

KAMIL JANIAK

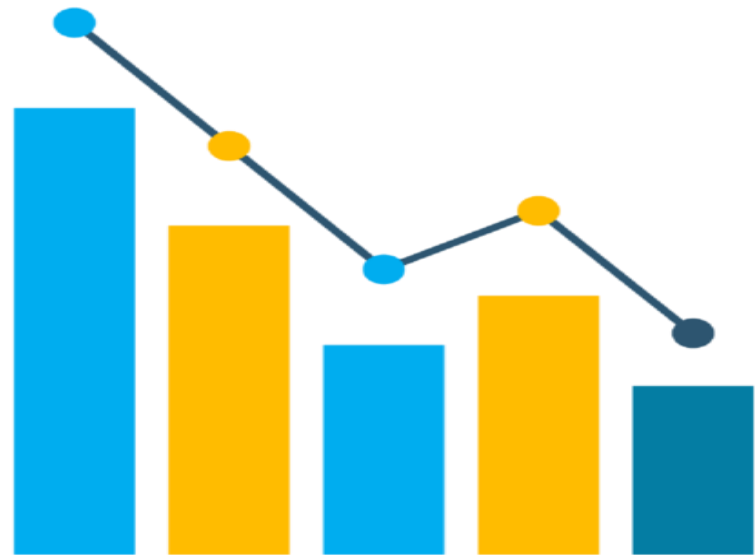
---

# STABILIZACJA OSADÓW I PROCESY TOWARZYSZĄCE

Oczyszczanie ścieków - kurs

Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika  
Wrocławska

WROCŁAW, 2025



# Zakres szkolenia

- 
1. Fermentacja metanowa
  2. Dezintegracja i Kofermentacja
  3. Tlenowa stabilizacja osadów
  4. Autotermiczna stabilizacja osadów
-

# **Cele stabilizacji osadów**

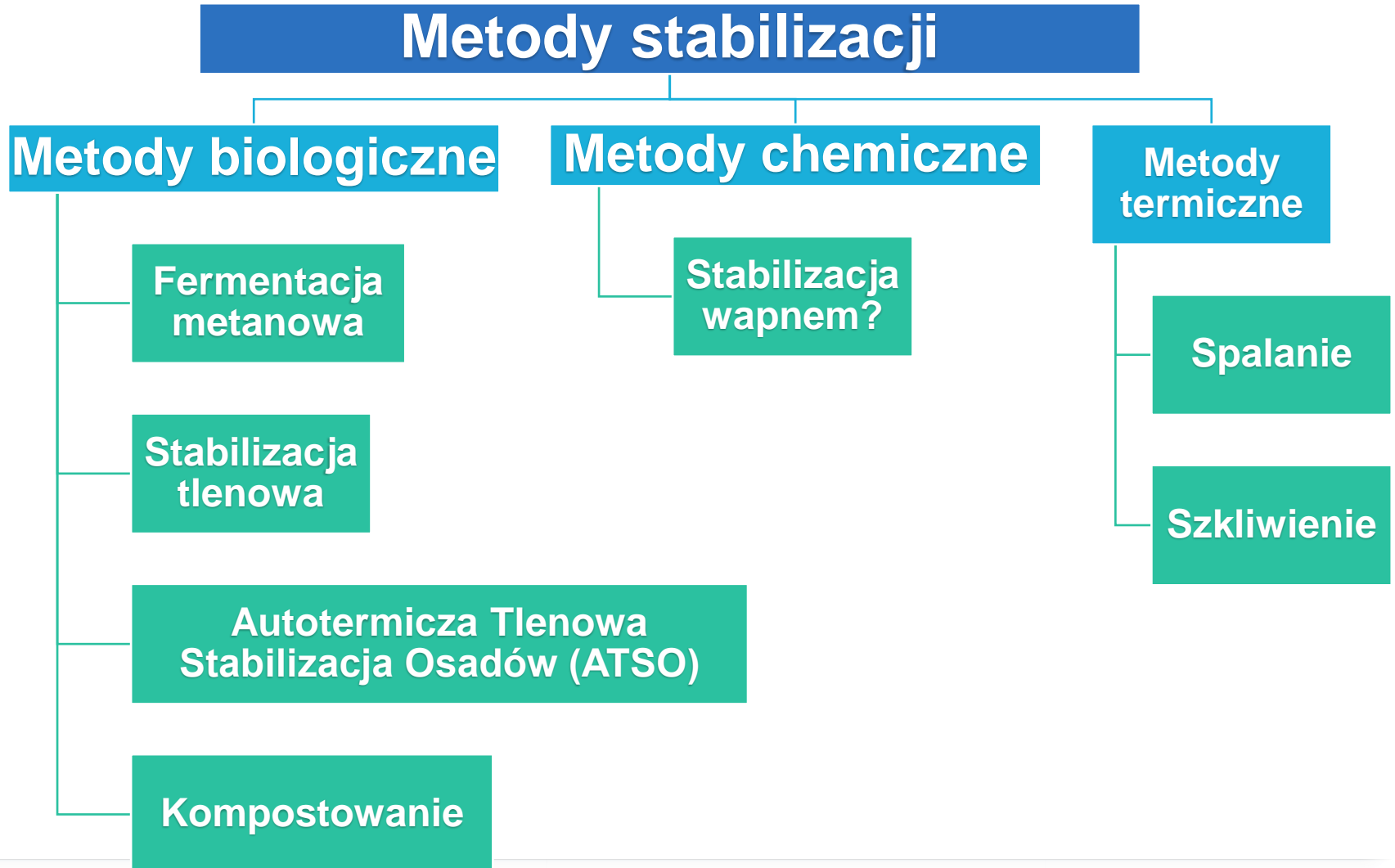
# Cel stabilizacji

---

- Eliminacja uciążliwości zapachowej osadu
- Zmniejszenie lub eliminacja zdolności osadu do zagniwania
- Zmniejszenie zawartości organizmów patogennych w osadzie

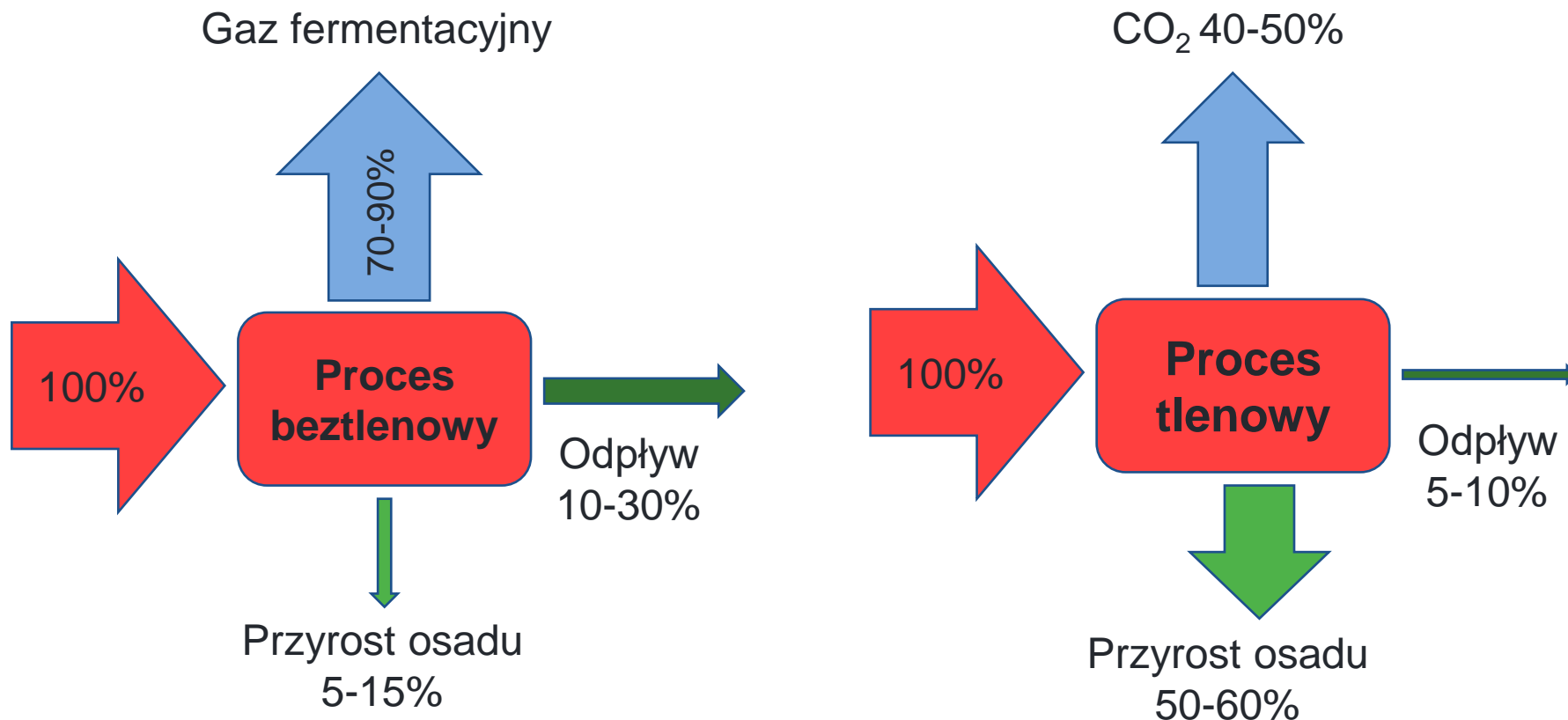
# Metody stabilizacji

---



# Biologiczne metody stabilizacji

## Procesy tlenowe, a beztlenowe



# **Fermentacja metanowa**

# Fermentacja metanowa

---

Jest to biologiczne przekształcenie materii organicznej do  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$  (gaz fermentacyjny) i  $\text{H}_2\text{O}$ .

Realizowane w reaktorze beztlenowym (zwykle zamkniętym i ogrzewanym).





# Fermentacja metanowa

---



# Fermentacja metanowa

## Wady i zalety

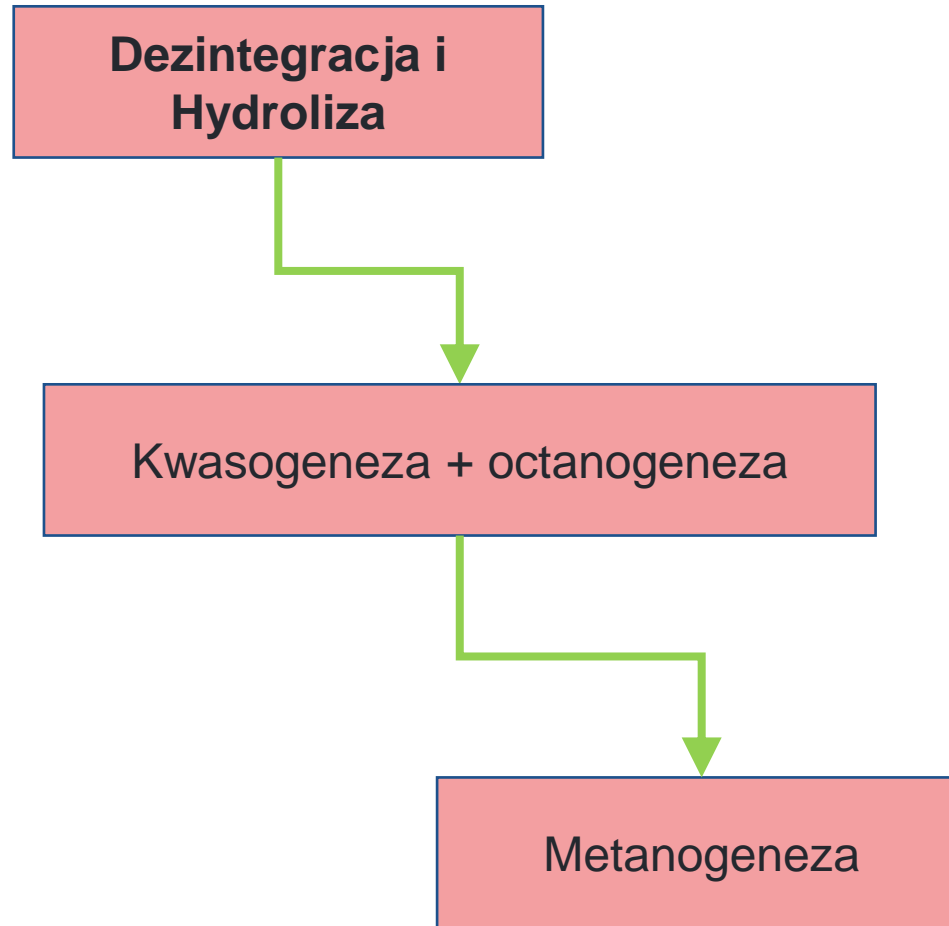
---

Wady	Zalety
<ul style="list-style-type: none"><li>• Wysokie koszty inwestycyjne</li><li>• Niezbędna wysoko wykwalifikowana załoga</li><li>• Wysokie stężenia biogenów w odciekach</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Produkcja gazu fermentacyjnego – dodatni bilans energetyczny</li><li>• Zmniejszenie ilości osadów</li></ul>

