

# Moduł 3: Zasady projektowania reaktorów chemicznych

Projektowanie reaktorów chemicznych

dr inż. Jan Krzysztoforski

Semestr letni 2021

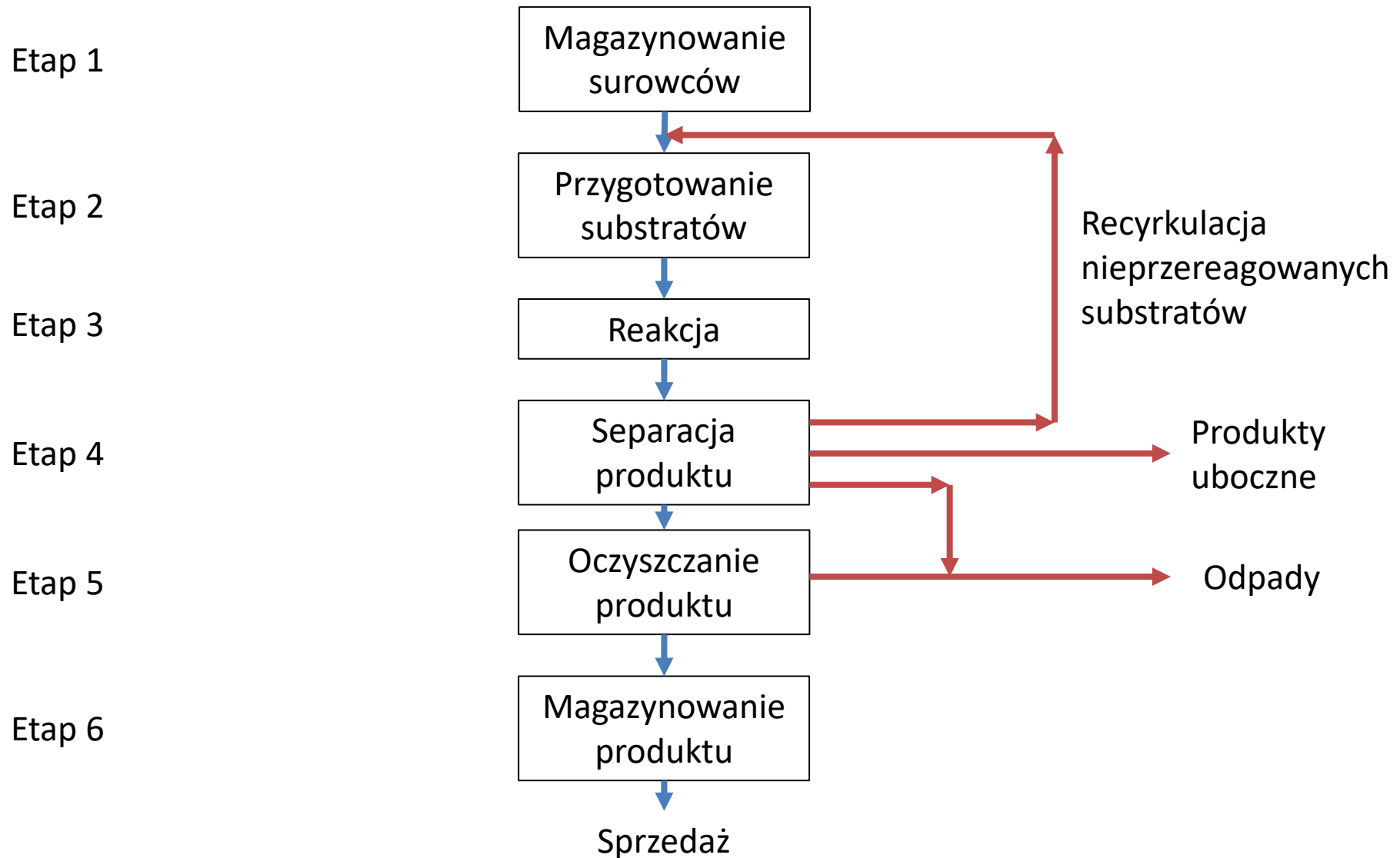
# Treść modułu

- Procedura projektowania reaktorów chemicznych (powtórzenie)
- Charakterystyka reakcji chemicznej
- Budowa i zasada działania reaktorów chemicznych
- Wybrane aspekty projektowania reaktorów chemicznych
  - Wybór warunków prowadzenia reakcji chemicznej
  - Wybór podzespołów
  - Bezpieczeństwo
  - Analiza kosztów
  - Powiększanie skali
  - Automatyka procesowa

# Zakres projektu reaktora chemicznego

- Typ i konstrukcja reaktora
- Bilans pędu, masy i energii
- Zestawienie strumieni wlotowych i wylotowych (w tym zapotrzebowanie na media energetyczne)
- Wytyczne do zaprojektowania aparatów pomocniczych
- Projekt aparatury kontrolno-pomiarowej oraz układów regulacji automatycznej
- Dobór wszystkich komponentów reaktora
- Analiza kosztów
- Projekt wykonawczy reaktora

# Schemat instalacji przemysłowej

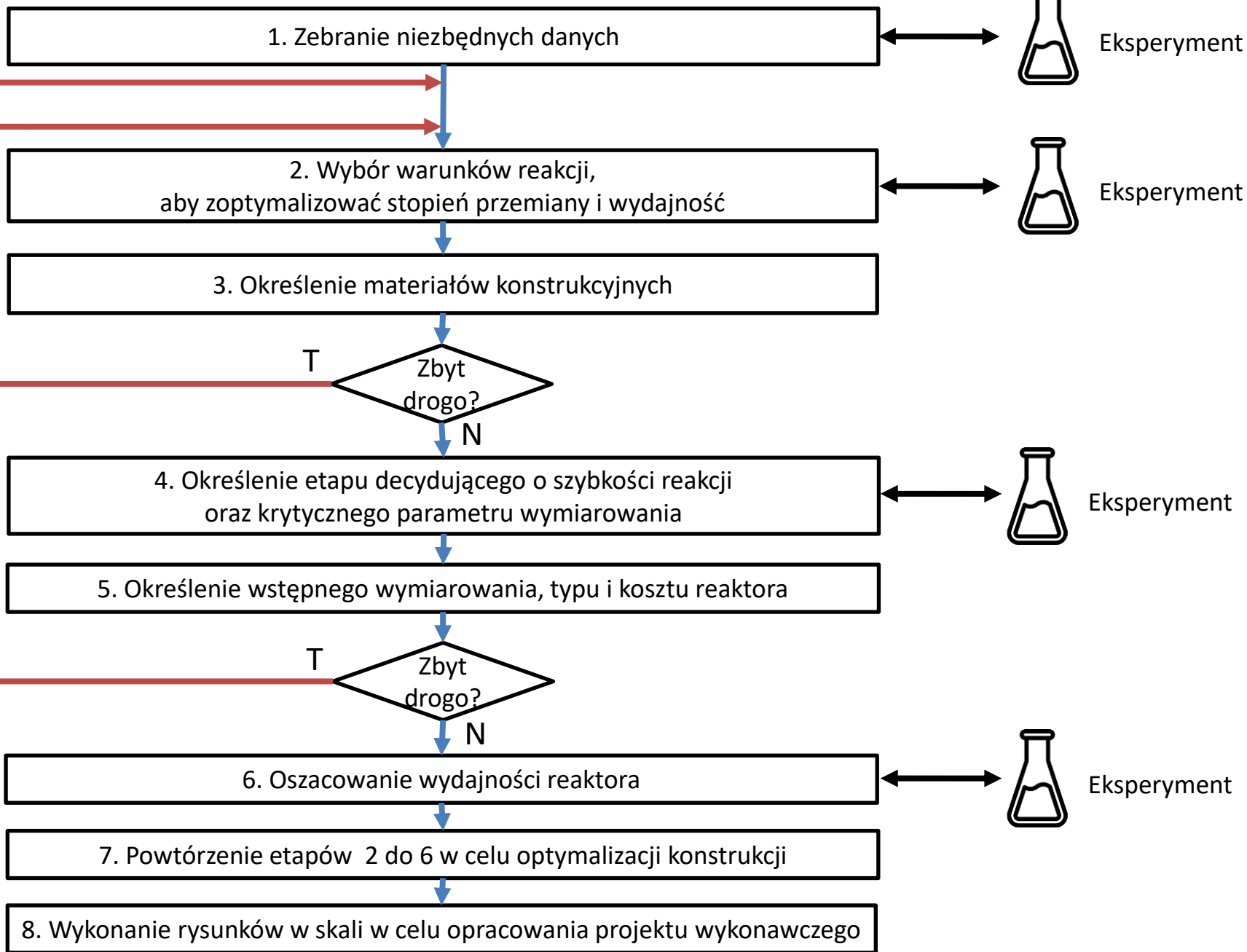


# Procedura projektowania reaktorów chemicznych

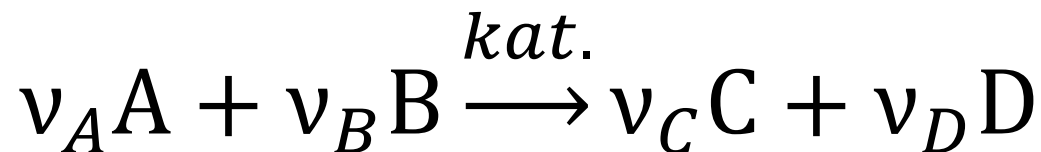
Dane wejściowe:

- Produkt
- Reakcja chemiczna
- Zdolność produkcyjna
- Stopień przemiany, selektywność, wydajność reakcji (wstępne założenia)

Procedura projektowania reaktorów chemicznych wg:  
**Towler G., Sinnott, R., Chemical Engineering Design. Principles. Practice and Economics of Plant and Process Design, Elsevier, 2013 (Rozdział 15).**



# Charakterystyka reakcji chemicznej



- Równanie stechiometryczne (substraty i produkty, ich proporcje)
- Mechanizm (etapy reakcji, liczba faz, katalizator)
- Kinetyka (szybkość reakcji w funkcji warunków reakcji)
- Termodynamika
  - Szybkość reakcji (stała szybkości reakcji)
  - Efekt cieplny
  - Równowaga reakcji

Szczegółowe informacje:

Inżynieria Reaktorów Chemicznych 1, Moduł 2

# Budowa i zasada działania reaktorów chemicznych

Rodzaje omawianych reaktorów:

- Reaktory jednofazowe
  - Niekatalityczne
  - Katalityczne
- Reaktory wielofazowe
  - Niekatalityczne
  - Katalityczne
- Bioreaktory
- Reaktory specjalne



# Projektowanie reaktorów chemicznych

Dwa podstawowe typy zadań projektowych:

- Ile wynosić będzie stopień przemiany  $\alpha_A$  w danym typie reaktora dla zadanego czasu przestrzennego  $\tau$ ?
- Ile musi wynosić czas przestrzenny  $\tau$ , aby w danym typie reaktora uzyskać zadany stopień przemiany  $\alpha_A$ ?

Rozwiązujemy tzw. równanie wydajności reaktora:

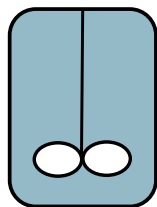
$$f(\alpha_A, \tau, \mathbf{P}) = 0$$

Inne typy zadań projektowych: maksymalizacja konwersji, selektywności, wydajności reakcji przy zadanych ograniczeniach.

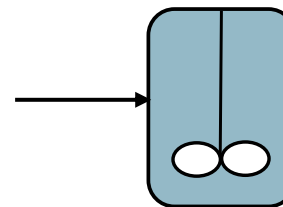
Problem doboru układu reaktorów można zawsze sprowadzić do problemu rozwiązania układu równań ww. typu.

# Reaktory idealne

REAKTOR OKRESOWY

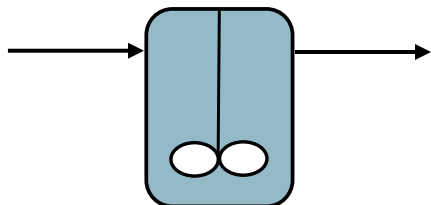


REAKTOR PÓŁOKRESOWY



## REAKTORY CIĄGŁE

Reaktor zbiornikowy  
z idealnym wymieszaniem

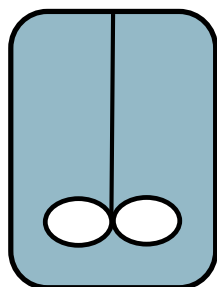


Reaktor rurowy  
z przepływem tłokowym



Szczegółowe informacje: Inżynieria Reaktorów Chemicznych 1, Moduł 3

# Reaktor okresowy



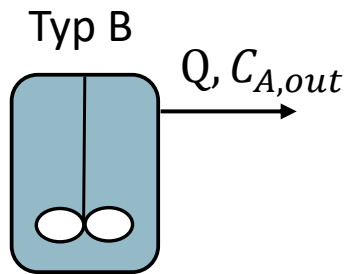
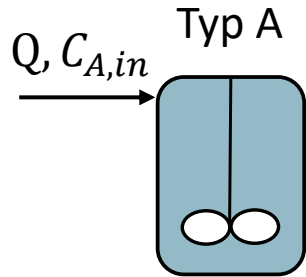
## Charakterystyka:

- Nie wymienia masy z otoczeniem
- Pracuje zawsze w stanie nieustalonym
- Typowa konstrukcja: reaktor zbiornikowy z mieszadłem i wymiennikiem ciepła
- Zmiana objętości zazwyczaj pomijalnie mała
- Zaleta: możliwość uzyskania wysokich stopni przemiany przy odpowiednio długim czasie prowadzenia reakcji
- Wada: wysokie koszty ruchowe (napełnianie, opróżnianie i czyszczenia reaktora)

## Zastosowanie:

- badanie kinetyki reakcji
- produkcja eksperymentalna
- produkcja drogich produktów w małych ilościach (m.in. biotechnologia, przemysł farmaceutyczny)

# Reaktor półokresowy



## Charakterystyka:

- Reaktor pracuje podobnie do reaktora okresowego, ale jest dodatkowo wyposażony w:
  - A. strumień wlotowy (z substratem), ALBO
  - B. Strumień wylotowy (głównie z produktem).
- Pracuje w warunkach nieustalonych.
- Umożliwia precyzyjną kontrolę szybkości reakcji.
- Stosowany jest do reakcji w fazie ciekłej lub w układzie gaz-ciecz.

## Zastosowanie:

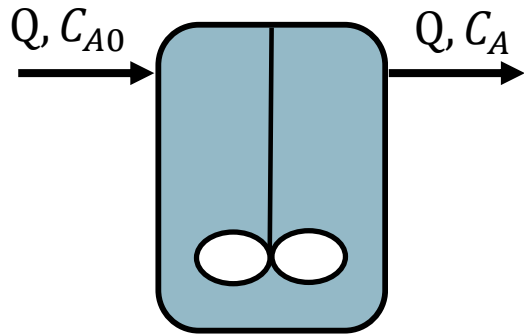
### A. Reaktor półokresowy ze strumieniem wlotowym:

- reakcje silnie egzotermiczne,
- reakcje bardzo szybkie,
- reakcje złożone, kontrolowane dopływem jednego z substratów.

### B. Reaktor półokresowy ze strumieniem wylotowym:

- reakcje odwracalne (odprowadzanie produktu z układu reakcyjnego).

