

KAMIL JANIAK

OPTYMALIZACJA NAPOWIETRZANIA NA OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW

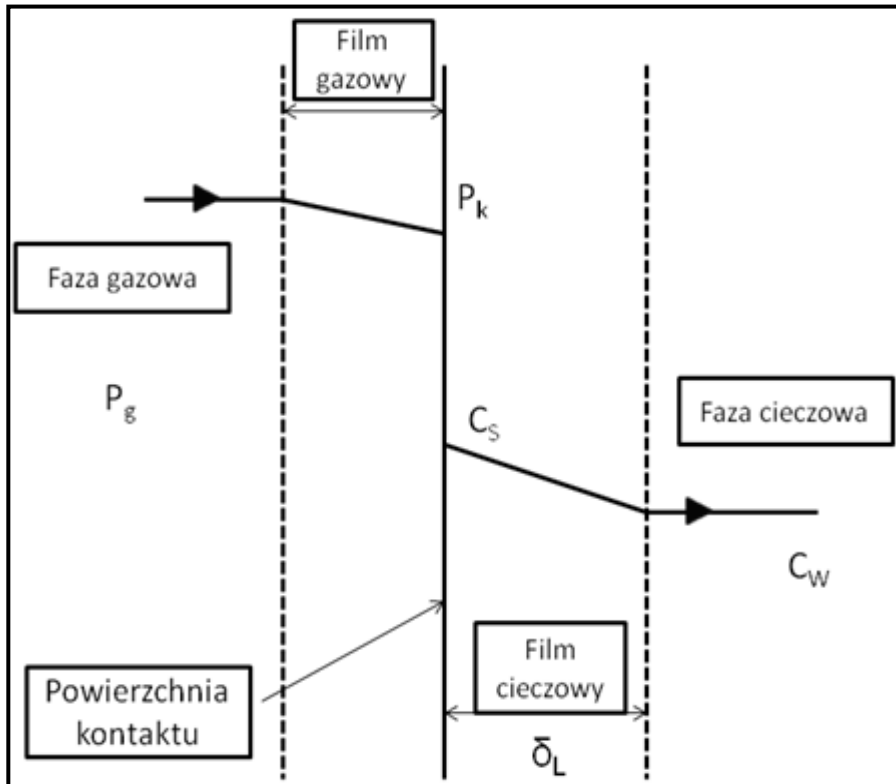
Politechnika Wroclawska

STYCZEŃ, 2026



Podstawowe parametry i obliczenia

Transfer tlenu – teoria dwufilmu



Najważniejsze informacje

$K_L = \frac{D}{\delta_L}$ - im większy tym lepszy transfer

D – współczynnik dyfuzji

δ_L – grubość filmu cieczowego

A – pole powierzchni wymiany masy

– im większe pole tym lepiej

$K_L A$ – objętościowy współczynnik transferu masy

Generalna zasada

Im mniejsze pęcherzyki tym lepiej

Im większa turbulencja tym lepiej

Im większy gradient stężeń tym lepiej

Podstawowe parametry i obliczenia

Stopień wykorzystania tlenu (OTE) i standardowy stopień wykorzystania tlenu (SOTE)

SOTE - standardowy stopień wykorzystania tlenu, %/m (lub $\text{gO}_2/\text{m}^3 \text{ m}$)

OTE - stopień wykorzystania tlenu w warunkach procesowych, %/m (lub $\text{gO}_2/\text{m}^3 \text{ m}$)

Generalnie: $\text{OTE} \ll \text{SOTE}$ ze względu na negatywny wpływ substancji zawartych w ściekach na transfer tlenu

Typ dyfuzorów	Strumień powietrza, [l/s dyfuzor]	SOTE dla zanurzenia 4,6 m [%]
Drobnopęcherzykowe ceramiczne płytowe	10,2-25,4 l/s m ²	26-33
Drobnopęcherzykowe ceramiczne dyskowe	0,2-1,6	25-40
Drobnopęcherzykowe membranowe dyskowe	0,24-9,7	16-38
Grubopęcherzykowe	1,6-21,2	9-13

Podstawowe parametry i obliczenia

α i β

$$\alpha = \frac{k_L a_{20}(\text{ścieki})}{k_L a_{20}(\text{woda})} \ll 1 \text{ (np. 0.7)}$$

$$\beta = \frac{C_{s,20}(\text{ścieki})}{C_{s,20}(\text{woda})} < 1 \text{ (zwykle rzędu 0.95 – 0.99)}$$

$k_L a_{20}$ – objętościowy współczynnik transferu tlenu w 20°C

$C_{s,20}$ – stężenie nasycenia tlenem rozpuszcz. w ściekach o temperaturze 20°C

α jest bezpośrednio przeliczalna na koszt natleniania.