# Fermentacja metanowa

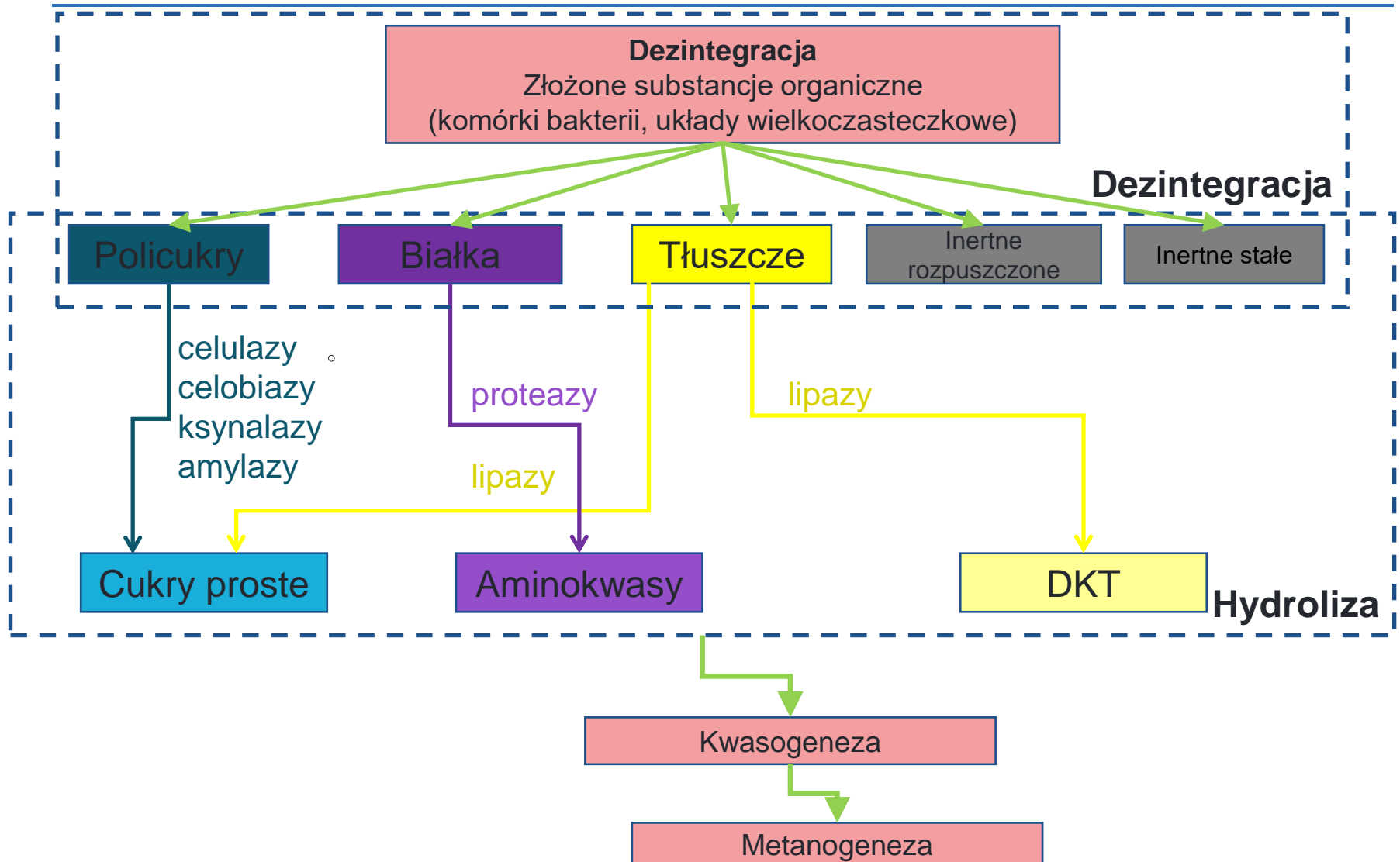
## Przebieg

---



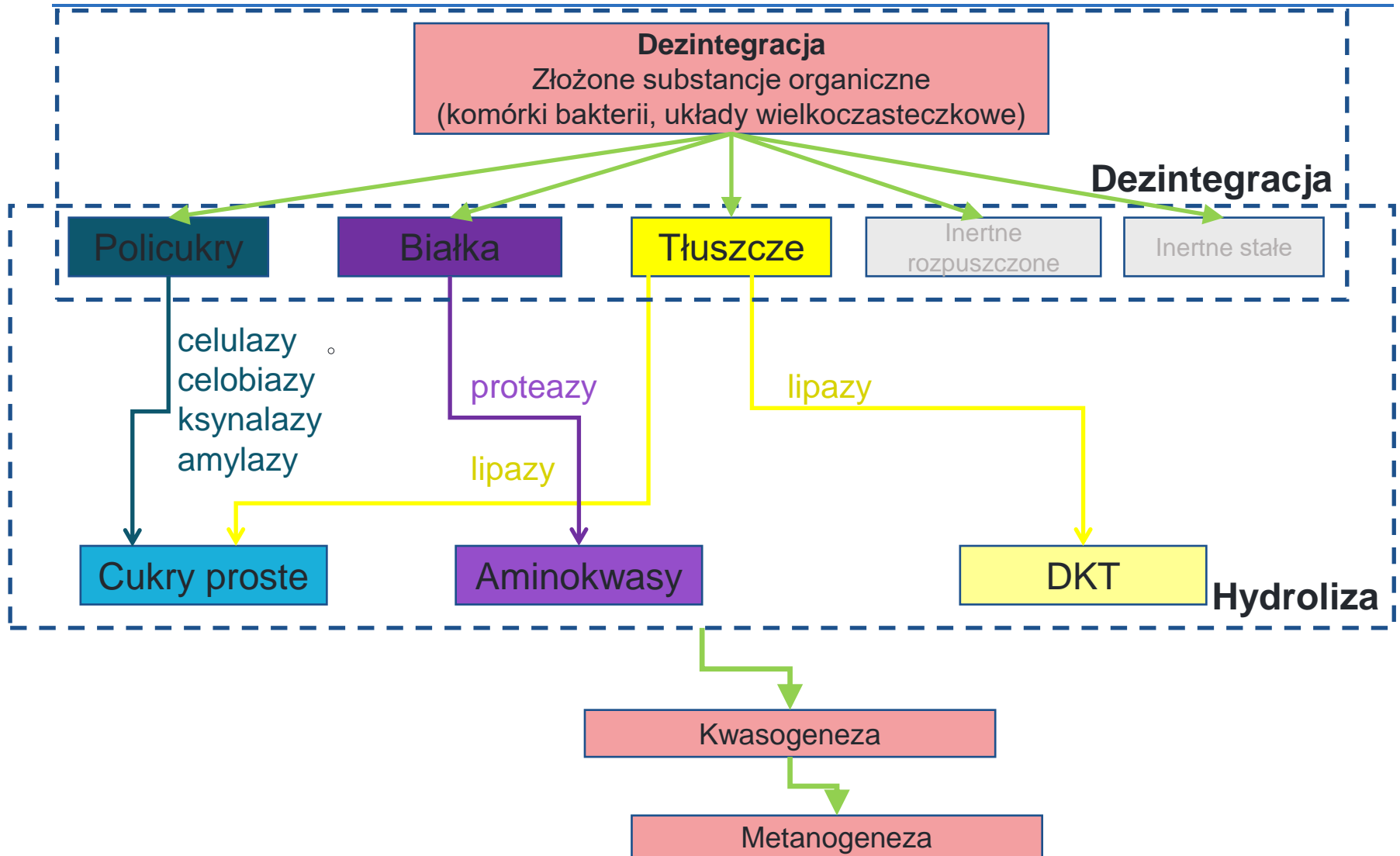
# Fermentacja metanowa

## Przebieg



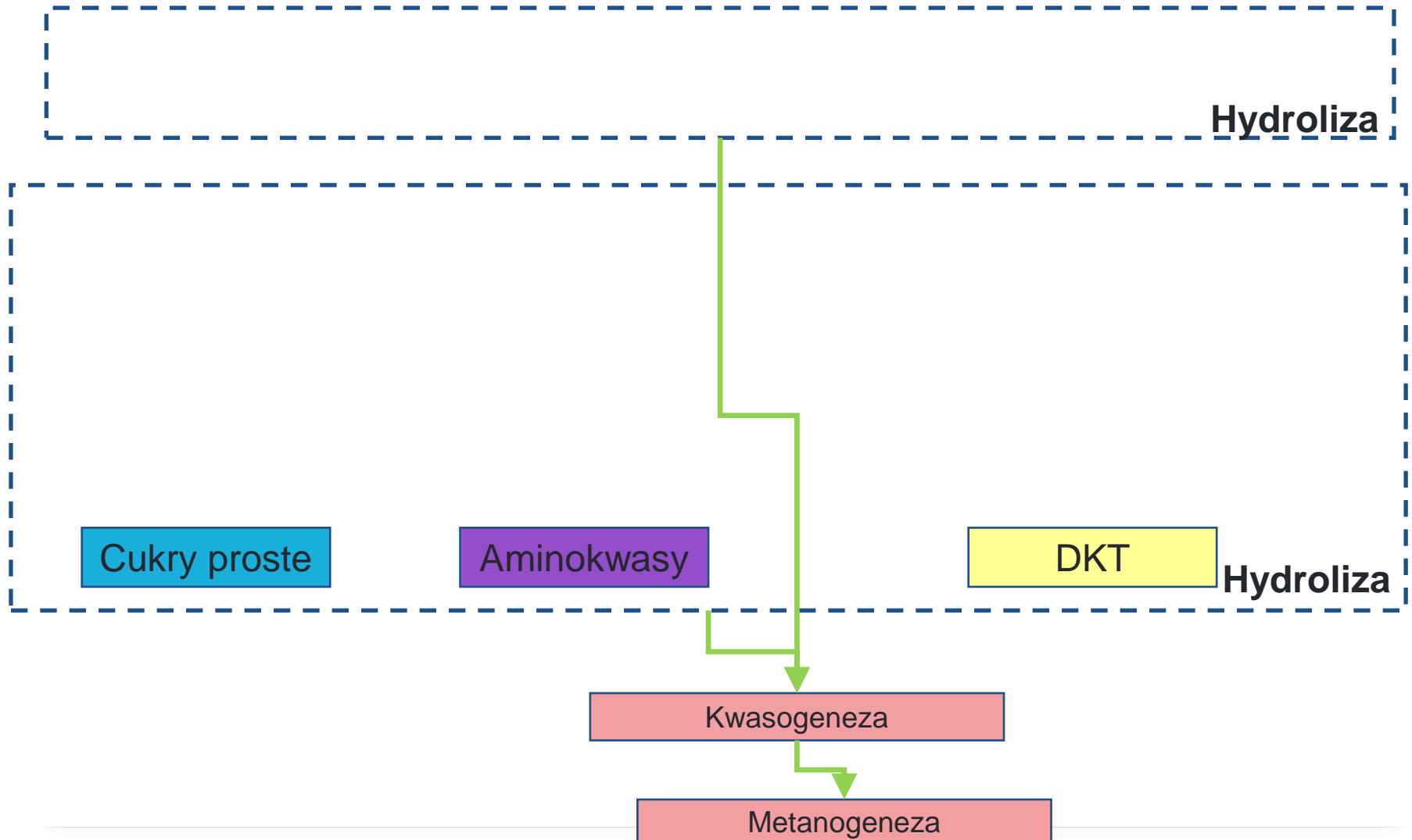
# Fermentacja metanowa

## Przebieg



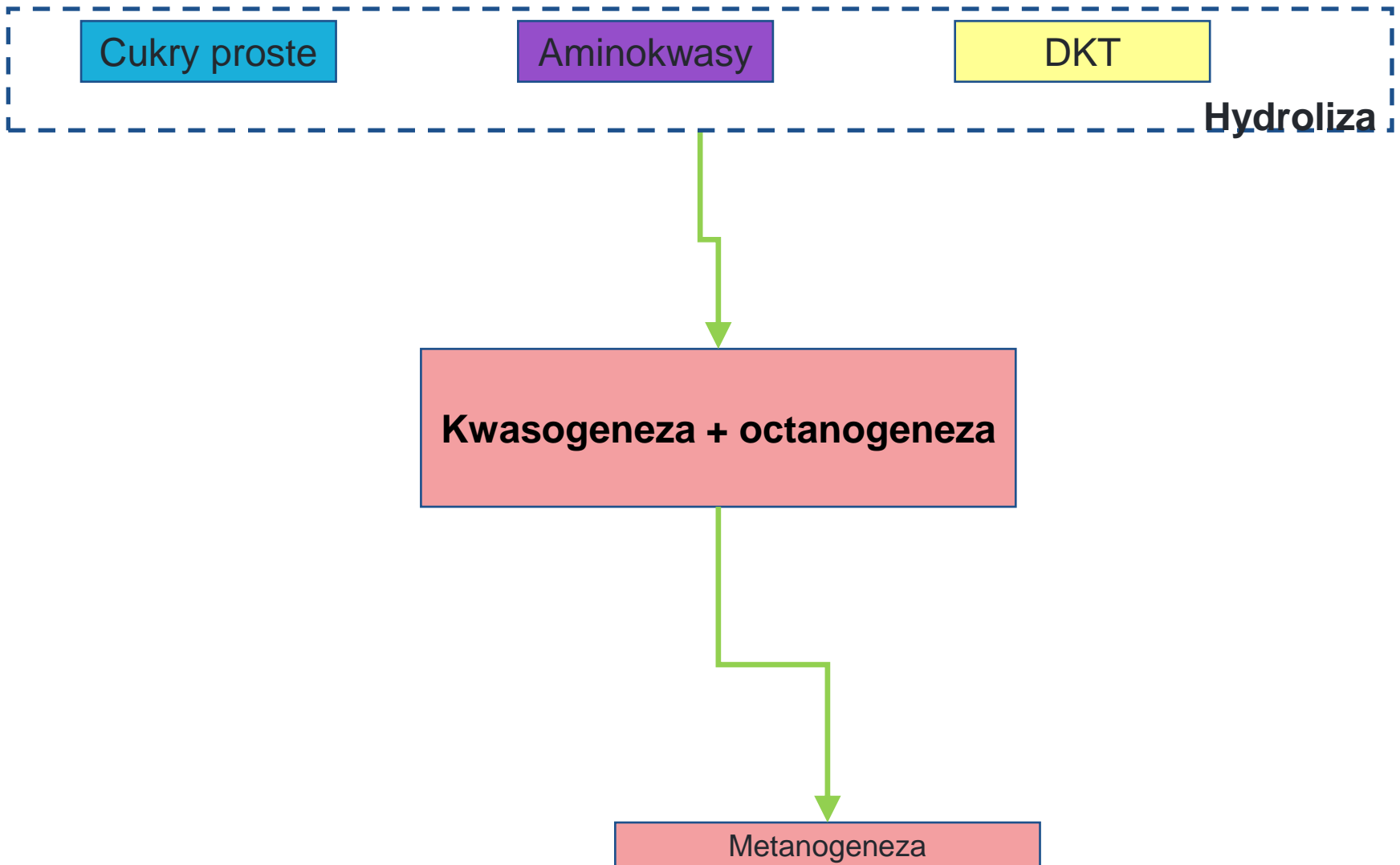
# Fermentacja metanowa

## Przebieg



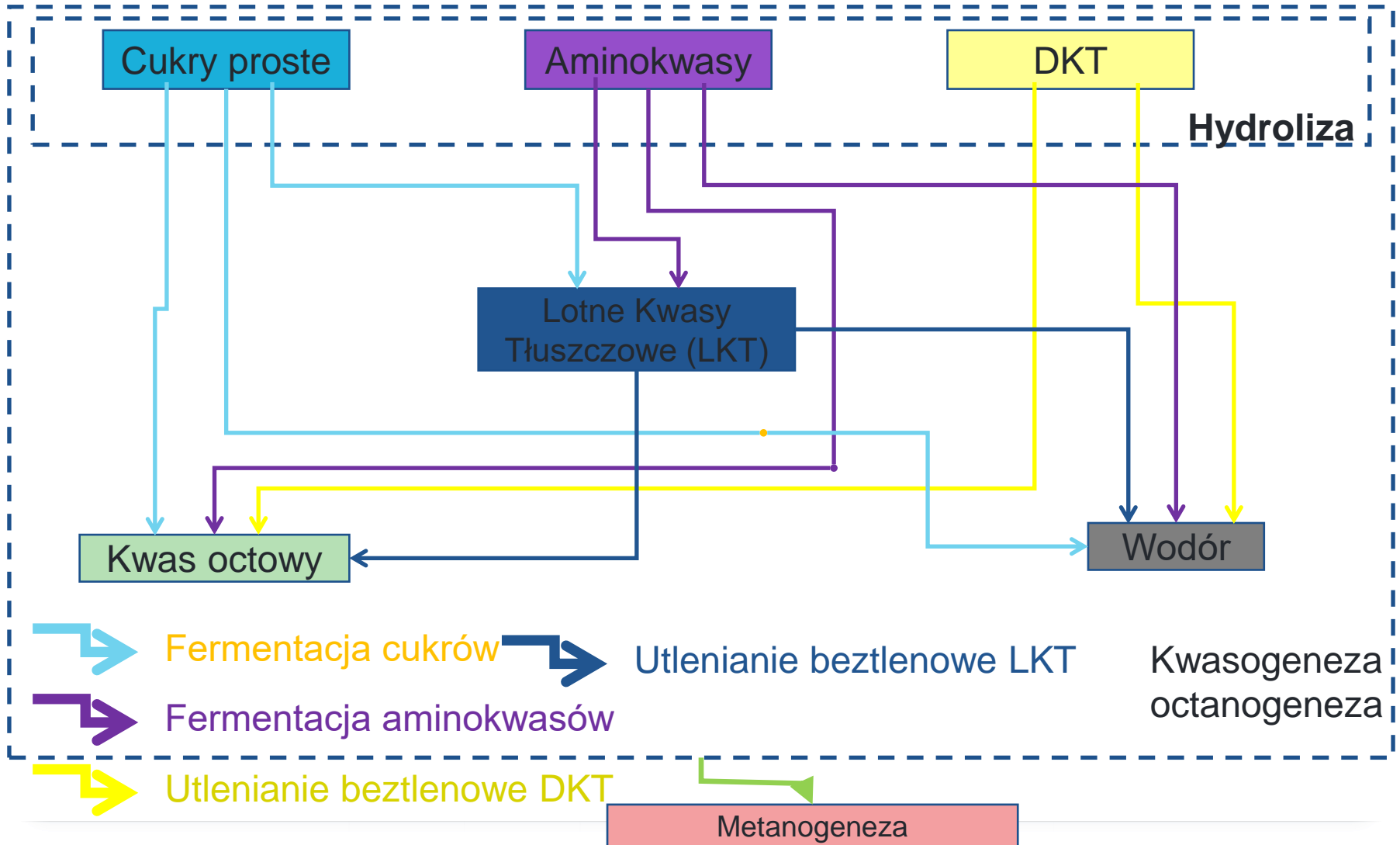
# Fermentacja metanowa

## Przebieg



# Fermentacja metanowa

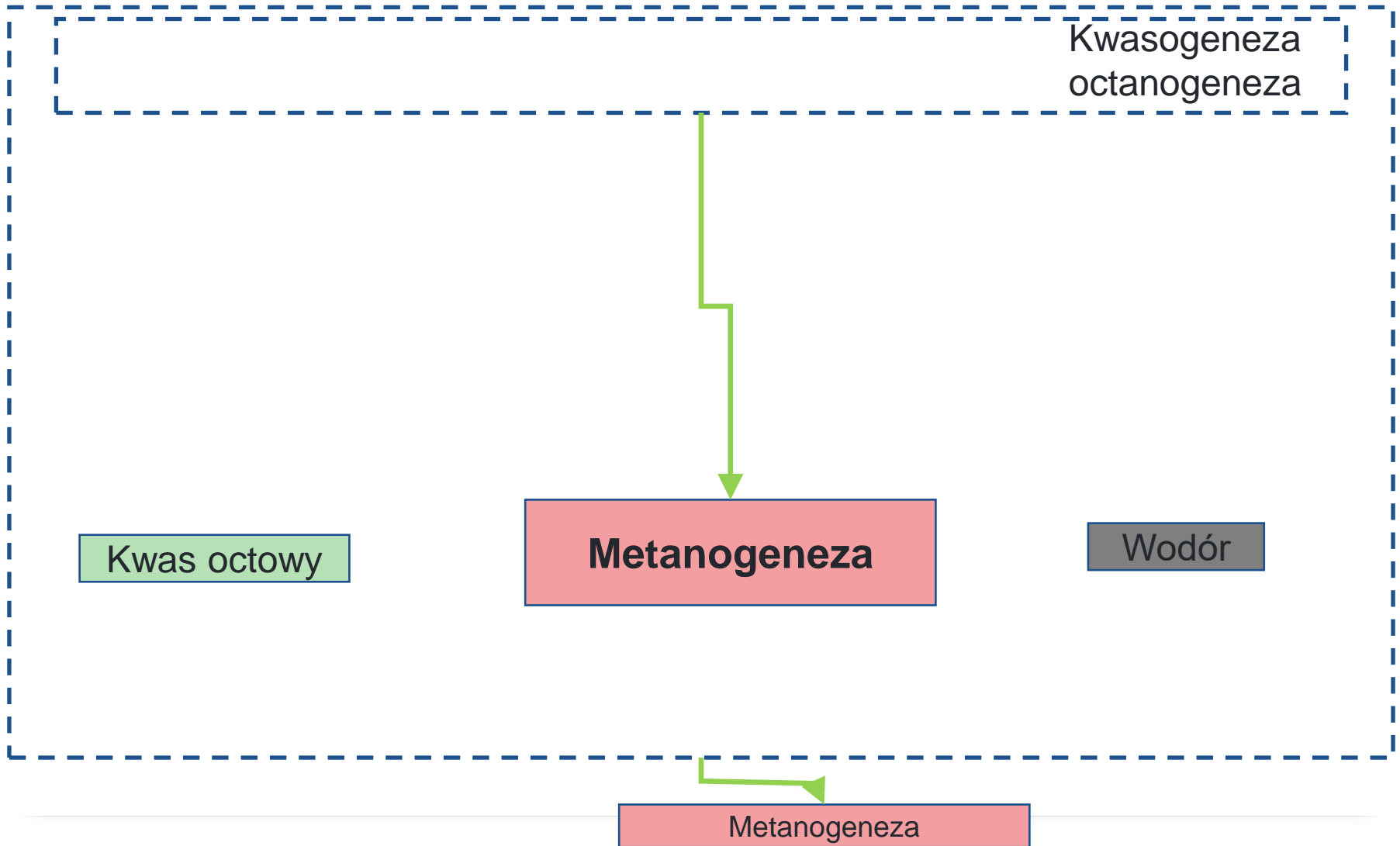
## Przebieg





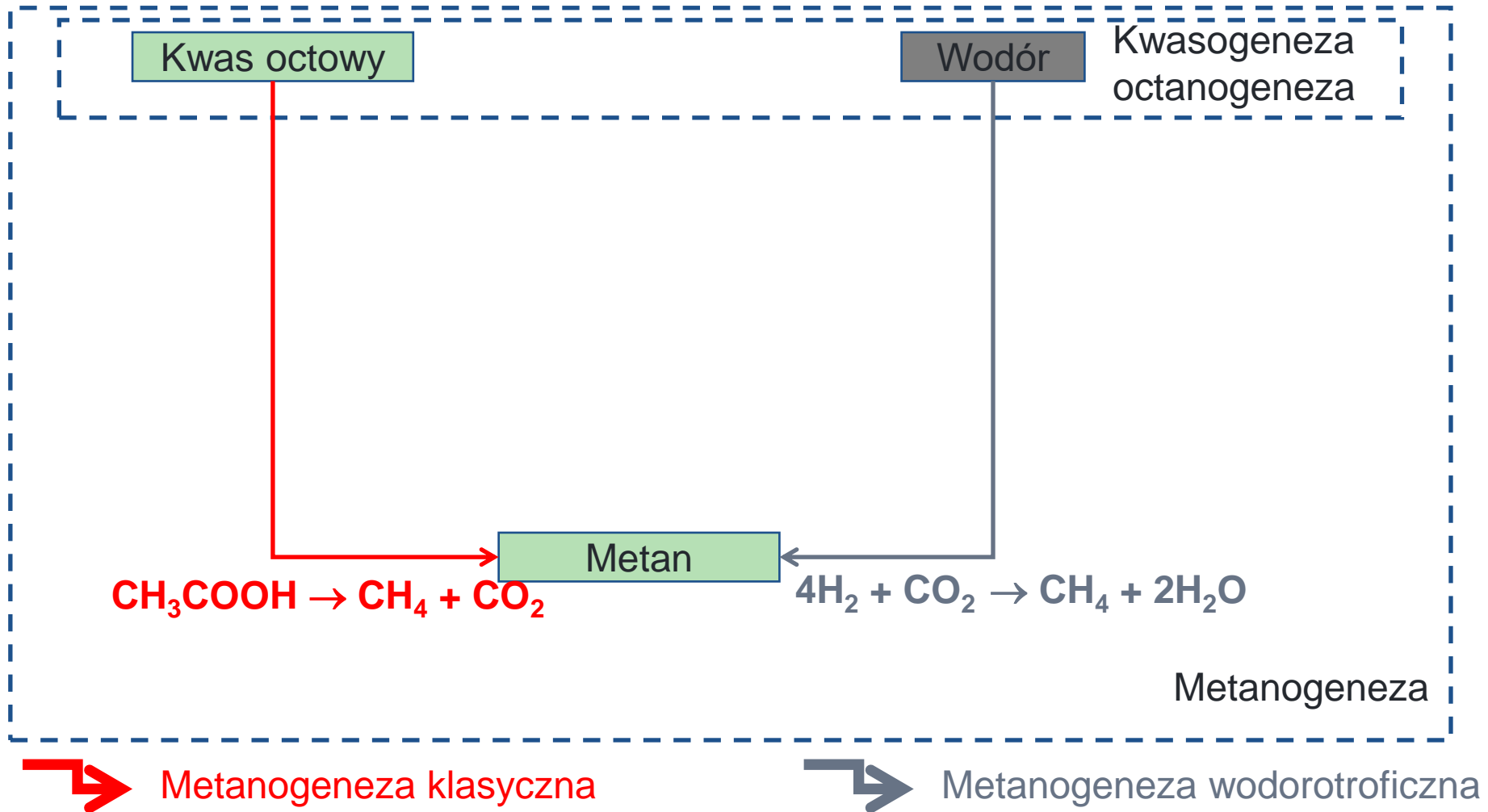
# Fermentacja metanowa

## Przebieg



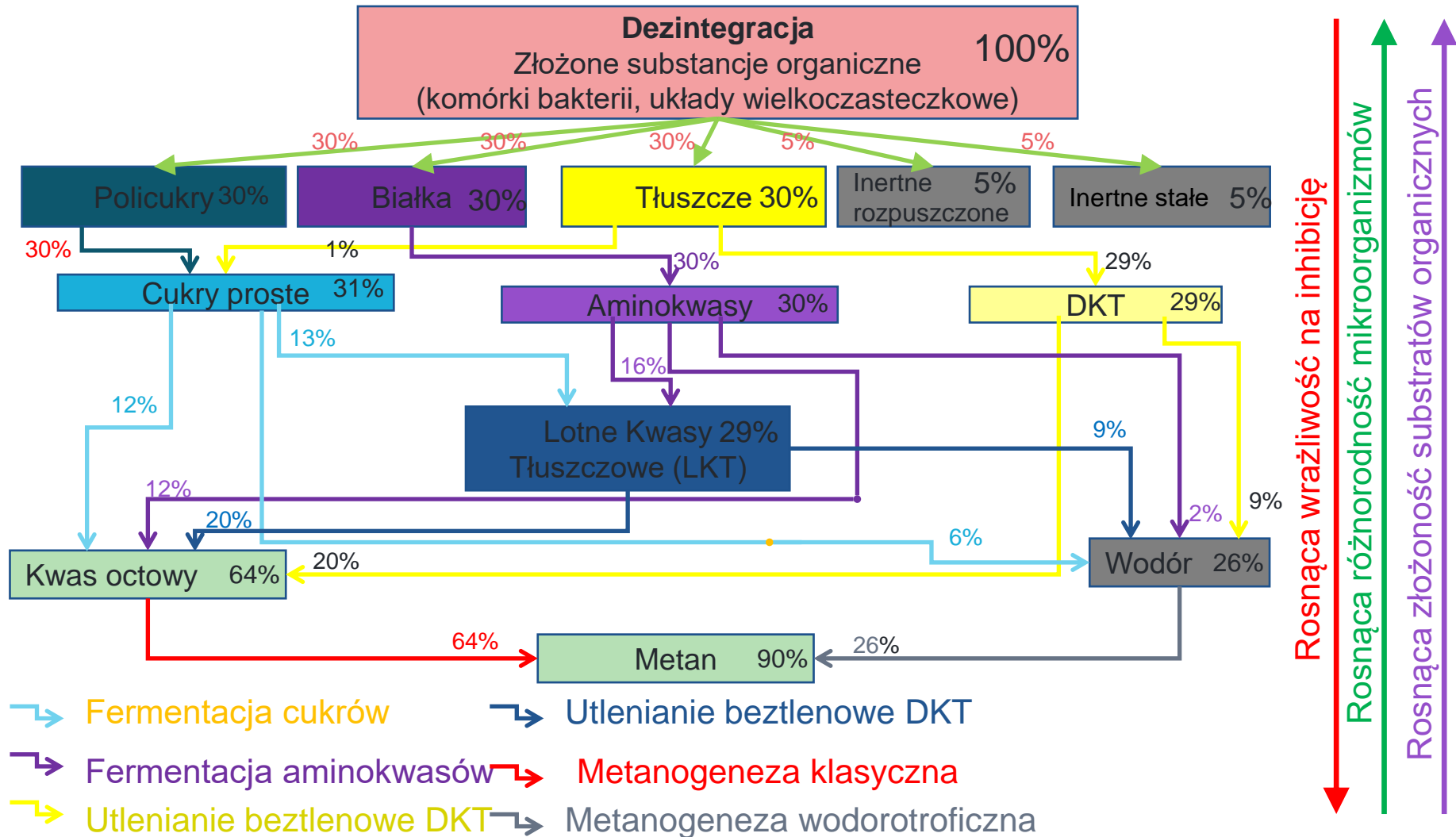
# Fermentacja metanowa

## Przebieg



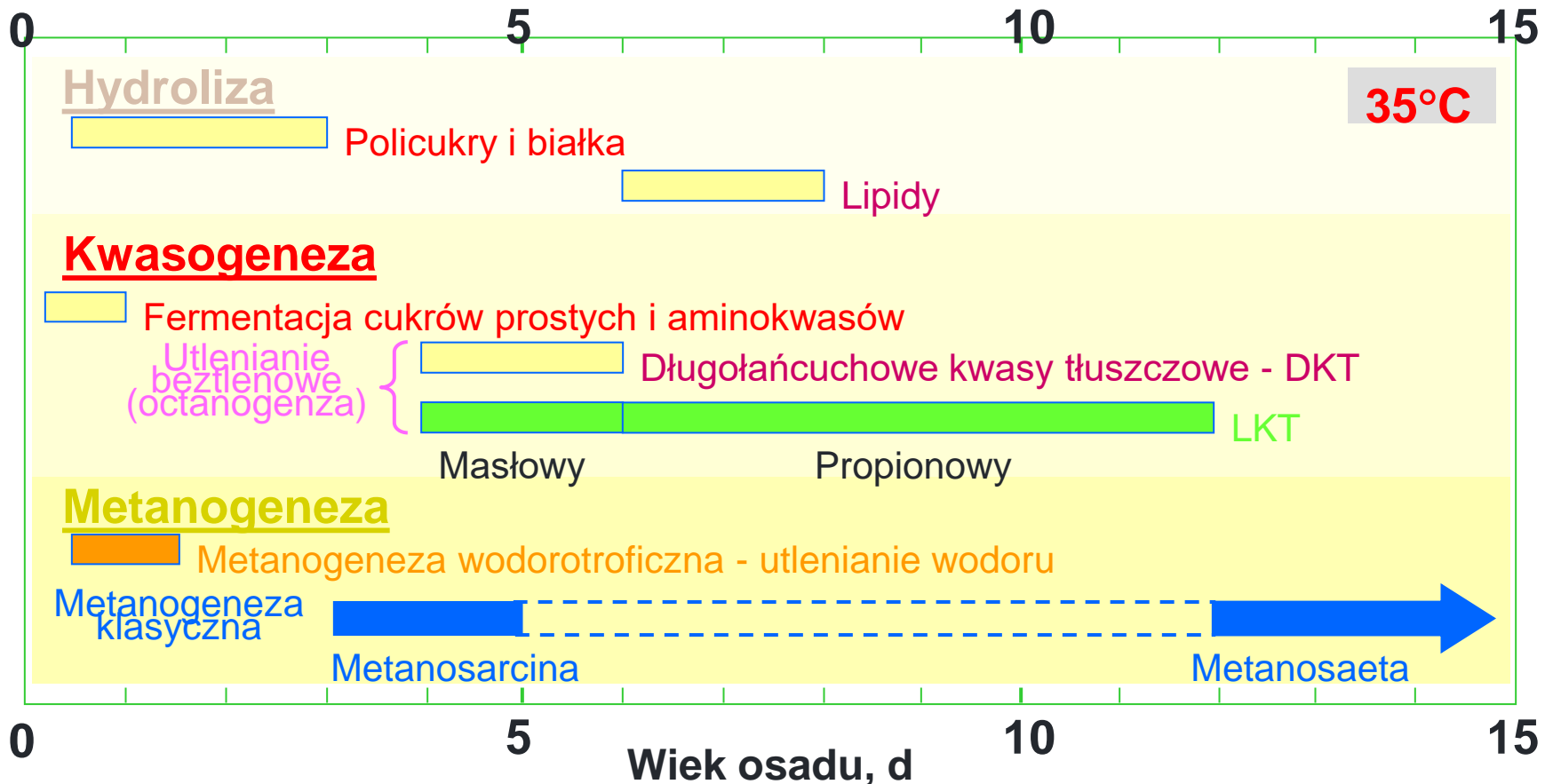
# Fermentacja metanowa

## Przebieg



# Fermentacja metanowa

Wiek osadu – przykład dla osadu wstępnego



Tak jak w procesie osadu czynnego, wiek osadu decyduje, które organizmy mogą pozostawać w komorze fermentacyjnej

# Fermentacja metanowa

Wiek osadu – 3d – przykład dla osadu wstępnego



- Hydroliza polocukrów i białek (max ~65%  $\Delta$ BZT)
- Fermentacja cukrów prostych i aminokwasów do:
  - LKT (max ~50%) – w tym kwas octowy max. ~26%
  - H<sub>2</sub> dalej przekształcony do CH<sub>4</sub> (max ~9%)
- Przyrost biomasy (max ~6%)
- Słaba hydroliza lipidów (a w konsekwencji słaba produkcja DKT)
- Brak octanogenezy kwasu propionowego
- Brak klasycznej metanogenezy (tylko utlenianie wodoru CH<sub>4</sub> (max ~9%) )

# Fermentacja metanowa

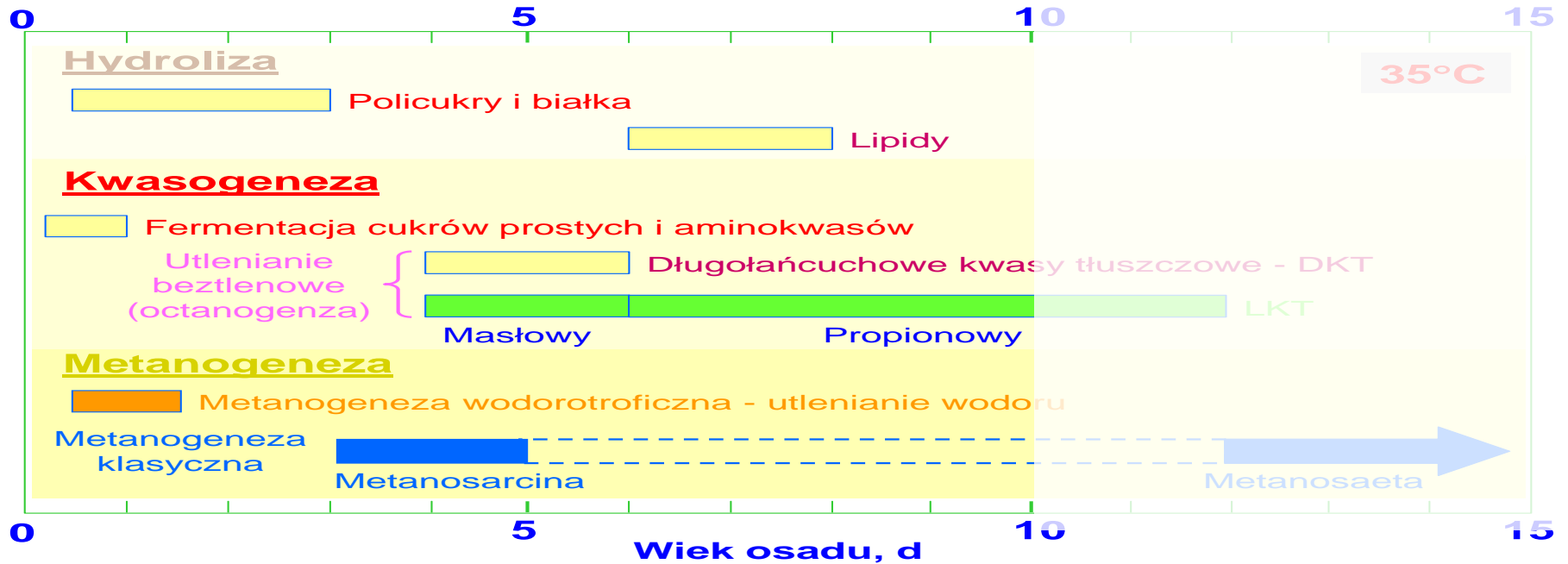
Wiek osadu – 6d – przykład dla osadu wstępnego



- Hydrolyza polocukrów i białek (max ~65%  $\Delta$ BZT)
- Fermentacja cukrów prostych i aminokwasów do:
  - LKT (max ~50%)
    - w tym kwas octowy dalej fermentowany do CH<sub>4</sub> (max ~24%)
  - H<sub>2</sub> dalej utleniany do CH<sub>4</sub> (max ~9%)
- Octanogeneza LKT (bez kwasu propionowego – max ~13%) do:
  - Kwasu octowego - ferment. do CH<sub>4</sub> (max ~9%)
  - H<sub>2</sub> - dalej utlenianego do CH<sub>4</sub> (max ~3%)
- Przyrost biomasy (max ~7%)
- Metanogeneza H<sub>2</sub> i CH<sub>3</sub>COOH do CH<sub>4</sub> (max ~[24+9+9+3]% = 45%)

# Fermentacja metanowa

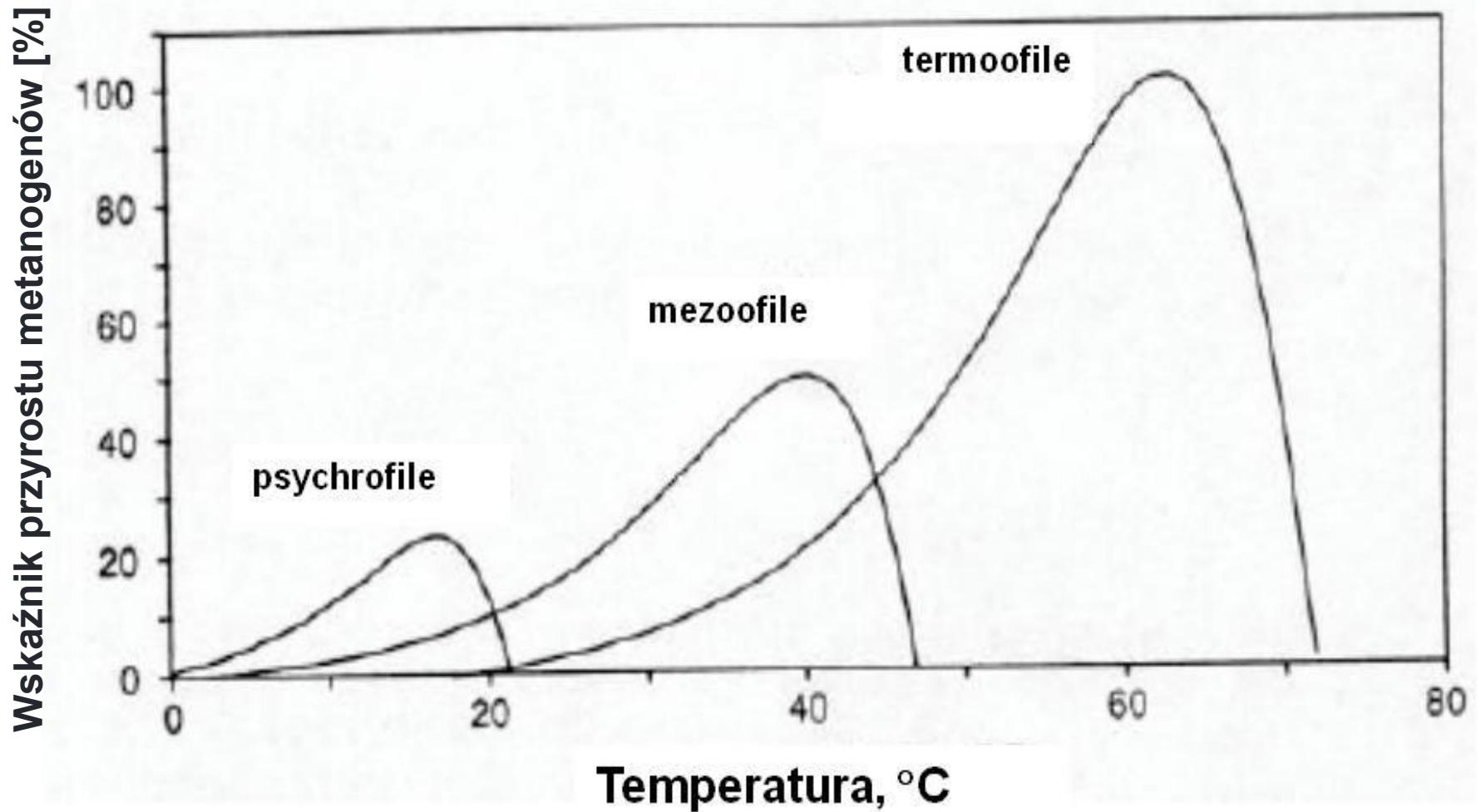
Wiek osadu – 10d – przykład dla osadu wstępnego



- Hydroliza polocukrów, białek i lipidów (max ~100%  $\Delta$ BZT)
- Fermentacja cukrów prostych i aminokwasów do:
  - LKT (max ~50%) w tym kwas octowy dalej fermentowany do  $\text{CH}_4$  (max ~24%)
  - $\text{H}_2$  dalej utleniany do  $\text{CH}_4$  (max ~9%)
- Octanogeneza DKT i LKT (w tym kwasu propionowego) do:
  - Kwasu octowego ferment do  $\text{CH}_4$  (max ~38%)
  - $\text{H}_2$  dalej utleniany do  $\text{CH}_4$  (max ~19%)
- Produkcja biomasy (max ~10%)
- Metanogeneza  $\text{H}_2$  i  $\text{CH}_3\text{COOH}$  do  $\text{CH}_4$  (max ~[24+9+38+19]% = 90%)

# Fermentacja metanowa

## Wpływ temperatury





# Fermentacja metanowa

## Wpływ temperatury

---

### Proces psychrofilowy 10-20°C

Otwarte komory fermentacyjne (OKF)

Małe i średnie obiekty

### Proces mezofilowy 32-37°C

Zamknięte komory fermentacyjne (WKF)

Duże i średnie obiekty

### Proces termofilowy 50-55°C

Zamknięte komory fermentacyjne (WKF)

Duże obiekty

Mała liczba obiektów

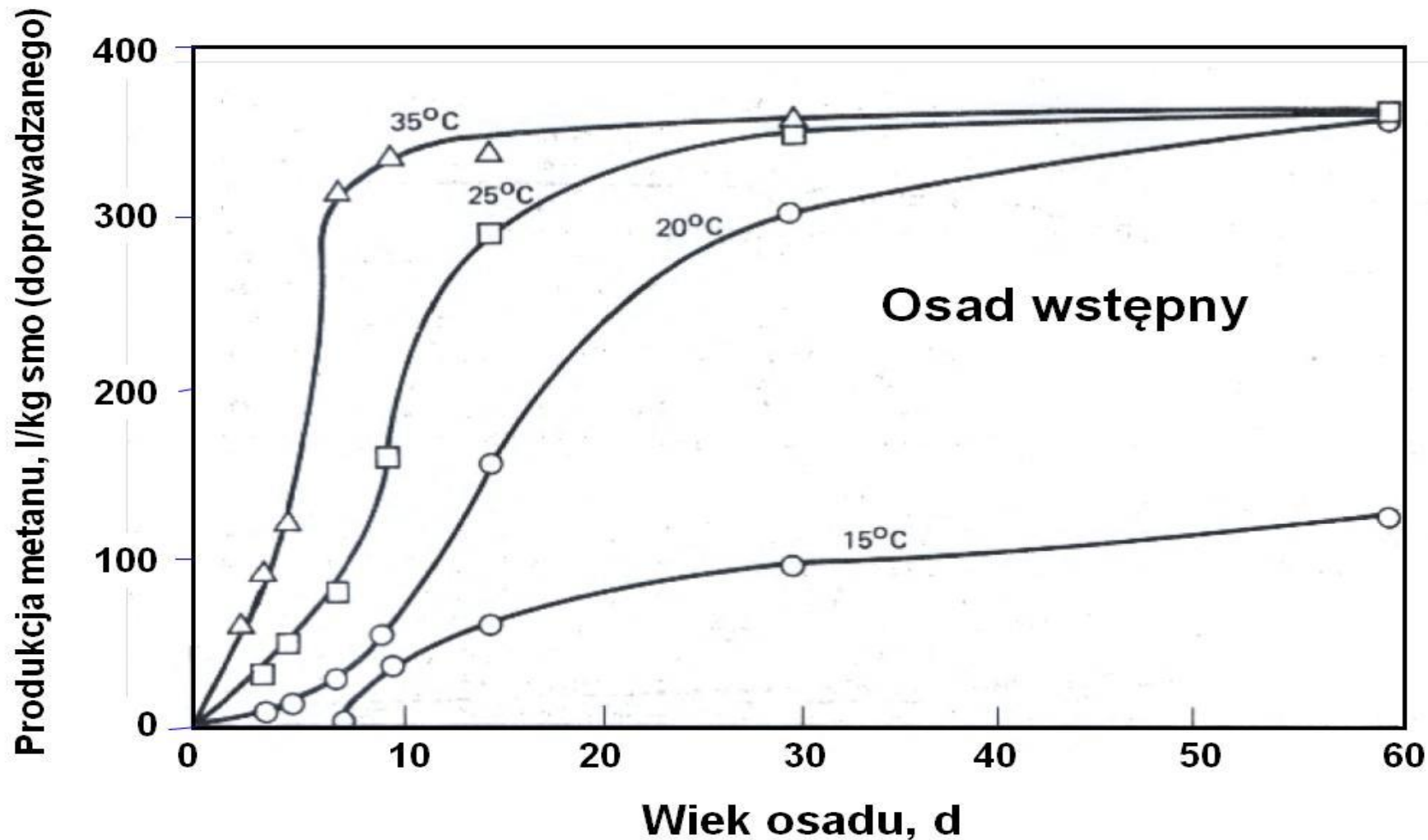
Wrażliwość procesu na inhibicję  
(głównie azot amonowy)

Stabilność procesu fermentacji

Niezbędna kubatura  
(czas hydraulicznego przetrzymania)