# Reaktor zbiornikowy z idealnym wymieszaniem (CSTR)



## Charakterystyka:

- Do reaktora w sposób ciągły dopływają substraty i w sposób ciągły odpływa mieszanina reakcyjna.
- We wnętrzu reaktora panuje idealne wymieszanie (stąd skład strumienia wylotowego odpowiada składowi mieszaniny reakcyjnej).
- Najczęściej pracuje w stanie ustalonym.
- Zalety: duża pojemność cieplna, tania konstrukcja, umożliwia uzyskanie produktu o wysokiej i powtarzalnej jakości, łatwa kontrola temperatury.
- Wady: Możliwe występowanie stref martwych lub bocznikowania.

## Zastosowanie:

- Produkcje wielkotonażowe
- Reakcje homogeniczne w fazie ciekłej, wymagające mieszania (niekoniecznie szybkie)
- Bioreaktory, w szczególności fermentory

# Reaktor rurowy z przepływem tłokowym (PFR)



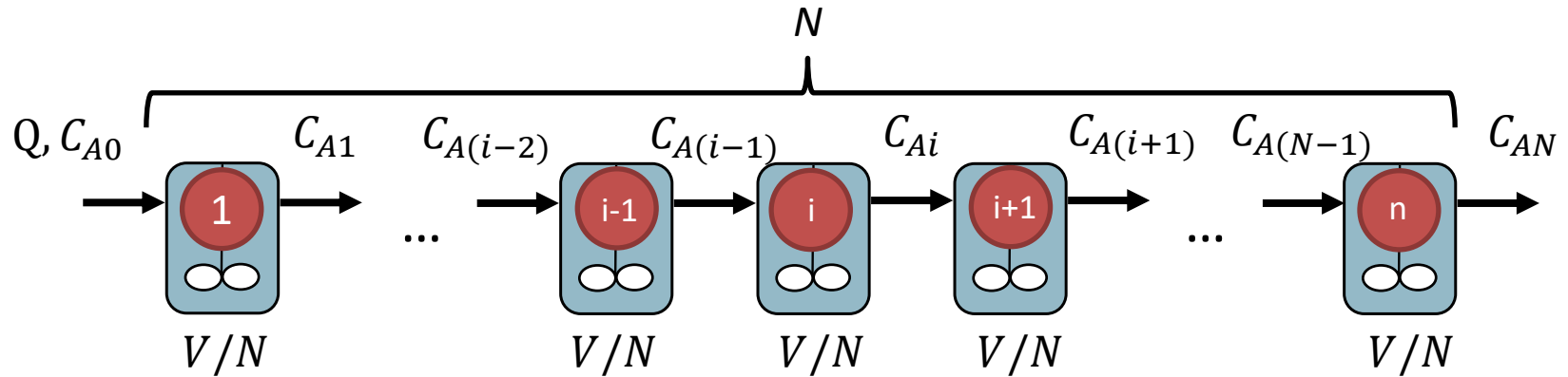
## Charakterystyka:

- Reaktor zrealizowany w postaci rury
- Przepływ tłokowy (płaski profil prędkości), założenie o całkowitej segregacji w kierunku osiowym oraz o idealnym wymieszaniu w kierunku promieniowym
- Skład mieszaniny reakcyjnej zmienia się wzdłuż reaktora
- Praca zazwyczaj w stanie ustalonym (człon akumulacyjny jest równy zero)

## Zastosowania:

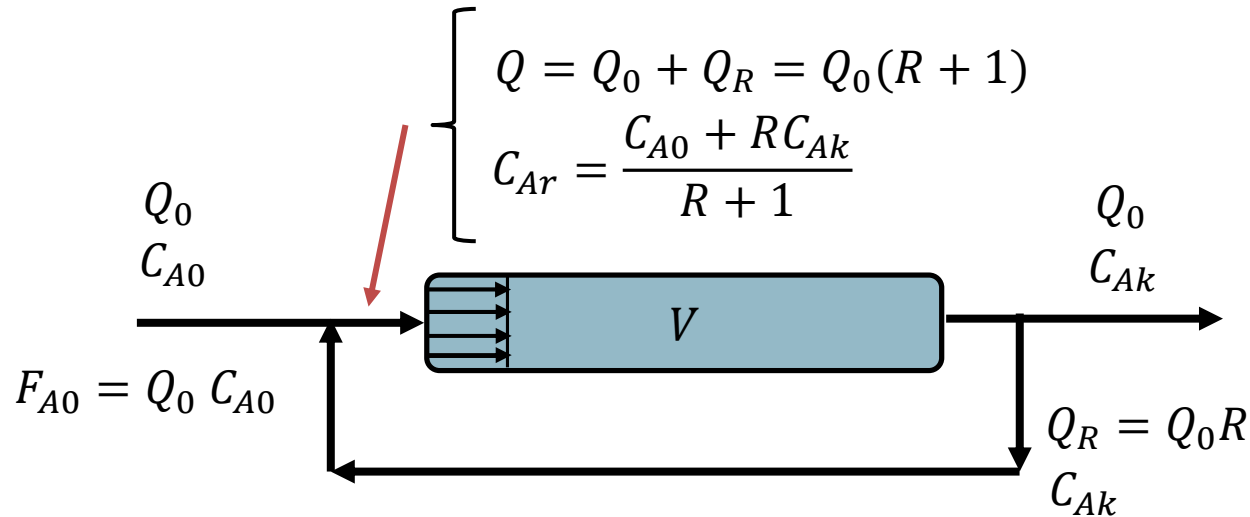
- reakcje szybkie
- reakcje głównie w fazie gazowej, lecz również w fazie ciekłej (niekatalityczne i katalityczne)

# Kaskada reaktorów CSTR



- Uzyskanie charakterystyki układu zbliżonej do reaktora rurowego z przepływem tłokowym
- Możliwość chłodzenia/grzania międzystopniowego
- Możliwość zastosowania zmiennych warunków prowadzenia reakcji w kolejnych stopniach kaskady

# Reaktor rurowy z recyrkulacją



- Realizacja charakterystyki reaktora CSTR w aparacie o konstrukcji odpowiadającej reaktorowi PFR
- Możliwość chłodzenia/grzania w pętli cyrkulacyjnej
- Reaktory kontaktowe (do reakcji katalitycznych ze katalizatorem stałym w postaci nieruchomego złoża)



# Układy reaktorów

- Układ szeregowy
- Układ równoległy
- Układ szeregowo-równoległy
- Układ z separatorem i recyrkulacją

# Zasady doboru reaktorów

## Zasada 1: Dla reakcji pojedynczych

W celu minimalizacji objętości reaktora:

- Dla reagentów, których rząd w reakcji wynosi  $n > 0$ , utrzymujemy wysokie stężenia.
- Dla reagentów, których rząd w reakcji wynosi  $n < 0$ , utrzymujemy niskie stężenia.
- Dla reagentów, których rząd w reakcji wynosi  $n = 0$ , ich stężenia nie mają znaczenia.

## Zasada 2: Dla reakcji szeregowych

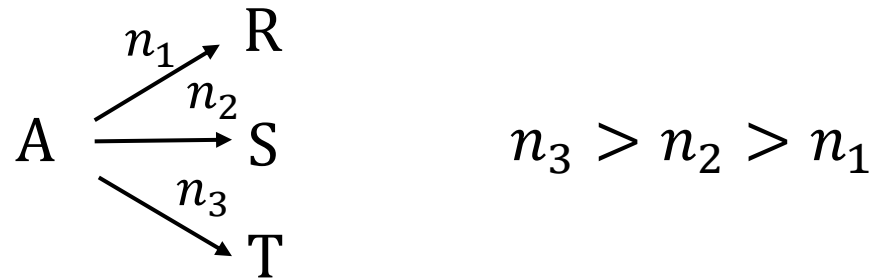
Dla reakcji szeregowej  $A \rightarrow R \rightarrow S \rightarrow T \rightarrow \dots Y \rightarrow Z$ :

W celu maksymalizacji produkcji produktu pośredniego, należy unikać mieszania strumieni różniących się składem. Lepszy będzie zatem reaktor PFR niż reaktor CSTR lub reaktor PFR z recyrkulacją.

# Zasady doboru reaktorów

## Zasada 3: Dla reakcji równoległych

Dla reakcji równoległych o różnej rzędowości reakcji:



W celu uzyskania najlepszego rozkładu produktów:

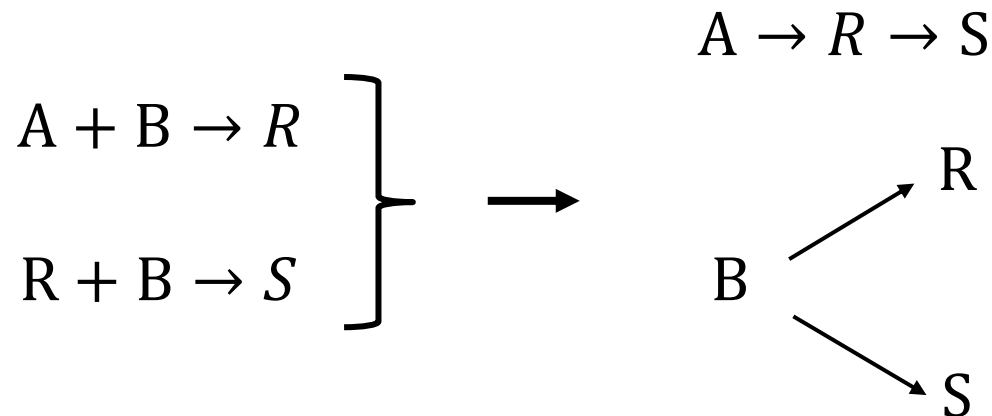
- wysokie stężenie  $C_A$  faworyzuje reakcję o najwyższej rzędowości (T),
- niskie stężenie  $C_A$  faworyzuje reakcję o najniższej rzędowości (R),
- jeśli pożądaný produkt (S) powstaje w reakcji o pośredniej rzędowości, pewna pośrednia wartość  $C_A$  będzie optymalna,
- dla reakcji równoległych, nieróżniących się między sobą rzędowością, stężenie substratu nie będzie miało znaczenia.

# Zasady doboru reaktorów

## Zasada 4: Dla reakcji złożonych

Złożone układy reakcji mogą być analizowane po rozbiciu na czynniki pierwsze:

- reakcje równoległe,
- reakcje szeregowo.



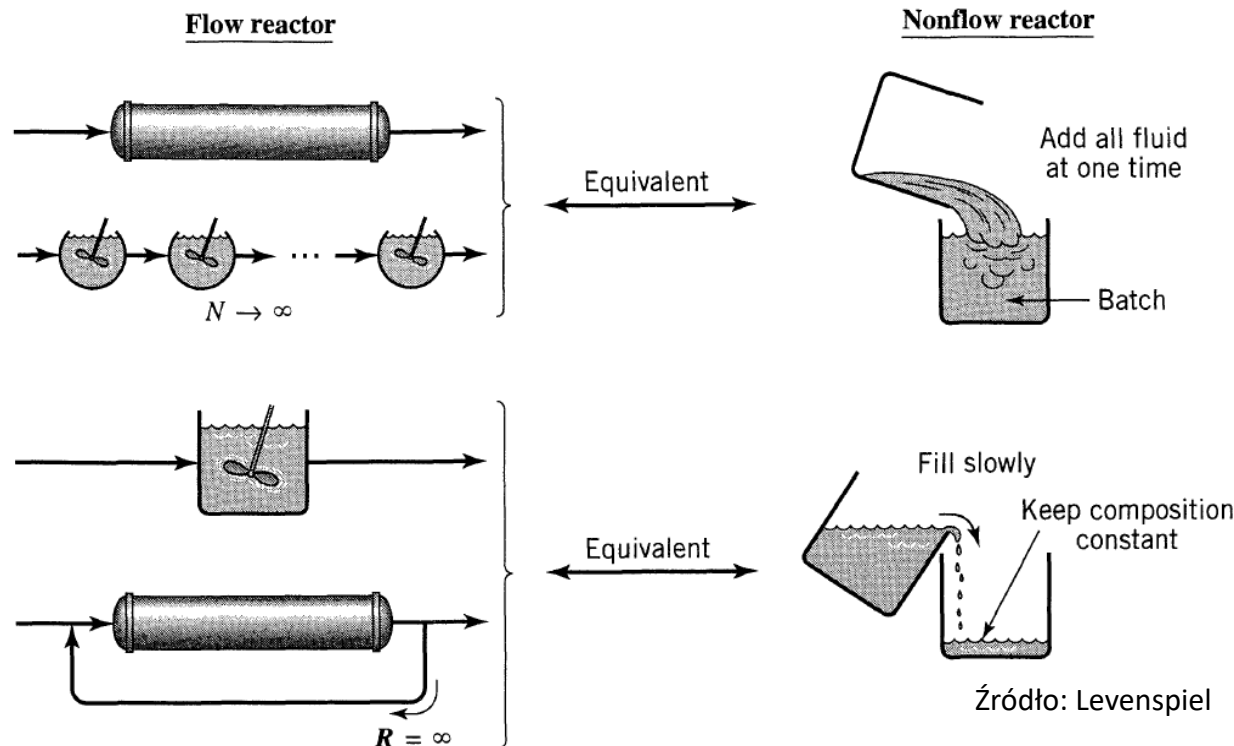
Przykład: reakcje szeregowo-równoległe

- Substrat A powinien być dozowany zgodnie z regułami dla reakcji szeregowych.
- Substrat B powinien być dozowany zgodnie z regułami dla reakcji równoległych.

# Zasady doboru reaktorów

## Zasada 5: Praca ciągła i nieciągła

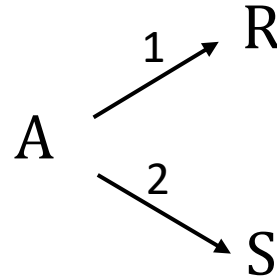
Dowolny rozkład produktów może zostać osiągnięty w stacjonarnych procesach przepływowych lub w równoważnym mu procesie nieprzepływowym (i vice versa).



# Zasady doboru reaktorów

## Zasada 6: Wpływ temperatury na rozkład produktów

Dla reakcji złożonych:



$$k_1 = k_{10} e^{-\frac{E_1}{RT}}$$

$$k_2 = k_{12} e^{-\frac{E_2}{RT}}$$

- Wysoka temperatura (lub podwyższenie temperatury) sprzyja reakcji o wyższej energii aktywacji.
- Niska temperatura (lub obniżenie temperatury) sprzyja reakcji o niższej energii aktywacji.

Szczegółowe informacje: Inżynieria Reaktorów Chemicznych 1, Moduł 4

# Wnioski praktyczne dla inżynierii reaktorów idealnych

1. Jeśli tylko możemy, stosujemy reaktory o działaniu ciągłym.
2. Przy użyciu reaktora półokresowego możemy kontrolować szybkość reakcji szybkością dozowania substratu.
3. Reaktor PFR jest „uciągloną” wersją reaktora okresowego.
4. Dla  $n > 0$ , reaktor PFR jest lepszy niż reaktor CSTR.
5. Reaktor CSTR jest wskazany, gdy  $r(\alpha)$  posiada maksimum dla dodatniej wartości  $\alpha$  (np. reakcja autokatalityczna lub wyraźnie egzotermiczna).
6. Układy reaktorów umożliwiają lepsze dopasowanie się do specyfiki danej reakcji chemicznej.
7. W przypadku reakcji egzotermicznych w reaktorze CSTR może wystąpić niestabilny stan stacjonarny.