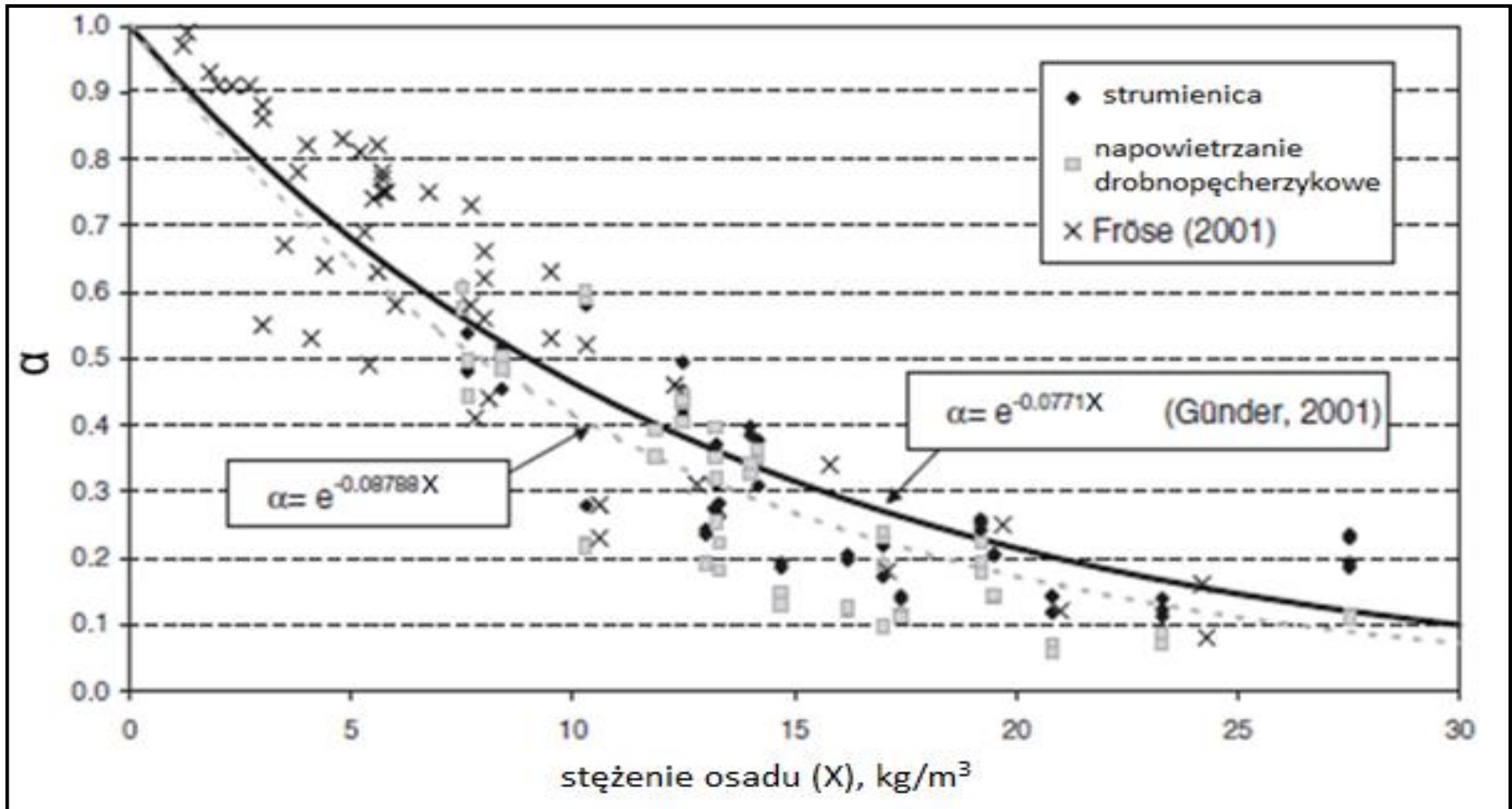
Dla przykładu, można przyjąć, że $\alpha=0.7$ oznacza koszty natleniania ścieków wynoszący $1/0.7 = 142\%$ kosztu natleniania wody czystej.

