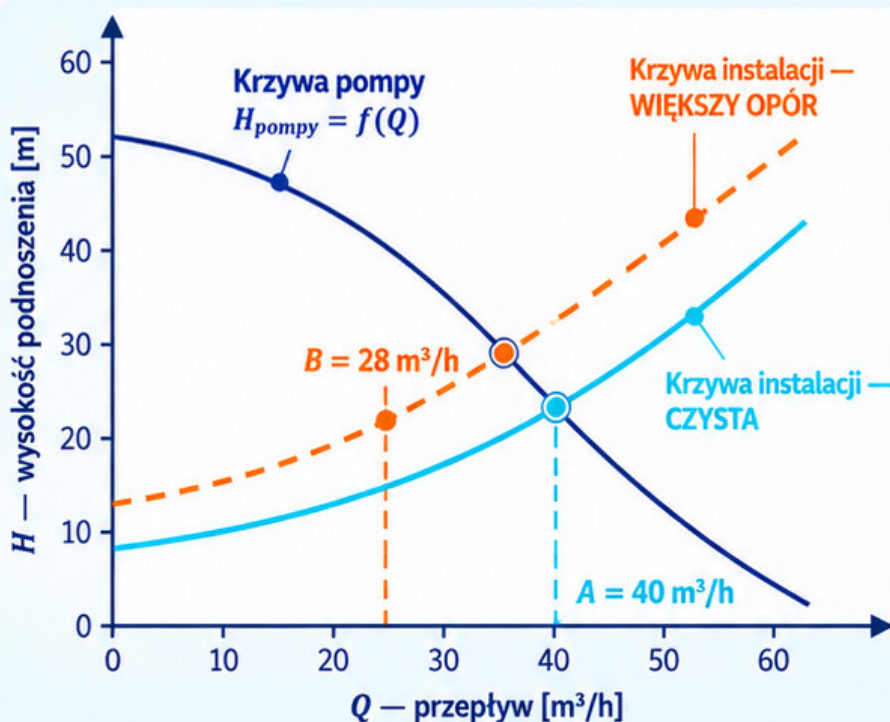
Instalacja ma własną charakterystykę — pompa musi pokonać:

- różnicę poziomów,
- straty ciśnienia w rurociągach,
- straty na zaworach (armatura),
- straty w wymiennikach ciepła,
- straty w innych urządzeniach.

Straty tarcia zwykle rosną w przybliżeniu z kwadratem przepływu:

$$H_{inst} = H_{stat} + k \cdot Q^2$$

gdzie H_{stat} — wysokość statyczna (różnica poziomów),
 k — współczynnik strat (zależny od instalacji).



Co się dzieje, gdy rośnie opór instalacji?

Jeśli opór instalacji rośnie, np. z powodu zanieczyszczonego filtra, częściowo zamkniętego zaworu lub odkładania się zanieczyszczeń w wymienniku ciepła, krzywa instalacji przesuwają się do góry. Nowy punkt pracy występuje przy mniejszym przepływie.



Wskazówka diagnostyczna

Jeśli przepływ spada, a różnica ciśnień na elemencie instalacji rośnie (np. na filtrze, zaworze, wymienniku), należy podejrzewać **zwiększonego oporu przepływu** (zanieczyszczenia, częściowe zamknięcie armatury, itp.).



Najważniejszy wniosek

Pompa nie narzuca jednego, stałego przepływu niezależnego od instalacji. Rzeczywisty przepływ wynika z równowagi między:

tym, co może dostarczyć pompa
(krzywa pompy),



tym, czego wymaga instalacja
(krzywa instalacji).

Krok 2 — Co dzieje się, gdy ciśnienie na ssaniu jest za niskie?

Ciecz wpływająca do pompy musi mieć odpowiednio wysokie ciśnienie. Jeśli lokalne ciśnienie spadnie zbyt blisko ciśnienia pary nasyconej, mogą tworzyć się pęcherzyki pary. Gdy trafią one do obszaru wyższego ciśnienia, gwałtownie się zapadają — to zjawisko nazywamy **kawitacją**.



Jak powstaje kawitacja?

Kawitacja to cykl: niskie ciśnienie → powstawanie pęcherzyków → obszar wyższego ciśnienia → gwałtowne zapadanie pęcherzyków.



Możliwe skutki kawitacji

- hałas przypominający przepływ żwiru
- drgania
- spadek wydajności
- niestabilna praca
- erozja wirnika
- skrócenie żywotności urządzenia



W skrócie

Kawitacja powstaje, gdy ciśnienie lokalne spada poniżej ciśnienia pary nasyconej cieczy, a następnie pęcherzyki pary zapadają się w obszarze wyższego ciśnienia, powodując mikrouderzenia.



NPSH — klucz do uniknięcia kawitacji

NPSH pozwala ocenić, czy w danych warunkach ciecz na ssaniu ma wystarczające ciśnienie, aby nie ulegała lokalnemu odparowaniu.