# Wnioski praktyczne dla inżynierii reaktorów idealnych

8. Dla reakcji autokatalitycznych można zastosować szeregowy układ reaktorów CSTR→PFR lub reaktor PFR z częściową recyrkulacją produktu.
9. Dla reakcji odwracalnych warunki reakcji dobieramy w oparciu o regułę przekory Le Chateliera i Browna.
10. Dla reakcji równoległych dobieramy optymalne warunki dla reakcji, która daje nam pożądany produkt.
11. Dla reakcji szeregowych, jeśli pożądanym produktem jest produkt pośredni, powinniśmy prowadzić reakcję do momentu uzyskania jego maksymalnego stężenia.

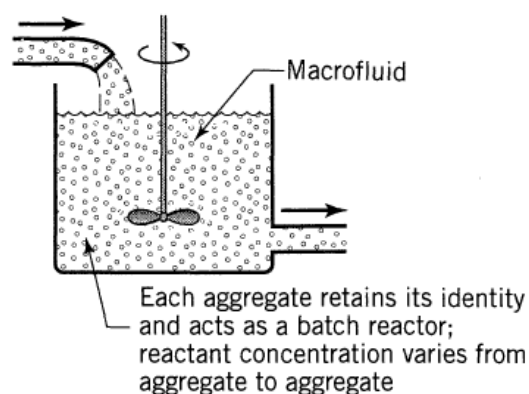
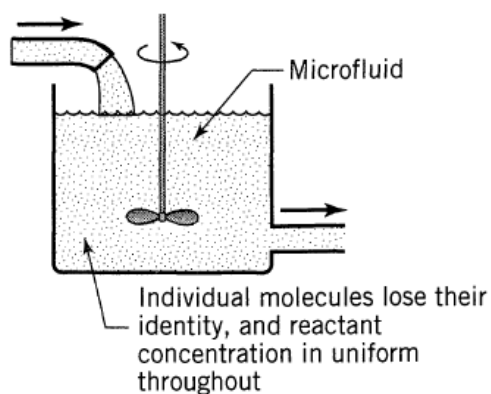
Szczegółowe informacje:

Inżynieria Reaktorów Chemicznych 1, Moduły 3 i 4



# Modele matematyczne dla reaktorów rzeczywistych

- Rozkład czasu przebywania (RTD)
- Model kompartmentowy
- Model dyspersyjny
- Model konwekcyjny z przepływem laminarnym
- Modele mieszania



Źródło: Levenspiel

# Reaktory jednofazowe katalityczne

- Opis matematyczny i zasady doboru reaktora są analogiczne do reaktorów jednofazowych niekatalitycznych.
- Pojawia się dodatkowy problem separacji katalizatora oraz jego ponownego użycia.
- W praktyce do reakcji katalitycznych stosuje się najczęściej reaktory wielofazowe.

# Reaktory wielofazowe – wprowadzenie

Najważniejsze aspekty projektowania reaktorów wielofazowych:

- Ile faz występuje w reaktorze i jakiego są typu?
- Jakie panują warunki dla transportu pędu, ciepła i masy?
- Czy reakcja jest reakcją katalityczną?
- W której fazie przebiega reakcja?
- Jaka jest powierzchnia międzyfazowa?
- Jaki jest schemat kontaktowania się faz?
- Jaki jest czynnik decydujący o szybkości reakcji?
- Jaka konstrukcja reaktora najlepiej się sprawdzi?

# Rodzaje reaktorów wielofazowych

## Reaktory niekatalityczne:

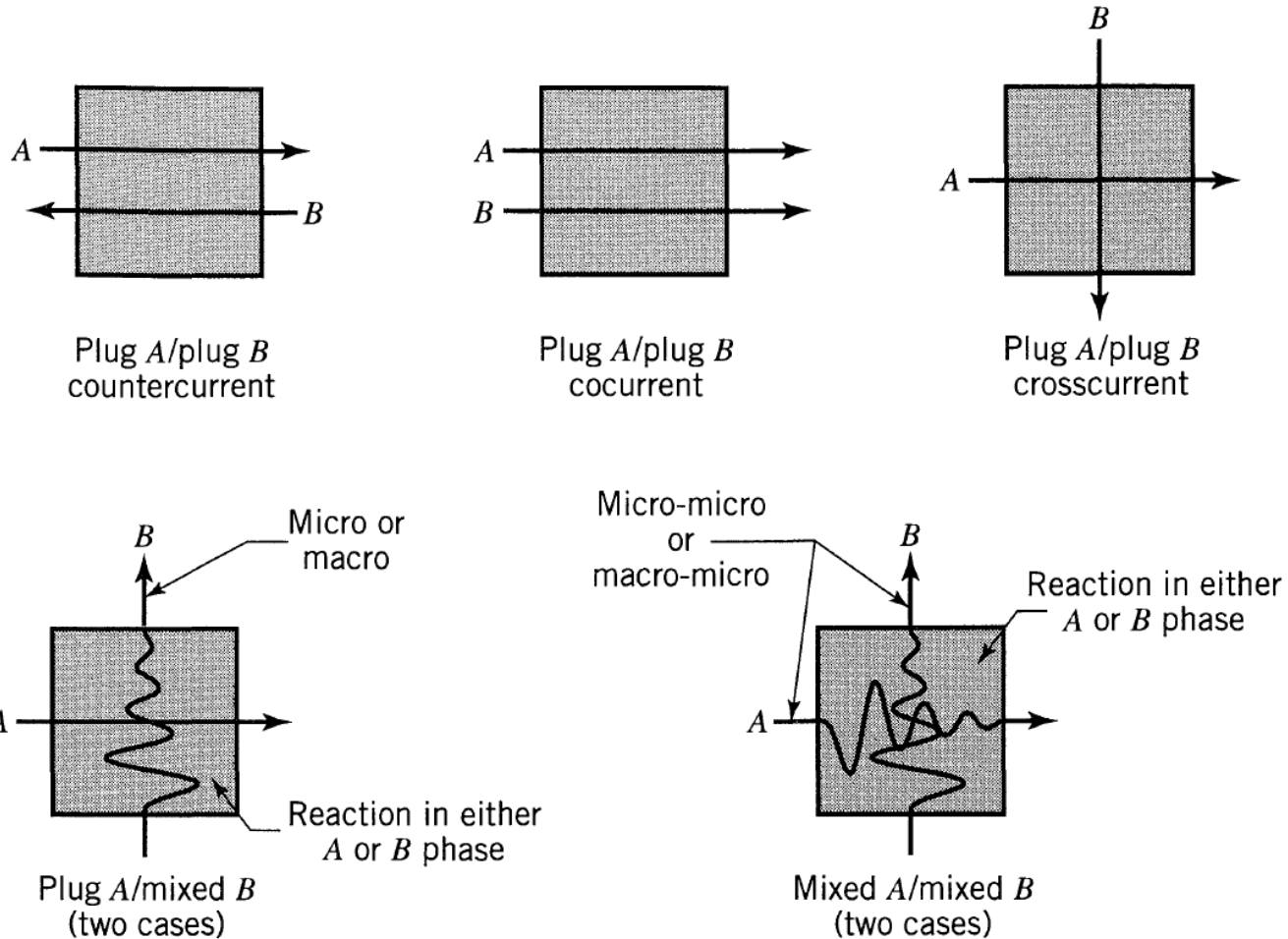
- Reaktor ciecz-gaz (absorpcja z reakcją chemiczną),
- Reaktor ciecz-para (destylacja reaktywna),
- Reaktor ciecz-ciecz (ekstrakcja reaktywna),
- Reaktor ciecz-ciało stałe.

## Reaktory katalityczne:

- Reaktory dwufazowe:
  - Reaktor ze złożem nieruchomym,
  - Reaktor ze złożem fluidalnym;
- Reaktory trójfazowe:
  - Reaktor strużkowy,
  - Reaktor zawieszinowy,
  - Reaktor ze złożem fluidalnym.

# Reaktory wielofazowe – kontaktowanie się faz

Schematy kontaktowania się faz:

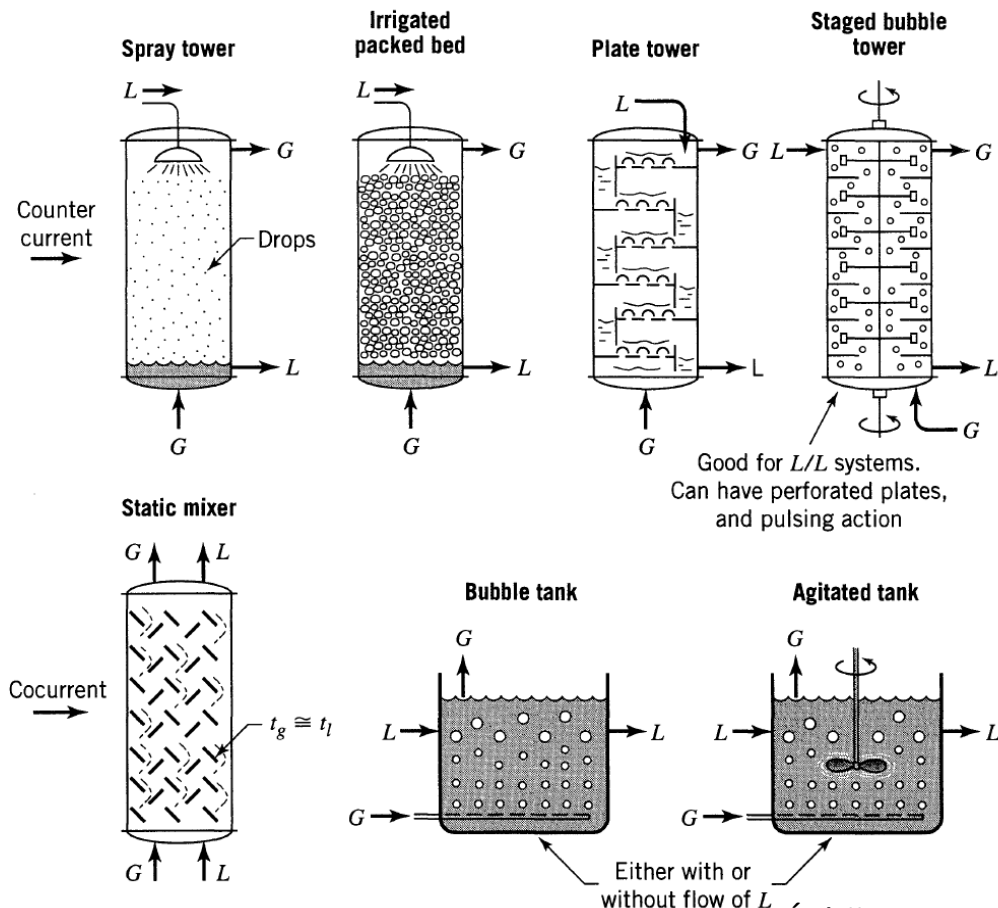


Źródło: Levenspiel

# Reaktory dwufazowe G/L (L/L)

Dwa rozwiązania konstrukcyjne: reaktory kolumnowe i zbiornikowe

1. Reaktor (absorber) natryskowy
2. Reaktor (absorber) z wypełnieniem
3. Reaktor (absorber) półkowy
4. Reaktor (absorber) barbotażowy mechaniczny
5. Mieszalnik statyczny
6. Zbiornik bełkotkowy/barbotażowy
7. Zbiornik bełkotkowy/barbotażowy z mieszadłem



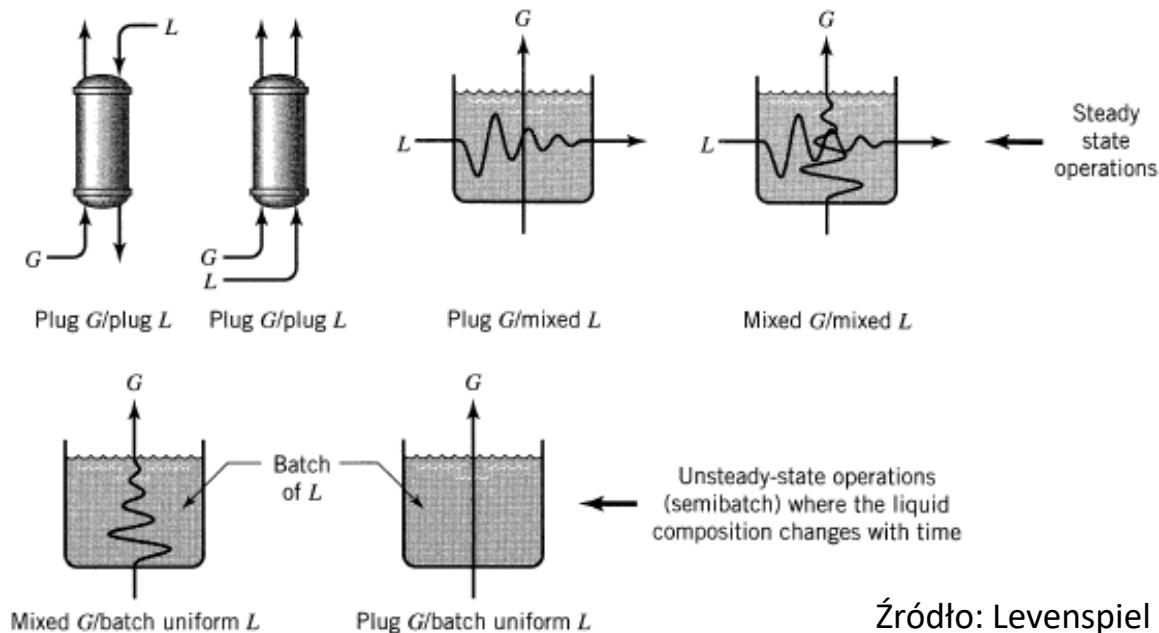
Źródło: Levenspiel

Powyższe rozwiązania konstrukcyjne można zastosować w reaktorach ciecz-gaz, ciecz-para oraz ciecz-ciecz.

# Reaktory dwufazowe G/L

Różnice w rozwiązaniach konstrukcyjnych:

- Stosunek objętościowy G/L
- Powierzchnia międzyfazowa
- Współczynniki wnikania masy  $k_g$  oraz  $k_l$
- Siły napędowe (wynikające ze schematu kontaktowania się faz)



Źródło: Levenspiel

# Reaktory G/L – charakterystyka i zasady doboru

## **Sposób kontaktowania się faz (rodzaje przepływów):**

- Kolumny: tłokowy G/tłokowy L
- Zbiorniki bełkotkowe: tłokowy G/wymieszanie L
- Zbiorniki bełkotkowe z mieszadłem: wymieszanie G/wymieszanie L

Aparaty kolumnowe mają największą siłę napędową, zbiorniki bełkotkowe z mieszadłem mają najmniejszą siłę napędową.