β ma dość nieistotny wpływ.

Zwykle, mamy ograniczony wpływ na wartości tych parametrów

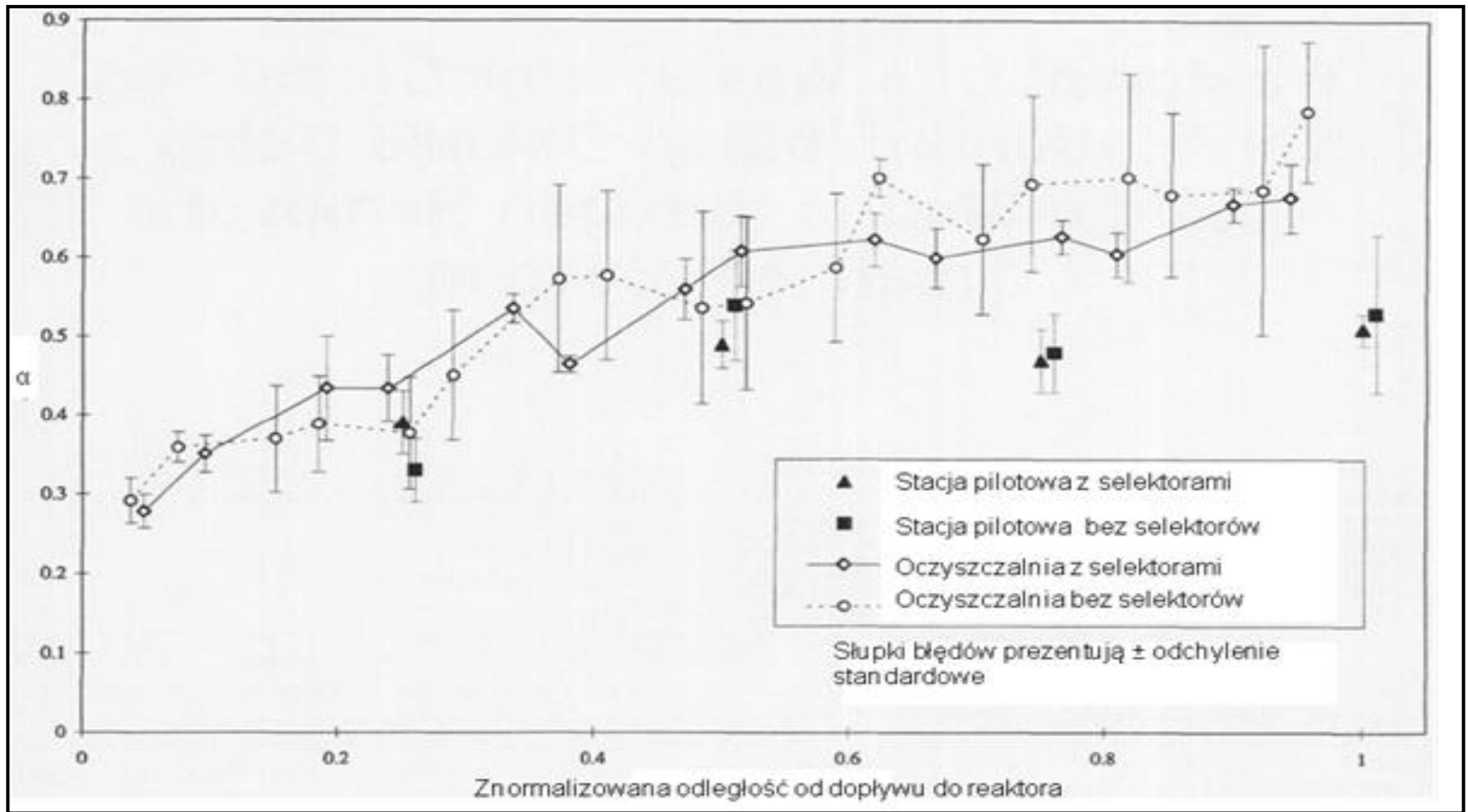
Podstawowe parametry i obliczenia

Współczynnik α – wpływ stężenia osadu



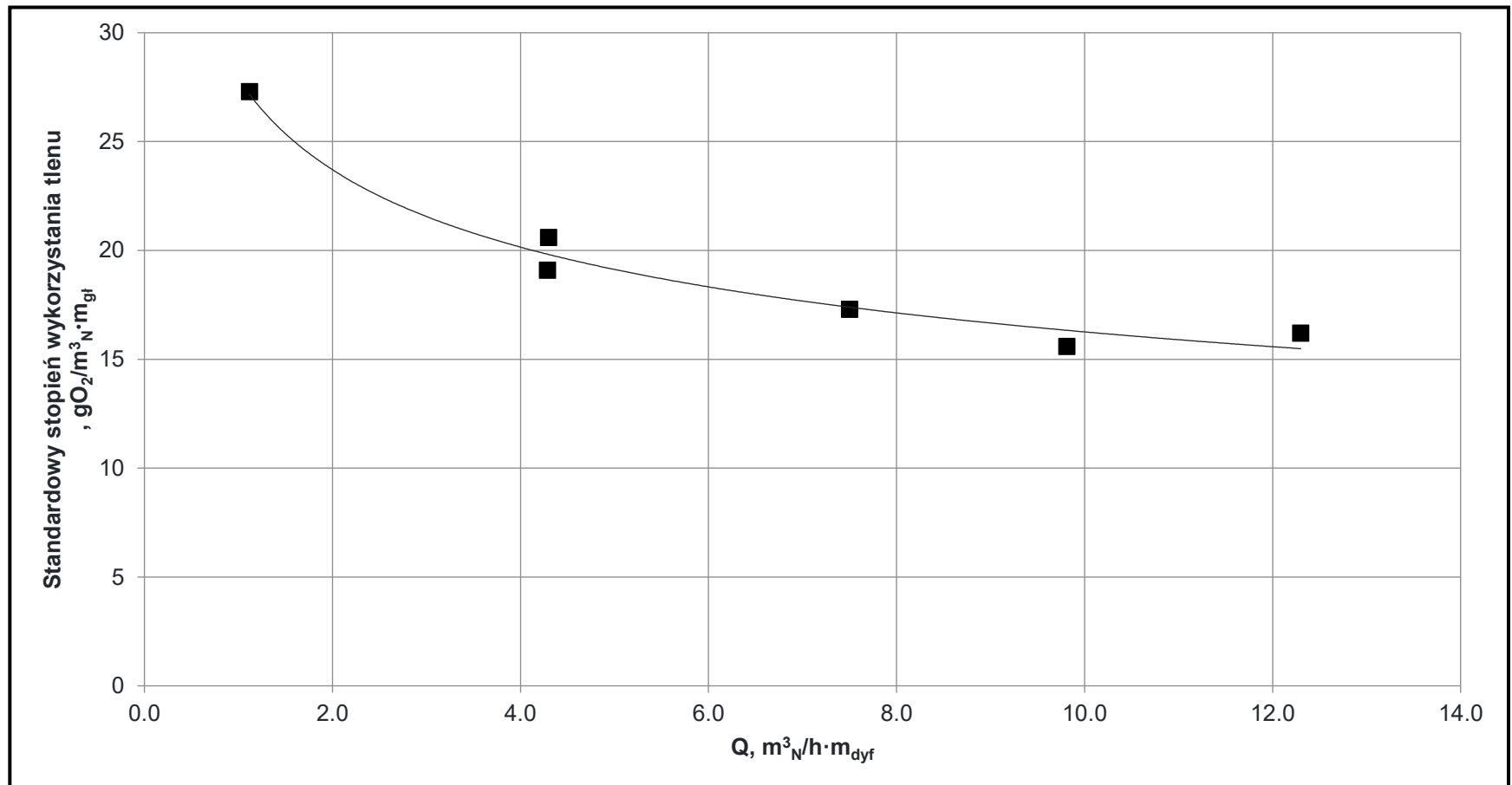
Podstawowe parametry i obliczenia

Współczynnik α – wpływ postępującego rozkładu biologicznego



Podstawowe parametry i obliczenia

Przepływ przez dyfuzor



Podstawowe parametry i obliczenia

Szybkość nitryfikacji

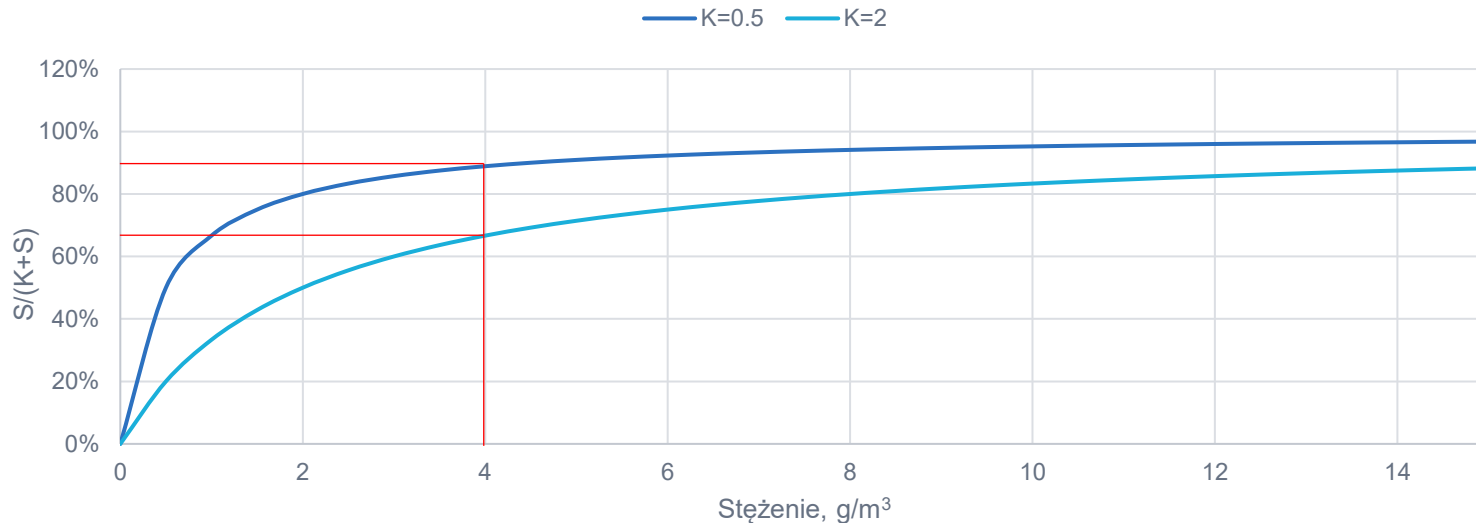
Szybkość przyrostu