# Fermentacja metanowa

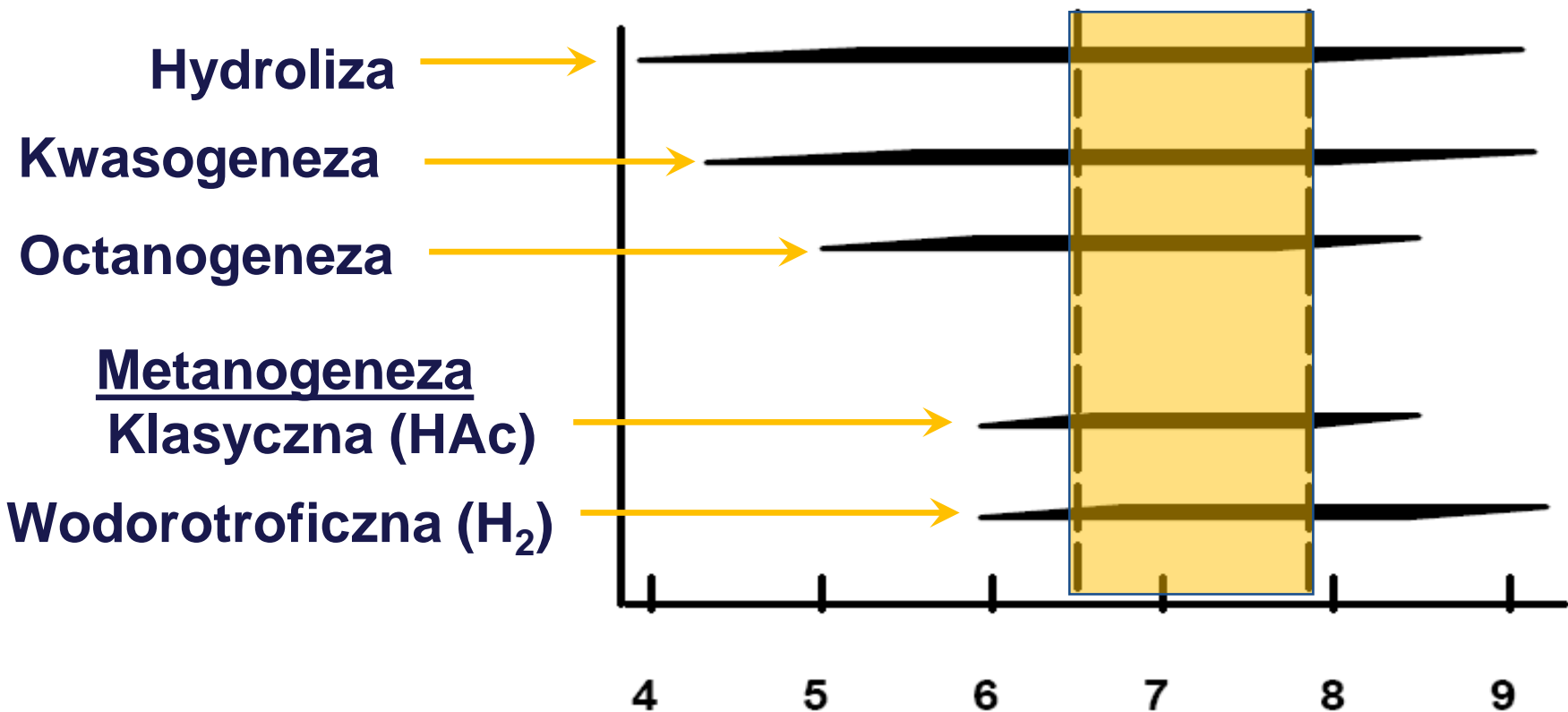
## Wpływ temperatury



# Fermentacja metanowa

Wpływ pH

Przedział pH bezpiecznego przebiegu fermentacji metanowej



# Fermentacja metanowa

## Wpływ pH

---

### Hydroliza

Rozsądna aktywność w zakresie pH 4-9

### Kwasogeneza

Rozsądna aktywność w zakresie pH 4,5-9

### Octanogeneza

Rozsądna aktywność w zakresie pH 5-8,5

### Metanogeneza wodorotroficzna

Rozsądna aktywność w zakresie pH 6-9

### Metanogeneza klasyczna

Rozsądna aktywność w zakresie pH 6-8,5

**Optimum w zakresie pH 6,5-7,8**



# Fermentacja metanowa

## Zasadowość i pH

$$HCO_3^- = 6.44 \cdot 10^{-4} \left( \frac{p(CO_2)}{10^{-pH}} \right)$$

$$pH = \log \frac{HCO_3^-}{6.44 \cdot 10^{-4} \times p(CO_2)}$$

WKF

$$pH = \log \frac{2000[gCaCO_3/m^3]}{6.44 \cdot 10^{-4} \times 0,35[atm]} = 6,95$$

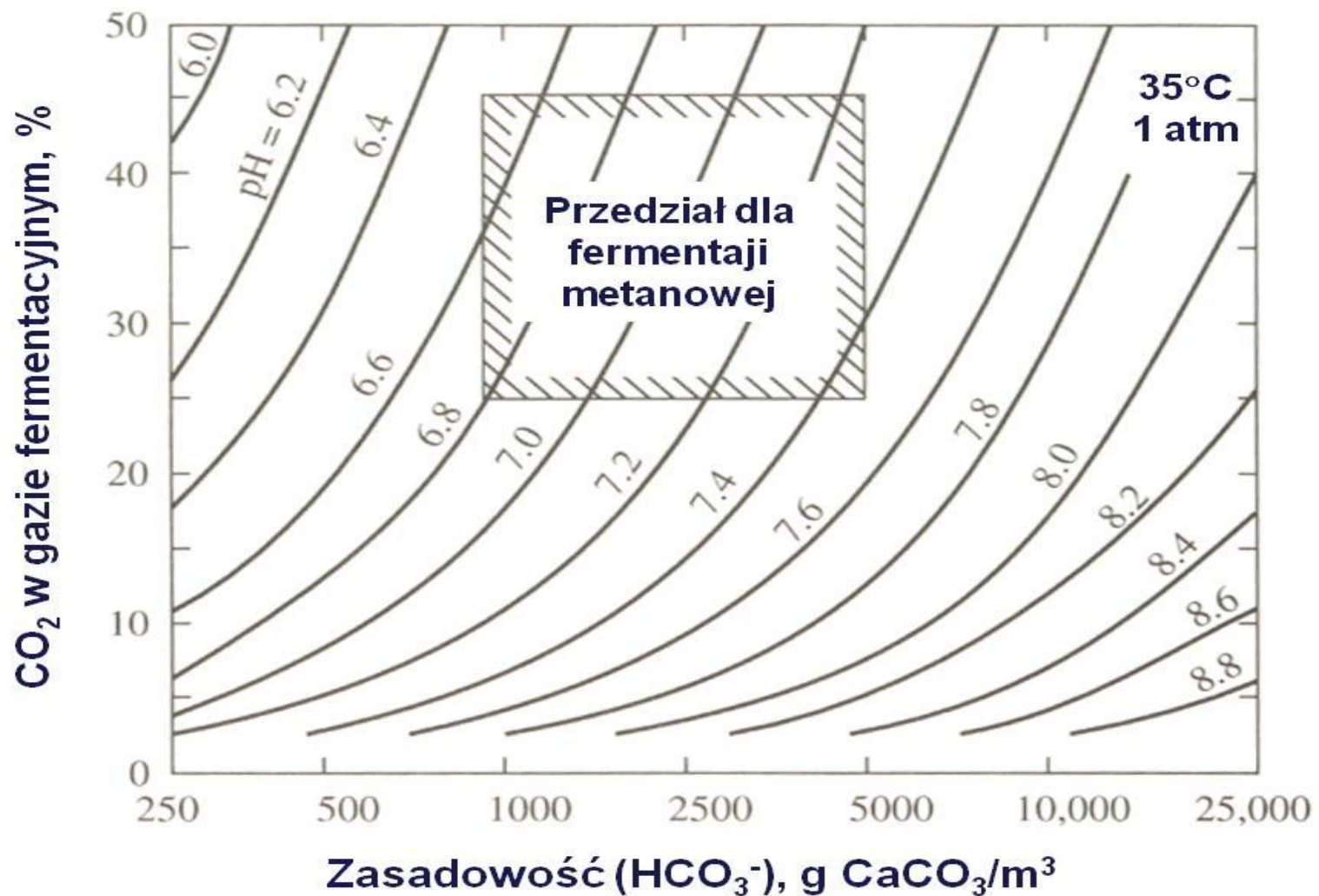
OKF

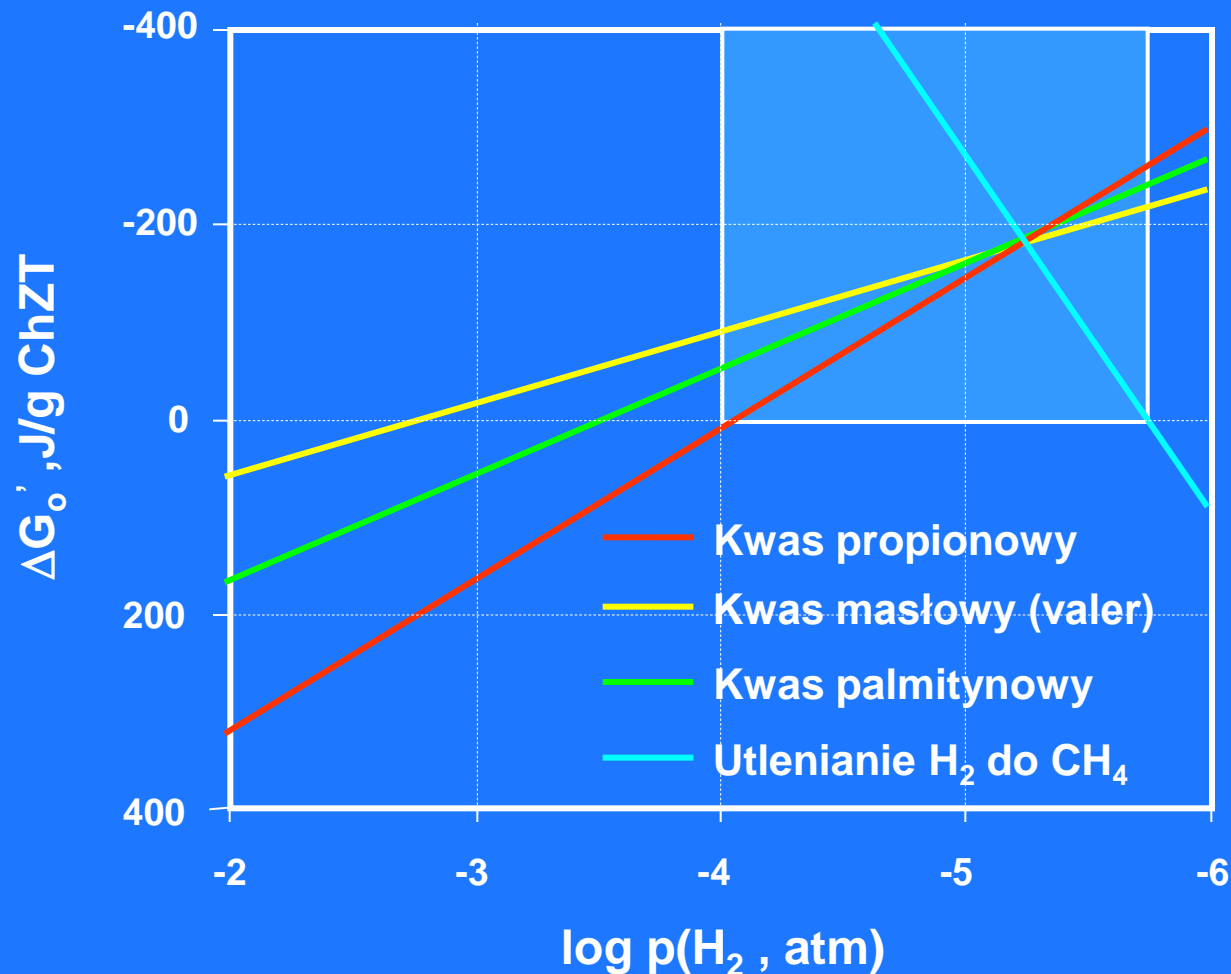
$$pH = \log \frac{2000[gCaCO_3/m^3]}{6.44 \cdot 10^{-4} \times 0,05[atm]} = 7,79$$

**pH w reaktorze zależne jest od udziału zasadowości oraz od ciśnienia parcjalnego dwutlenku węgla.**

# Fermentacja metanowa

## Zasadowość i pH





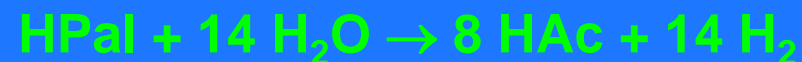
$\Delta G_o'$  jest funkcją ciśnienia wodoru w gazie  $p(\text{H}_2)$



Bardzo niskie  $p(\text{H}_2)$  warunkuje przebieg octanogenezy

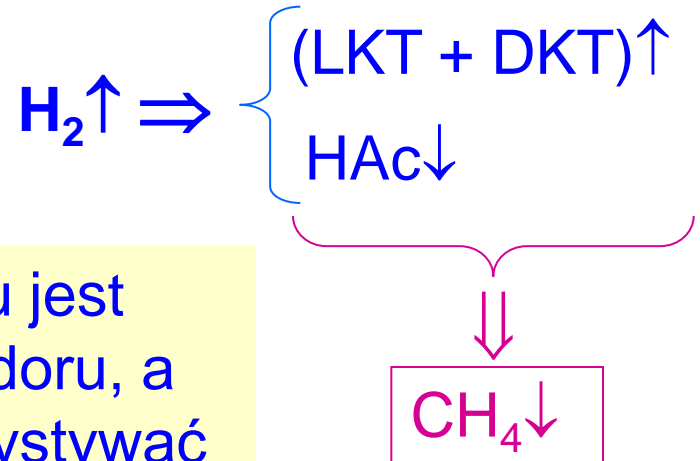
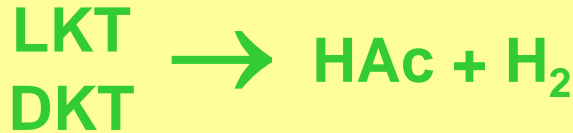


Jest kluczem do zrównoważenia reakcji i populacji mikroorganizmów w reaktorze



# Fermentacja metanowa

Równowaga pomiędzy kwasogenezą, a metanogenezą



Wytwarzanie kwasu octowego i wodoru jest hamowane przez wysokie stężenie wodoru, a bakterie metanowe nie potrafią wykorzystywać innych kwasów niż octowy

- Zakwaszenie komory fermentacyjnej
- Spadek produkcji metanu
- Niepełna stabilizacja osadu

## Wniosek

Metanogeny wodorotroficzne muszą usuwać wodór tak szybko jak on powstaje i utrzymywać jego stężenie na bardzo niskim poziomie.



# Fermentacja metanowa

Równowaga pomiędzy kwasogenezą, a metanogenezą

---

Wpływ pH i akumulacji kwasów tłuszczowych na przebieg stabilizacji beztlenowej:

bakterie **kwasogenne** są bardziej odporne na niskie pH (duża szybkość wzrostu nawet przy **pH 5**) niż bakterie **metanogenne** (bardzo mała szybkość wzrostu poniżej **pH 6.4**)

produkcja **kwasów tłuszczowych** może doprowadzić do **spadku pH** (z pewnym opóźnieniem – po zużyciu zasadowości)

**spadek pH** powoduje wzrost udziału niezdisocjowanych form LKT  $\Rightarrow$  wzrost inhibicji metanogenów (**błędne koło**)

# Fermentacja metanowa

Równowaga między metanogenezą a kwasogenezą – błędne koło

---



# Fermentacja metanowa

Równowaga pomiędzy kwasogenezą, a metanogenezą

---



# Fermentacja metanowa

Równowaga pomiędzy kwasogenezą, a metanogenezą

$\dot{\mu}$  bakterii fermentacyjnych

cukry: 5 d<sup>-1</sup>  
aminokwasy: 6.4 d<sup>-1</sup>



$\dot{\mu}$  bakterii octanogennych

DKT: 0.55 d<sup>-1</sup>  
HPr: 0.16 d<sup>-1</sup>  
HBu, HVa: 0.7 d<sup>-1</sup>

$\dot{\mu}$  bakterii metanowych

HAc: 0.35 (0.07) d<sup>-1</sup>  
H<sub>2</sub>: 1.5 d<sup>-1</sup>



Bakterie fermentacyjne mogą szybciej reagować na wzrost stężenia

- produkcja HAc, HPr, HBu, HVa i DKT – rośnie bardzo szybko
- rozkład HPr, HBu, HVa i DKT nie nadąża
- rozkład HAc i wodoru do metanu i nie nadąża



**Należy unikać szybkich zmian obciążenia, aby uniknąć „zakwaszenia”**

# Fermentacja metanowa

Równowaga pomiędzy kwasogenezą, a metanogenezą

---

Bakterie metanowe są bardzo wrażliwe na wszelkie zmiany temperatury



Szybkie zmiany temperatury ( $>1^{\circ}\text{C/d}$ ) mogą prowadzić do „zakwaszenia”



Gdy niezbędna zmiana temperatury to zaleca się  $\sim 0.5^{\circ}\text{C/d}$

# Fermentacja metanowa

## Azot amonowy i amoniak

---

Wpływ azotu amonowego na proces fermentacji metanowej jest zależny od jego stężenia w osadzie:

do 200 g N/m<sup>3</sup> – zaspokaja potrzeby mikroorganizmów,

od 200 do 1000 g N/m<sup>3</sup> – brak negatywnego wpływu na proces,

od 1000 do 3000 g N/m<sup>3</sup> – przy zbyt wysokim pH może pojawić się inhibicja procesu,

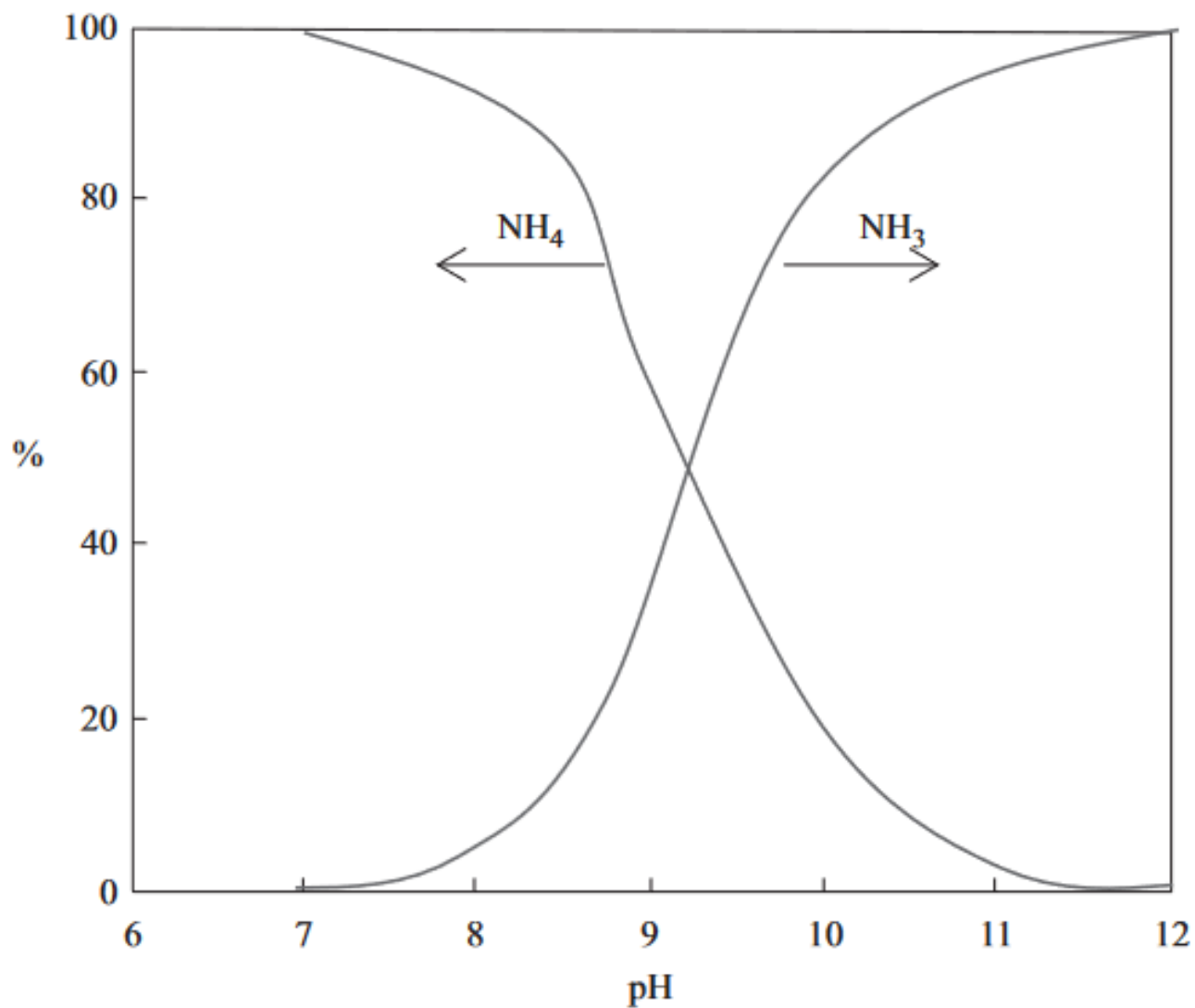
powyżej 3000 g N/m<sup>3</sup> – stężenie toksyczne.

**Za toksyczność azotu amonowego odpowiada jego forma wolna czyli amoniak, który może pasywnie przenikać do komórek mikroorganizmów.**

**Spośród wszystkich grup mikroorganizmów procesu fermentacji metanowej, metanogeny są najbardziej wrażliwe na wysokie stężenie amoniaku**

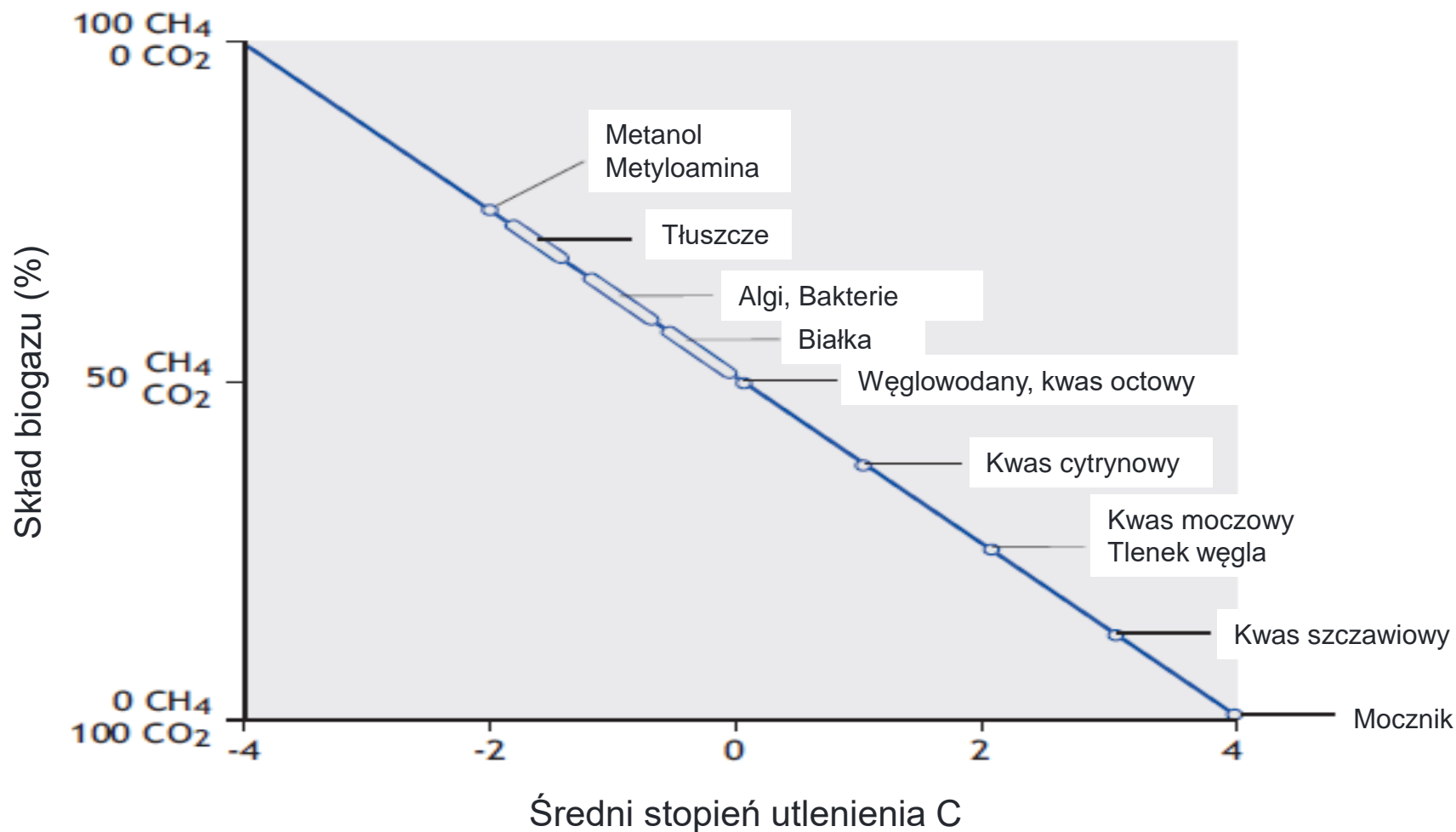
# Fermentacja metanowa

Azot amonowy i amoniak



# Fermentacja metanowa

## Szacowanie produkcji metanu

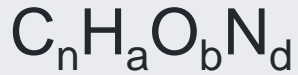




# Fermentacja metanowa

## Szacowanie ChZT i OWO substratów

---



$$\text{ChZT} = 8(4n+a-2b)/(12n+a+16b) \text{ (gChZT/gC}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{)}$$

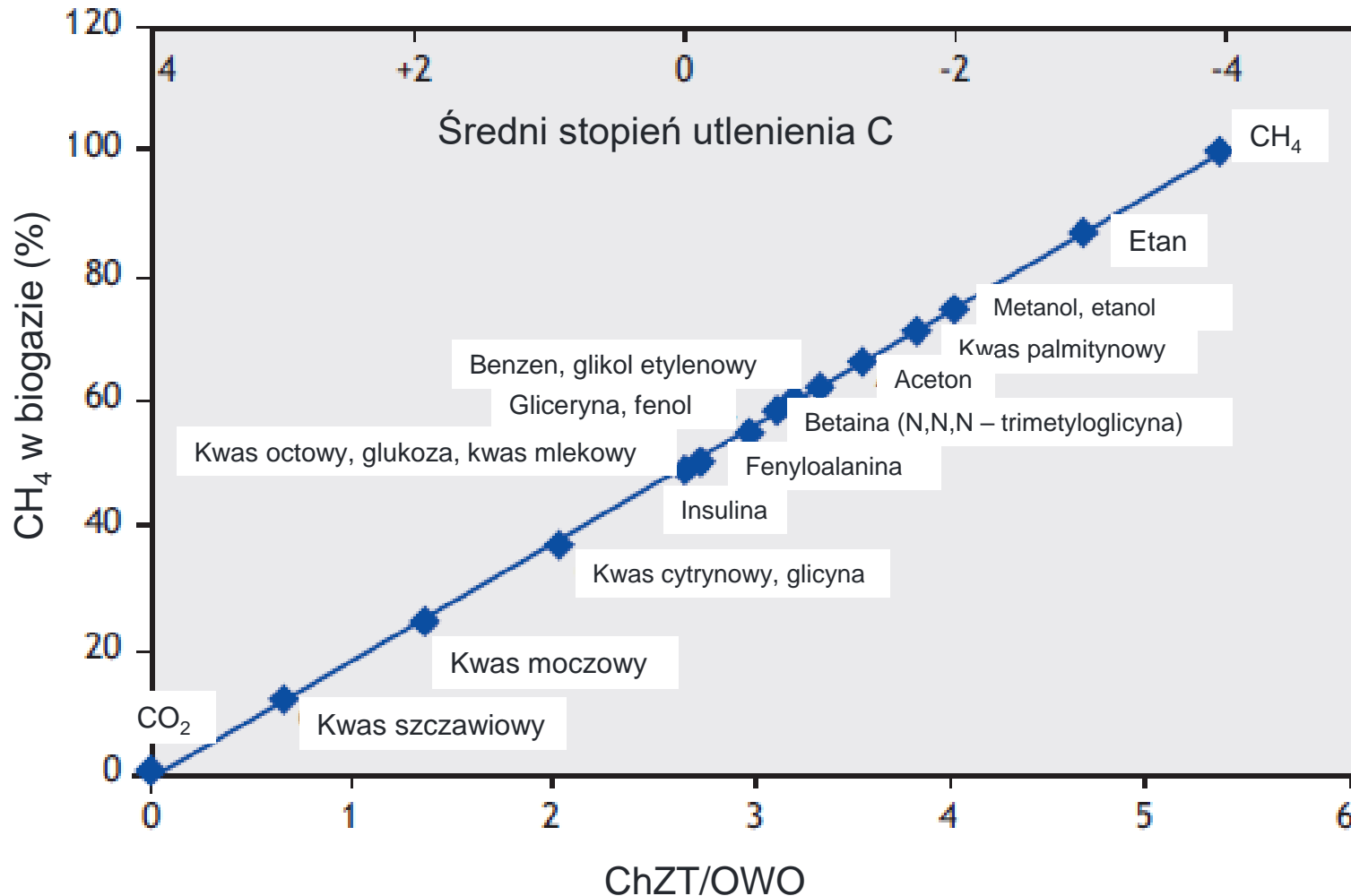
$$\text{ChZT} = 8(4n+a-2b-3d)/(12n+a+16b+14d) \text{ (gChZT/gC}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_d\text{)}$$

$$\text{OWO} = 12n/(12n+a+16b+14d) \text{ (gChZT/gC}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_d\text{)}$$

# Fermentacja metanowa

## Szacowanie produkcji metanu

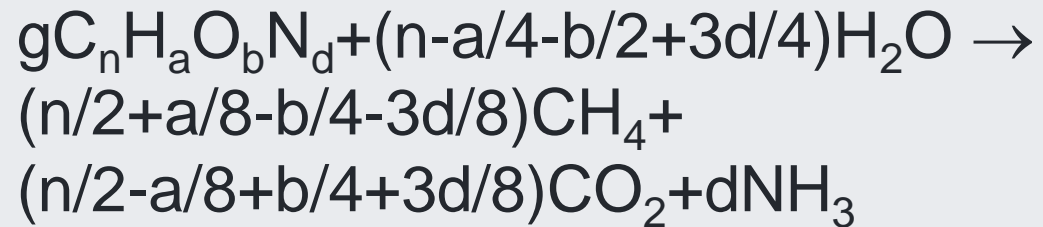
$$\text{ChZT/OWO} = 8(4n+a-2b-3d)/(12n) = 8/3 + 2(a-2b-3d)/(3n)$$



# Fermentacja metanowa

## Szacowanie produkcji metanu

---



# Fermentacja metanowa

## Szacowanie produkcji metanu

---

Substrat	Ilość gazu l/kg $\Delta$ smo	% CH <sub>4</sub>	% CO <sub>2</sub>	Energia gazu kWh/m <sup>3</sup>
Węglowodany	747	50	50	~5
Tłuszcze	1434	71	29	~7
Białka	636	60	40	~6
Osad ściekowy	880÷1020	64÷67	33÷36	~(6.4÷6.7)

# Fermentacja metanowa

## Szacowanie produkcji metanu

---

### ChZT metanu

$$1 \text{ mol CH}_4 = 64 \text{ g O}_2 = 64 \text{ g ChZT}$$

$$64 \text{ g ChZT} / 16 \text{ g CH}_4 = 4 \text{ g ChZT/g CH}_4 \quad 0.25 \text{ g CH}_4/\text{g ChZT}$$

### Objętość metanu

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{nRT}{p}$$

$$V_{1 \text{ mol CH}_4} = \frac{(1 \text{ mol})(0.082057 \text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K})[(273.15 + 35) \text{ K}]}{1 \text{ atm}} = 25.29 \text{ L}$$