## **Współczynniki wnikania masy:**

- Krople w gazie: duże  $k_g$  , małe  $k_l$
- Pęcherze w cieczy: małe  $k_l$  , duże  $k_g$



# Reaktory G/L – charakterystyka i zasady doboru

## Przepływy

- Kolumny z wypełnieniem  $F_l / F_g \approx 10$  (dla 1 bar)
- Inne aparaty: większa elastyczność w doborze stosunku  $F_l / F_g$

## Gdy dominuje opór w warstewkach granicznych G/L:

- Maksymalizować powierzchnię międzyfazową a (zbiorniki z mieszadłem i kolumny)
- Dla dużych oporów w warstewce L – unikać reaktorów natryskowych
- Dla dużych oporów w warstewce G – unikać reaktorów barbotażowych

## Gdy dominuje opór w głębi fazy L:

- Unikać reaktorów natryskowych (mały stosunek  $V_l / V_g$ )
- Wykorzystać reaktory zbiornikowe (duży stosunek  $V_l / V_g$ )

# Reaktory G/L – charakterystyka i zasady doboru

## **Rozpuszczalność**

- Dobrze rozpuszczalne gazy – szybkość kontroluje warstewka G (unikać reaktorów barbotażowych)
- Słabo rozpuszczalne gazy – szybkość kontroluje warstewka L (unikać reaktorów natryskowych)

## **Reakcja zmniejsza opór w warstewce L:**

- Reakcja nie pomaga w absorpcji gazów dobrze rozpuszczalnych
- Reakcja pomaga w absorpcji gazów słabo rozpuszczalnych i przyspiesza przebieg procesu

# Reaktory G/L – podsumowanie

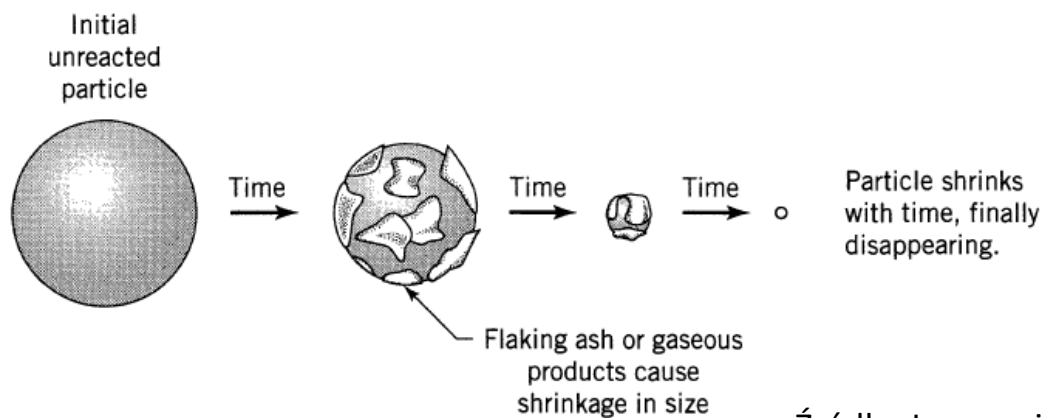
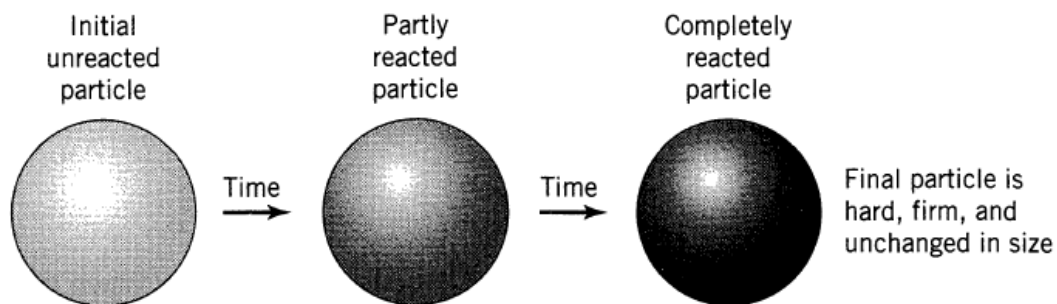
**Table 24.1** Characteristics of *G/L* Contactors (from Kramers and Westerterp, 1961).

Flow Pattern	Contactors	$a$ (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	$f_l = \frac{V_l}{V}$ (–)	Capacity	Comments
Counter Current Flow	Spray tower	60	0.05	Low	Good for very soluble gases high $k_g/k_l$
	Packed bed	100	0.08	High	Good all rounder, but must have $F_l/F_g \cong 10$
	Plate tower	150	0.15	Medium-high	
	Staged bubble column	200	0.9	Low	Needs mechanical mixer or pulsing device. Good for slightly soluble gases and $L_1/L_2$ . Has low $k_g/k_l$ .
Cocurrent flow	Static mixer	200	0.2–0.8	Very high	Very flexible, little reported data $\bar{t}_g \cong \bar{t}_l$ .
Mixed flow of <i>L</i>	Bubble tank	20	0.98	Medium	Cheap to build
	Agitated tank	200	0.9	Medium	Cheap to build but needs a mechanical agitator

Źródło: Levenspiel

# Reakcje chemiczne w ciele stałym

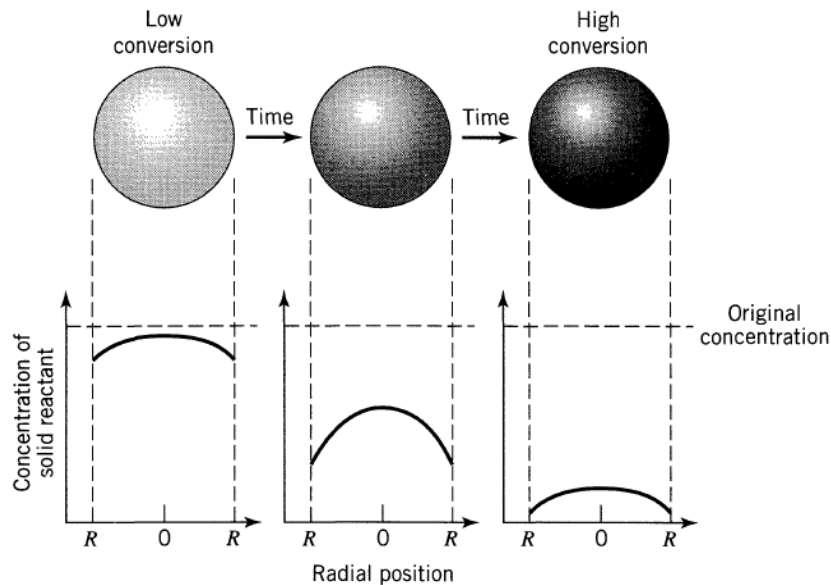
Dwa podstawowe schematy przereagowania cząstek ciał stałych:



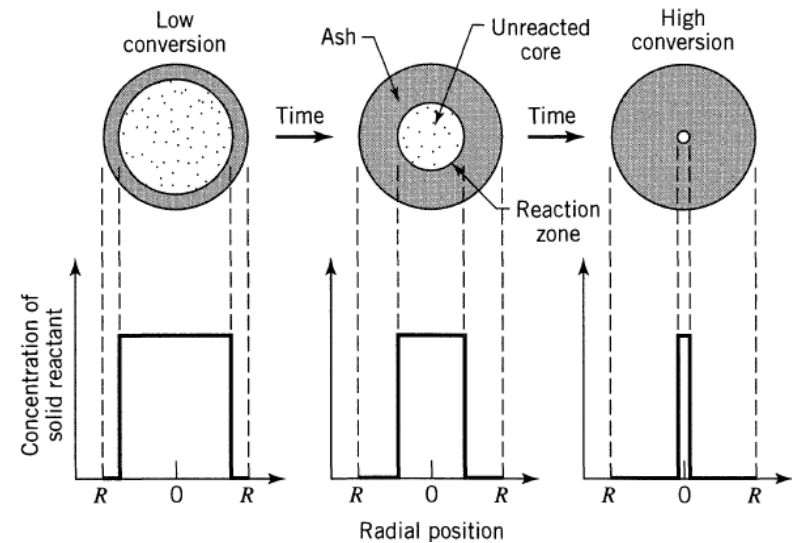
Źródło: Levenspiel

# Reaktory wielofazowe niekatalityczne – modele matematyczne

Model stopniowego przekształcania  
(*progressive conversion model*)



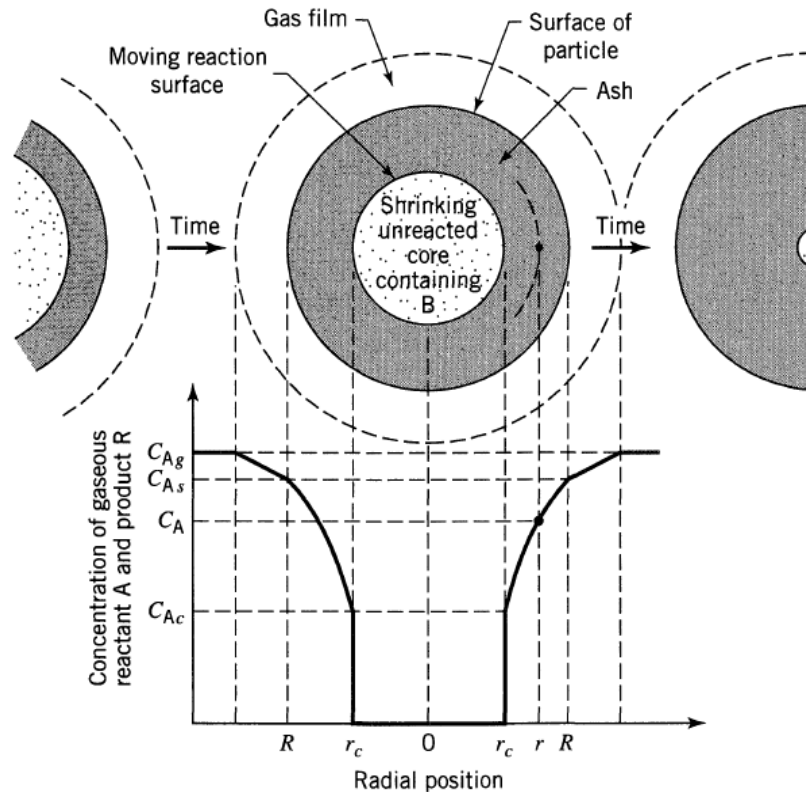
Model kurczącego się rdzenia  
(*shrinking core model*)



Źródło: Levenspiel

# Model kurczącego się rdzenia

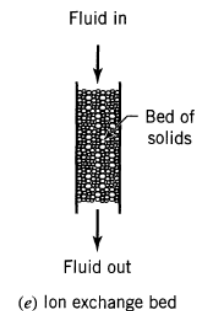
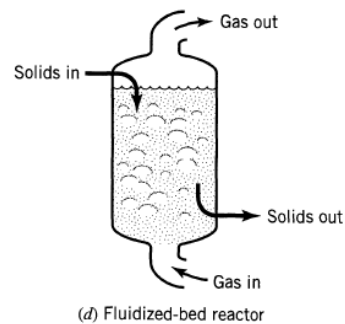
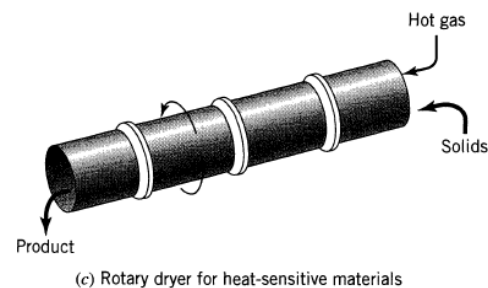
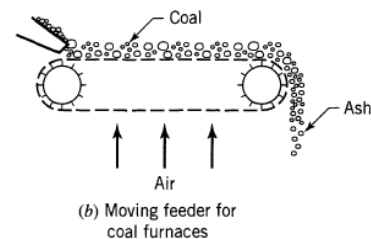
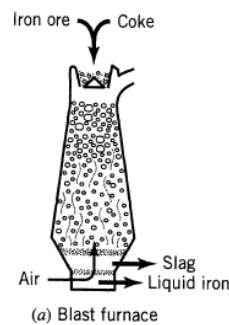
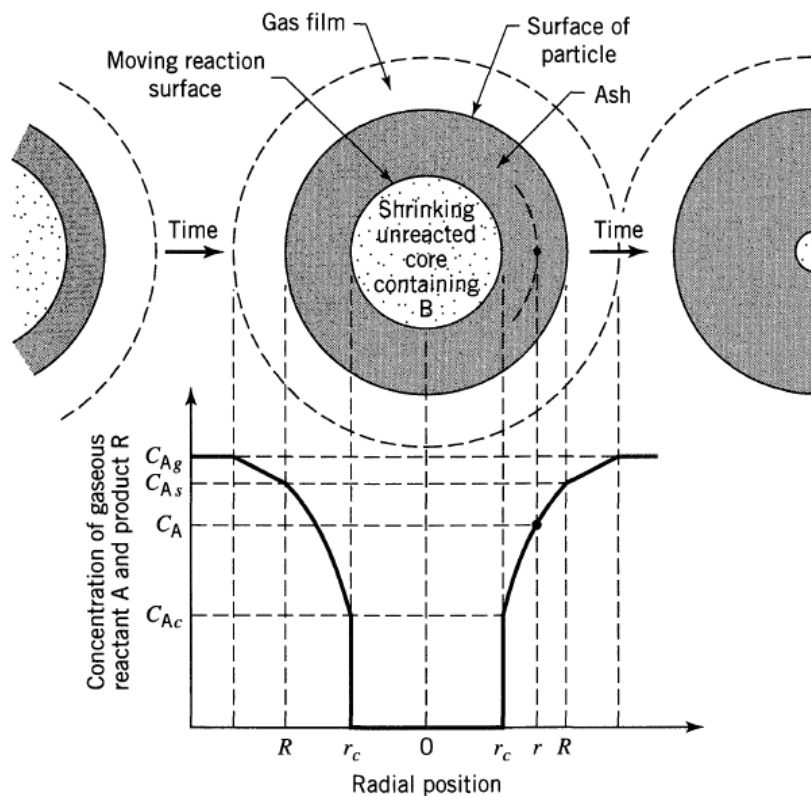
Etapy transportu masy i reakcji chemicznej:



Źródło: Levenspiel

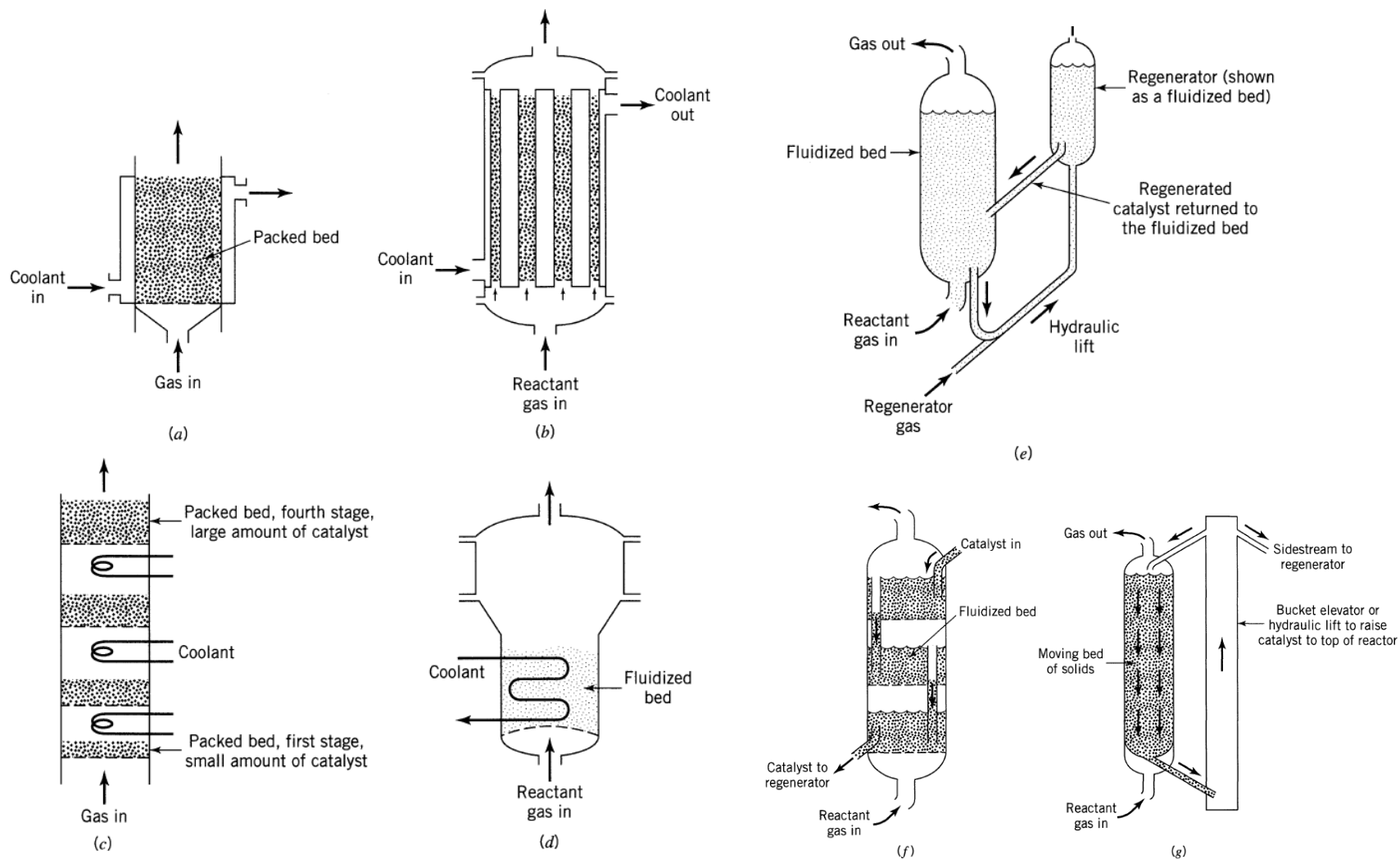
# Model kurczącego się rdzenia

Etapy transportu masy i reakcji chemicznej:



Źródło: Levenspiel

# Reaktory dwufazowe z katalizatorem stałym

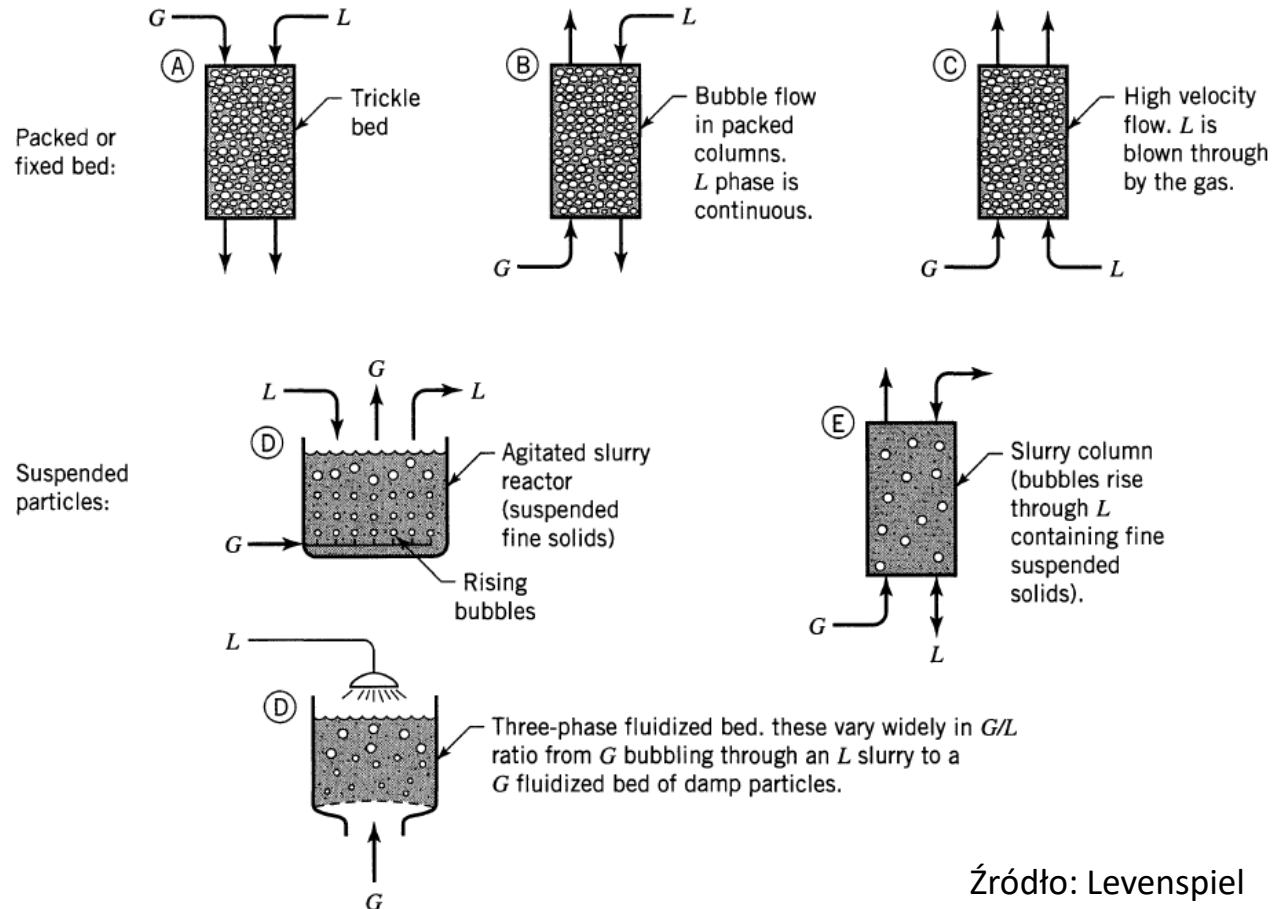


Źródło: Levenspiel



# Reaktory trójfazowe z katalizatorem stałym

Rodzaje: **reaktor strużkowy** (trickle bed reactor), **reaktor zawieszinowy** (slurry reactor), **reaktor fluidalny** (fluidized bed reaktor)



Źródło: Levenspiel

# Reaktory trójfazowe z katalizatorem stałym

Kluczowe aspekty w doborze reaktora:

- miejsce występowania dominującego oporu transportu masy,
- charakterystyka schematu kontaktowania faz,
- rodzaj aparatury pomocniczej.

Ostateczna decyzja zapada na bazie analizy ekonomicznej, biorąc pod uwagę ww. czynniki.

# Reaktory trójfazowe z katalizatorem stałym

**Szybkość procesu** – wybieramy reaktor, który wspomaga najwolniejszy etap procesu:

- główny opór transportu masy w warstewce G/L → duża powierzchnia międzyfazowa
- główny opór na granicy faz L/S → duża powierzchnia właściwa ciała stałego
- główny opór to transport dyfuzyjny w porach → małe cząstki ciała stałego

Wyznaczanie najwolniejszego etapu na podstawie badań doświadczalnych, zmieniając pojedyncze parametry procesowe przy innych niezmiennych.

**Kontaktowanie się faz:**

- przepływ tłokowy dla składnika będącego w niedomiarze
- prowadzenie procesu w przeciwnym kierunku

# Reaktory trójfazowe z katalizatorem stałym

## Aparatura pomocnicza:

- reaktory zawieszinowe wykorzystują małe cząstki katalizatora (=małe opory dyfuzji wewnątrz porów), natomiast pojawia się problem z późniejszą separacją.
- reaktory strużkowe nie wykazują tych problemów, ale cechują się większym oporem transportu masy. Nie jest to jednak kłopotliwe gdy:
  - reakcja jest bardzo wolna, lub
  - reakcja jest bardzo szybka i przebiega na nieporowatych cząstkach fazy stałej, pokrytych katalizatorem.

## Podsumowanie:

Reaktory strużkowy jest najprostszy, reaktor zawieszinowy umożliwia większą szybkość procesu, reaktor fluidalny ma cechy pośrednie między reaktorem strużkowym i zawieszinowym.

# Bioreaktory

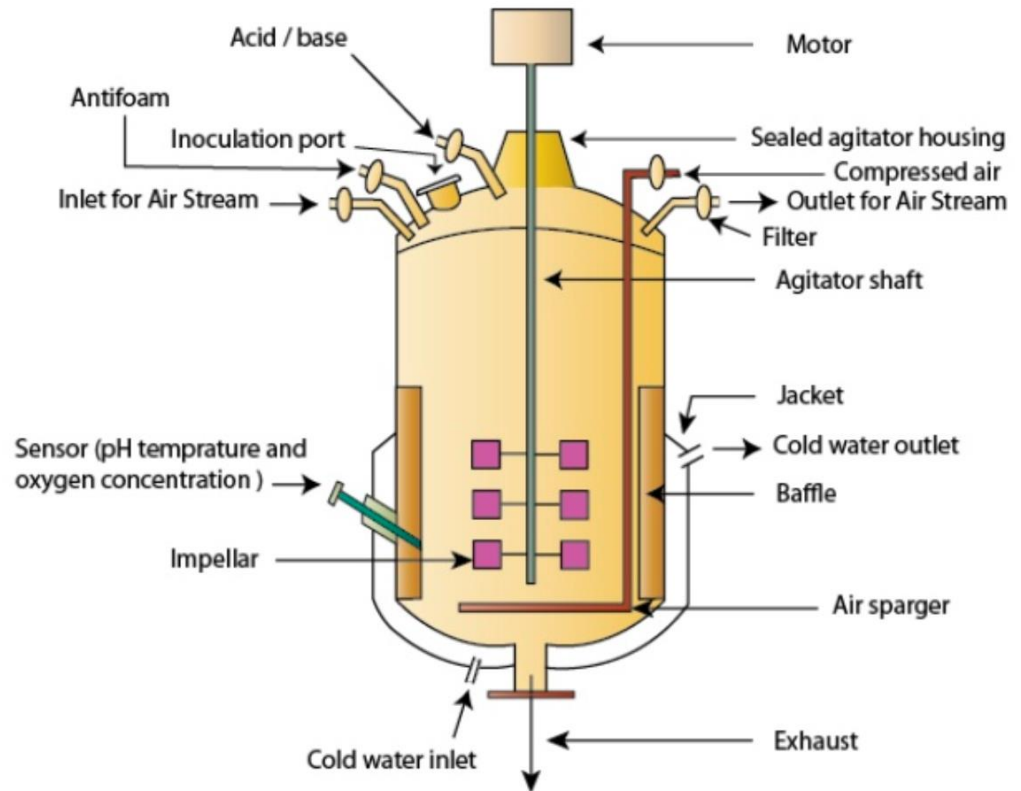
Typy bioreaktorów:

- bioreaktory zbiornikowe z mieszadłem
- bioreaktory barbotażowe (standardowe, air-lift, wieżowe)
- bioreaktory ze złożem nieruchomym
- bioreaktory ze złożem fluidalnym
- fotobioreaktory

# Bioreaktor zbiornikowy z mieszadłem

## Cechy:

- Różne tryby pracy:
  - reaktor okresowy
  - reaktor półokresowy
  - reaktor ciągły
- Geometria:
  - $H/D$  w zakresie od 3 do 5
  - $D_m/D$  wynosi ok. 1/3
- Zalety:
  - Dobre wymieszanie
  - Efektywne napowietrzanie
  - Szeroki zakres skali procesu
  - Uniwersalność

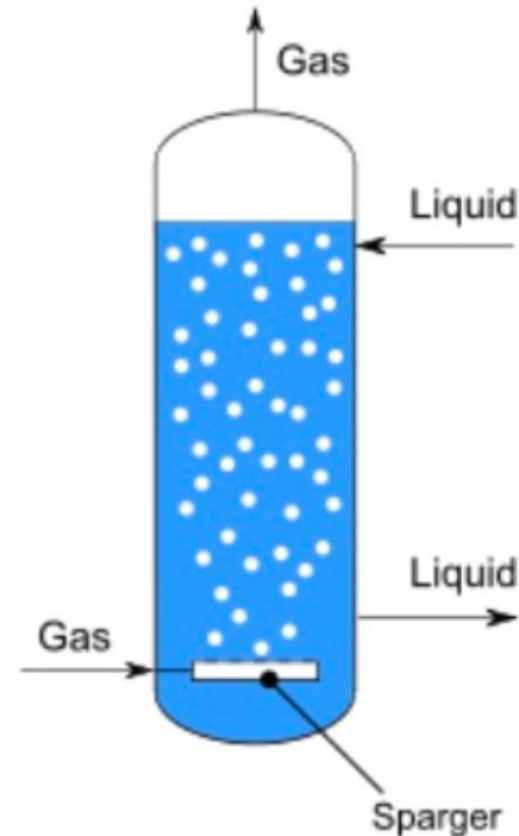


Źródło: <https://www.slideshare.net/asertseminar/bioreactor-ppt>

# Bioreaktor barbotażowy

## Cechy:

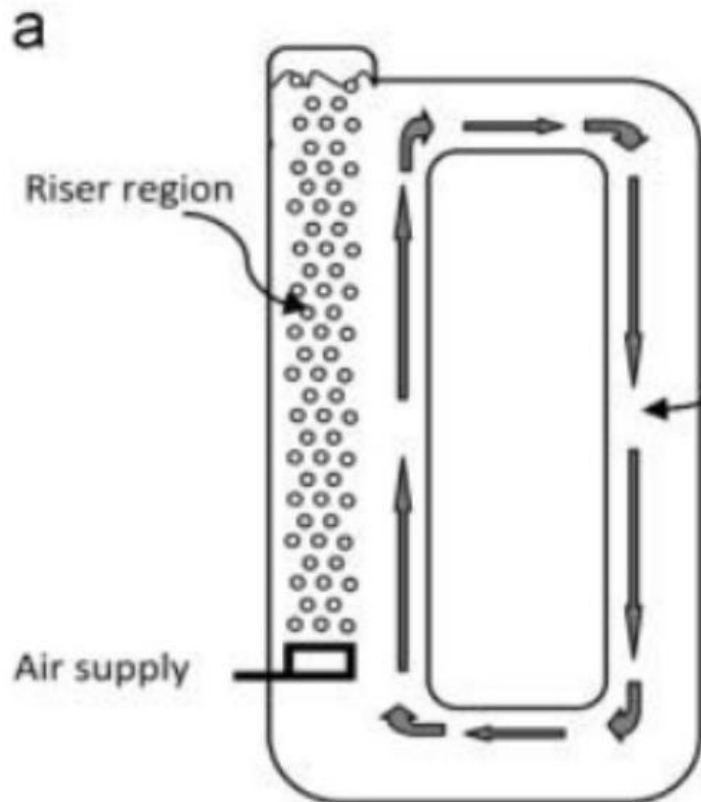
- Strumień gazu odpowiada za napowietrzanie oraz mieszanie
- Możliwość zastosowania perforowanych płytek, sprzyjających mieszaniu
- Różne tryby pracy:
  - reaktor półokresowy
  - reaktor ciągły
- Geometria:
  - $H/D$  w zakresie od 4 do 6
- Rozwiązania konstrukcyjne:
  - Bioreaktor barbotażowy
  - Bioreaktor air-lift
    - z cyrkulacją zewnętrzną
    - z cyrkulacją wewnętrzną
  - Bioreaktor kolumnowy