NPSH_a — dostępny

Wynika z rzeczywistych warunków po stronie ssawnej instalacji (ciśnienie w zbiorniku, wysokość ssania, straty w rurociągu, temperatura cieczy itd.).

NPSH_r — wymagany przez pompę

Jest określany przez producenta pompy. To minimalna wartość NPSH, przy której pompa pracuje poprawnie i bez kawitacji.



NPSH_a musi być odpowiednio większy od NPSH_r.



Co może obniżyć NPSH dostępny?

- niski poziom cieczy w zbiorniku
- wysoka temperatura cieczy
- duże straty w przewodzie ssawnym
- zatkany filtr
- zbyt mała średnica rurociągu
- niekorzystna geometria ssania



Dlaczego temperatura jest ważna?

Wraz ze wzrostem temperatury cieczy rośnie również ciśnienie pary nasyconej, dlatego lokalne odparowanie staje się łatwiejsze.



Ten sam układ może działać poprawnie w niższej temperaturze, a mieć problemy w wyższej.

To nie jest uniwersalny próg, ale logiczny przykład:

25°C

pompa pracuje prawidłowo



80°C

ta sama pompa może mieć problemy z kawitacją



Kawitacja ≠ zasysanie powietrza

Oba zjawiska mogą powodować hałas, drgania i niestabilną pracę, ale mają różne przyczyny:

Kawitacja

- pęcherzyki pary powstają z pompowanej cieczy (w wyniku niskiego ciśnienia)
- to zjawisko termodynamiczne

Zasysanie powietrza

- gaz przedostaje się z zewnątrz (np. przez nieszczelności) lub ze zbiornika
- do instalacji dostaje się gaz, a nie para z cieczy

Diagnoza końcowa – przepływ 28 m³/h, hałas i drgania

Jak krok po kroku zidentyfikować przyczyny spadku przepływu i niepokojących objawów?



Warunki nominalne (stabilna praca)

Q = 40 m³/h

Proces pracował stabilnie, bez nadmiernego hałasu i drgań.



Aktualna sytuacja

Q = 28 m³/h

hałas + drgania + niestabilne ciśnienie

Spadek przepływu o 30% i niepokojące objawy.



Cel diagnozy

Zidentyfikować przyczyny zmiany warunków pracy i przywrócić stabilny, bezpieczny przepływ na poziomie 40 m³/h.

1

Potwierdź przepływ

Upewnij się, że spadek przepływu jest rzeczywisty.



- porównaj z innym pomiarem (np. przepływomierz, pomiar masowy),
- sprawdź poziom w zbiorniku,
- wykonaj bilans materiałowy,
- porównaj z danymi historycznymi (trendy z DCS/SCADA).

2

Sprawdź ciśnienie ssania

Jeśli ciśnienie ssania spadło, poszukaj przyczyn po stronie zasilania:



- poziom w zbiorniku,
- zawory na ssaniu,
- zanieczyszczony filtr / sito,
- straty ciśnienia w rurociągu ssawnym (kolana, zwiężenia).

3

Sprawdź temperaturę cieczy

Jeśli temperatura cieczy wzrosła, zwiększyło się ciśnienie pary nasyconej, co mogło obniżyć zapas antykawitacyjny (NPSH_A).



- porównaj aktualną temperaturę z warunkami nominalnymi,
- sprawdź źródła podgrzewania (np. wymiennik, recyrkulacja).

4

Sprawdź filtr lub sito ssawne

Zanieczyszczenie filtra/sita zwiększa opory przepływu, obniża ciśnienie ssania, zmniejsza przepływ i sprzyja kawitacji.



- sprawdź wskazania Δp na filtrze,
- oczyść lub wymień wkład/sito,
- ocenić stan króćców i uszczelnień.

Drzewo diagnostyczne

Główne obszary możliwych przyczyn spadku przepływu.



INSTALACJA
zawór / filtr / opory / wymiennik



SSANIE
poziom / NPSH / gaz / temperatura

Q
ZA NISKIE



POMPA
obroty / zużycie / uszkodzenie



POMIAR
przepływ / ciśnienie



Nie pytaj tylko: „Co jest zepsute?”

Zapytaj: „Co zmieniło się pomiędzy stabilną pracą przy 40 m³/h a obecną pracą przy 28 m³/h?”

5

Sprawdź pozycję zaworów po stronie tłocznej



Łtawienie zaworu zwiększa opory układu, co powoduje przesunięcie punktu pracy pompy w kierunku mniejszego przepływu.

- sprawdź pozycję i nastawy zaworów,
- upewnij się, że nie nastąpiło niezamierzone łtawienie,
- sprawdź elementy regulacyjne (np. zawór regulacyjny, by-pass).

6

Porównaj rzeczywiste dane z krzywą pompy



Na podstawie przepływu, ciśnienia ssania, ciśnienia tłoczenia i gęstości cieczy oszacuj rzeczywisty punkt pracy i porównaj z charakterystyką pompy.