### ChZT metanu

$$64 \text{ g ChZT} / 25.29 \text{ L CH}_4 = 2.53 \text{ g ChZT/L CH}_4$$

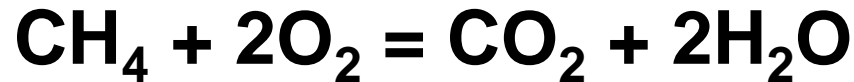
$$25.29 \text{ L} / 64 \text{ g ChZT} = 0.395 \text{ L CH}_4/\text{g ChZT}$$

# Fermentacja metanowa

## Potencjał energetyczny gazu fermentacyjnego

---

### Ciepło spalania metanu



$$35\,800 \text{ kJ/m}^3 = 9\,944 \text{ Wh/m}^3 \sim 10 \text{ kWh/m}^3$$

### Ciepło spalania gazu fermentacyjnego (70% CH<sub>4</sub> + 30% CO<sub>2</sub>)

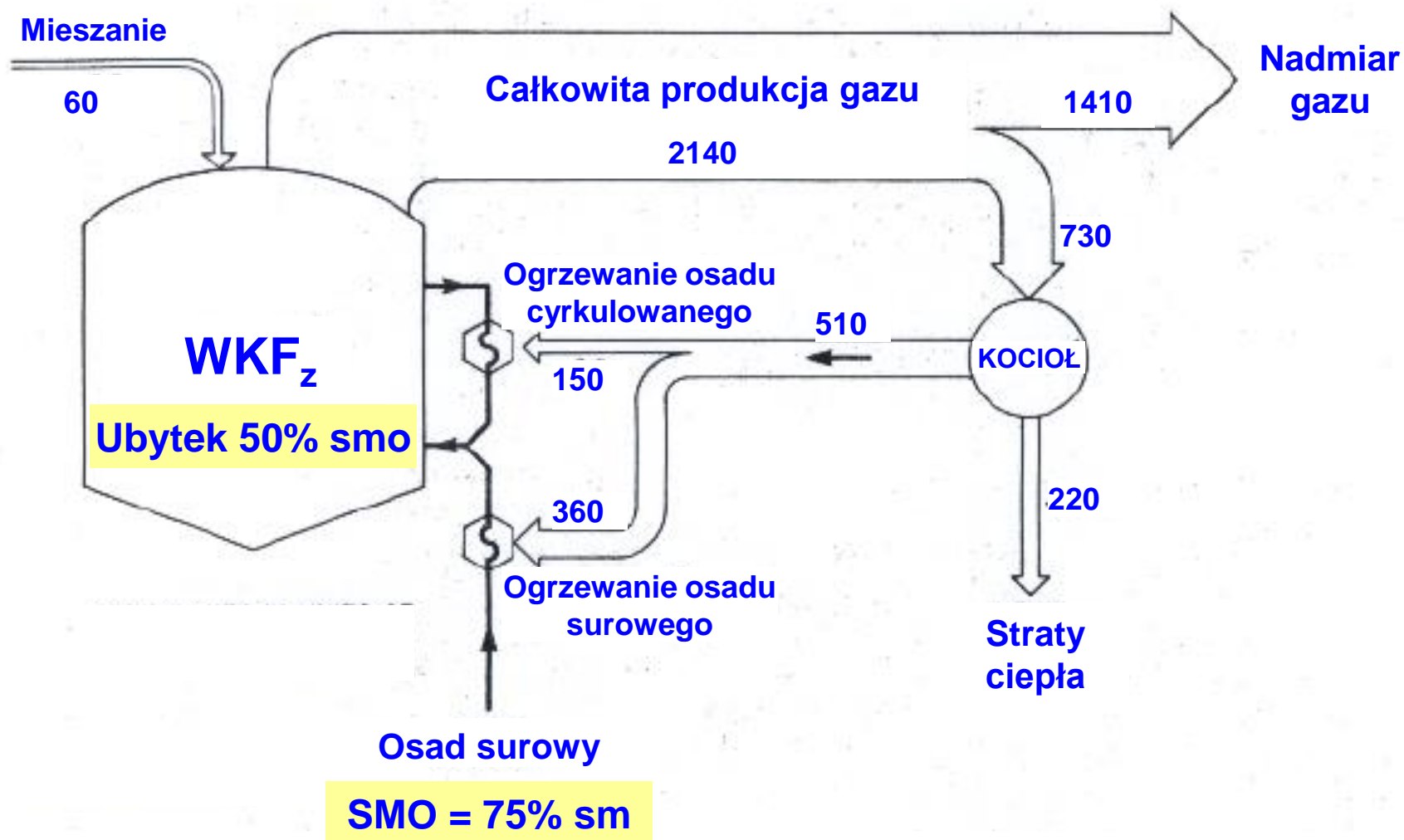
$$0.7 \times 35\,800 = 25\,060 \text{ kJ/m}^3 = 6\,960 \text{ Wh/m}^3 \sim 7 \text{ kWh/m}^3$$

### Ciepło spalania gazu ziemnego

$$37\,300 \text{ kJ/m}^3 = 10\,360 \text{ Wh/m}^3 \sim 10.4 \text{ kWh/m}^3$$

# Fermentacja metanowa

## Potencjał energetyczny gazu fermentacyjnego



# Fermentacja metanowa

## Bilans ChZT

---

**Proces fermentacji metanowej analizuje się z perspektywy ChZT, a nie SM!**

**Bardzo często w praktyce, sprawność procesu jest oceniana poprzez ubytek suchej masy itd. a nie przemiany ChZT – prowadzi to do nieścisłości i problemów.**

**W przeciwieństwie do procesów tlenowych, w procesach beztlenowych nie dochodzi do zniszczenia ChZT.**

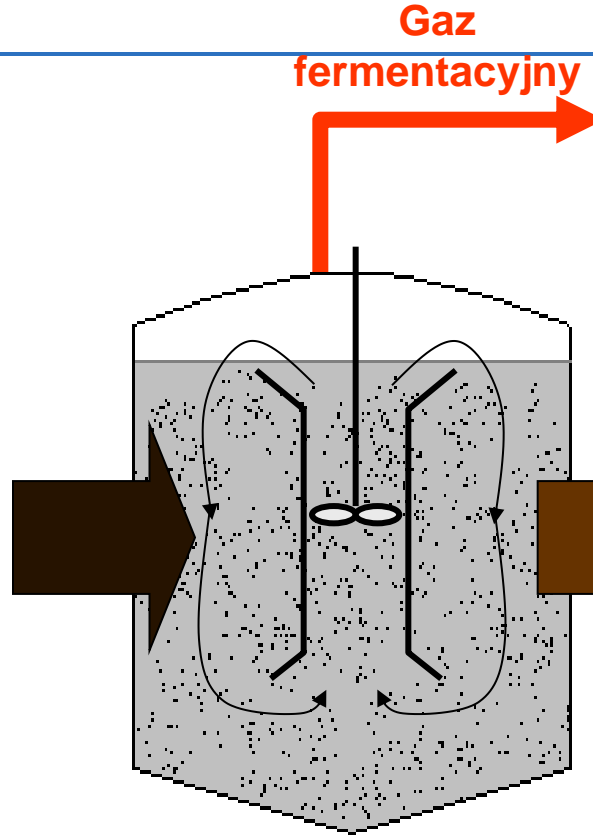
$$\text{ChZT}_{\text{dopływ}} = \text{ChZT}_{\text{odpływ}}$$



# Fermentacja metanowa

## Bilans ChZT

$$\begin{aligned}
 &Q_{OS} \text{ [m}^3/\text{d]} \\
 &ChZT_{SUR} \text{ [kg ChZT/m}^3\text{]} \\
 &SMO_{SUR} \text{ [kg smo/m}^3\text{]} \\
 &l_{ChZT,SUR} = Q_{OS} \times ChZT_{SUR} \text{ [kg ChZT/d]} \\
 &l_{SMO,SUR} = Q_{OS} \times SMO_{SUR} \text{ [kg smo/d]}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &Q_G \text{ [m}^3/\text{d]} \\
 &C_{CH_4} \text{ [kg CH}_4/\text{m}^3\text{]} \\
 &l_{CH_4} = Q_G \times C_{CH_4} \text{ [kg CH}_4/\text{d]} \\
 &l_{ChZT,CH_4} = 4 \times l_{CH_4} \text{ [kg ChZT/d]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &Q_{OS} \text{ [m}^3/\text{d]} \\
 &ChZT_F \text{ [kg ChZT/m}^3\text{]} \\
 &SMO_F \text{ [kg smo/m}^3\text{]} \\
 &l_{ChZT,F} = Q_{OS} \times ChZT_F \text{ [kg ChZT/d]} \\
 &l_{SMO,F} = Q_{OS} \times SMO_F \text{ [kg smo/d]}
 \end{aligned}$$

$$l_{ChZT,CH_4} = Q_{OS}(ChZT_{SUR} - ChZT_F) \text{ [kg ChZT/d]}$$

$$\Delta l_{ChZT,OS} \approx 1.6 Q_{OS}(SMO_{SUR} - SMO_F)$$

$$\text{g ChZT/g smo}$$

$$\Delta l_{SMO,OS}$$

# Fermentacja metanowa

## Bilans ChZT

$$L_{\text{ChZT,CH}_4} = \Delta L_{\text{ChZT,OS}} \text{ [kg ChZT/d]}$$

$$L_{\text{CH}_4} = 0.25 \times \Delta L_{\text{ChZT,OS}} \text{ [kg CH}_4\text{/d]}$$

$$V_{\text{CH}_4} = 0.395 \times \Delta L_{\text{ChZT,OS}} \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{/d]}$$

$$\Delta L_{\text{ChZT,OS}} \approx 1.6 \times \Delta L_{\text{SMO,OS}} \text{ [kg ChZT/d]}$$

$$L_{\text{ChZT,CH}_4} \approx 1.6 \times \Delta L_{\text{SMO,OS}} \text{ [kg ChZT/d]}$$

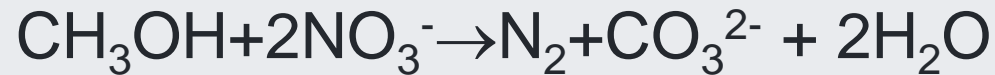
$$L_{\text{CH}_4} \approx 0.4 \times \Delta L_{\text{SMO,OS}} \text{ [kg CH}_4\text{/d]}$$

$$V_{\text{CH}_4} \approx 0.632 \times \Delta L_{\text{SMO,OS}} \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{/d]}$$

# Fermentacja metanowa

Bilans ChZT – uwaga na azotany i siarczany

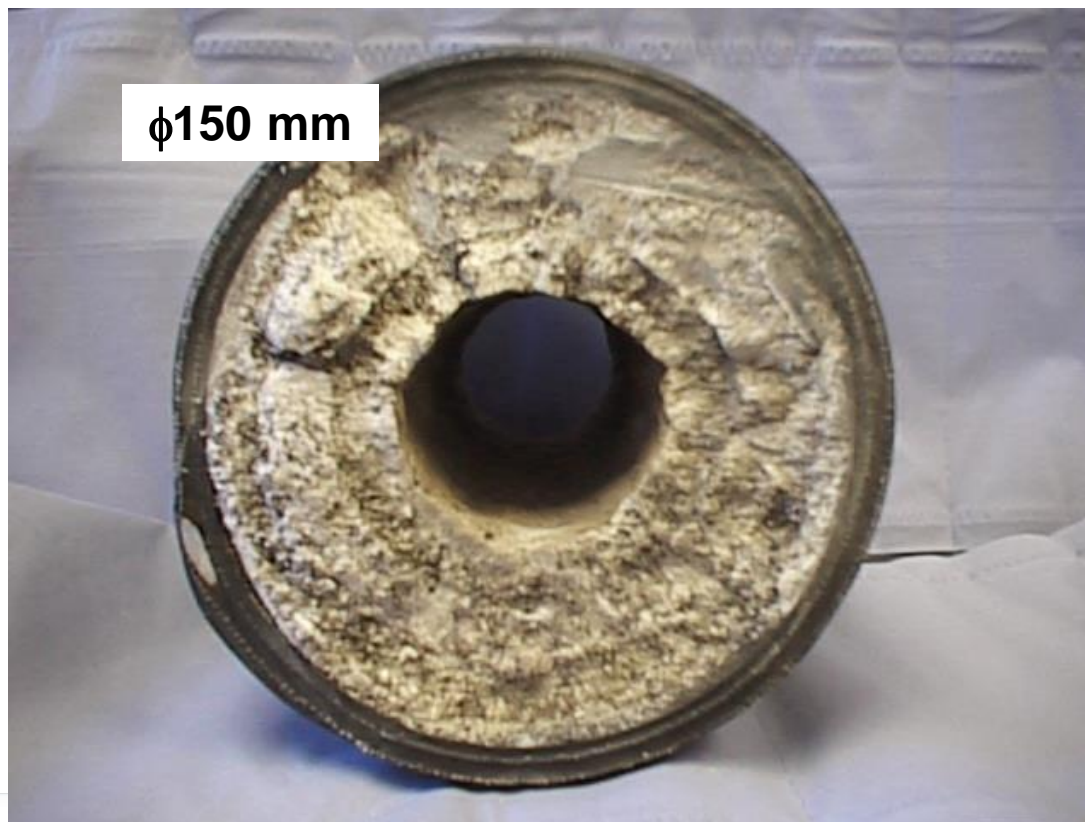
---



**Denitryfikacja oraz redukcja siarczanów powodują ubytek ChZT i zaburzają bilans ChZT. W normalnych warunkach błąd jest niewielki.**

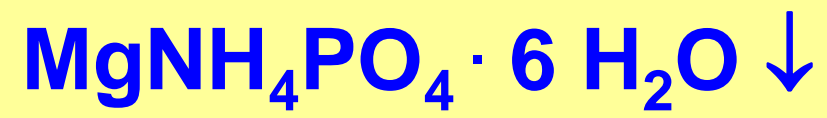
# Wytrącanie struwitu

---



# Wytrącanie struwitu

---



# Wytrącanie struwitu

## Kinetyka

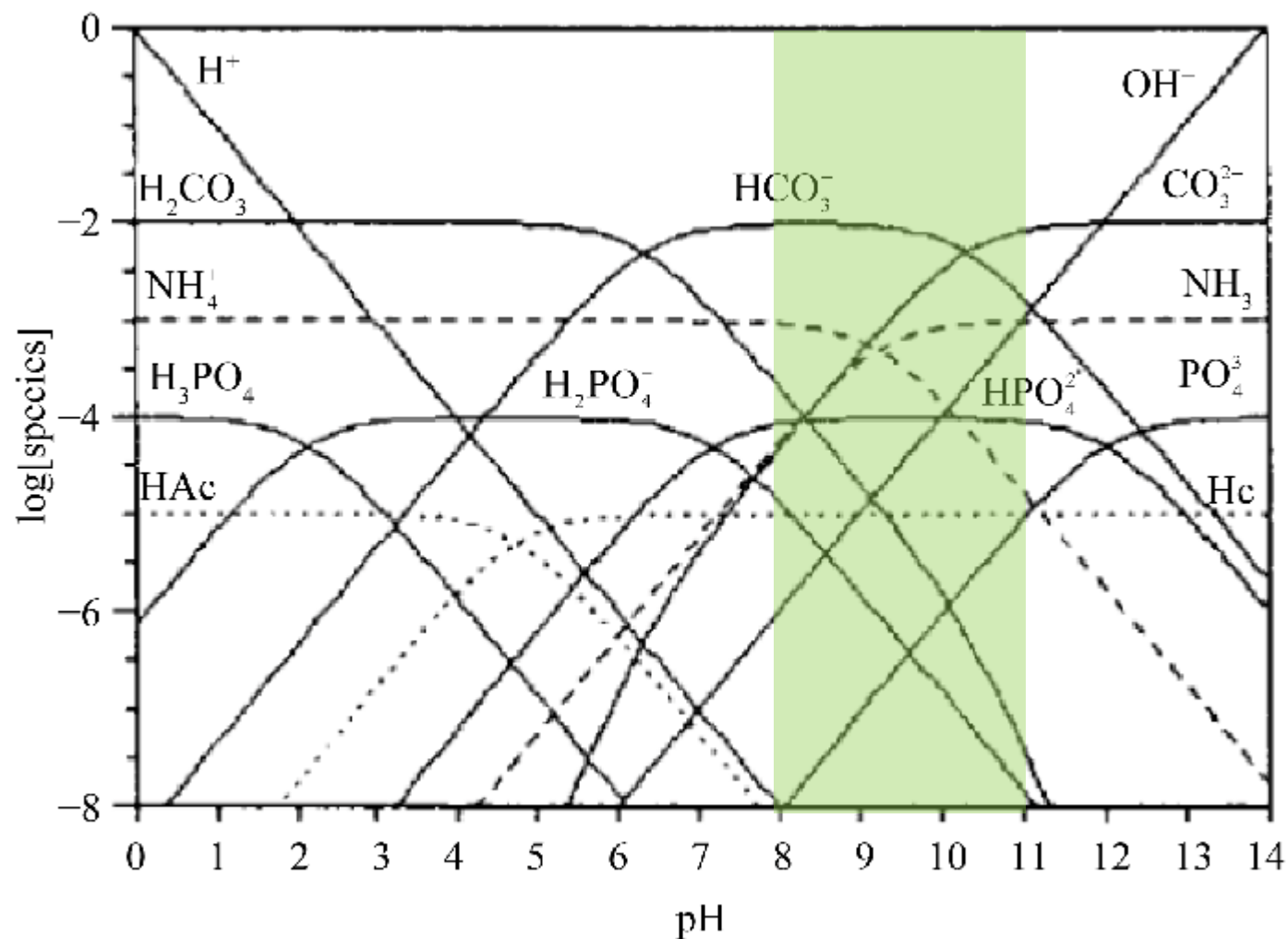
---

$$IR = [\text{Mg}^{2+}][\text{NH}_4^+][\text{PO}_4^{3-}]$$

Kiedy wytrąci się struwit? Gdy zostanie przekroczony iloczyn rozpuszczalności

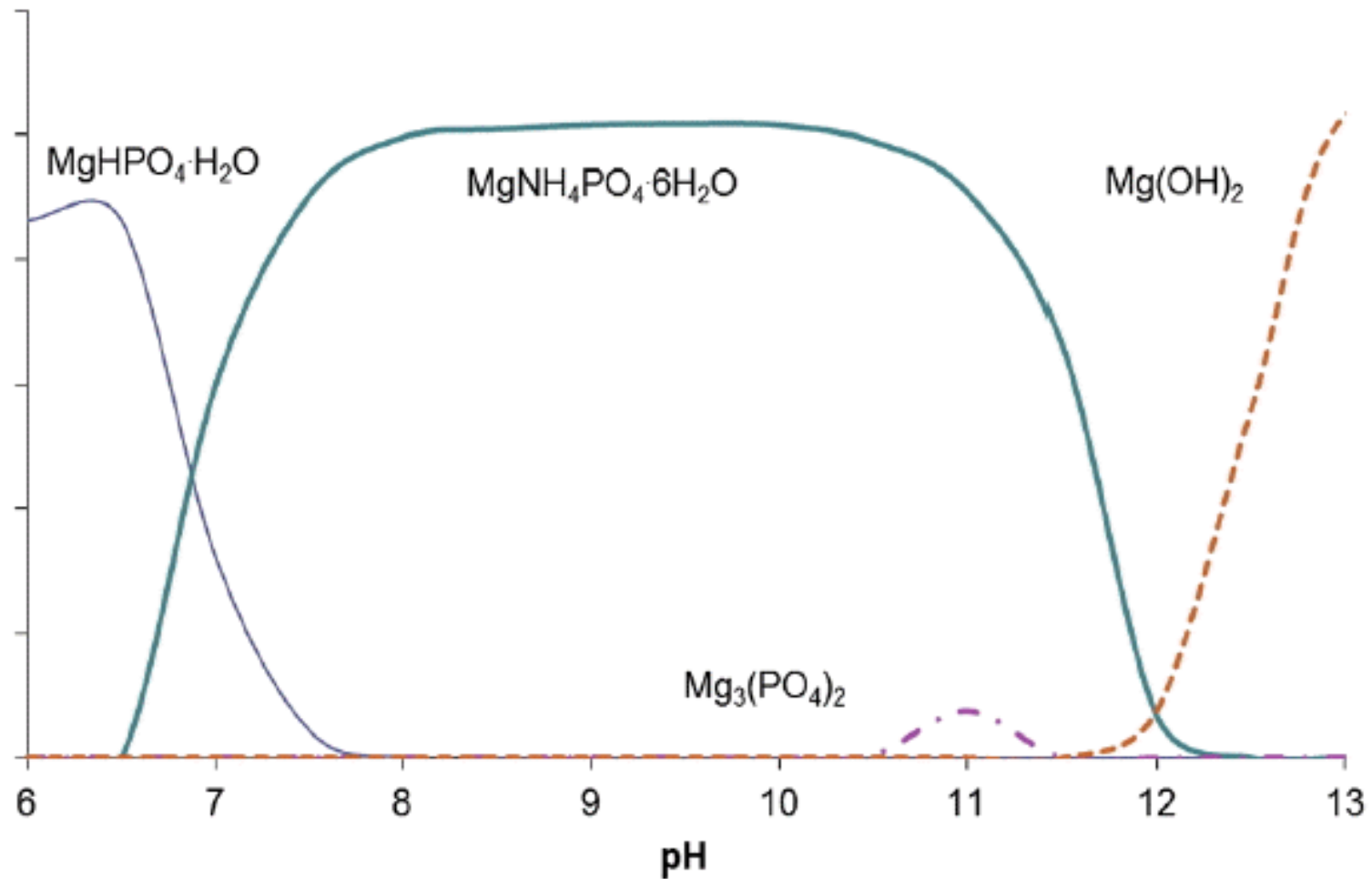
# Wytrącanie struwitu

## Kinetyka



# Wytrącanie struwitu

## Kinetyka

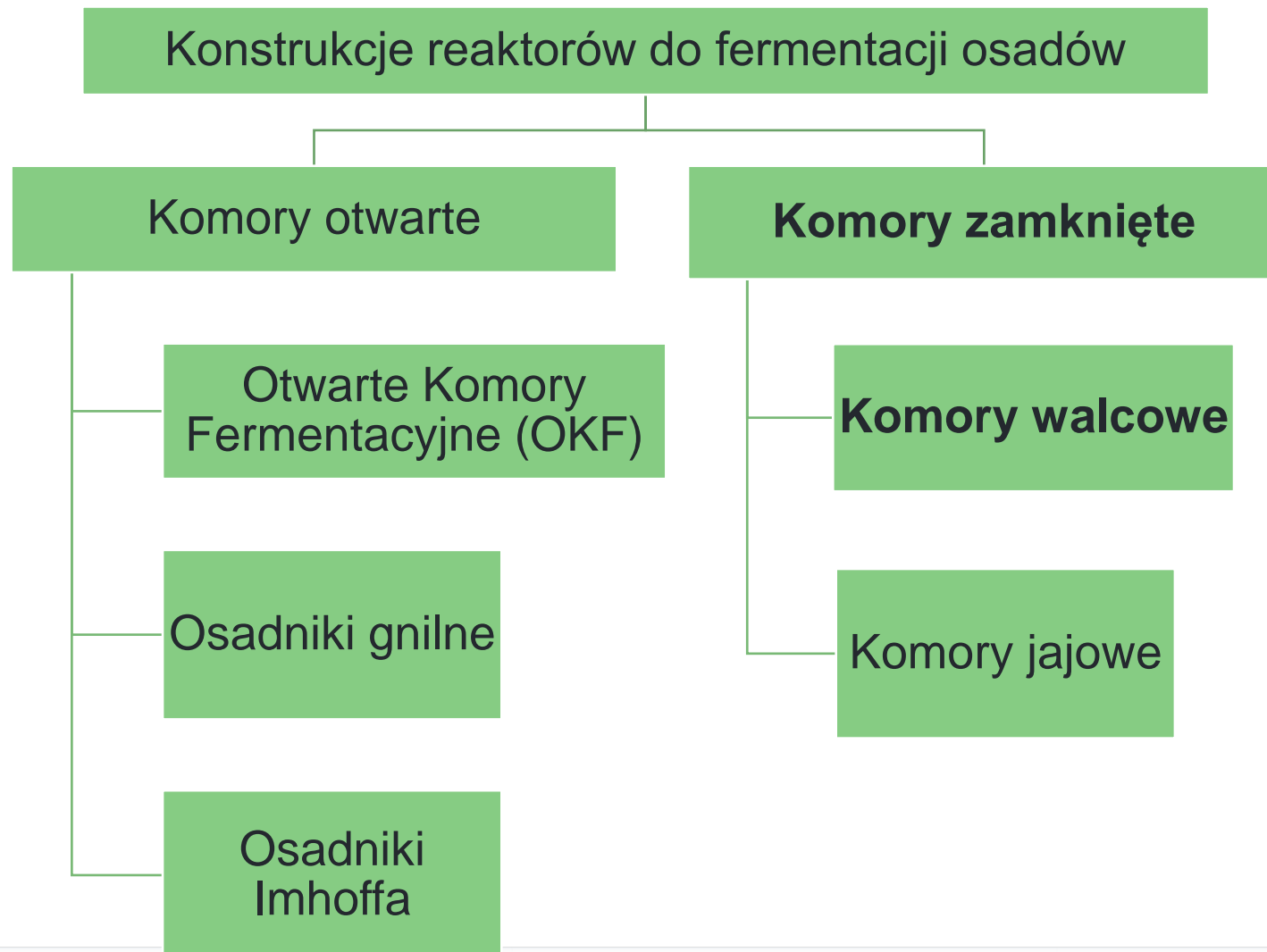




# **Techniczne aspekty procesu fermentacji**

# Konstrukcje reaktorów

---



# Konstrukcje reaktorów

## Komory otwarte

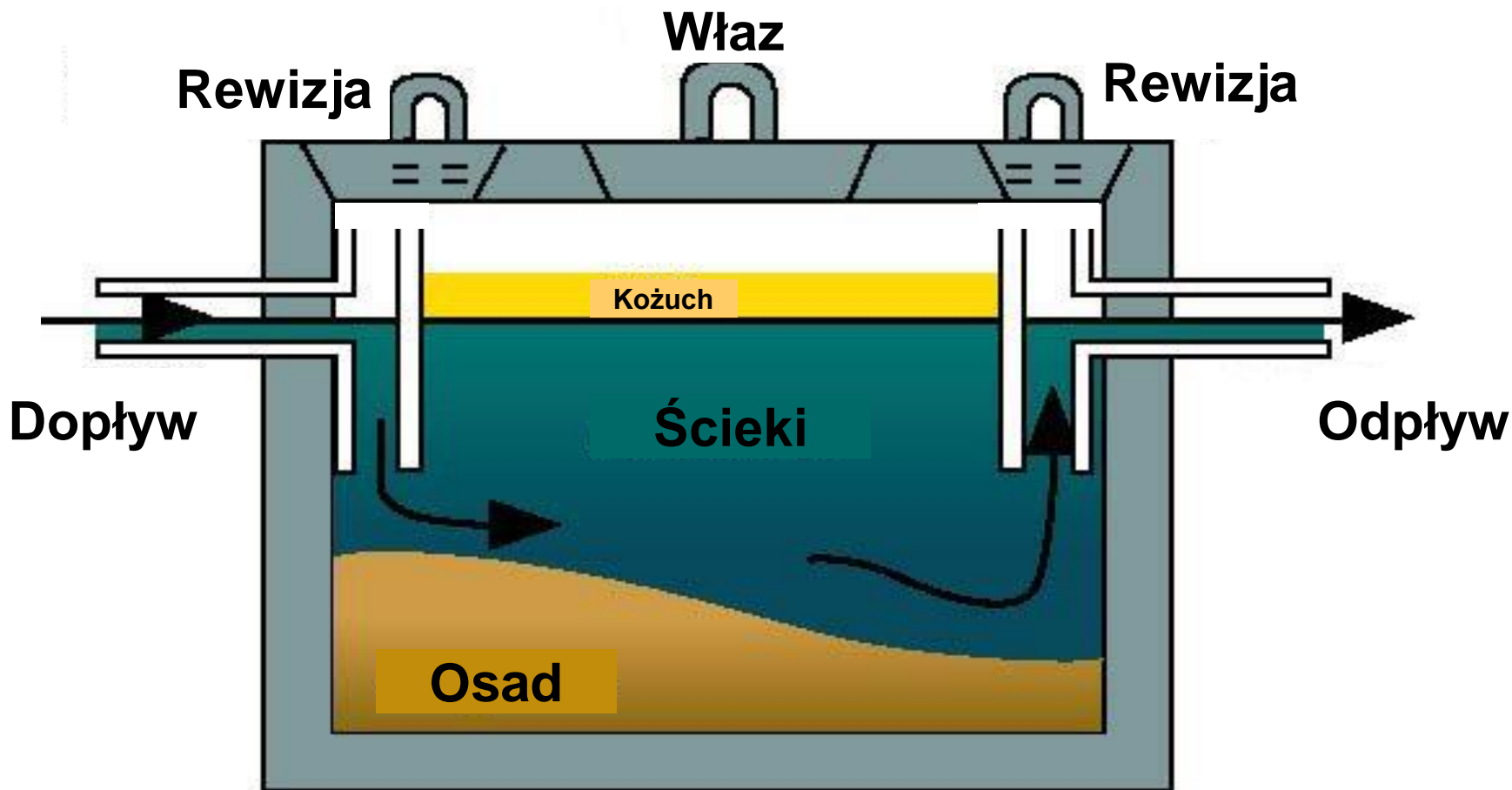
---

- Zwykle stosunkowo płytkie i rozległe zbiorniki.
- Mieszanie okresowe poprzez mieszadła śmigłowe (jak w KOCz).
- Zwykle warunki psychrofilowe.
- Często wykorzystywane również jako „zimowy” magazyn osadów



# Konstrukcje reaktorów

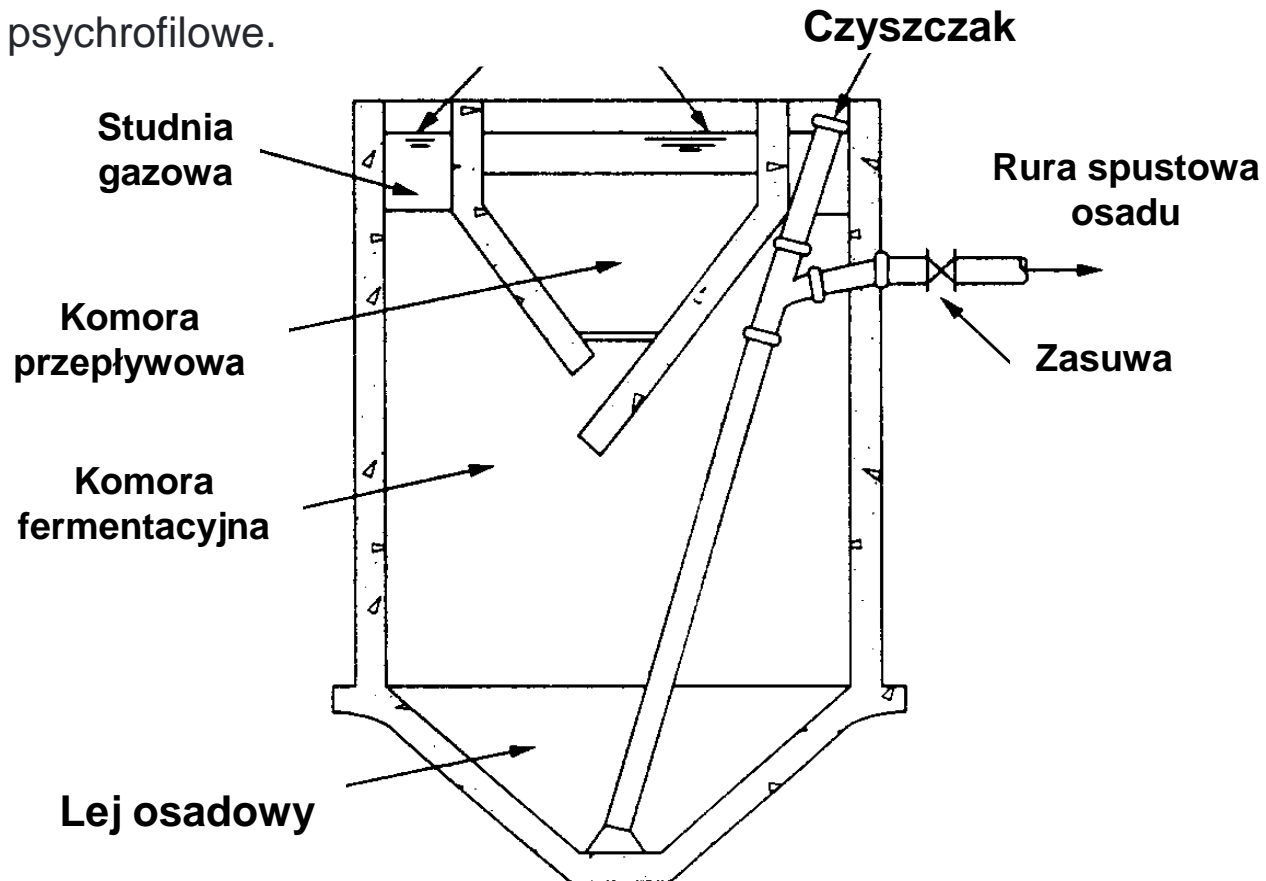
## Osadnik gnilny



# Konstrukcje reaktorów

## Osadnik Imhoffa

- Element ciągu oczyszczania ścieków (osadnik wstępny).
- Długi czas przetrzymania osadów.
- Urządzenie rzadko wykorzystywane w nowoczesnym projektowaniu.
- Zwykle warunki psychrofilowe.