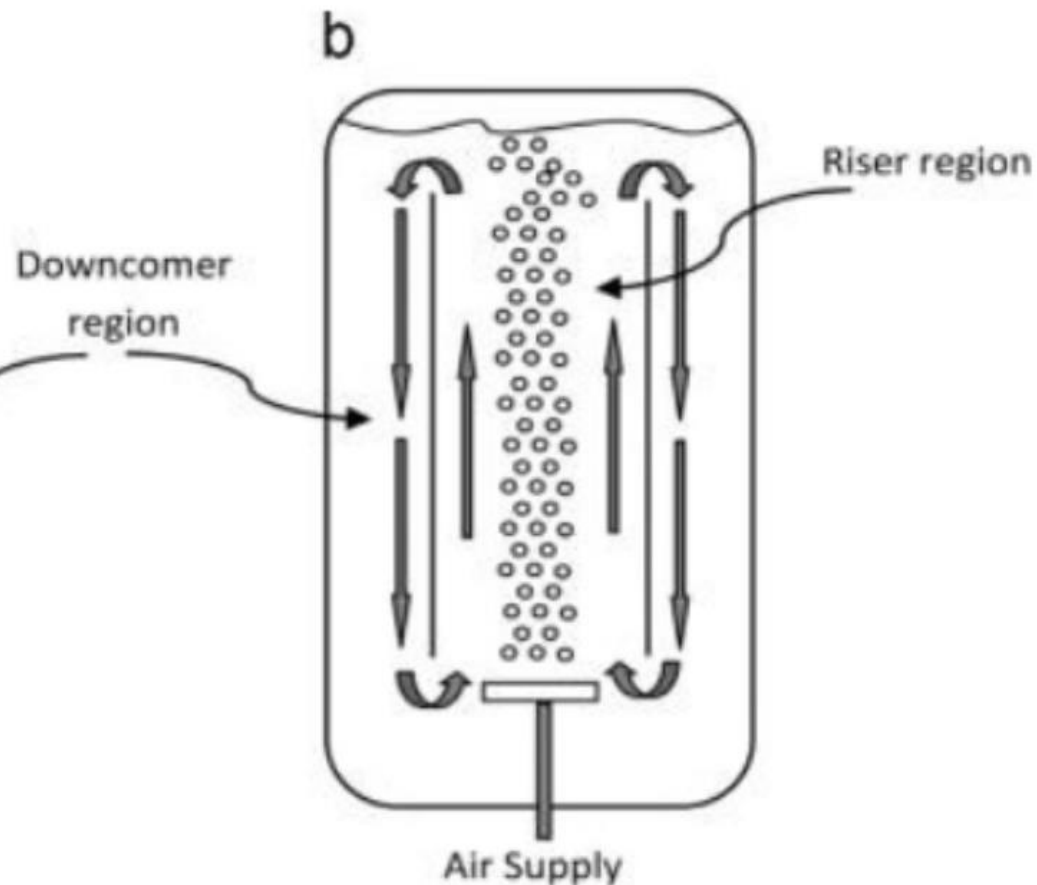
Źródło: <https://www.slideshare.net/asertseminar/bioreactor-ppt>

# Bioreaktor air-lift

Z cyrkulacją zewnętrzną



Z cyrkulacją wewnętrzną



Bioreaktory typu air-lift zapewniają lepsze wymieszanie w stosunku do standardowego reaktora barbotażowego.

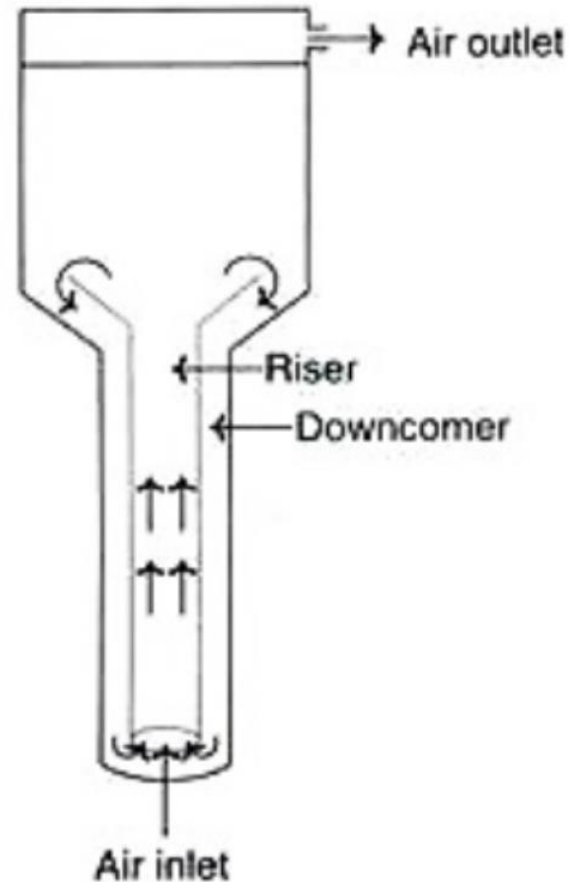
Źródło: <https://www.slideshare.net/asertseminar/bioreactor-ppt>



# Bioreaktor wieżowy

## Cechy:

- Duża wysokość i konstrukcja dwustrefowa
- Mieszanie za sprawą przepływu powietrza
- Cyrkulacja biomasy za sprawą zmiennej szerokości bioreaktora
- Dolna część bioreaktora
  - Wysokie ciśnienie hydrostatyczne
  - Dobra rozpuszczalność tlenu
  - Unoszenie biomasy
- Górna część reaktora
  - Niskie ciśnienie hydrostatyczne
  - Słaba rozpuszczalność  $\text{CO}_2$
  - Opadanie biomasy
- Dobre warunki wymieszania i transportu masy przy równoczesnym braku ruchomych części

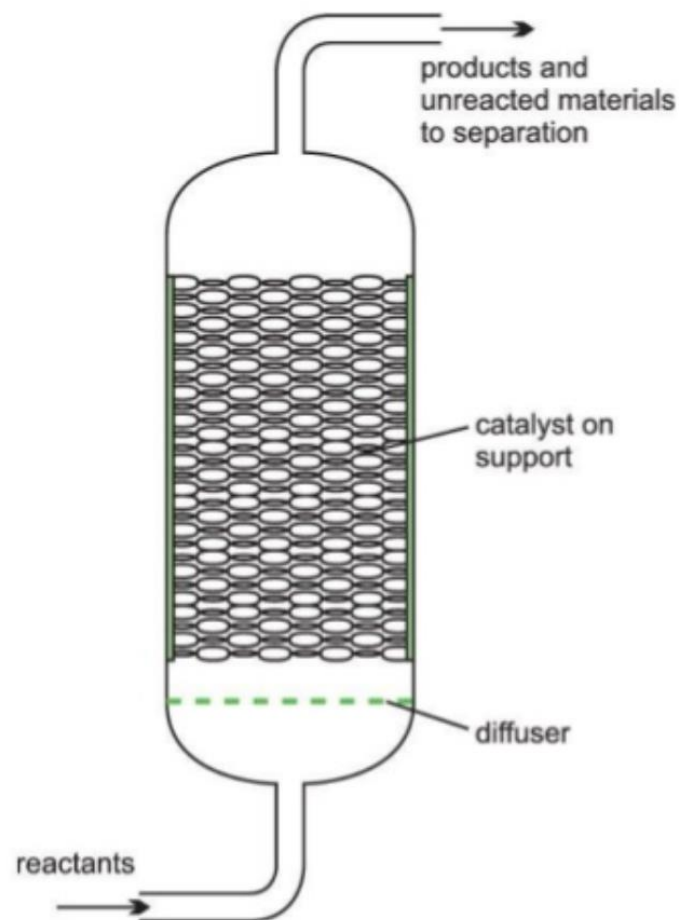


Źródło: <https://www.slideshare.net/asertseminar/bioreactor-ppt>

# Bioreaktor ze złożem nieruchomym

## Cechy:

- Złoże nieruchome zawierające biokatalizator (enzymy/komórki, unieruchomione na złożu)
- Przepływ od dołu lub od góry (grawitacyjnie)
- Substraty (w tym pożywka) są doprowadzane w strumieniu wlotowym
- Reakcja zachodzi w fazie stałej
- Produkty są odprowadzane w strumieniu wylotowym
- Możliwość napowietrzania od dołu
- Sterowanie wydajnością przez zmianę strumienia objętościowego płynu
- Brak akumulacji produktu wewnątrz reaktora (korzystne w przypadku inhibicji produktem)

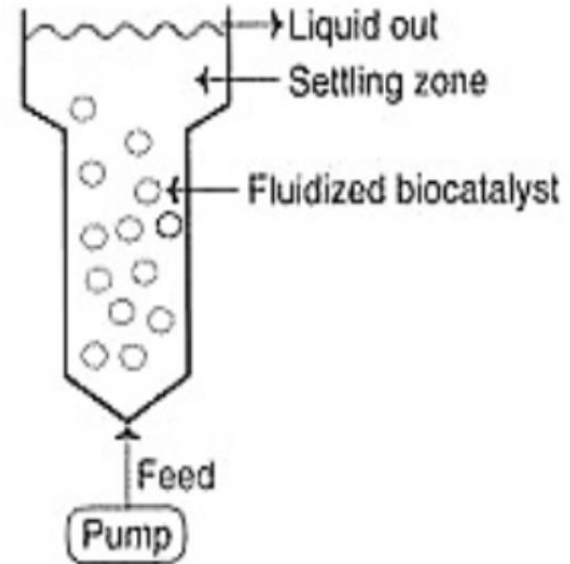


Źródło: <https://www.slideshare.net/asertseminar/bioreactor-ppt>

# Bioreaktor ze złożem fluidalnym

## Cechy:

- Konstrukcja analogiczna do bioreaktora barbotażowego/wieżowego
- Biomasa/biokatalizator tworzy osobną fazę stałą (immobilizowane enzymy/komórki)
- Intensyfikacja transportu masy i napowietrzania
- Wymagana jest odpowiednia gęstość cząstek fazy stałej, aby możliwe było wytworzenie złoża fluidalnego

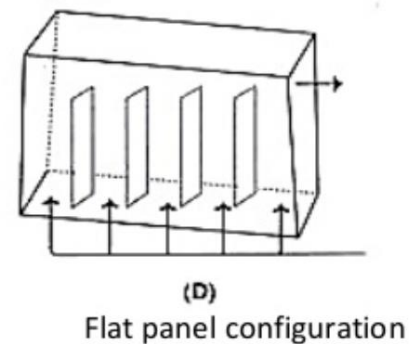
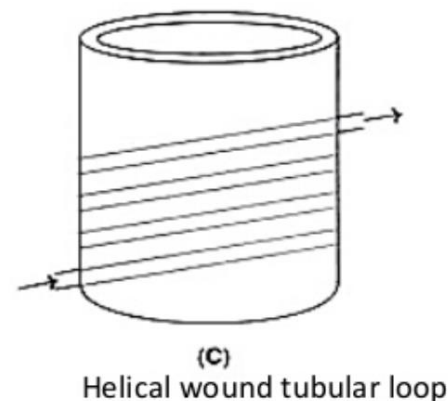
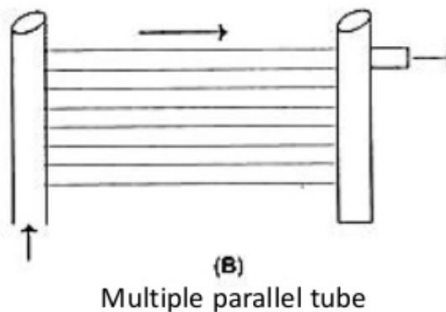
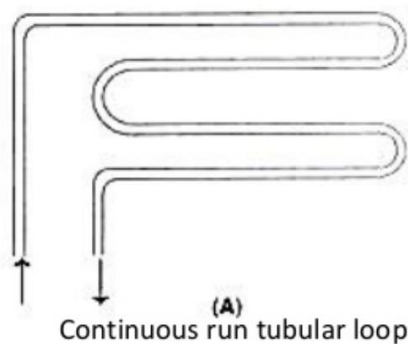


Źródło: <https://www.slideshare.net/asertseminar/bioreactor-ppt>

# Fotobioreaktor

## Cechy:

- Ekspozycja na światło słoneczne (tańsze) lub sztuczne
- Kolektory słoneczne - korpusy szklane lub z przezroczystego tworzywa sztucznego
- Cyrkulacja medium reakcyjnego przez kolektory słoneczne
- Konieczny jest ciągły ruch medium reakcyjnego oraz brak powstawania osadów
- Niezbędne jest chłodzenie kolektorów
- Mikroorganizmy rosną w ciągu dnia, a wytwarzają produkty w ciągu nocy



Źródło: <https://www.slideshare.net/asertseminar/bioreactor-ppt>

# Reaktory specjalne

## Reaktory membranowe

- Reaktory zintegrowane
- Zastosowanie w m.in. biotechnologii
- Dobór modułu membranowego pod zastosowanie
- Wyzwania: wydajność i trwałość rozwiązania (fouling)
- Możliwość immobilizacji katalizatorów na membranie

## Palniki, piece i silniki

- Zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu
- Optymalizacja pracy pod względem sprawności
- Minimalizacja produkcji CO<sub>2</sub>, CO oraz NO<sub>x</sub>

## Reaktory elektrochemiczne

- Elektroliza i galwanizacja
- Ogniwa galwaniczne (pojemność, trwałość, szybkość ładowania, bezpieczeństwo)
- Ogniwa paliwowe

# Reaktory specjalne

## Reaktory ultradźwiękowe

- Wspomaganie mieszania i reakcji chemicznej
- Podstawy teoretyczne: sonochemia
- Wyzwania: wytwarzanie ciepła

## Reaktory mikrofalowe

- Wspomaganie reakcji chemicznych, w tym reakcji polimeryzacji
- Precyzyjne dostarczanie ciepła do układu reakcyjnego
- Wyzwania: dobór parametrów promieniowania oraz geometrii układu pod dane zastosowanie

## Fotoreaktory

- Wykorzystanie zjawiska fotokatalizy
- Zastosowanie: np. uzdatnianie wody, oczyszczanie powietrza, hodowla alg

# Reaktory specjalne

## Reaktory plazmowe

- Wykorzystanie sztucznie wytworzonej plazmy
- Zastosowanie: usuwanie zanieczyszczeń, powlekanie
- Wyzwania: skład i jakość plazmy, sterowanie procesem

## Reaktory radiacyjne

- Zastosowanie: sterylizacja, reakcje polimeryzacji
- Wyzwania: dawka, rozwiązanie konstrukcyjne, sterowanie, bezpieczeństwo

## Reaktory jądrowe

- Jeden z filarów energetyki XXI wieku
- Wyzwania:
  - Cykl termodynamiczny
  - Rozwiązania konstrukcyjne
  - Sterowanie i regulacja
  - Systemy zabezpieczające

# Wybrane aspekty projektowania reaktorów chemicznych

1. Wybór warunków prowadzenia reakcji chemicznej
2. Wybór podzespołów
  - Mieszanie
  - Wymiana ciepła
  - Katalizator
3. Bezpieczeństwo
4. Analiza kosztów
5. Powiększanie skali
6. Automatyka procesowa



# Wybór warunków prowadzenia reakcji chemicznej

1. Reakcja chemiczna lub biochemiczna
2. Katalizator
3. Temperatura
4. Ciśnienie
5. Faza, w której przebiega reakcja
6. Rozpuszczalnik i jego funkcje
7. Stężenia (w tym dodanie związków inertnych)

# Wybór warunków prowadzenia reakcji chemicznej

## 1. Reakcja chemiczna lub biochemiczna

- Reakcja chemiczna przeprowadzana jest zazwyczaj w wyższych temperaturach oraz w szerszym zakresie wartości parametrów operacyjnych
- Reakcja biochemiczna (mikroorganizmy, komórki lub enzymy) wymaga ściśle określonych warunków prowadzenia reakcji