- jeśli punkt pracy znacząco odbiega od oczekiwanego, sprawdź:
- stan pompy (zużycie, uszkodzenia),
- warunki pracy (ciśnienia, gęstość, lepkość, temperatura).

7

Sprawdź prędkość obrotową



Zmniejszona prędkość obrotowa może powodować jednoczesny spadek przepływu i wysokości podnoszenia.

- sprawdź wskazania falownika/silnika,
- porównaj z wartością nominalną,
- sprawdź sprzęgło, paski, ewentualny poślizg.

8

Oceń objawy mechaniczne



Nietypowe drgania, hałas, temperatura łożysk, wycieki mogą wskazywać na problem techniczny pompy, wymagający przeglądu.

- sprawdź temperaturę łożysk,
- oceń poziom drgań,
- posłuchaj charakteru hałasu,
- sprawdź wycieki i stan uszczelnień,
- zaplanuj inspekcję techniczną.



Problemy przepływowe należy analizować jako problem całego systemu:



zbiornik



ssanie



pompa



rurociąg + aparaty



zawory

Od objawu do decyzji — checklista inżyniera procesu

W sześciu przypadkach przeanalizowaliśmy różne urządzenia i zjawiska, ale sposób rozwiązywania problemów pozostał podobny. Nie zaczynaliśmy od przypadkowego wzoru, tylko od **zrozumienia procesu**.

1



Zdefiniuj problem

Zapisz konkretną zmienną, a nie „proces źle działa”, np. „temperatura wzrosła z 40°C do 52°C” lub „przepływ spadł z 40 do 28 m³/h”.

2



Narysuj proces

Zaznacz dopływy, odpływy, urządzenia, granice bilansowe i punkty pomiarowe.

Jeżeli nie potrafisz narysować procesu, prawdopodobnie jeszcze go nie rozumiesz.

3



Określ, co jest zachowywane

Jaki bilans jest kluczowy w danym problemie?

- MASĘ?
- SKŁADNIK?
- ENERGIĘ?
- PĘD / CIŚNIENIE?

4



Oddziel dane od niewiadomych

Wypisz, co wiemy, a czego szukamy.

WIEMY:

(np. T, p, F, x, skład)

SZUKAMY:

(np. T, F, x, Q, k)

Sprawdź jednostki, podstawę stężeń i warunki temperatury oraz ciśnienia.

5



Zidentyfikuj zjawisko dominujące

Które zjawisko ma największy wpływ na badany problem?

- mieszania
- wymiany ciepła
- równowagi fazowej
- kinetyki
- wymiany masy
- przepływu płynu

6



Zbuduj najprostszy użyteczny model

Zacznij od najprostszego modelu, który opisuje istotę problemu. Dopiero potem zwiększaj szczegółowość.

PROSTY MODEL → WERYFIKACJA → WIĘKSZA SZCZEGÓŁOWOŚĆ

7



Wykonaj obliczenia z jednostkami

Starannie podstaw wartości, prowadź obliczenia z jednostkami.

⚠️ Jeśli jednostki się nie zgadzają, zatrzymaj się i sprawdź równanie.

8



Sprawdź sens fizyczny

Czy wynik ma właściwy znak?
Czy mieści się w rozsądnym zakresie wartości?
Czy domyka bilans?
Czy jest zgodny z rzeczywistością fizyczną?

9



Porównaj „BYŁO” i „JEST”

Porównaj: przepływy, temperatury, ciśnienia, składy, położenia zaworów, warunki zasilania. Poszukaj parametru, który zmienił się jako pierwszy.

10



Zamień wynik na decyzję

Co oznacza wynik dla procesu?
Czy należy:

- zmienić przepływ?
- sprawdzić wymiennik?
- zmniejszyć obciążenie?
- zweryfikować analizator?
- oczyścić filtr?
- sprawdzić warunki pracy pompy?

6 przypadków, 1 sposób myślenia



BILANS MASY

Gdzie znika lub skąd się bierze składnik?



WYMIANA CIEPŁA

Co powoduje zmianę temperatury i jak duży jest przepływ ciepła?



DESTYLACJA

Jak zmienia się skład między fazami i czy osiągamy rozdział?



REAKTOR

Jak szybko zachodzi reakcja i co ogranicza przemianę?



ABSORPCJA

Ile składnika może przejść do drugiej fazy i co decyduje o skuteczności?



POMPA

Czy zapewniamy odpowiedni przepływ i ciśnienie i co go ogranicza?



**Nie ucz się tylko wzorów.
Naucz się patrzeć na proces
jak inżynier.**

Najpierw **zrozum** zjawisko. Potem **zapisz** bilans. Następnie **wykonaj** obliczenia. Na końcu **sprawdź**, co wynik oznacza w rzeczywistej instalacji.