# Konstrukcje reaktorów

## Zamknięte komory fermentacyjne

---

- Kształt komory dostosowany do różnych typów mieszadeł.
- Komory jajowe – mieszadła pompowe.
- Komory walcowe – mieszadła śmigłowe.
- Stare obiekty mogą nie posiadać mieszadeł (Gniezno).
- Zdarzają się wyjątki... i to sporo.
- Zwykle ogrzewane (warunki mezo/termofilowe).

# Konstrukcje reaktorów

## Komory jajowe

---





# Konstrukcje reaktorów

## Komory walcowe

---





# Konstrukcje reaktorów

## Komory walcowe vs jajowe

---



30 dni mroku (30 Days of Night) – dystrybutor Kinoświat

# Konstrukcje reaktorów

## Mieszanie

---

Cel mieszania komór fermentacyjnych:

- Zapewnienie jednorodności mieszaniny w całej WKF
- Minimalizacja stref martwych i „krótkich spięć”
- Rozbijanie kożucha
- Zapobieganie wytrącaniu piasku – trwały ubytek objętości czynnej

Zapotrzebowanie mocy na mieszanie:

- $P=5-8 \text{ W/m}^3$  - bez cyrkulacji
- $P=3-5 \text{ W/m}^3$  – z dodatkową cyrkulacją grzewczą

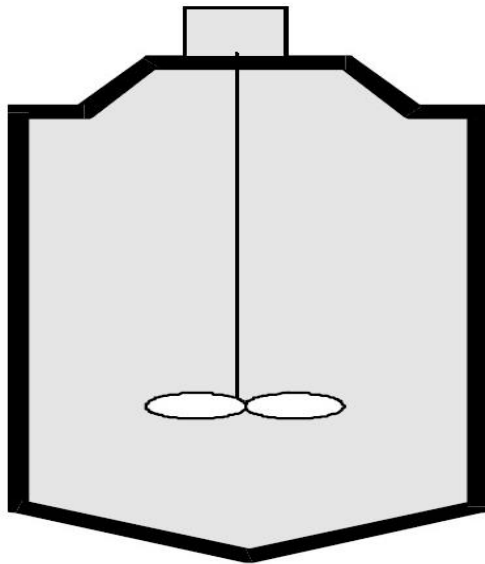
$P$  mniejsze niż  $2 \text{ W/m}^3$  – smutna rzeczywistość

# Konstrukcje reaktorów

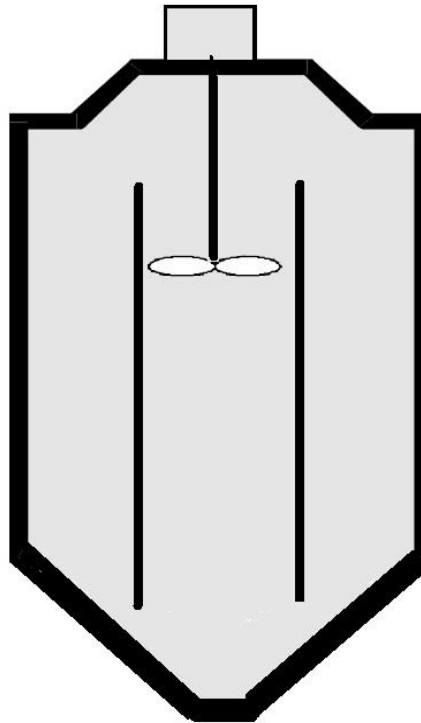
## Mieszanie – typy mieszadeł

### Mieszadła w WKF

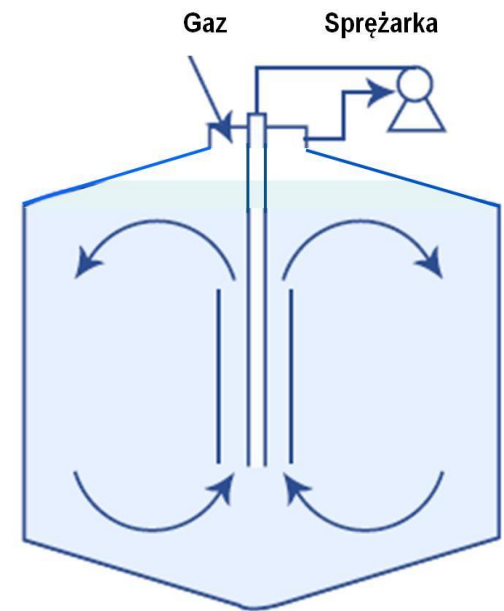
#### Mieszadło śmigłowe



#### Mieszadło pompowe



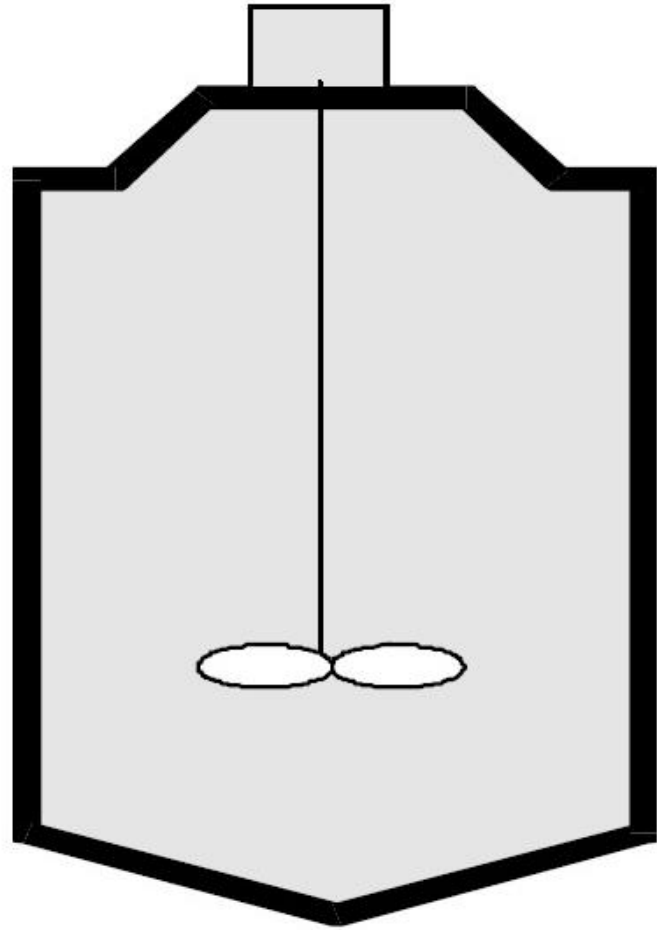
#### Mieszanie gazem



# Konstrukcje reaktorów

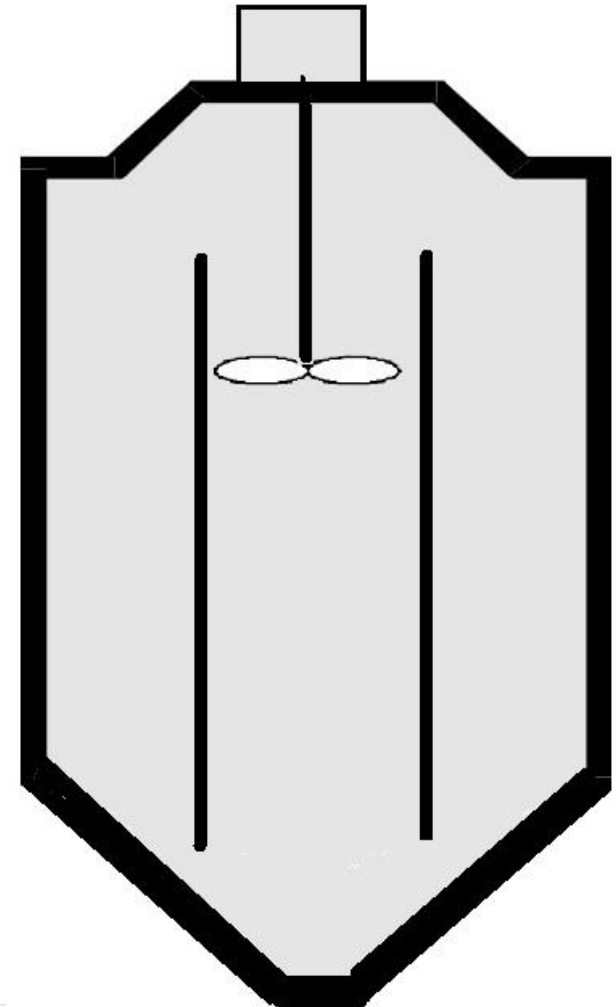
## Mieszanie – mieszadła śmigłowe

---



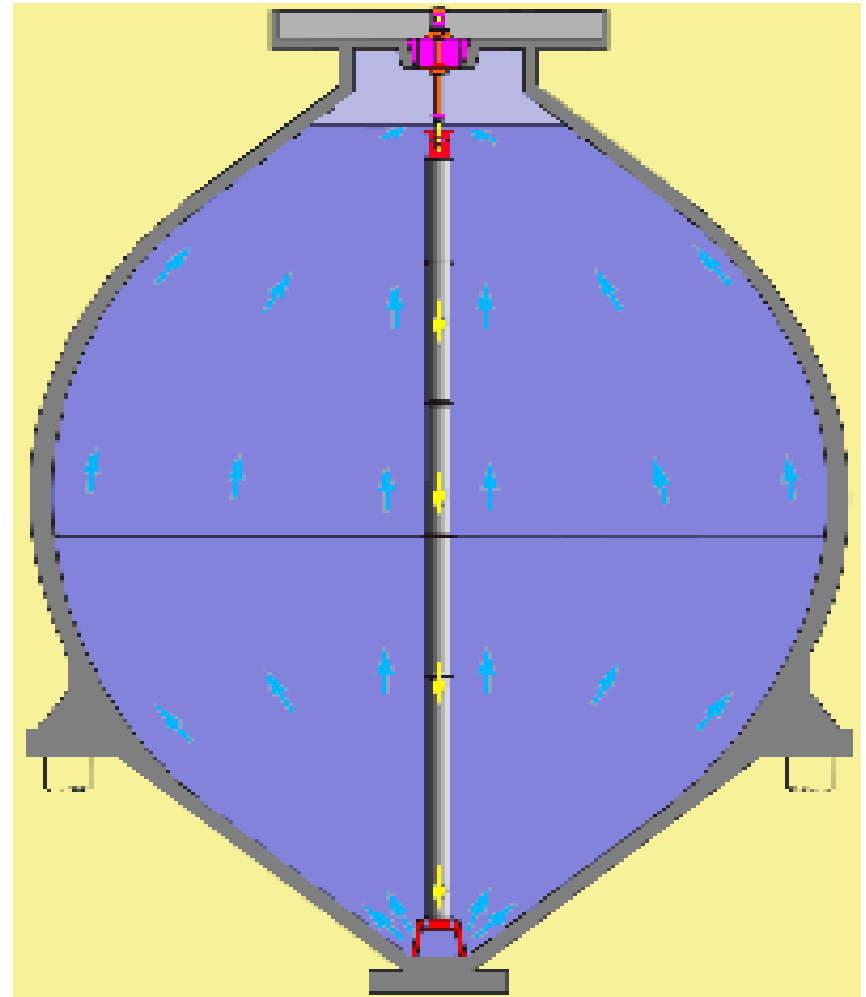
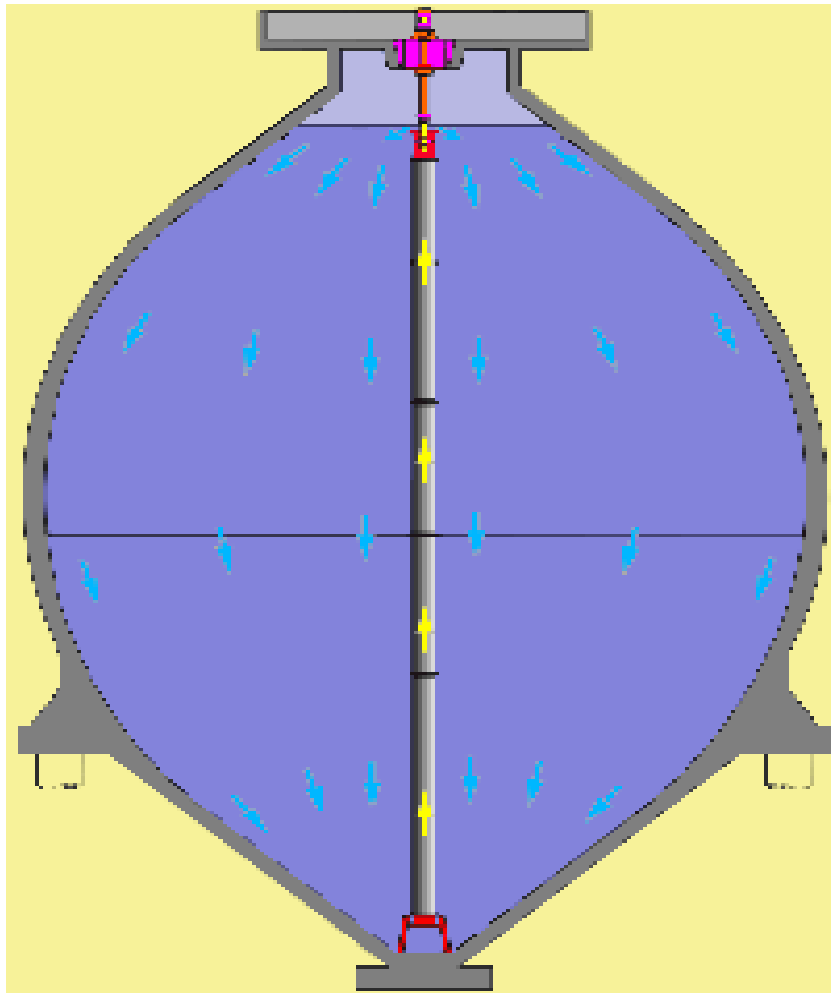
# Konstrukcje reaktorów

## Mieszanie – mieszadła pompowe (Hallberg)



# Konstrukcje reaktorów

## Mieszanie – mieszadła pompowe (Hallberg)



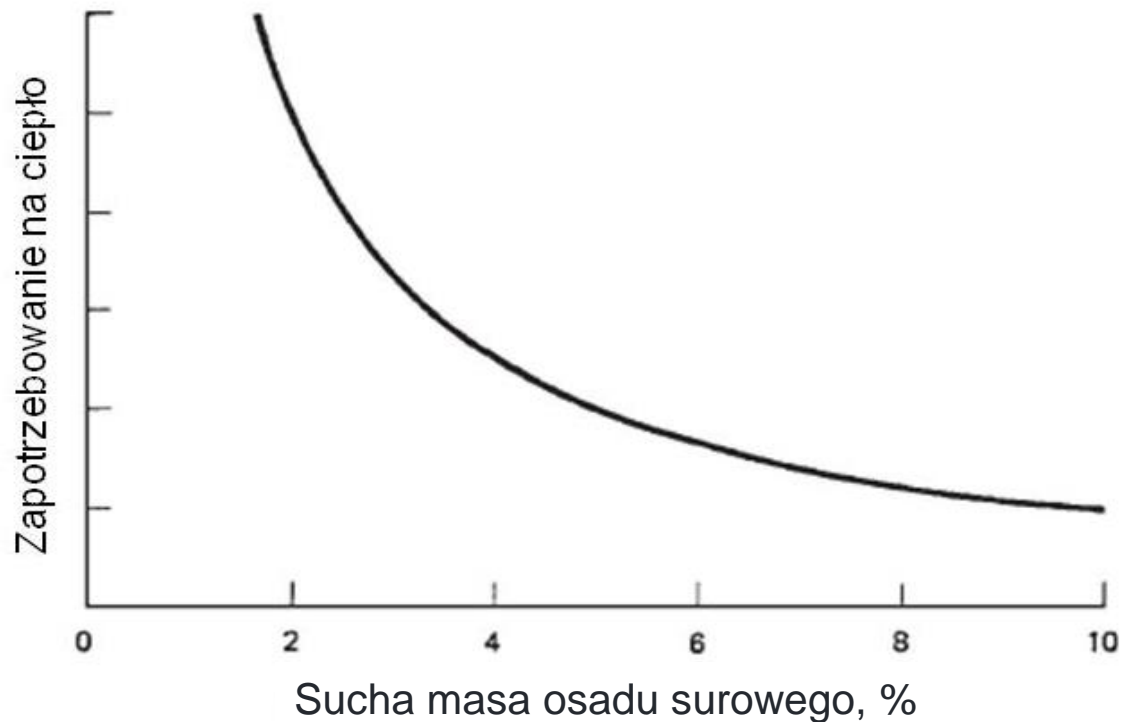
# Konstrukcje reaktorów

## Ogrzewanie

Zwykle zawartość komór fermentacyjnych ogrzewana jest w zewnętrznych wymiennikach ciepła. Osad jest pobierany z komory, ogrzewany, a następnie poprzez pompę cyrkulacyjną zawracany z powrotem do komory.

Wyróżniamy dwa rodzaje wymienników ciepła:

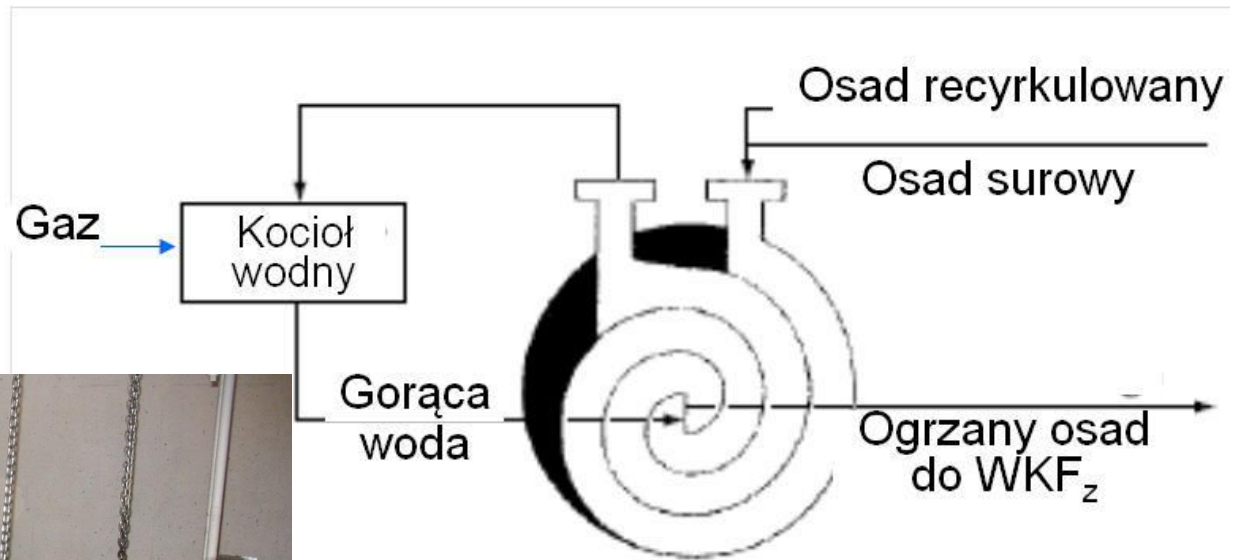
- Wymienniki rurowe
- Wymienniki dyskowe