## 2. Katalizator

- Reakcja katalityczna umożliwia przyspieszenie reakcji chemicznej, co skutkuje mniejszą objętością reaktora i/lub bardziej łagodnymi warunkami prowadzenia reakcji
- Reaktory katalityczne mogą różnić się konstrukcją od reaktorów niekatalitycznych (szczególnie w przypadku katalizy heterogenicznej)

# Wybór warunków prowadzenia reakcji chemicznej

## 3. Temperatura

- Wzrost temperatury prowadzi do wzrostu szybkości reakcji
- Wzrost temperatury powoduje wzrost (spadek) wartości stałej równowagi reakcji endotermicznej (egzotermicznej)
- Dopuszczalna temperatura jest ograniczona przez termodynamikę, wytrzymałość aparatu, stabilność termiczną reagentów, stabilność termiczną katalizatora
- Reakcje biochemiczne są szczególnie wrażliwe na nadmierny wzrost temperatury

## 4. Ciśnienie

- Zwiększenie ciśnienia fazy gazowej prowadzi do zwiększenia gęstości mieszaniny reakcyjnej i do zwiększenia stężeń, co przyspiesza reakcję
- W przypadku reakcji odwracalnej wzrost ciśnienia może mieć pozytywny lub negatywny wpływ na stałą równowagi reakcji

# Wybór warunków prowadzenia reakcji chemicznej

## 5. Faza, w której przebiega reakcja

- W zależności od typu reakcji oraz warunków prowadzenia reakcji, będzie ona przebiegać w różnych fazach
- Często to temperatura reakcji determinuje rodzaj fazy, w której reakcja ta przebiega
- Reagenty stałe korzystnie jest doprowadzać w postaci zawiesin

## 6. Rozpuszczalnik i jego funkcje

- Rozcieńczanie reagentów
- Rozpuszczanie reagentów stałych
- Zwiększenie bezwładności cieplnej
- Łączenie reagentów wzajemnie nierozpuszczalnych

# Wybór warunków prowadzenia reakcji chemicznej

## 7. Stężenia

- Wysokie stężenia prowadzą do dużej szybkości reakcji i mniejszych reaktorów
- Niskie stężenia prowadzi do mniejszej szybkości reakcji i większych reaktorów, ale do łagodniejszych przebiegów reakcji
- Rozcieńczenie reagentów umożliwia zmniejszenie efektu temperaturowego reakcji
- Dodanie substancji inertnych do fazy gazowej może przesunąć równowagę chemiczną w reakcjach odwracalnych
- Dodanie substancji inertnych może wyprowadzić mieszaninę reakcyjną z zakresu palności/wybuchowości
- Substancje inertne mogą służyć jako stabilizatory warunków reakcji (np. pH)

# Mieszanie

## Cele mieszania:

- Intensyfikacja transportu masy
- Intensyfikacja transportu ciepła
- Zmiana selektywności reakcji chemicznej

## Mieszanie gazów

- Łączenie gazów w warunkach dużej intensywności przepływu

## Mieszanie cieczy

- Mieszanie przez połączenie strumieni, mieszalniki statyczne, mieszadła, mieszanie przy użyciu pomp

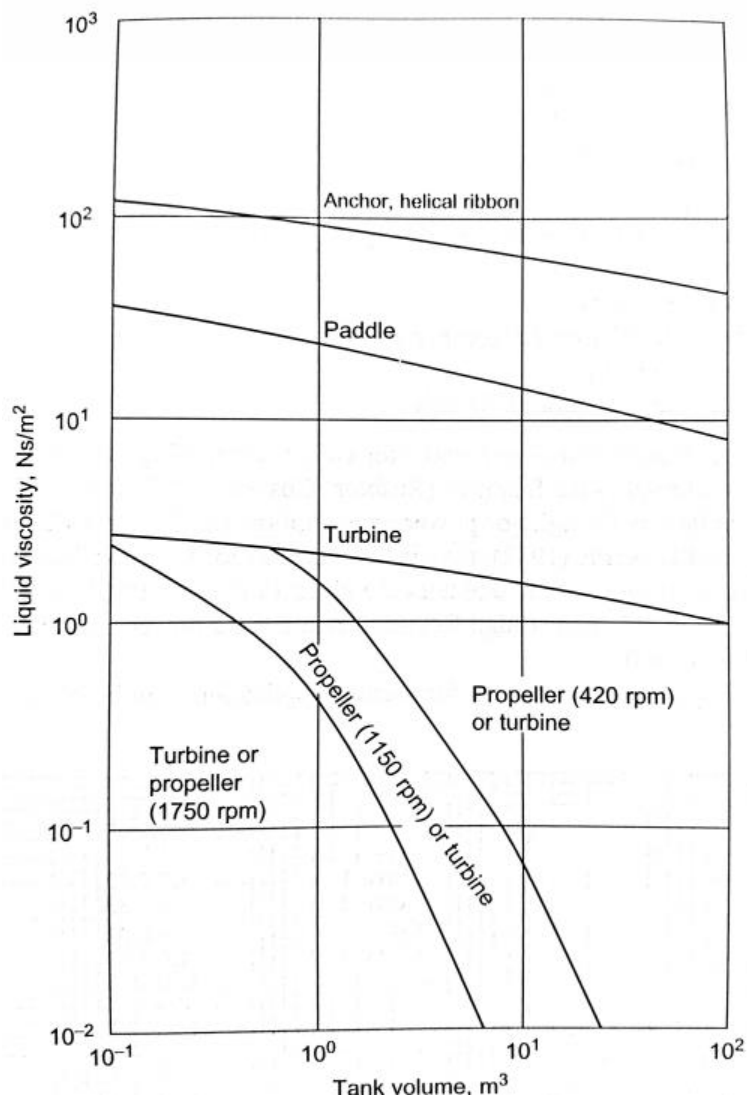
## Mieszanie ciecz-gaz

- Mieszanie przez połączenie strumieni, mieszalniki statyczne, mieszadła, mieszanie przy użyciu pomp, kontaktowanie faz przy użyciu odpowiednich aparatów

## Mieszanie płyn-ciało stałe

- Wytwarzanie zawiesin w mieszalnikach zbiornikowych

# Mieszanie



**Table 15.5** Power Requirements—Baffled Agitated Tanks

Agitation	Applications	Power, $\text{kW/m}^3$
Mild	Blending, mixing	0.04–0.10
	Homogeneous reactions	0.01–0.03
Medium	Heat transfer	0.03–1.0
	Liquid-liquid mixing	1.0–1.5
Severe	Slurry suspension	1.5–2.0
	Gas absorption	1.5–2.0
	Emulsions	1.5–2.0
Violent	Fine slurry suspension	>2.0

Źródło: Chemical Engineering Design

# Wymiana ciepła

## Rozważania wstępne:

1. Czy reakcja może być prowadzona w sposób adiabatyczny?
2. Czy strumienie zasilające mogą zapewniać wymagane chłodzenie lub podgrzewanie?
3. Czy najbardziej opłacalna byłaby realizacja wymiany ciepła poza reaktorem?
4. Czy najbardziej opłacalna byłaby realizacja reakcji wewnątrz wymiennika ciepła?
5. Czy zaproponowana konstrukcja pozwala na bezproblemowe uruchomienie i zatrzymanie procesu?
6. Czy są obawy dotyczące bezpieczeństwa, jeśli chodzi o chłodzenie i ogrzewanie reaktora?



# Sposoby wymiany ciepła

## Przeponowa wymiana ciepła

- Płaszcz grzejny
- Wężownica wewnętrzna
- Zewnętrzny układ do wymiany ciepła (z układem pompowania)

## Bezprzeponowa wymiana ciepła

- Ogrzewanie parą
- Chłodzenie przez odparowanie
- Chłodzenie/ogrzewanie strumieniem zasilającym

# Chłodzenie i ogrzewanie reaktorów katalitycznych

- Reaktory homogeniczne
  - płaszcz grzejny, węzownica, wymiennik zewnętrzny
  - ogrzewanie parą, chłodzenie przed odparowanie, chłodzenie/ogrzewanie strumieniem zasilającym
- Reaktory zawieszinowe
  - węzownica wewnętrzna nie jest zalecana (erozja)
  - pompy i wymienniki powinny być przystosowane do zawiesin
- Reaktory ze złożem nieruchomym
  - chłodzenie wewnątrz złoża
  - chłodzenie międzystopniowe
  - katalizator w wymienniku ciepła
- Reaktory ze złożem fluidalnym
  - wewnętrzne wymienniki ciepła
  - gorące cząstki katalizatora z procesu regeneracji

# Wymienniki ciepła jako reaktory

## Warunki stosowania WC jako reaktory:

- Wysokotemperaturowe reakcje endotermiczne
- Niskotemperaturowe reakcje egzotermiczne

## Reakcje homogeniczne

- Konstrukcja jak w konwencjonalnych wymiennikach ciepła
- Obliczanie wymienników ciepła z reakcją chemiczną odbiega w znaczny sposób od obliczania wymienników ciepła bez reakcji chemicznej

## Reakcje heterogeniczne

- Katalizator wewnątrz rurek wymiennika płaszczowo-rurowego
- Dla reakcji endotermicznych – możliwe jest bezpośrednie ogrzewanie przy użyciu gazów spalinowych

# Katalizatory – kluczowe cechy i dobór

- **Kształt** – dopasowanie do danego typu reaktora
- **Rozmiar** – rozwinięcie powierzchni międzyfazowej, przepływ
- **Skład** - substancja katalityczna i substancje strukturalne
- **Porowatość** – rozwinięcie powierzchni międzyfazowej
- **Wytrzymałość** – ważne w reaktorach zawieszinowych i fluidalnych
- **Stabilność termiczna** – istotna w reakcjach egzotermicznych
- **Aktywność** – stopień przyspieszenia reakcji chemicznej
- **Selektywność** – uprzywilejowanie reakcji pożądanej
- **Podatność na dezaktywację** – trwałość katalizatora
- **Cena** – aspekt ekonomiczny (nie jest to czynnik decydujący!)

# Bezpieczeństwo

Wybrane aspekty związane z bezpieczeństwem reaktorów:

- Zapobieganie niekontrolowanemu przebiegowi reakcji
- Stabilność pracy reaktora
- Szczelność i wytrzymałość aparatu procesowego
- Podatność na błędy operatorów oraz awarie podsystemów
- Systemy zabezpieczające
- Bezpieczeństwo bezpośredniego otoczenia
- Obciążenie środowiska naturalnego
- Sterylność układu reakcyjnego

# Inherently Safer Design Principles

## Bezpieczeństwo inherentne

*Inherentny* - nieodłączny, tkwiący w istocie, przynależący do czegoś, nieodzowny.

(sjp.pl)

Zasady projektowania inżynierskiego w celu osiągnięcia bezpieczeństwa inherentnego (Kletz i Amyotte, 2010):

- **Eliminate**
- **Minimize**
- **Substitute**
- **Moderate**
- **Simplify**
  
- Error tolerance
- Limit effects

# Inherently Safer Design Principles

LP	Zasada	Zastosowanie w reaktorze	Uzasadnienie	Kompromis
1	<i>Minimize</i>	Wybór trybu pracy ciągłej zamiast trybu pracy okresowej	Reaktor rurowy ma mniej elementów wyposażenia niż reaktor okresowy oraz jest łatwiejszy do sterowania i regulacji	Tryb pracy półciągłej może być korzystniejszy, gdy możemy kontrolować przebieg reakcji przez dozowanie substratu
2	<i>Minimize</i>	Zastosowanie dużej liczby małych reaktorów (miniaturyzacja)	Zmniejszone są skutki awarii jednego reaktora	Większe prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznego zjawiska, wyższy koszt układu
3	<i>Minimize</i>	Zastosowanie bardziej aktywnego katalizatora	Możliwość zastosowania mniejszego reaktora	Większy strumień uwalnianego ciepła, gdy reakcja jest egzotermiczna
4	<i>Minimize</i>	Połączenie reakcji i separacji (jak w destylacji reaktywnej)	Mniejsza liczba aparatów procesowych	Warunki optymalne dla procesu separacji mogą prowadzić do większych czasów przebywania
5	<i>Minimize</i>	Praca z większym stopniem konwersji	Zmniejszenie recyrkulacji materiału oraz kosztów separacji	Zazwyczaj prowadzi do gorszej selektywności, co może powodować zwiększenie stopnia skomplikowania układu separacyjnego

# Inherently Safer Design Principles

LP	Zasada	Zastosowanie w reaktorze	Uzasadnienie	Kompromis
6	<i>Minimize</i>	Poprawienie mieszania	Zmniejszenie czasu reakcji	Większy strumień uwalnianego ciepła, gdy reakcja jest egzotermiczna
7	<i>Substitute</i>	Zastosowanie niepalnego rozpuszczalnika	Niepalne rozpuszczalniki nie mogą spowodować pożaru	Koszty rozpuszczalnika; wiele rozpuszczalników niepalnych to związki halogenowane
8	<i>Substitute</i>	Wykorzystanie biologicznych procesów przetwórczych	Procesy biologiczne przebiegają łagodniej, w fazie wodnej, +/- w temperaturze otoczenia	Znacznie większe reaktory, zwiększenie ilości produkowanych ścieków
9	<i>Substitute</i>	Wykorzystanie innej ścieżki chemicznej	Alternatywna ścieżka chemiczna może pomóc uniknąć związków wybuchowych lub toksycznych	
10	<i>Substitute</i>	Wykorzystanie pary jako czynnika grzejącego, zamiast bezpośredniego opalania lub grzałek elektrycznych	Ogrzewanie parą jest z natury rzeczy ograniczone do temperatury pary, stąd jest bezpieczniejsze	Trudności w uzyskaniu pary wysokotemperaturowej, co skutkuje zmniejszeniem szybkości reakcji; konieczność zastosowania aparatów wysokociśnieniowych; niebezpieczeństwo nieszczelności



# Inherently Safer Design Principles

LP	Zasada	Zastosowanie w reaktorze	Uzasadnienie	Kompromis
11	<i>Moderate</i>	Praca w niższej temperaturze	W przypadku przecieku mieszanina reakcyjna jest dalsza od samozapłonu	Zmniejszenie szybkości reakcji, zwiększenie czasu przebywania i objętości mieszaniny reakcyjnej
12	<i>Moderate</i>	Praca w niższym ciśnieniu	Zmniejszone konsekwencje nadciśnienia	Zmniejszenie szybkości reakcji, zwiększenie czasu przebywania i objętości mieszaniny reakcyjnej
13	<i>Moderate</i>	Praca z większym rozcieńczeniem	Zmniejszona intensywność reakcji, osłabiony efekt temperaturowy reakcji ( $\Delta T$ )	Zmniejszenie szybkości reakcji, zwiększenie czasu przebywania i objętości mieszaniny reakcyjnej, dodatkowe etapy separacji
14	<i>Simplify</i>	Wyeliminowanie procesów nieciągłych	Awaria zaworu przełączającego może być niebezpieczną sytuacją	
15	<i>Simplify</i>	Przeprowadzanie reakcji wewnątrz wymiennika ciepła	Mniej aparatów procesowych	Możliwy przeciek z mieszaniny reakcyjnej do medium grzejnego i odwrotnie

# Bezpieczeństwo bioreaktorów

- Zachowanie sterylności układu:
  - konieczność sterylizacji pożywki, powietrza, itp.;
  - zapewnienie sterylności na danym odcinku linii produkcyjnej.
- Zachowanie szczelności układu względem otoczenia:
  - gdy mikroorganizmy są patogenami dla ludzi, zwierząt lub roślin;
  - gdy mikroorganizmy wytwarzają toksyczne związki chemiczne;
  - gdy narażenie pracowników na mikroorganizmy może spowodować reakcje alergiczne;
  - gdy mikroorganizmy zostały zmodyfikowane genetycznie i istnieje niebezpieczeństwo zasiedlenia środowiska naturalnego.