# Konstrukcje reaktorów

## Ogrzewanie – wymiennik spiralny

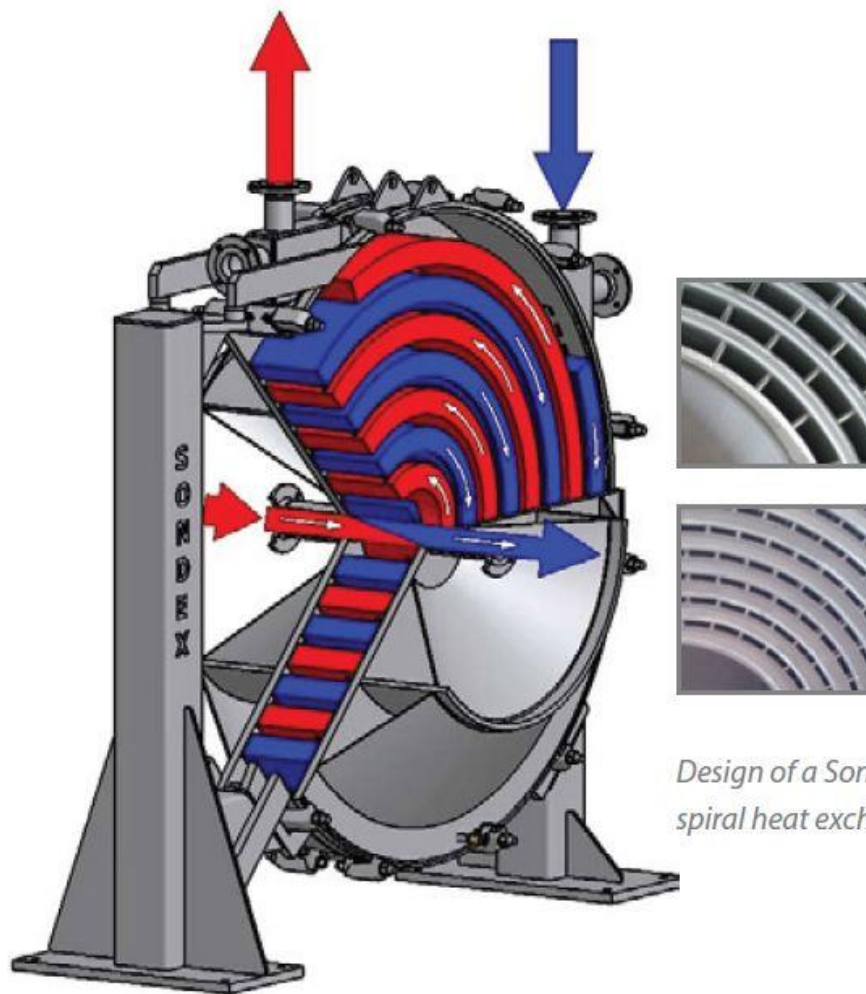


- + Niewielkie rozmiary
- + Stosunkowo łatwe czyszczenie
- Wyższy koszt

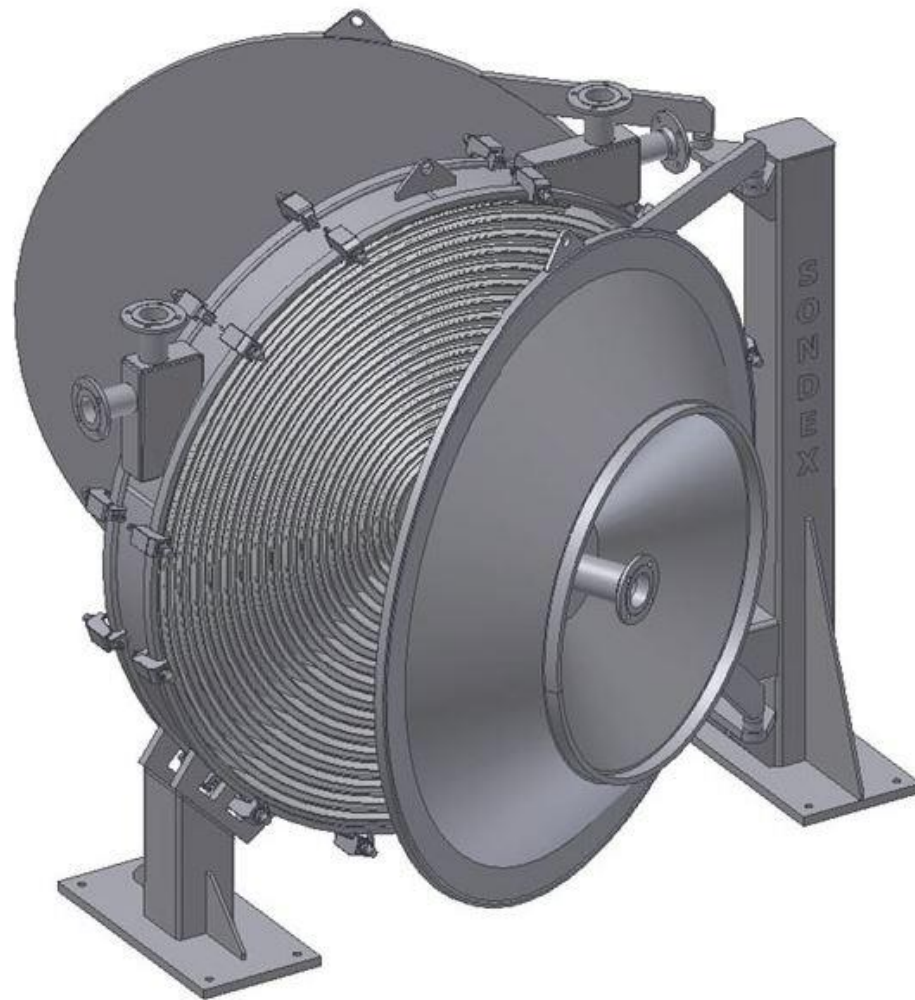


# Konstrukcje reaktorów

## Ogrzewanie – wymiennik spiralny

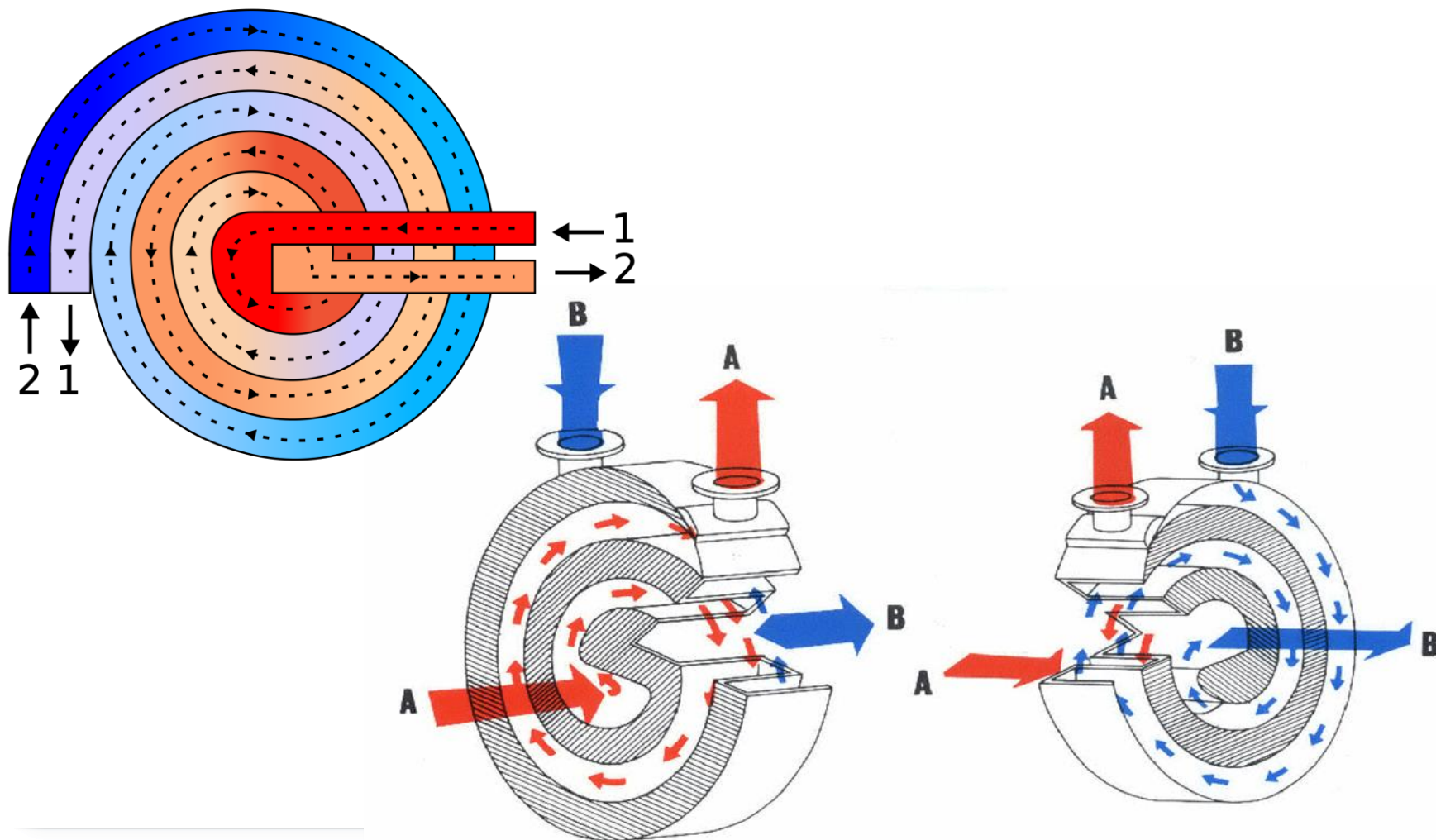


*Design of a Son  
spiral heat exch*



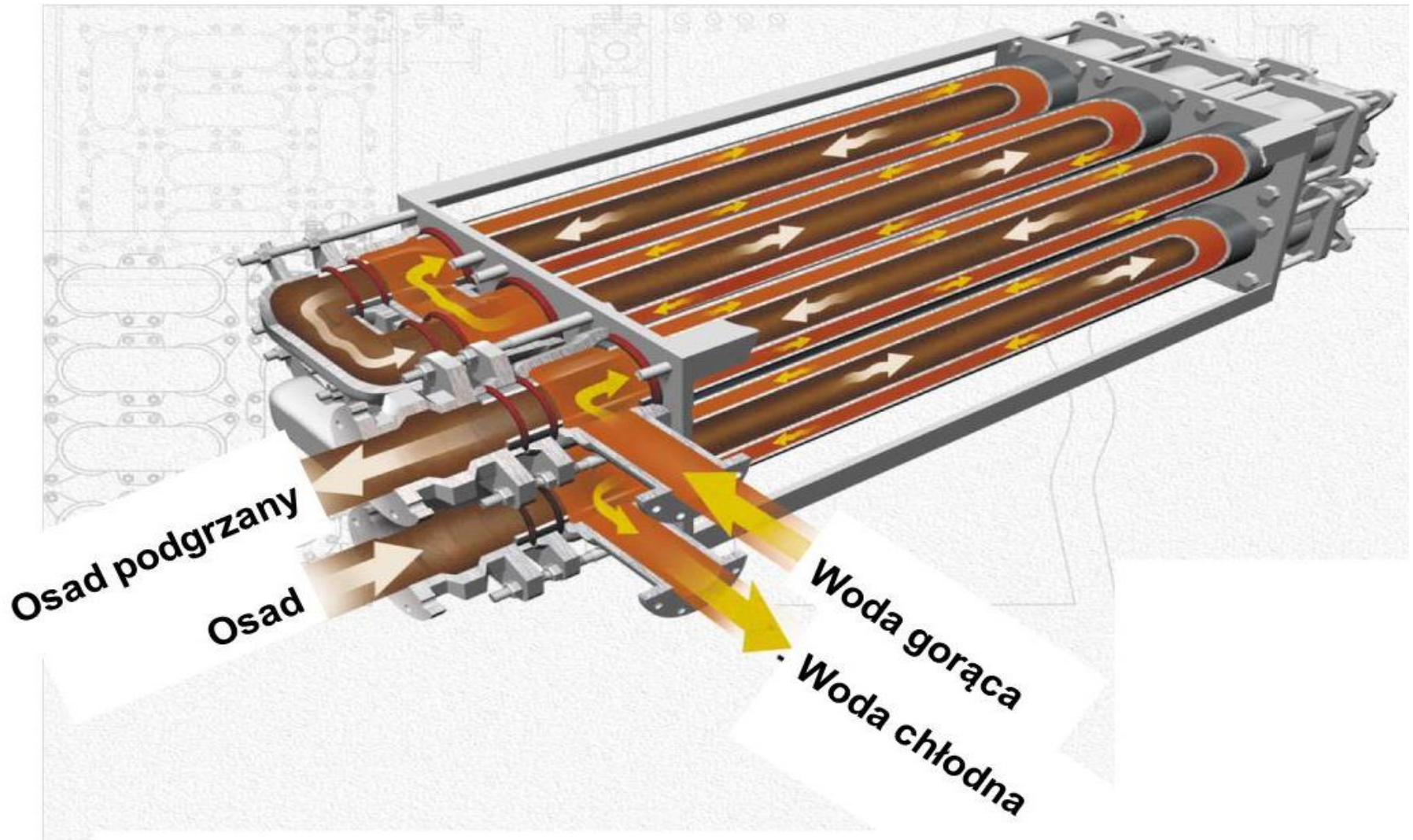
# Konstrukcje reaktorów

## Ogrzewanie – wymiennik spiralny



# Konstrukcje reaktorów

## Ogrzewanie – wymiennik rurowy





# Konstrukcje reaktorów

## Ogrzewanie – wymiennik rurowy

---





# Konstrukcje reaktorów

## Parametry projektowe

---

**Niezbędny wiek osadu**


$$WO_{35^{\circ}\text{C}} = 15 \div 20 \text{ d}$$


$$WO_{55^{\circ}\text{C}} = 8 \div 10 \text{ d}$$

**Objętość czynna**

$$V_{\text{cz}} = WO \times Q_{\text{os}} \quad [\text{m}^3]$$

**Obciążenie komory**

$$O_V \approx 0.7 \div 5.7 \quad [\text{kg smo/m}^3 \text{ d}]$$

# **Urządzenia ciągu gazowego**

# Ciąg gazowy

## Elementy

---

- Ujęcie gazu
- Instalacja do gaszenia piany
- Usuwanie substancji wleczonych
- Odwadnianie gazu
- Odsiarczanie
- Magazynowanie
- Energetyczne wykorzystanie
- System spalania nadmiaru gazu w pochodni

# Ciąg gazowy

## Ujęcie gazu (dzwon gazowy)/gaszenie piany

---

Dzwon to pierwszy element instalacji gazowej.  
Wytworzony gaz można skierować do sieci lub usunąć do atmosfery.  
Ujęcie wyposażone jest w instalację (zraszacze) do gaszenia piany.



Kominek wydmuchowy

Bezpiecznik mechaniczny

Rurociąg sieciowy



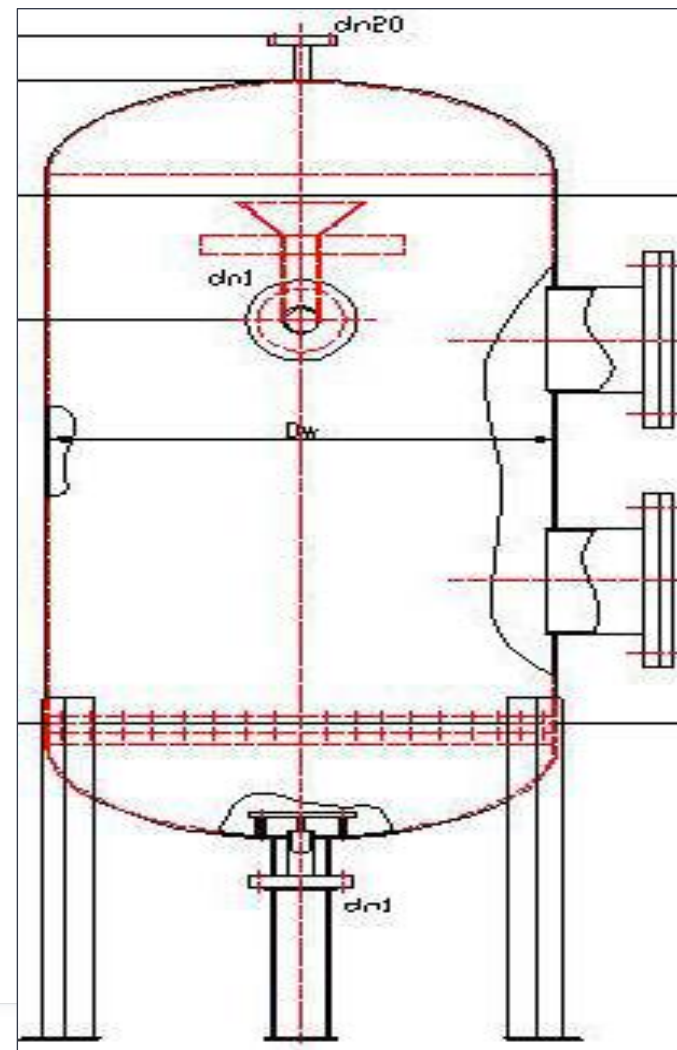
# Ciąg gazowy

## Usuwanie substancji wleczonych

Usuwanie substancji wleczonych realizuje się w filtrach żwirowych.

Jest to pierwszy stopień oczyszczania gazu fermentacyjnego.

W filtrach żwirowych następuje także wstępna kondensacja pary wodnej.



# Ciąg gazowy

## Odwadnianie

---

Kondensacja pary wodnej odbywa się zwykle w całym rurociągu transportowym gazu, następnie kondensat odbierany jest w najniższym punkcie rurociągu za pomocą odwadniacza.

Nowsze instalacje wyposażone są w układ do aktywnego suszenia gazu

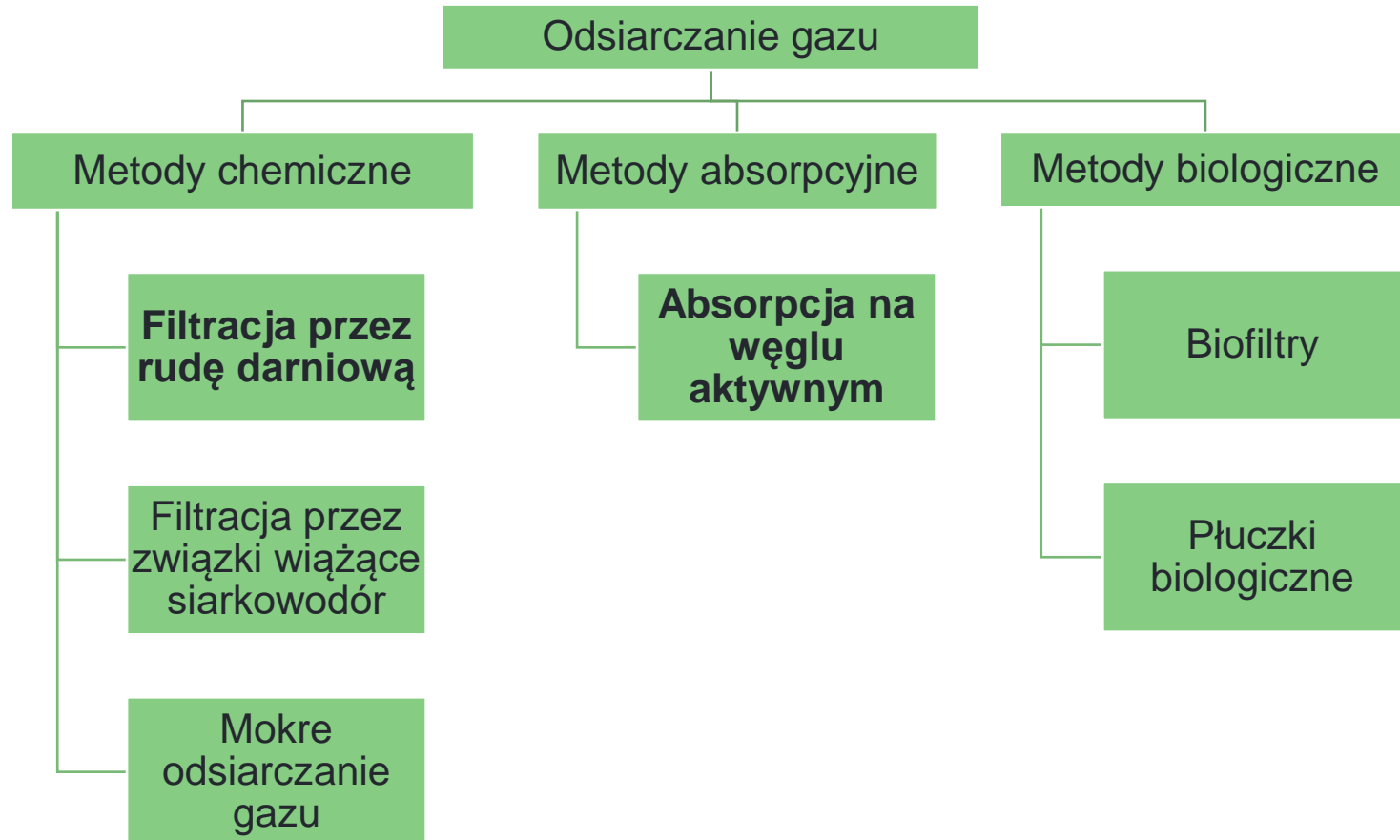


**Należy pamiętać że kwestia kondensacji pary wodnej i jej odbioru musi być zrealizowana na każdym z odcinków rurociągu.**

# Ciąg gazowy

## Odsiarczanie

---



# Ciąg gazowy

## Ruda darniowa

---

Gaz przepływa przez wypełnienie złoża od dołu do góry.

Przekształcanie siarkowodoru zachodzi według reakcji:



# Ciąg gazowy

## Węgiel aktywny

---

Gaz przepływa przez wypełnienie węgla aktywnego. Siarkowodór i inne substancje absorbowane są na węglu aktywnym.

Kluczowa dla wydajności procesu jest niska wilgotność gazu



# Ciąg gazowy

## Magazynowanie

---

Ponieważ produkcja gazu jest nierównomierna w ciągu doby, gaz należy magazynować.

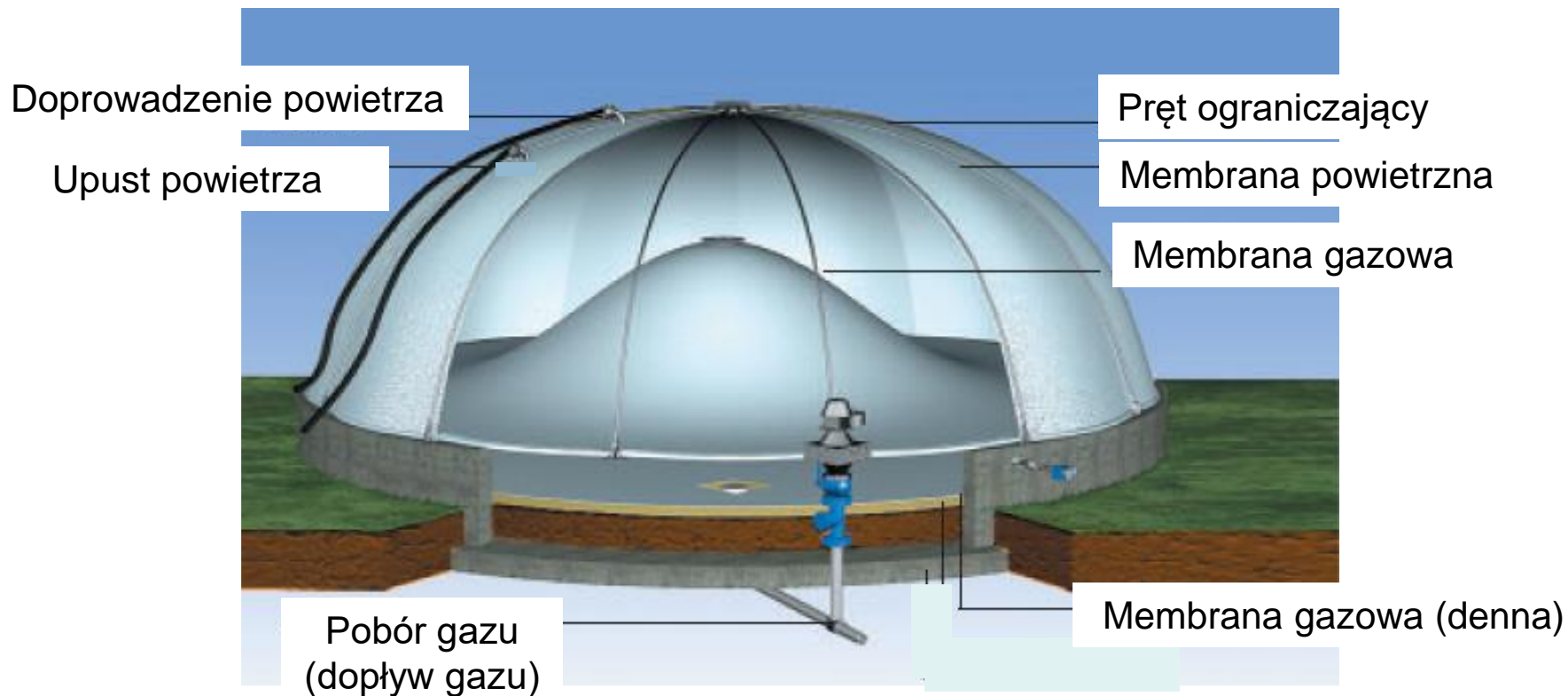
Zbiorniki gazu na oczyszczalniach posiadają objętość pozwalającą magazynować gaz od 6 do 24 godzin.

Najczęściej stosowane zbiornik dwupowłokowe



# Ciąg gazowy

## Magazynowanie – zbiornik dwupowłokowy





# Ciąg gazowy

Magazynowanie – zbiornik dwupowłokowy

---





# **Dezintegracja**

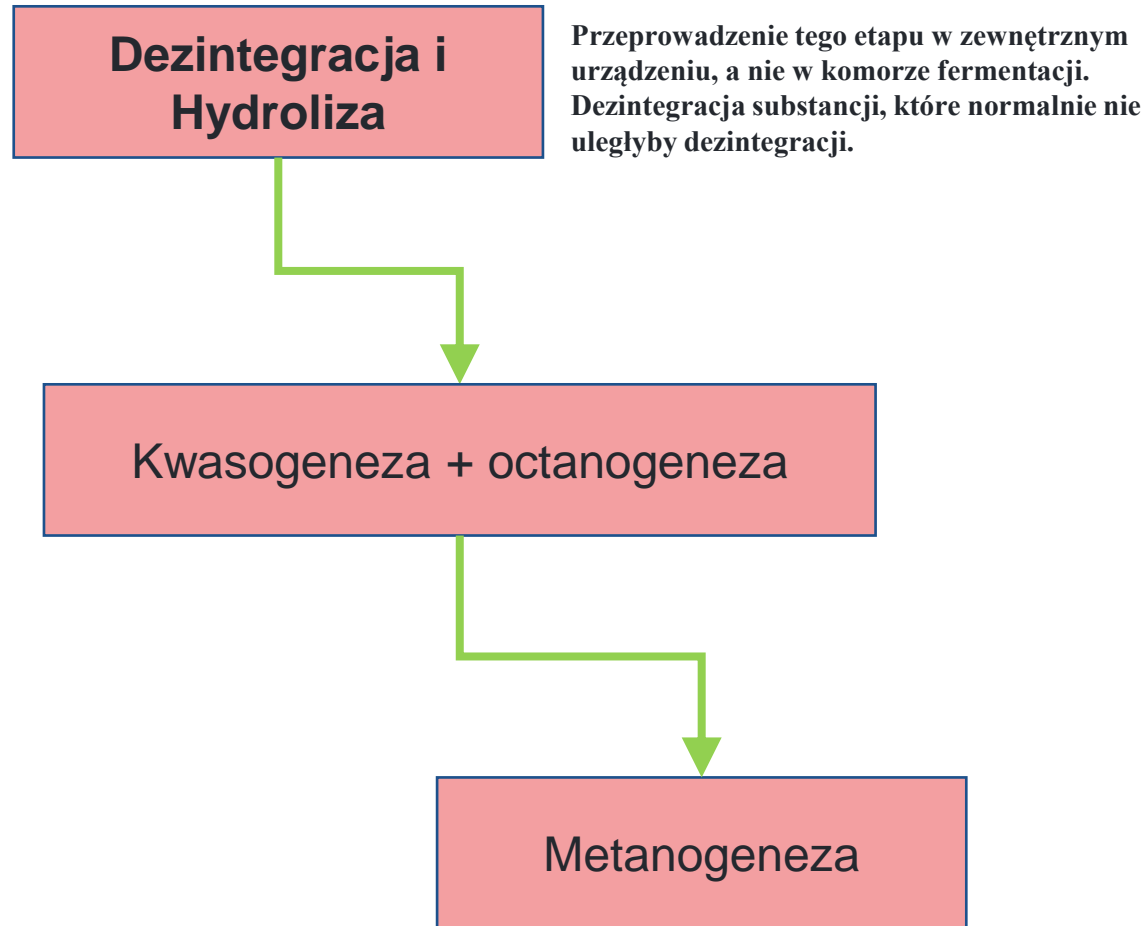
## Lokalizacja w procesie technologicznym



# Dezintegracja

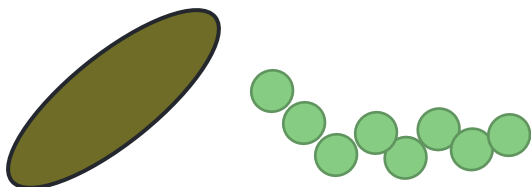
## Rola

---

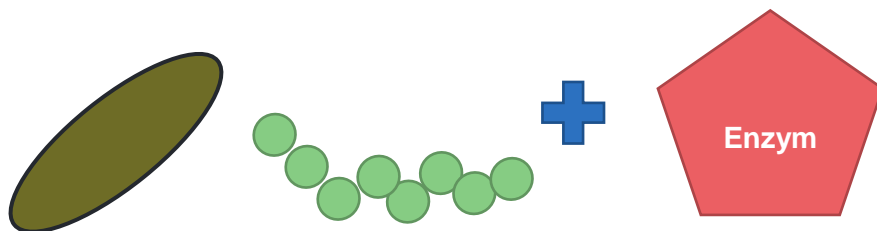


# Wykorzystanie enzymów

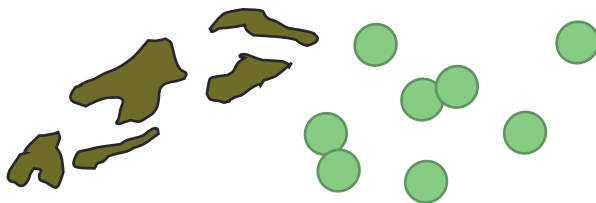
Uwalnianie łatwobiodegradowalnej materii organicznej wskutek prowadzenia reakcji enzymatycznych



Bakterie i substancje złożone w osadzie czynnym



Dodatek preparatu z zewnątrz lub produkcja przez inne bakterie

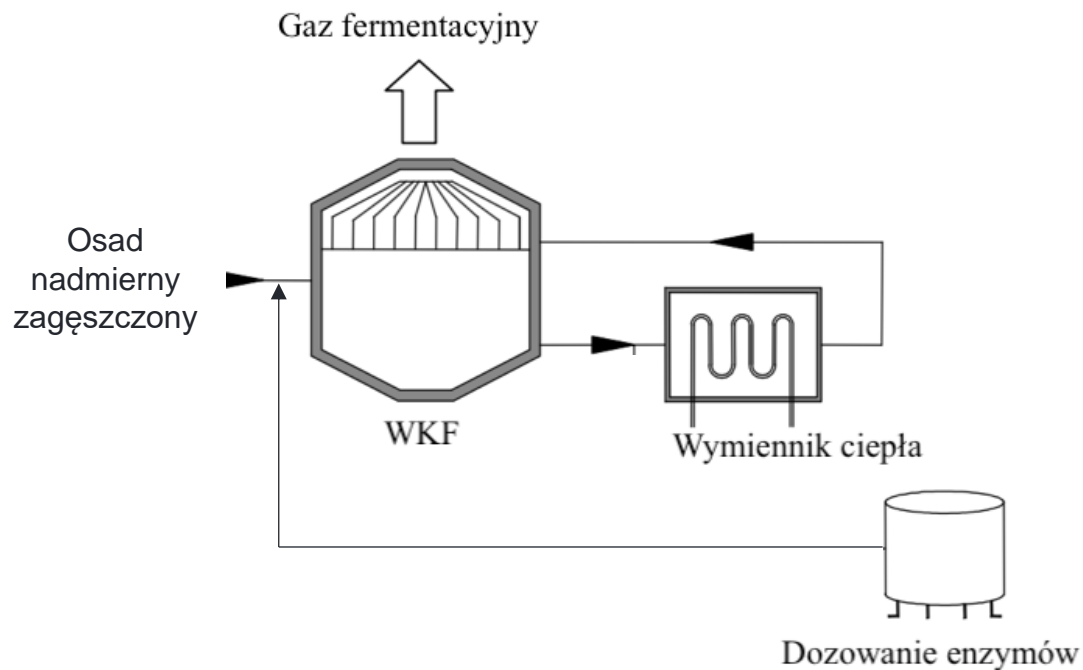


Rozkład (liza) bakterii i substancji złożonych do związków prostych, na których rosną kolejne bakterie

- Dodatek enzymów uwalnia łatwobiodegradowalne związki organiczne zgromadzone w osadzie czynnym
- Przyspiesza również lizę komórek bakteryjnych
- Na produktach hydrolizy przyrastają nowe bakterie (enzymy dawkowane do KOCz) lub rośnie produkcja gazu fermentacyjnego (enzymy + osad nadmierny)
- Rośnie stopień mineralizacji osadu

# Wykorzystanie enzymów

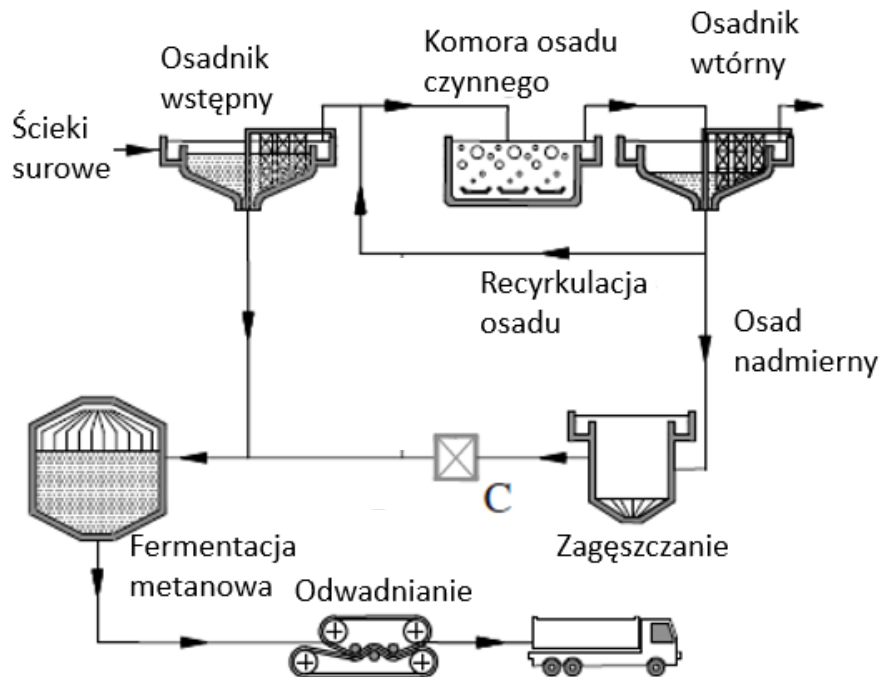
## Dezintegracja osadu nadmiernego



- Przed WKF dodajemy enzymy, które intensyfikują hydrolizę osadu
- Wymaga fermentacji termofilowej (temperatura wspomaga hydrolizę)
- Trudny do oszacowania koszt zakupu enzymów
- Wymaga adaptacji procesu stabilizacji do warunków termofilowych
- Wzrost produkcji gazu o 10-20% i kilkuprocentowy spadek produkcji pofermentu

# Wykorzystanie dezintegracji mechanicznej

## Idea rozwiązania

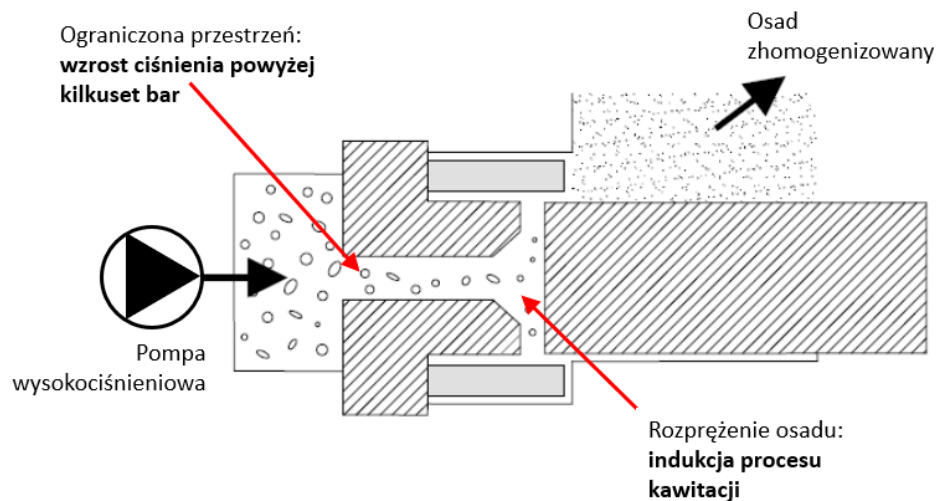


- Wykorzystanie prostych procesów fizycznych
- Zależnie od ilości użytej energii zmiana struktury osadu (poprawa IO, zmniejszenie lepkości) lub jego rozbicie na poziomie komórkowym (wzrost stężenia łatwobiodegradowalnych związków organicznych)
- Intensyfikacja produkcji biogazu

# **Dotąd zrobione**

# Wykorzystanie dezintegracji mechanicznej

## Zalety wdrożenia technologii

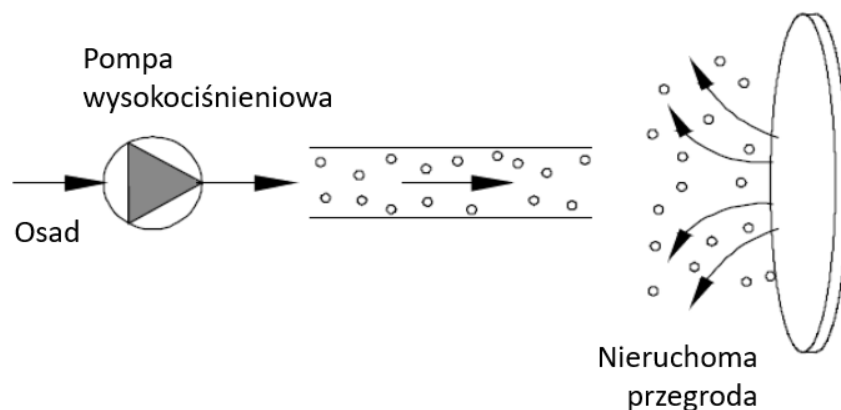


- Łatwa implementacja rozwiązania do już istniejącego układu
- Brak potrzeby oddelegowania wysoce wykwalifikowanej obsady z uwagi na stosunkowo prostą zasadę działania procesów
- Niewielkie nakłady energetyczne pozwalają uzyskać widoczną poprawę w wydajności mieszania i pompowania z uwagi na zmniejszoną lepkość osadu
- Najlepsze efekty w stosunku do zużycia energii w przypadku zastosowanie dezintegracji kawitacyjnej (rysunek)



# Wykorzystanie dezintegracji mechanicznej

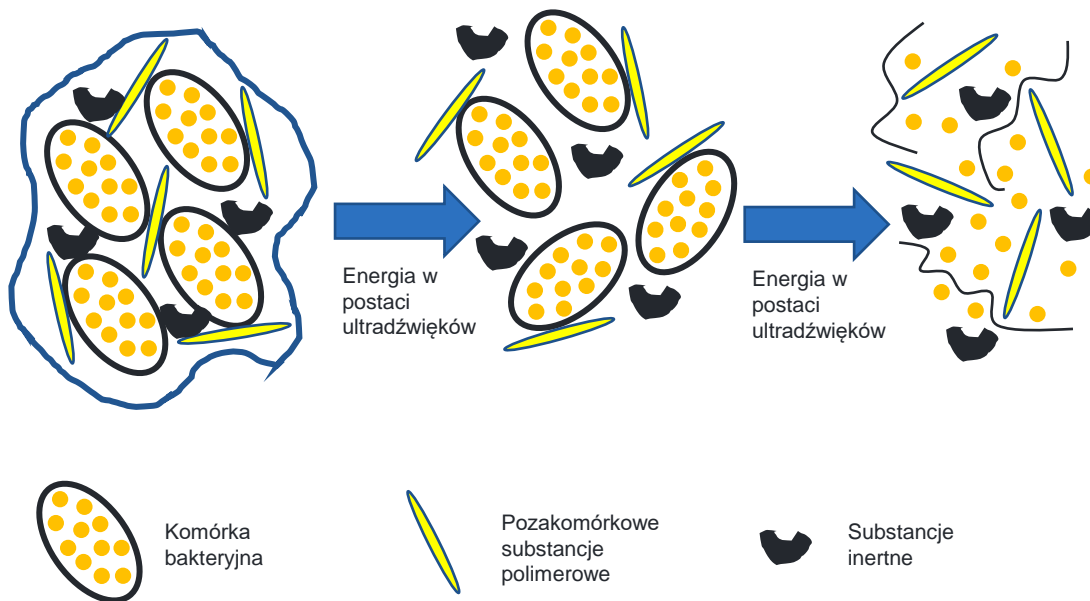
## Wady wdrożenia technologii



- **Wysokie koszty eksploatacyjne zarówno z uwagi na duże zużycie energii jak również szybkie zużywanie się sprzętu (przykładem obu jest rozwiązanie przedstawione na rysunku)**
- **Konieczność znacznego zagęszczania osadu**
- **Nie sprzężone z fermentacją metanową, rozwiązanie uzasadnione ekonomicznie jedynie w przypadku bardzo wysokich kosztów wywozu osadów**

# Wykorzystanie dezintegracji ultradźwiękowej

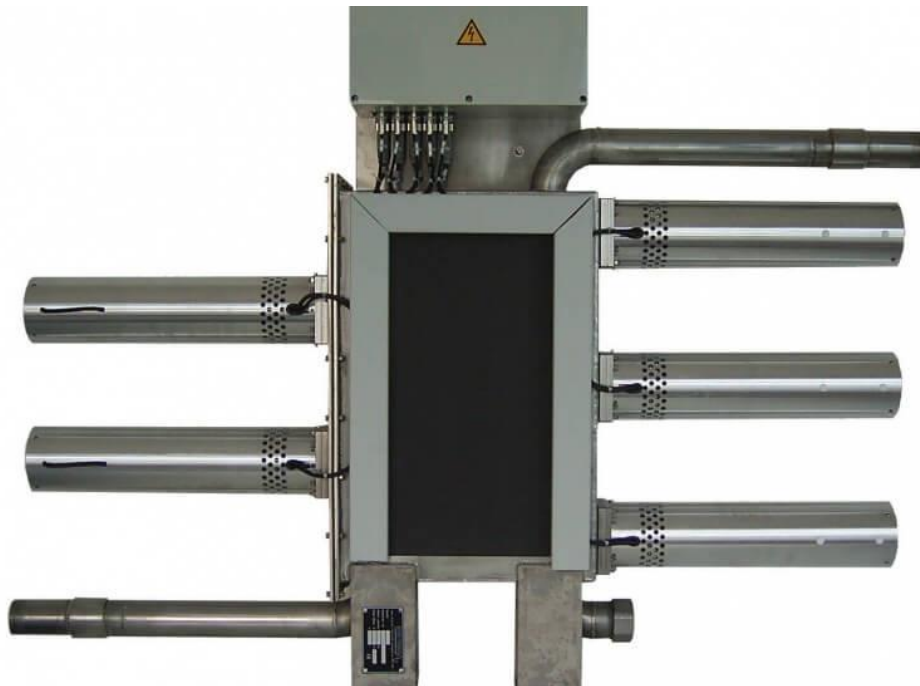
## Idea rozwiązania



- Wykorzystanie ultradźwięków w zakresie częstotliwości 20kHz a 10MHz
- Zasadność stosowania niższych częstotliwości z przywołanego zakresu indukujące powstanie pęcherzyków kawitacyjnych
- Stymulujący wpływ ultradźwięków przy niskim wydatku energetycznym na metabolizm bakterii
- Z uwagi na konieczność stosowanie dużych zagęszczeń osadu, rozwiązanie głównie do strumienia osadu nadmiernego

# Wykorzystanie dezintegracji ultradźwiękowej

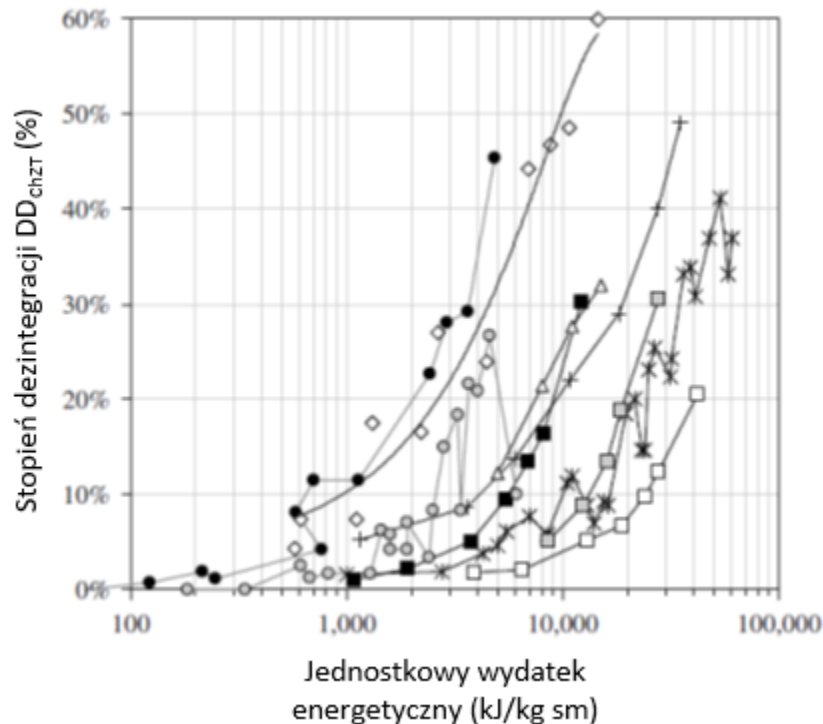
## Zalety wdrożenia technologii



- Osiągany stopień dezintegracji sięgający 60%
- Proces szeroko omawiany w literaturze naukowej – duża baza wiedzy
- Możliwość zakupu gotowych kompleksowych rozwiązań np. OVIVO® (rysunek)
- Możliwość wykorzystania odcieków po dezintegracji do wspomagania procesu denitryfikacji

# Wykorzystanie dezintegracji ultradźwiękowej

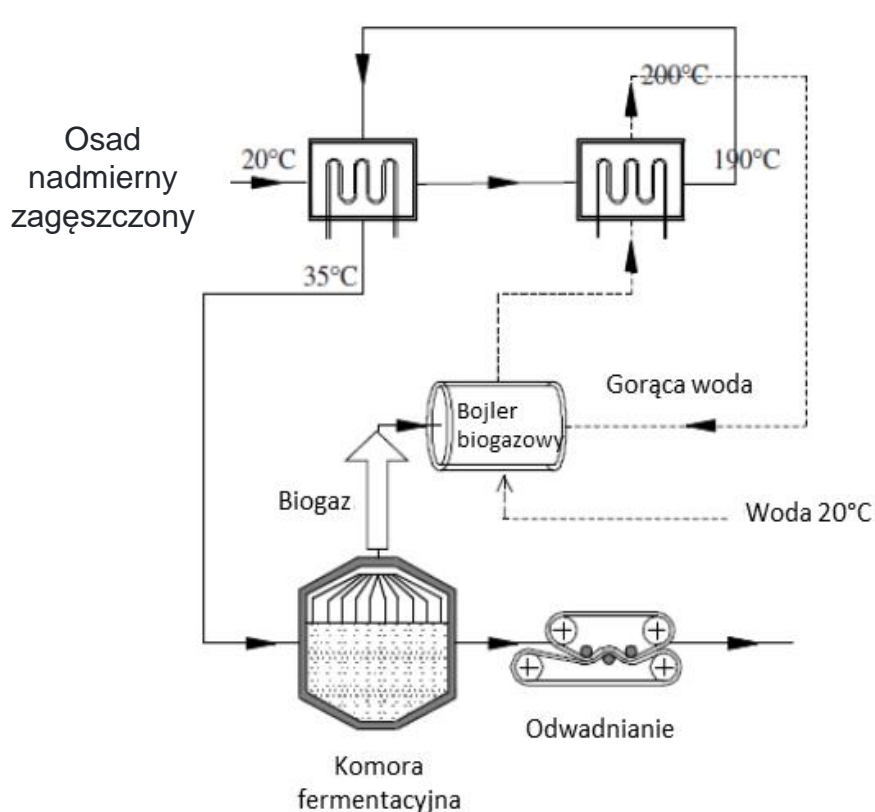
## Wady wdrożenia technologii



- Bardzo duże zużycie energii, trudne do zrównoważenia ekonomicznie wysokim stopniem dezintegracji nawet implementując do układu z fermentacją metanową (rysunek)
- Brak modeli matematycznych wymusza zaawansowane badania laboratoryjne i pilotażowe przed wdrożeniem inwestycji
- Zużywanie się sprzętu tj. sonotrod na skutek wystawienia na działanie zjawiska kawitacji

# Wykorzystanie procesów termicznych i chemicznych

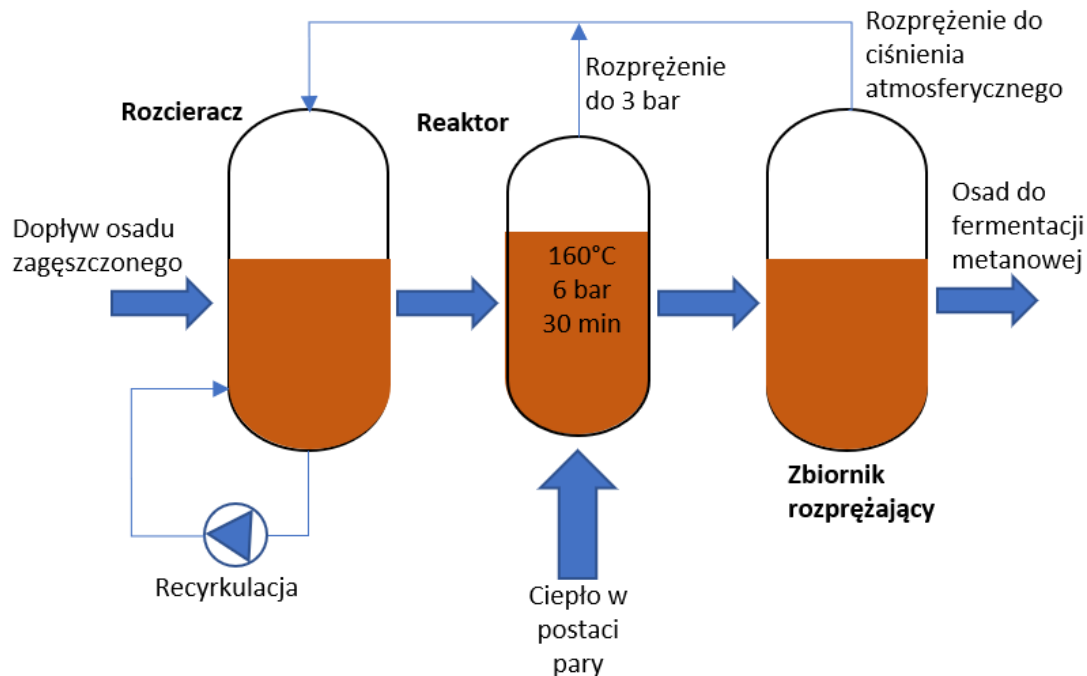
## Idea rozwiązania



- Dezintegracja osadu w wyniku wystawienia go na temperaturę powyżej 150°C lub/i silnie kwasowych bądź zasadowych reagentów
- Procesy czysto chemiczne są rzadko spotykane i raczej funkcjonują jako wsparcie dla procesów termicznych
- Spadek finalnej masy osadu również z uwagi na poprawę jego parametrów odwadniania
- Stosowane wobec osadu mocno zagęszczonego

# Wykorzystanie procesów termicznych i chemicznych

## Zalety wdrożenia



- Redukcja masy osadu sięgająca 25%
- Duża ilość gotowych rozwiązań dostępnych na rynku i wykorzystywanych w pełnej skali na całym świecie, np. CAMBI (rysunek)
- W przypadku połączenia z fermentacją metanową możliwość ograniczenia kosztów poprzez wymienniki ciepła przy jednoczesnym zwiększeniu produkcji biogazu
- Dodatek reagentów chemicznych obniża wymaganą temperaturę procesu

# Wykorzystanie procesów termicznych i chemicznych

## Wady wdrożenia



- Konieczność znacznego zagęszczania osadu celem przeciwdziałania rozpraszania się ciepła w fazie ciekłej
- Duże zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepłą
- Duży koszt reagentów chemicznych
- Dodatni bilans ekonomiczny jedynie w przypadku uwzględnienia wszystkich czynników (biogaz, odwadnianie, mniej osadu)

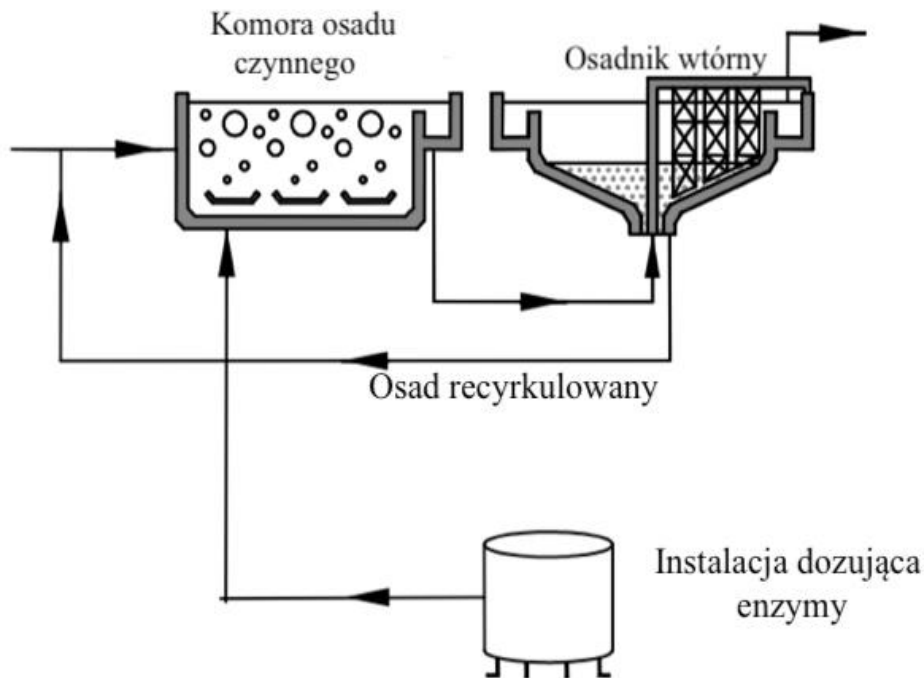
# Inne zastosowania dezintegracji

---



# Wykorzystanie enzymów

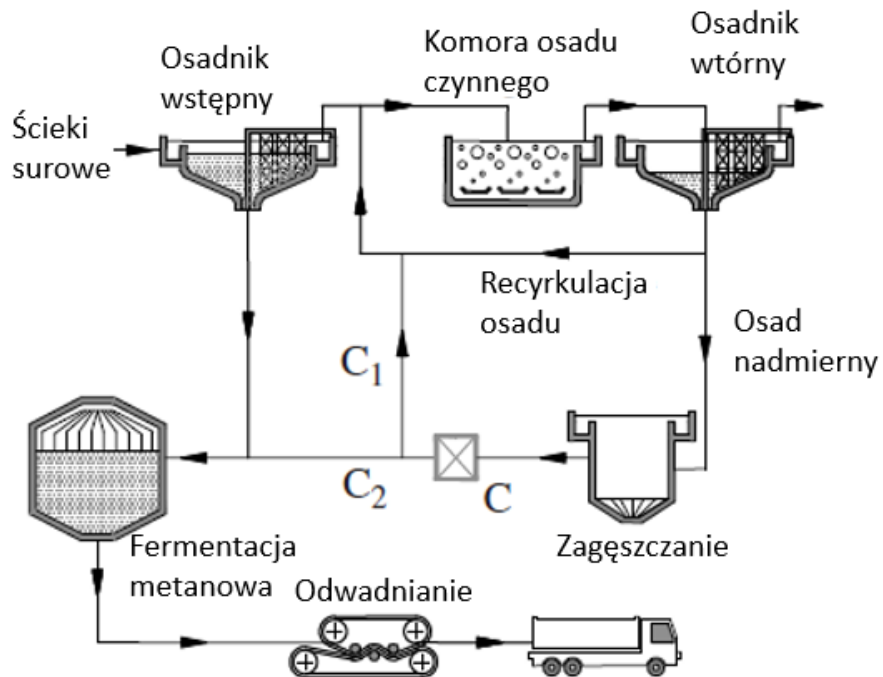
## Dezintegracja enzymatyczna w KOCz



- Dawkowanie komercyjnego preparatu (skład utajniony)
- Prosta instalacja dozująca – niskie nakłady inwestycyjne
- Efektywność zależy od składu ścieków i warunków w reaktorze (np. obecności Ca i Mg)
- Konieczne przeprowadzenie badań pilotowych – efekty są trudne do przewidzenia

# Wykorzystanie dezintegracji mechanicznej

## Idea rozwiązania



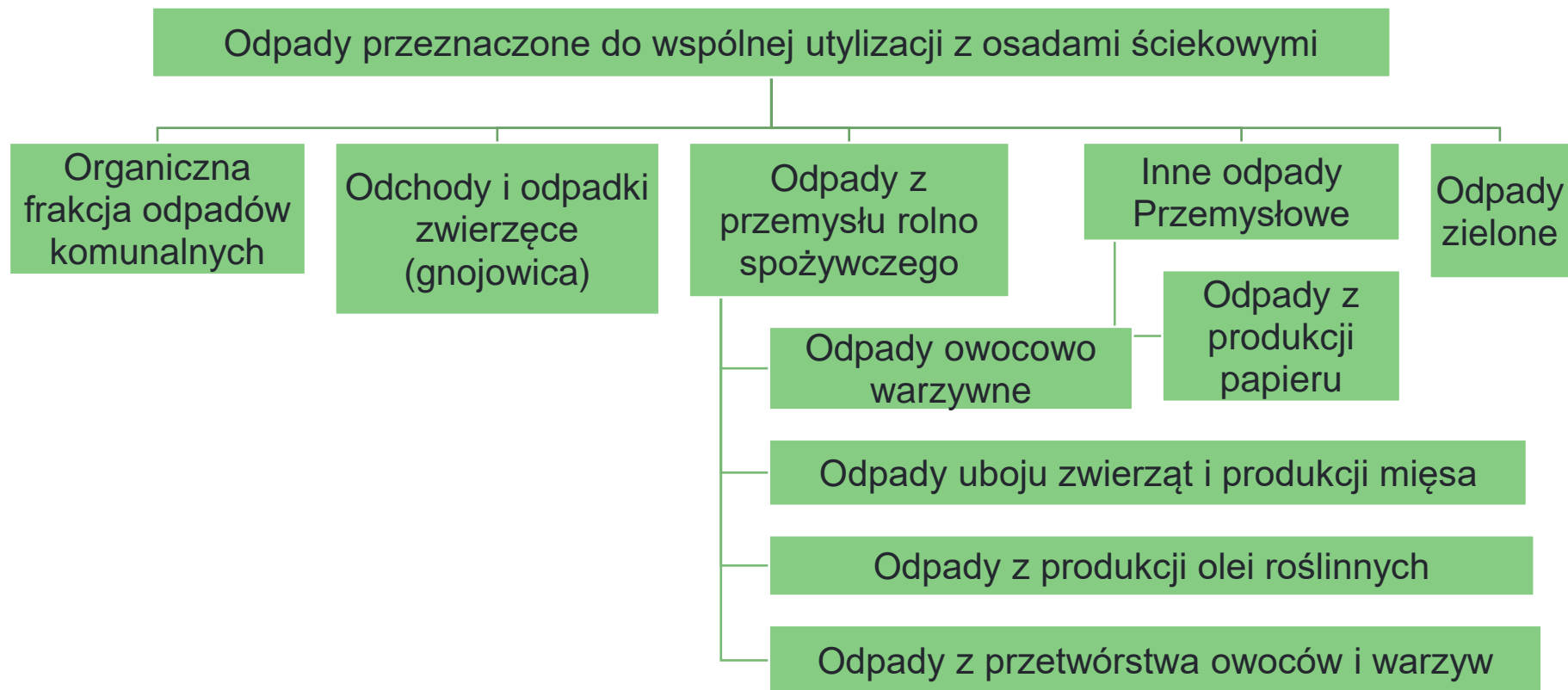
- Wykorzystanie prostych procesów fizycznych
- Zależnie od ilości użytej energii zmiana struktury osadu (poprawa IO, zmniejszenie lepkości) lub jego rozbicie na poziomie komórkowym (wzrost stężenia łatwobiodegradowalnych związków organicznych)
- Poprawa sprawności denitryfikacji ( $C_1$ )
- Intensyfikacja produkcji biogazu ( $C_2$ )

# **Kofermentacja**

# Kofermentacja

## Surowce

---



# Kofermentacja

Surowce do kofermentacji – produkcja metanu

---

Substrat	Ilość gazu l/kg $\Delta$ smo	% CH <sub>4</sub>	% CO <sub>2</sub>	Energia gazu kWh/m <sup>3</sup>
Węglowodany	747	50	50	~5
Tłuszcze	1434	71	29	~7
Białka	636	60	40	~6
Osad ściekowy	880÷1020	64÷67	33÷36	~(6.4÷6.7)

# Kofermentacja

## Kofermentacja, a parametry odcieków

---

**Kofermentacja osadów z odpadami nie zawierającymi N i P (np. tłuszcze) nie prowadzi do zwiększenia stężenia tych pierwiastków w odciekach. Należy się spodziewać jednak wzrostu ładunku ChZT odcieków**

**Kofermentacja osadów z odpadami zawierającymi N i P (np. białka) doprowadzi do uwolnienia dodatkowych ilości tych pierwiastków do odcieków. Dodatkowo wzrośnie ładunek ChZT odcieków**

# Kofermentacja

## Kofermentacja, a parametry odcieków

Typ odpadu	Wzrost masy osadu odwodnionego	Zwiększenie objętości odcieków	Wzrost ładunku ChZT w odciekach	Wzrost obciążenia NH <sub>4</sub> -N w odciekach
	kg/t	dm <sup>3</sup> /t	kg/t	kg/t
Tłuszcze	56,6	~0	1,649	~0
Odpady żywnościowe	54,3	863,2	2,696	3,792
Wytłoki z produkcji wina	59,5	645,9	2,499	9,580

# Kofermentacja

## Kofermentacja, a parametry odcieków

Typ odpadu	Wzrost masy osadu odwodnionego	Zwiększenie objętości odcieków	Wzrost ładunku ChZT w odciekach	Wzrost obciążenia NH <sub>4</sub> -N w odciekach
	kg/t	dm <sup>3</sup> /t	kg/t	kg/t
Mięso do produkcji karmy	69,8	612,4	16,803	12,174
Osad z podczyszczalni odwodniony	128,5	319,2	5,629	7,653
Mieszanina żelatyny ze szlamem roślinnym	152,1	239,5	46,235	56,806



# Kofermentacja

## Bilans finansowy – przykład rzeczywisty

	Koszt energii elektrycznej (0,7złkWh)	Koszty kofermentacji	Bilans	Jednostko wy bilans
	zł/rok	zł/rok	zł/rok	zł/t
Odpad 2	1 758 120,00 zł	50 026,28 zł	1 708 093,72 zł	850,86 zł
Odpad 3	27 366,78 zł	3 186,49 zł	24 180,29 zł	863,58 zł
Odpad 4	3 302 174,40 zł	367 681,29 zł	2 934 493,11 zł	406,17 zł
Odpad 5	22 218,00 zł	3 003,36	19 214,64 zł	45,75 zł

# **Tlenowa stabilizacja osadów**

# Tlenowa stabilizacja osadów

---

Biologiczne utlenianie materii organicznej do  $\text{H}_2\text{O}$  i  $\text{CO}_2$ .

Realizuje się w reaktorze (zwykle otwartym) napowietrzanym.



# Tlenowa stabilizacja osadów

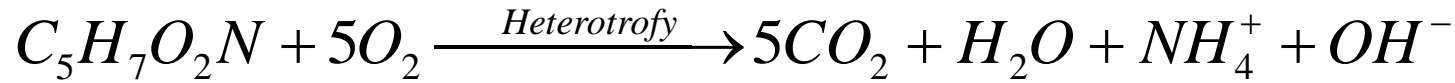
## Wady i zalety

---

Wady	Zalety
<ul style="list-style-type: none"><li>• Wysoce energochłonny proces (napowietrzanie)</li><li>• Trudne odwadnianie osadu po stabilizacji tlenowej</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Proces łatwy w eksploatacji</li><li>• Wykorzystywany w małych oczyszczalniach ścieków</li><li>• Odcieki z procesu zawierają stosunkowo niewielkie ilości biogenów</li></ul>

# Tlenowa stabilizacja osadów

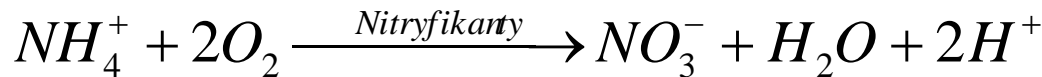
## Reakcje



$$ZO_2^{(1)} = 1 \text{ g } O_2 / \text{g ChZT} = 1.42 \text{ g } O_2 / \text{g smo}$$

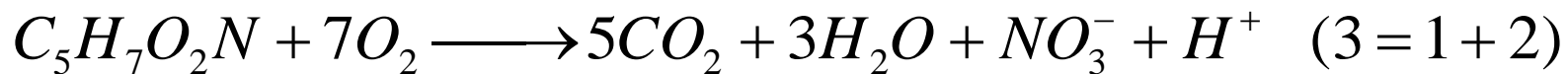
$$\Delta ALK^{(1)} = +6.25 \text{ mval} / \text{g ChZT} = +8.85 \text{ mval} / \text{g smo}$$

Bez nitryfikacji



$$ZO_2^{(2)} = 4.57 \text{ g } O_2 / \text{g } NH_4^+ = 0.40 \text{ g } O_2 / \text{g ChZT} = 0.57 \text{ g } O_2 / \text{g smo}$$

$$\Delta ALK^{(2)} = -12.5 \text{ mval} / \text{g ChZT} = -17.7 \text{ mval} / \text{g smo}$$



$$ZO_2^{(1+2)} = 1.4 \text{ g } O_2 / \text{g ChZT} = 1.99 \text{ g } O_2 / \text{g smo}$$

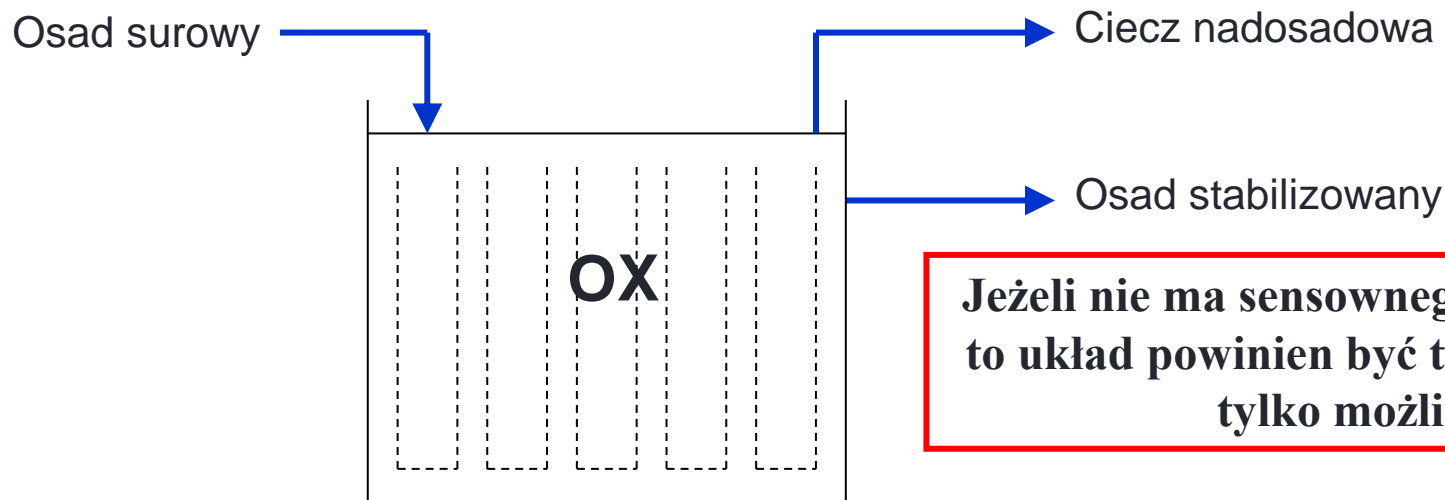
$$\Delta ALK^{(1+2)} = -6.25 \text{ mval} / \text{g ChZT} = -8.85 \text{ mval} / \text{g smo}$$

Z nitryfikacją

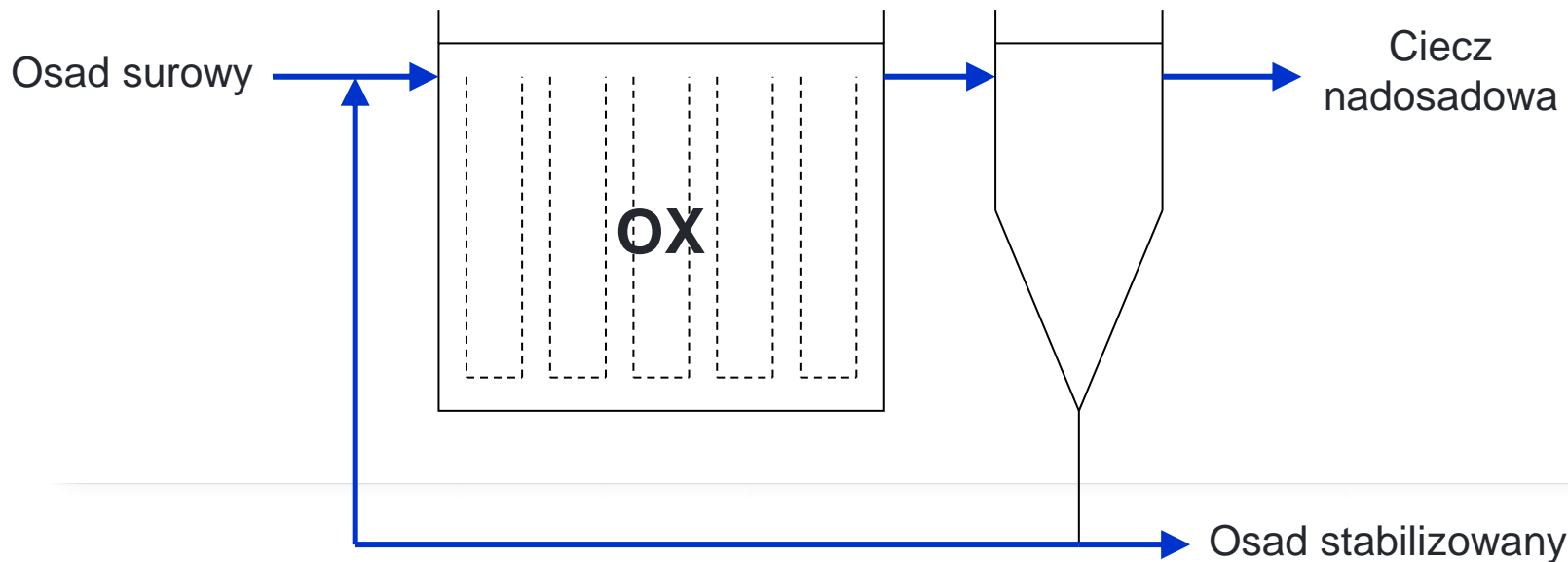
Proces nitryfikacji powoduje większe zapotrzebowanie na tlen jednak nie mamy możliwości eliminacji tego procesu