# Analiza kosztów

Koszt reaktora: koszt zbiornika ciśnieniowego + koszt wyposażenia

Wzór na oszacowanie cen aparatury procesowej:

$$C_e = a + bS^n$$

gdzie:

$C_e$  - cena aparatury w USD (2010)

$S$  – rozmiar aparatu

$a, b, n$  – parametry zależne od typu aparatu

Źródło: Chemical Engineering Design

# Analiza kosztów

Parametry dla wybranych typów aparatów procesowych:

Aparat	Jednostka dla rozmiaru S	S <sub>min</sub>	S <sub>max</sub>	a	b	n
Reaktor z płaszczem i mieszadłem	objętość, m <sup>3</sup>	0,5	100	61 500	32 500	0,8
Zbiornik ciśnieniowy (304 SS)	masa skorupy, kg					
-poziomy		120	250 000	17 400	79	0,85
-pionowy		120	50 000	12 800	73	0,85
Wypełnienie	objętość, m <sup>3</sup>					
-pierścienie Raschiga, 304 SS				0	8 000	1
-pierścienie Palla, 304 SS				0	8 500	1
-strukturalne, 304 SS				0	7 600	1
-strukturalne, PVC				0	5 500	1
Półka	średnica, m	0,5	5			
-sitowa				130	440	1.8
-zaworowa				210	400	1.9
-dzwonowa				340	640	1.9
Wymiennik ciepła	Powierzchnia, m <sup>2</sup>					
-płaszczowo-rurowy (u-rurowy)		10	1000	28 000	54	1,2
-płytowo-ramowy		1	500	1 600	210	0,95
Mieszadło śmigłowe	moc napędu, KW	5	75	17 000	1 130	1,05

Źródło: Chemical Engineering Design

# Powiększanie skali reaktorów

## Wyzwania:

- Złożoność procesu przemiany chemicznej:
  - wymiana pędu, masy i ciepła
  - reakcja chemiczna
- Zróżnicowany wpływ powiększania skali na różne zjawiska (proporcjonalność do długości, powierzchni, objętości...)
- Niezmiennność kluczowych wielkości (np. rozmiar kryształów lub pęcherzy)
- Odprowadzanie ciepła w reakcjach egzotermicznych
- Brak możliwości równoczesnego spełnienia wszystkich kryteriów podobieństwa
- Różnice konstrukcyjne w skali laboratoryjnej i przemysłowej

Oznaczenia: 1 – skala laboratoryjna, 2 – skala przemysłowa

# Kryteria powiększania skali

1. Kryterium podobieństwa warunków prowadzenia procesu:

$$T_1 = T_2$$

$$p_1 = p_2$$

$$(C_A)_1 = (C_A)_2$$

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$\mu_1 = \mu_2$$

$$(D_m)_1 = (D_m)_2$$

2. Kryterium podobieństwa geometrycznego:

$$\left(\frac{H}{D}\right)_1 = \left(\frac{H}{D}\right)_2$$

3. Kryterium podobieństwa liczb kryterialnych:

$$Re_1 = Re_2$$

$$Nu_1 = Nu_2$$

$$Sh_1 = Sh_2$$

4. Kryterium podobieństwa bezwymiarowego czasu reakcji:

$$(Da_I)_1 = (Da_I)_2$$

W przypadku spełnienia kryterium podobieństwa warunków:

$$\tau_1 = \tau_2$$

# Kryteria powiększania skali

5. Kryterium podobieństwa powierzchni wymiany ciepła:

$$\left(\frac{A_q}{V}\right)_1 = \left(\frac{A_q}{V}\right)_2$$

6. Kryterium podobieństwa warunków transportu masy  
w układzie wielofazowym:

$$\begin{aligned}(k_L a)_1 &= (k_L a)_2 \\ (k_g a)_1 &= (k_g a)_2 \\ (ka)_1 &= (ka)_2\end{aligned}$$

# Powiększanie skali bioreaktorów

Ze względu na złożoność procesów biochemicznych podczas powiększania skali nie zmienia się własności fizykochemicznych mediów.

Przykładowe kryteria powiększania skali bioreaktorów:

1. Stałość mocy na jednostkę objętości cieczy nienagazowanej  $\left(\varepsilon = \frac{1}{\rho} \frac{P}{V}\right)$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

Dla przepływu burzliwego:

$$N_2 = N_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2/3}$$

2. Stałość szybkości liniowej łopatek mieszadła:

$$\pi d_1 N_1 = \pi d_2 N_2$$

3. Stałość objętościowego współczynnika wnikania tlenu:

$$(k_L a)_1 = (k_L a)_2$$



# Badania doświadczalne a powiększanie skali

Jakie czynniki brać po uwagę podczas planowania eksperymentów w skali laboratoryjnej, aby wyniki były możliwie miarodajne dla reaktora w dużej skali:

- **Sposób mieszania** – sposób mieszania w małym reaktorze musi odzwierciedlać warunki w dużym reaktorze (np. podawanie strumieni wspólnie do reaktora, podawanie w dwóch różnych miejscach, charakterystyczny czas mieszania).
- **Bilans materiałowy** – już w małym reaktorze bilans materiałowy i bilans pierwiastków musi być zachowany. Należy zwrócić uwagę na skład cieczy i pary w układach wielofazowych, jak i na osadzanie się produktów reakcji na ścianie reaktora i/lub na katalizatorze.
- **Bilans energii i profil temperatury** – trudno jest realizować procesy adiabatyczne w małych reaktorach (należy zadbać o dobrą izolację). Profil temperatury małego reaktora powinien odpowiadać profilowi temperatury w dużym reaktorze (rozkład przestrzenny źródeł ciepła).

# Badania doświadczalne a powiększanie skali (cd.)

- **Przenoszenie masy** – w układach wielofazowych opory transportu masy mogą ograniczać szybkość reakcji, a zatem należy ten mechanizm uwzględnić w badaniach w skali laboratoryjnej, aby móc rozgraniczyć efekt przenoszenia masy oraz efekt samej reakcji chemicznej.
- **Skład strumieni zasilających** – skład strumieni zasilających powinien być identyczny w obydwóch skalach. Odczynniki laboratoryjne mają wysoką czystość i mogą nie zawierać zanieczyszczeń, kluczowych dla procesu.
- **Układ recyrkulacji** – jeśli docelowy układ zawierać będzie recyrkulację strumieni masowych, należy zbadać ten efekt w skali laboratoryjnej (produkty uboczne mogą akumulować się w pętli cyrkulacyjnej).
- **Stan ustalony** – należy zapewnić ścisłe warunki stanu ustalonego.
- **Wiek katalizatora lub komórek** – należy zbadać wpływ długotrwałego stosowania układu reakcyjnego na takie zjawiska, jak starzenie się katalizatora lub ewolucja populacji mikroorganizmów.

# Automatyka procesowa w inżynierii reaktorów

Cele i zadania układów automatyki przemysłowej:

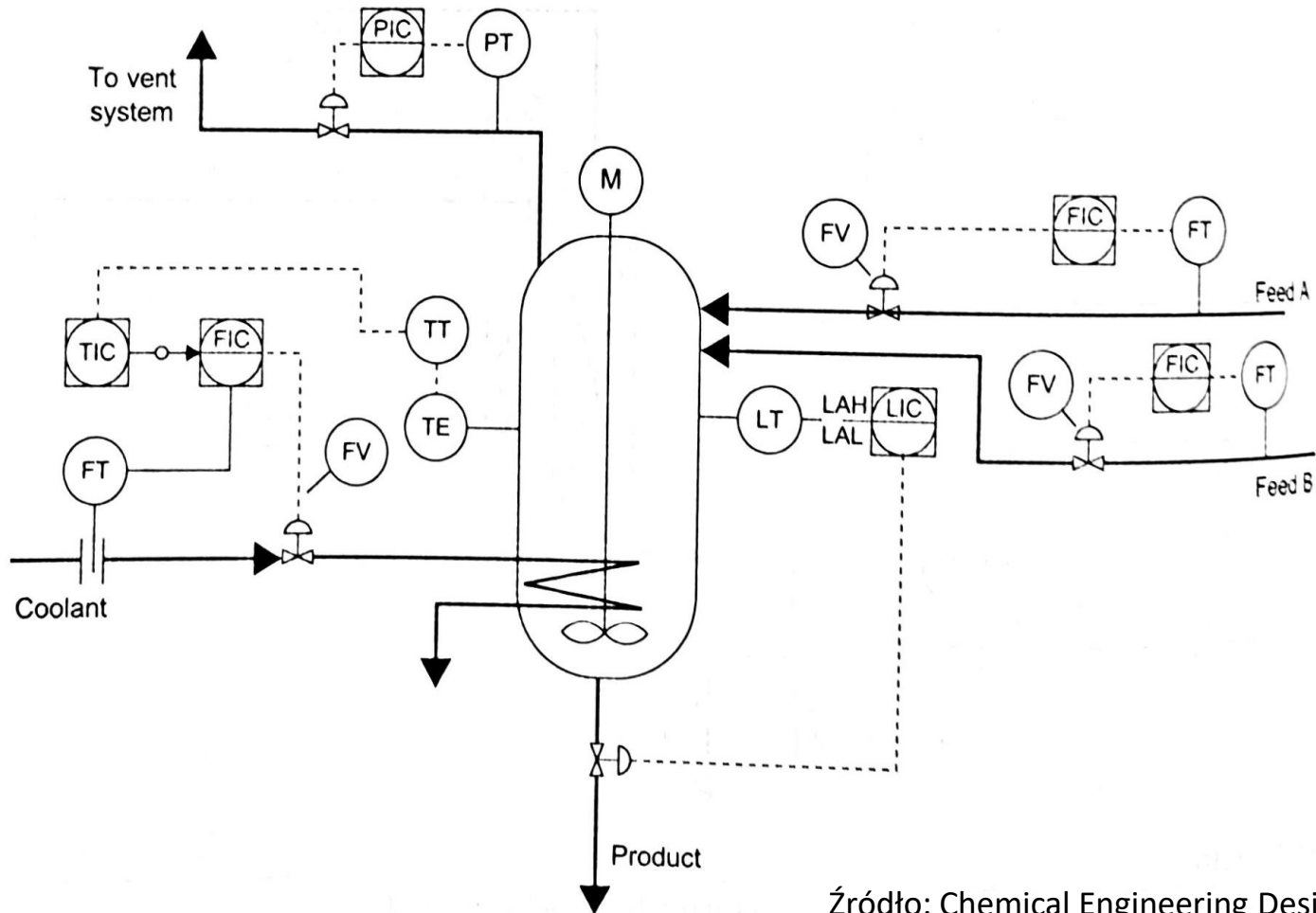
- Bezpieczeństwo pracy instalacji
  - utrzymanie parametrów procesowych w bezpiecznym przedziale
  - wykrywanie stanów nietypowych i niebezpiecznych oraz zapewnienie alarmów i zautomatyzowanych procedur wyłączania awaryjnego
  - Zapewnienie alarmów i blokad, aby zapobiegać realizacji niebezpiecznych ingerencji ze strony operatora
- Wydajność produkcji
- Kontrola jakości
- Stabilność pracy
- Koszty eksploatacji

# Automatyka procesowa w inżynierii reaktorów

Typowe układy regulacji automatycznej dla reaktorów chemicznych:

- **Regulacja temperatury** – np. przez przepływ medium grzejnego, przez recyrkulację strumienia produktowego lub dodanie substancji inertnych
- **Regulacja ciśnienia** – zazwyczaj stałowartościowa (ważna w reaktorach wielofazowych)
- **Regulacja przepływu masowego/objętościowego**
- **Regulacja szybkości mieszania**
- **Regulacja wypełnienia reaktora** (w przypadku reaktorów wielofazowych)
- **Regulacja składu**
  - pH
  - przewodność
  - potencjał redoks
  - lepkość
  - spektrometry działające w trybie online

# P&ID dla reaktora przepływowego z mieszadłem



Źródło: Chemical Engineering Design

Legenda: T – transmitter (przełącznik/przetwornik), I – indicator (wskaźnik), C – controller (regulator), AH – alarm high (alarm wysokiego poziomu), AL – alarm low (alarm niskiego poziomu),

# Aparatura kontrolno-pomiarowa dla bioreaktorów

- **Temperatura** – pomiar temperatury przy użyciu termopar w różnych miejscach bioreaktora; regulacja temperatury przez zmianę przepływu czynnika chłodzącego i/lub grzejącego w wymienniku ciepła.
- **Ciśnienie** – pomiar gazu na wylocie z reaktora oraz regulacja ciśnienia przy pomocy zaworu w przewodzie wylotowym. Zazwyczaj dąży się do utrzymania niewielkiego nadciśnienia (ochrona przed zakażeniem).
- **Poziom cieczy** – ważny dla reaktorów półokresowych i ciągłych. Poziom cieczy może być trudny do zmierzenia z uwagi na pęcherze powietrza oraz pianę.
- **Strumień zasilający** – kontrolowanie szybkości dozowania poszczególnych substratów do reaktora półokresowego lub ciągłego. Strumień zasilający jest często zmienny w czasie (zmiana składu i/lub wielkości).
- **Szybkość mieszania** – bieżąca kontrola pracy mieszadła zapewnia stałość warunków mieszania oraz stabilność transportu tlenu.

# Aparatura kontrolno-pomiarowa dla bioreaktorów

- **pH** – wykorzystanie czujników pH do monitorowania na bieżąco odczynu mieszaniny reakcyjnej. Regulacja pH następuje przez dozowanie małych ilości kwasu ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) lub zasady ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{NH}_3$ ).
- **Tlen rozpuszczony** – pomiar przy użyciu sond tlenowych *in situ*. Sonda tlenowa może zostać sprzężona z regulacją ciśnienia (aby zwiększyć ciśnienie cząstkowe tlenu) lub mieszania (aby zwiększyć intensywność transportu tlenu) .
- **Pienienie** – pomiar przy użyciu np. sondy konduktometrycznej, umiejscowionej na odpowiedniej wysokości. Służy od regulacji dozowania środków przeciwpieniących.
- **Skład gazu wylotowego** – monitorowanie składu *online* w celu określenia dostępności tlenu dla mikroorganizmów.
- **Skład fazy ciekłej** – analiza chromatograficzna *offline*.
- **Mętność** – wskazuje pośrednio na stężenie biomasy.

# Procedura opracowania systemu automatyki procesowej

1. Zidentyfikować i narysować pętle regulacji, które są w sposób oczywisty niezbędne do zachowania stabilnej pracy instalacji (poziom, przepływ, ciśnienie, temperatura).
2. Zidentyfikować główne zmienne procesowe, którymi trzeba sterować, aby osiągnąć pożądaną jakość produktu. Narysować stosowane pętle regulacji dla tych zmiennych lub dla wielkości pochodnych.
3. Dodać pętle regulacji, niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa procesu.
4. Zdecydować o dodatkowych punktach pomiarowych do monitorowania przebiegu procesu przez operatora, do identyfikacji i usuwania awarii, oraz do przyszłych badań i modyfikacji układu (np. dodatkowe porty na termometry, punkty poboru próbek).
5. Wybrać położenie punktów poboru próbek.
6. Zdecydować o typie regulatora (lokalny czy przyłączony do zakładowego systemu automatyki procesowej).
7. Określić rodzaje alarmów i blokad.