# Tlenowa stabilizacja osadów

## Reaktory



**Jeżeli nie ma sensownego uzasadnienia  
to układ powinien być tak prosty jak o  
tylko możliwe**



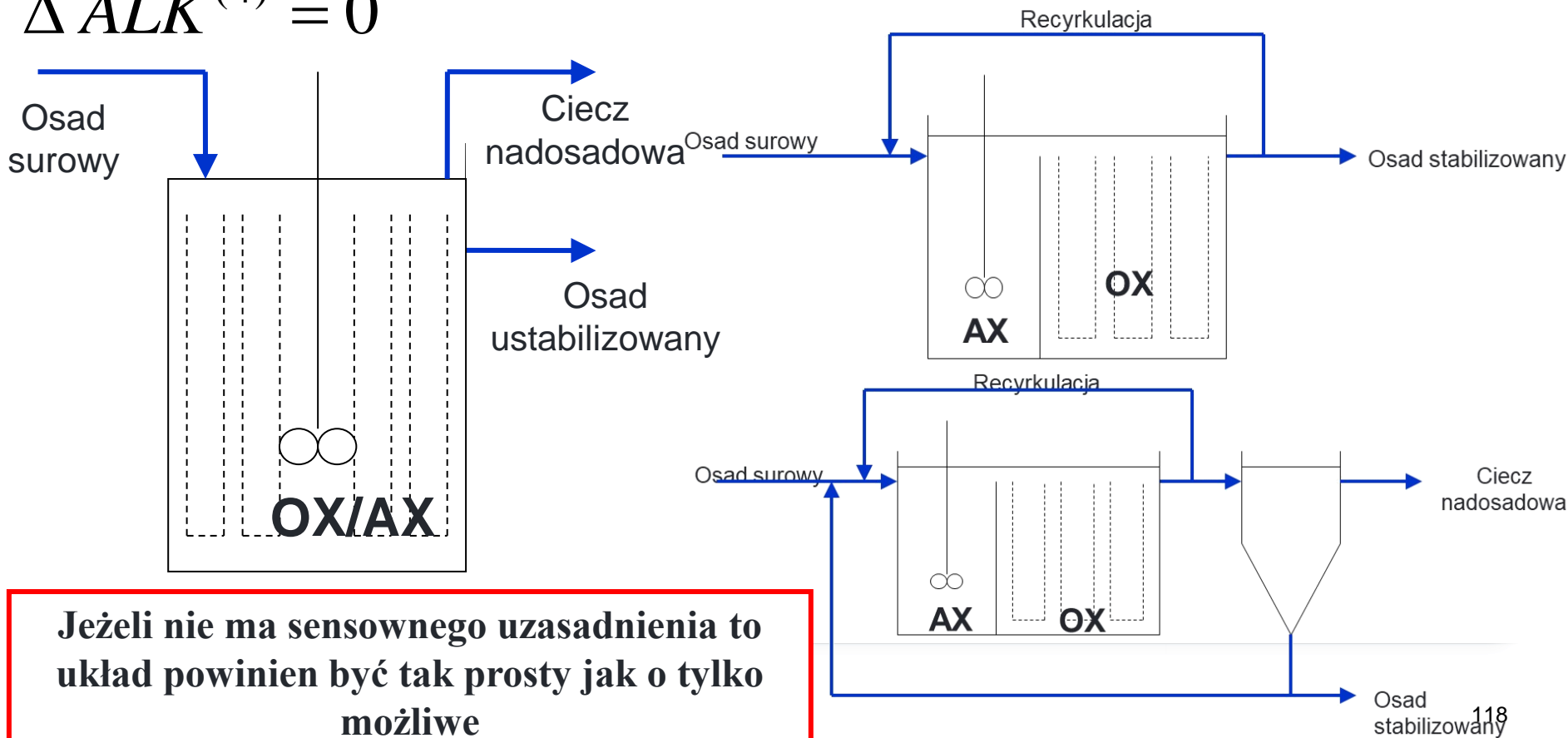
# Tlenowa stabilizacja osadów

## Wprowadzenie denitryfikacji



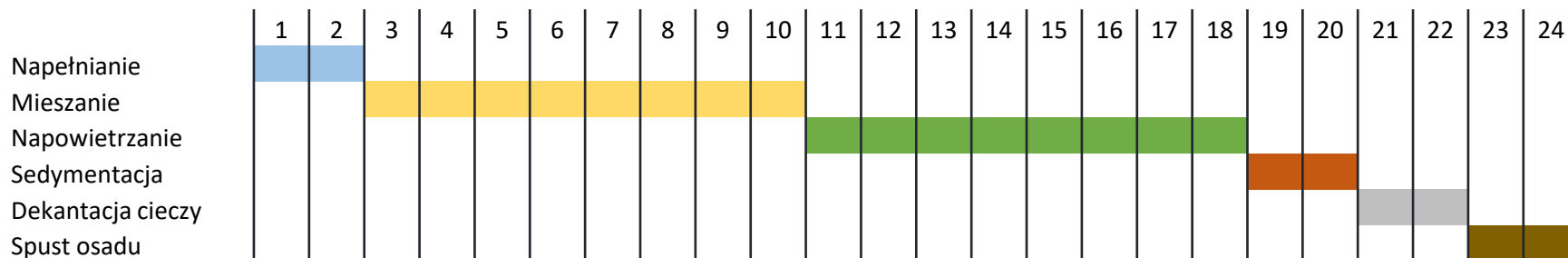
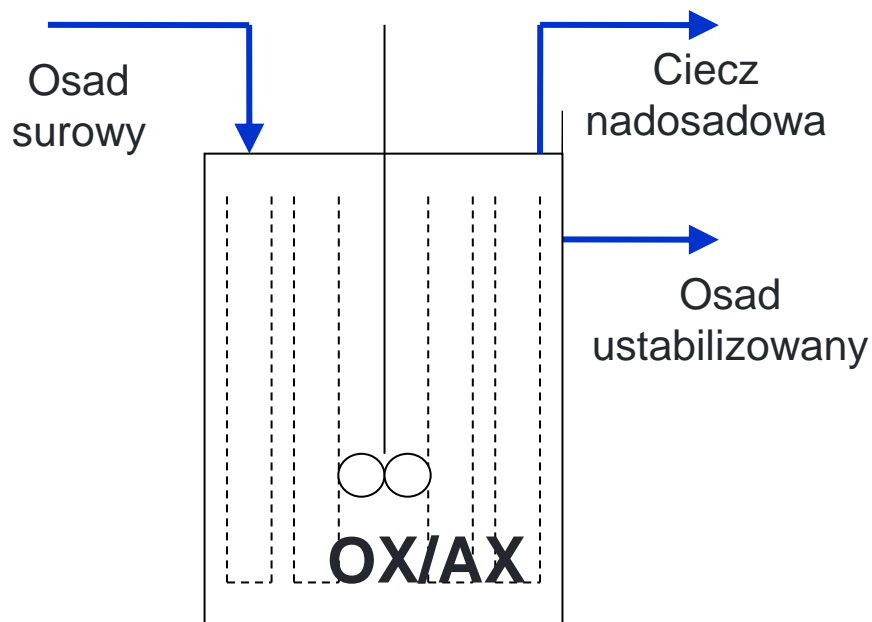
$$ZO_2^{(1+2)} = 1.15 \text{ g } O_2 / \text{ g ChZT} = 1.63 \text{ g } O_2 / \text{ g smo}$$

$$\Delta ALK^{(4)} = 0$$



# Tlenowa stabilizacja osadów

## Wprowadzenie denitryfikacji



**Długości fazy mieszania (denitryfikacja) i napowietrzania (nityfikacja) trzeba dobrać w warunkach procesowych**



# Tlenowa stabilizacja osadów

## Prawo

W aktualnym rozporządzeniu

„w sprawie stosowania komunalnych osadów ściekowych”

pojawia się zapis

**osady te zostały poddane obróbce z zastosowaniem co najmniej jednego z wymienionych procesów:**

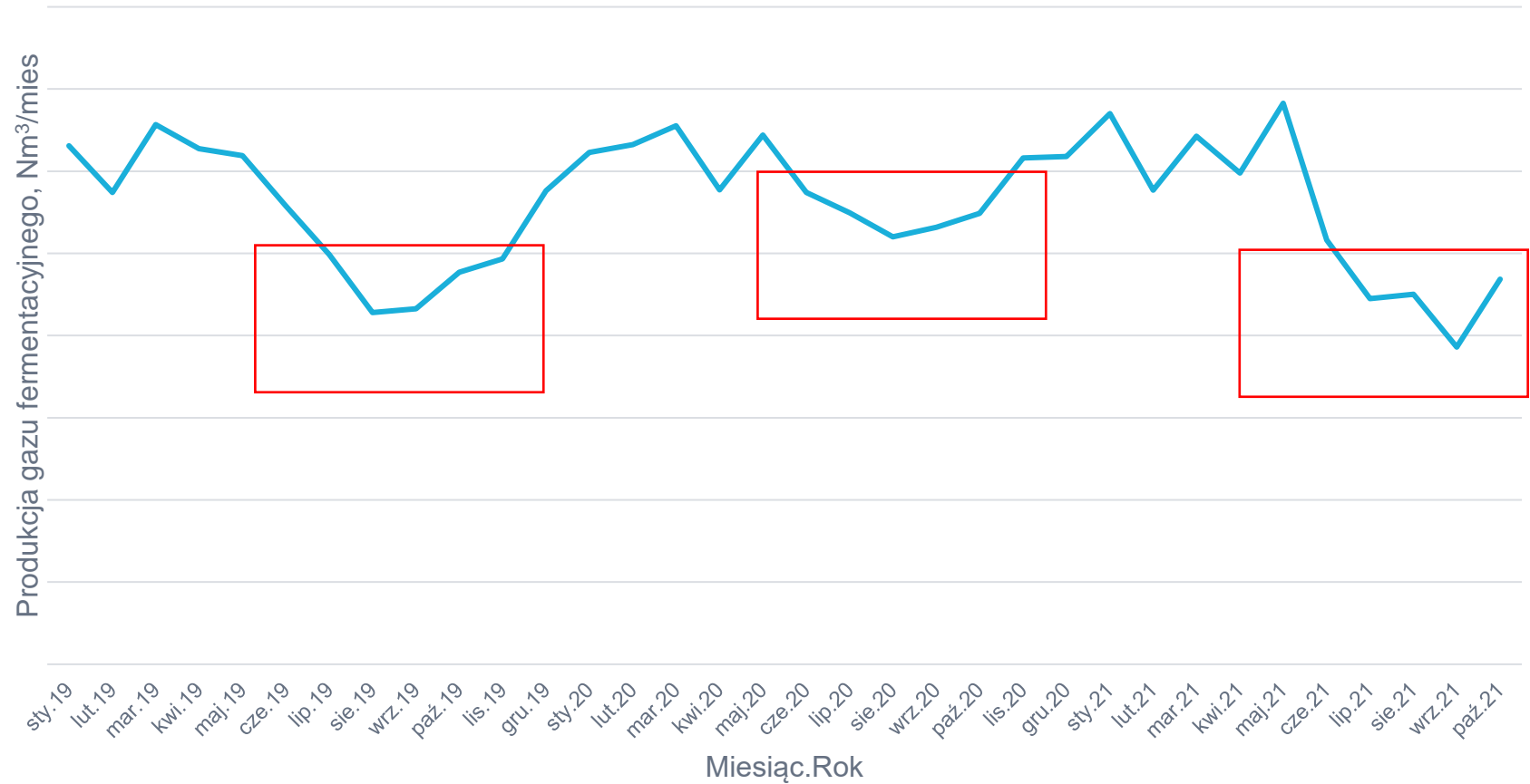
**b) tlenowego, jeżeli był prowadzony przez co najmniej 25 dni, przy czym do tego okresu wlicza się czas, w jakim zachodziły procesy w części tlenowej reaktora biologicznego,**

W praktyce dla oczyszczalni o standardowym WO 15-25 dób (połowa to tlenowy WO) niezbędne jest przetrzymanie osadów w KTSO przez 12-17dób.

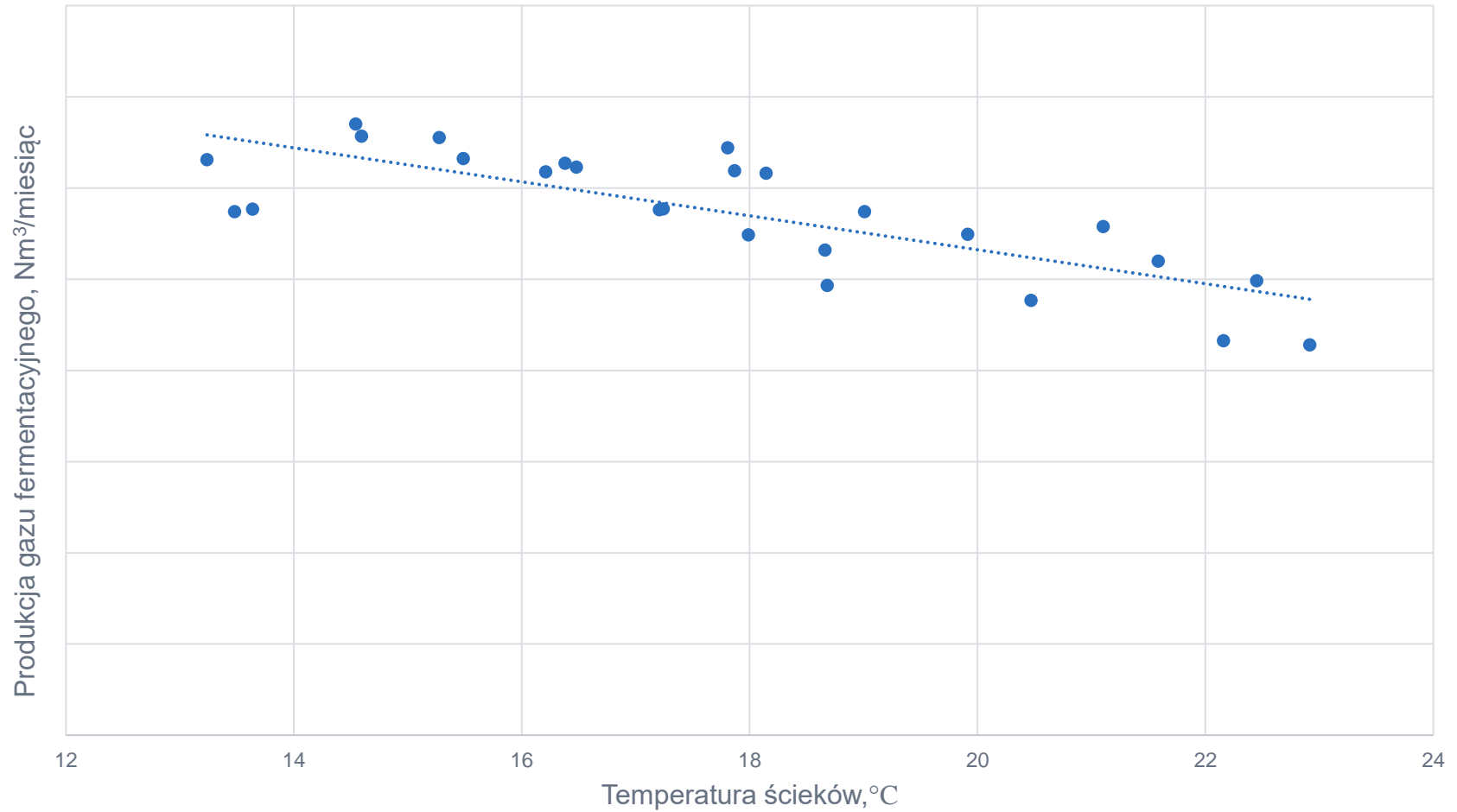
# Case study: fermentacja w osadniku wstępnym

---

# Case study: fermentacja w osadniku wstępnym



# Case study: fermentacja w osadniku wstępnym

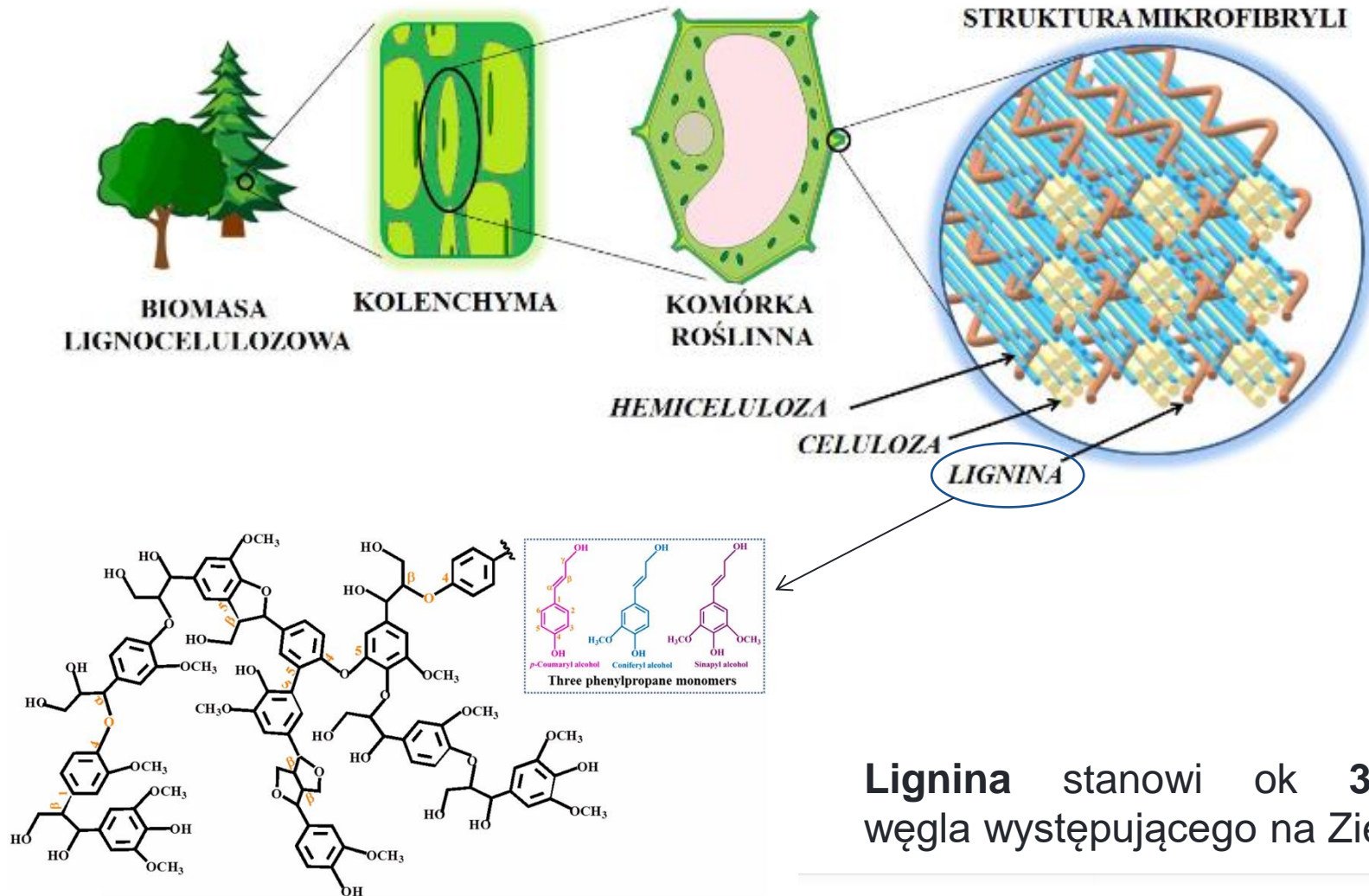


# Case study: fermentacja w osadniku wstępnym

---

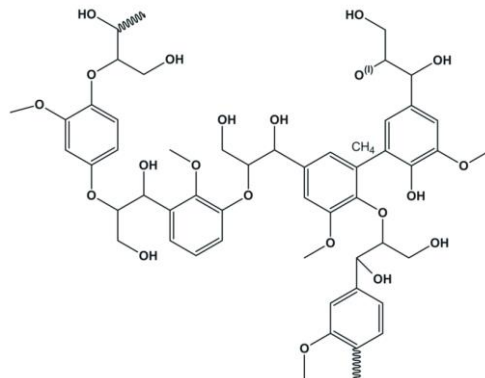
# Lignina

Najpowszechniej występujący w przyrodzie naturalny polimer



# Lignina

## Źródła występowania w ściekach



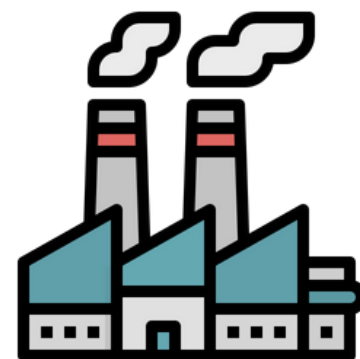
**Lignina i jej pochodne**  
(nawet do 44% masy osadu nadmiernego wt/wt)



Papier toaletowy



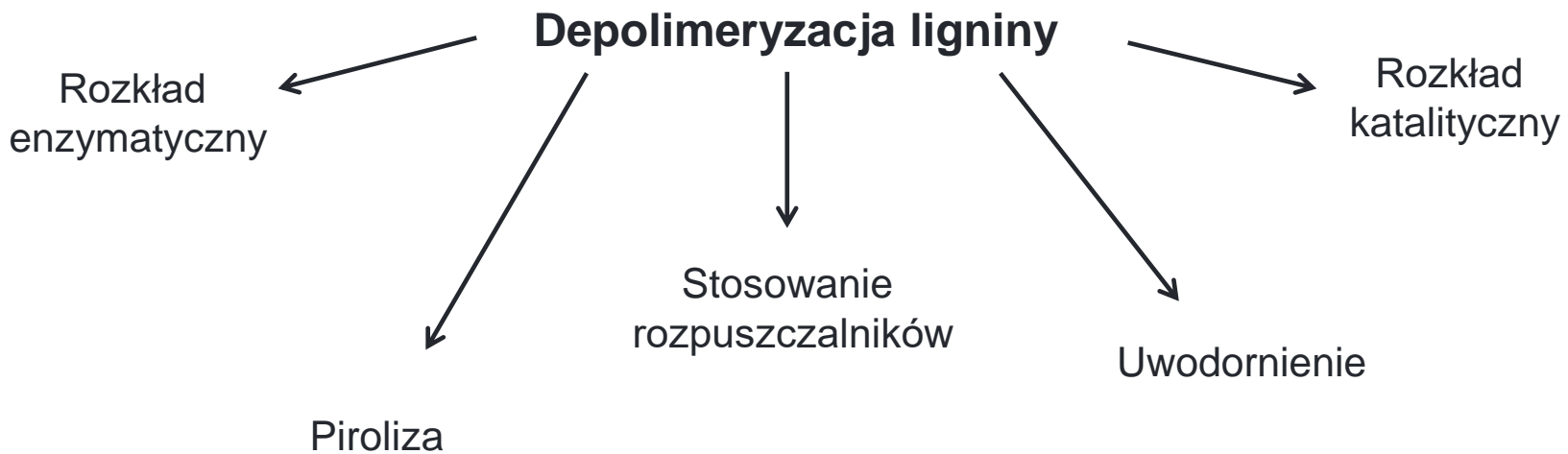
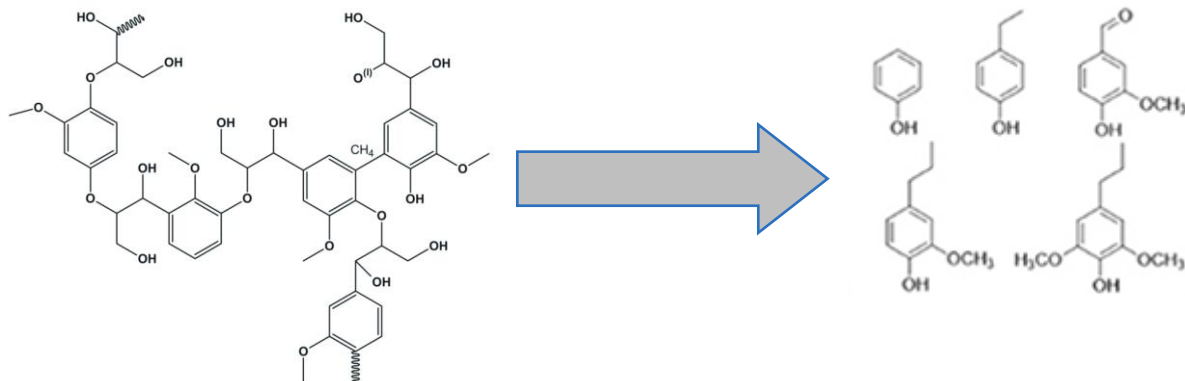
Fekalia



Przemysł papierowy,  
spożywczo-rolny

# Depolimeryzacja ligniny

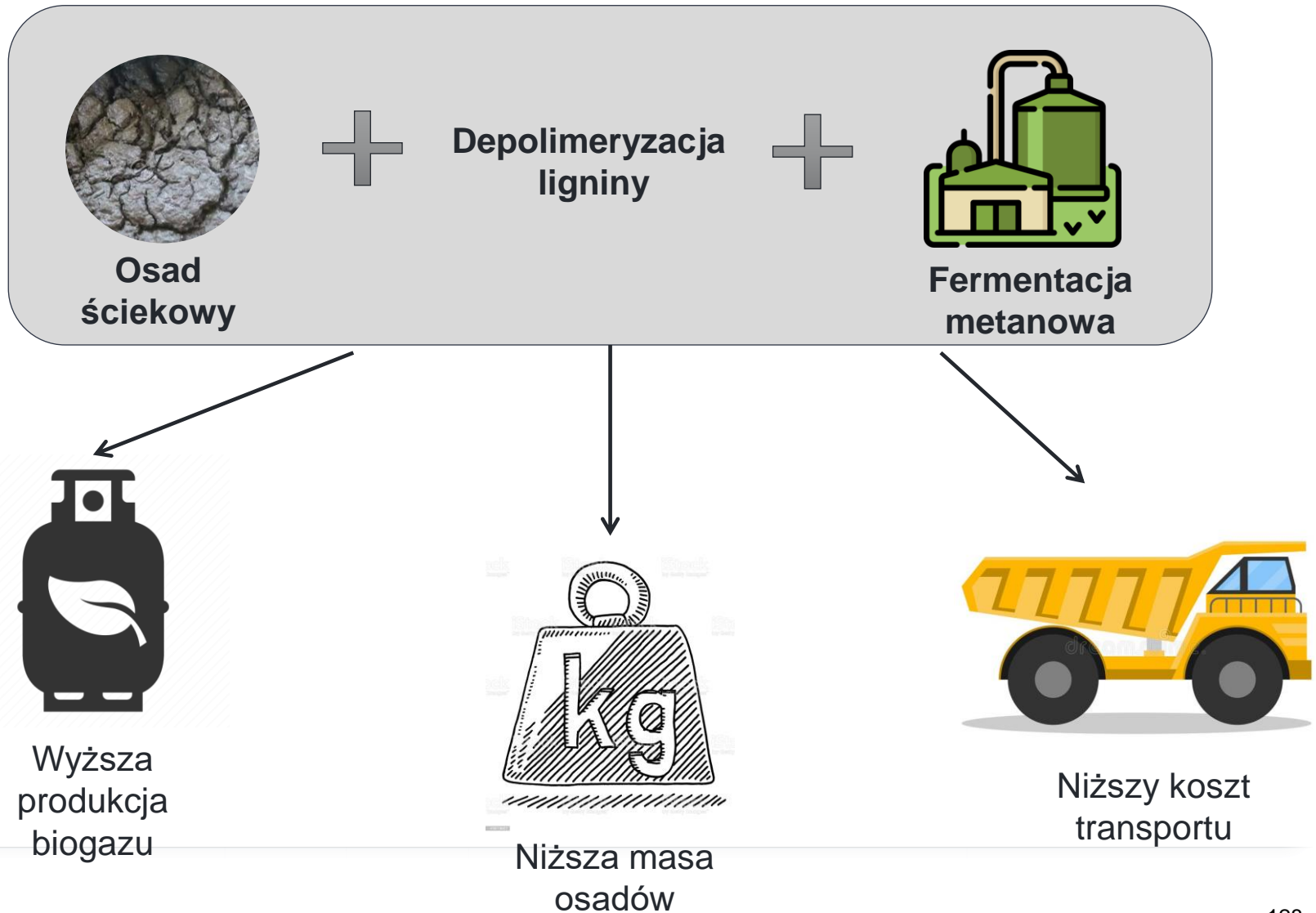
## Metody





# Depolimeryzacja ligniny

Kluczowe działanie dla efektywnej konwersji biomasy



# Związki lignocelulozowe w liczbach

---



**Osad ściekowy**  
z komunalnej OŚ

**14-44%** (wt/wt)  
związków  
lignocelulozowych

**40-50%** (wt/wt)  
**celulozy** ulega  
degradacji w procesie  
fermentacji metanowej

Do **10%** (wt/wt) ligniny  
ulega degradacji w procesie  
fermentacji metanowej

Okolo **35%** zawiesin w  
ściekach dopływających do  
OŚ stanowi papier toaletowy  
- **celuloza**

**[www.wwrtdt.pwr.edu.pl](http://www.wwrtdt.pwr.edu.pl)**

**Fermentacja metanowa, kofermentacja**

**Odzysk wody ze ścieków**

**Produkcja nawozów płynnych z odpadów**

**Odzysk azotu i fosforu do struwitu**

**Optymalizacja zużycia energii**

**Optymalizacja usuwania azotu i fosforu**

**Kamil Janiak, 697 286 553, [kamil.Janiak@pwr.edu.pl](mailto:kamil.Janiak@pwr.edu.pl)**