nitryfikantów, 1/d

Stężenie nitryfikantów, gO_2/m^3

$$r_{nit} \approx \mu_{nit} \cdot \frac{S_{NH_4}}{S_{NH_4} + K_{NH_4}} \cdot \frac{S_{O_2}}{S_{O_2} + K_{O_2}} \cdot X_A$$

Stała nasycenia azotem
amoniowym, gN/m^3

Stała nasycenia tlenem, gO_2/m^3



Podstawowe parametry i obliczenia

Zapotrzebowanie na tlen na nitryfikację

Tyle tlenu trzeba zużyć na utlenienie 1 g N-NH₄

$$Z_{O_2,N} = \frac{Q_d \cdot 4,3 \cdot (S_{NO_3,D} - S_{NO_3,ZB} + S_{NO_3,AN})}{1000}$$

Stężenie azotu azotanowego do denitryfikacji

Stężenie azotu azotanowego w dopływie do bloku biologicznego

Stężenie azotu azotanowego w odpływie z osadnika wtórnego

Podstawowe parametry i obliczenia

Odzysk tlenu z denitryfikacji

$$O = \frac{Q \cdot 2,9 \cdot S_{NO_3, D}}{1000}$$

Ilość ścieków dopływających do bloku biologicznego

Współczynnik jednostkowego odzysku tlenu z denitryfikacji 1 g N-NO₃

Stężenie azotu azotanowego do denitryfikacji

Podstawowe parametry i obliczenia

Zapotrzebowanie na tlen na skróconą nitrytację

Tyle tlenu trzeba zużyć
na utlenienie 1 g N-NH₄

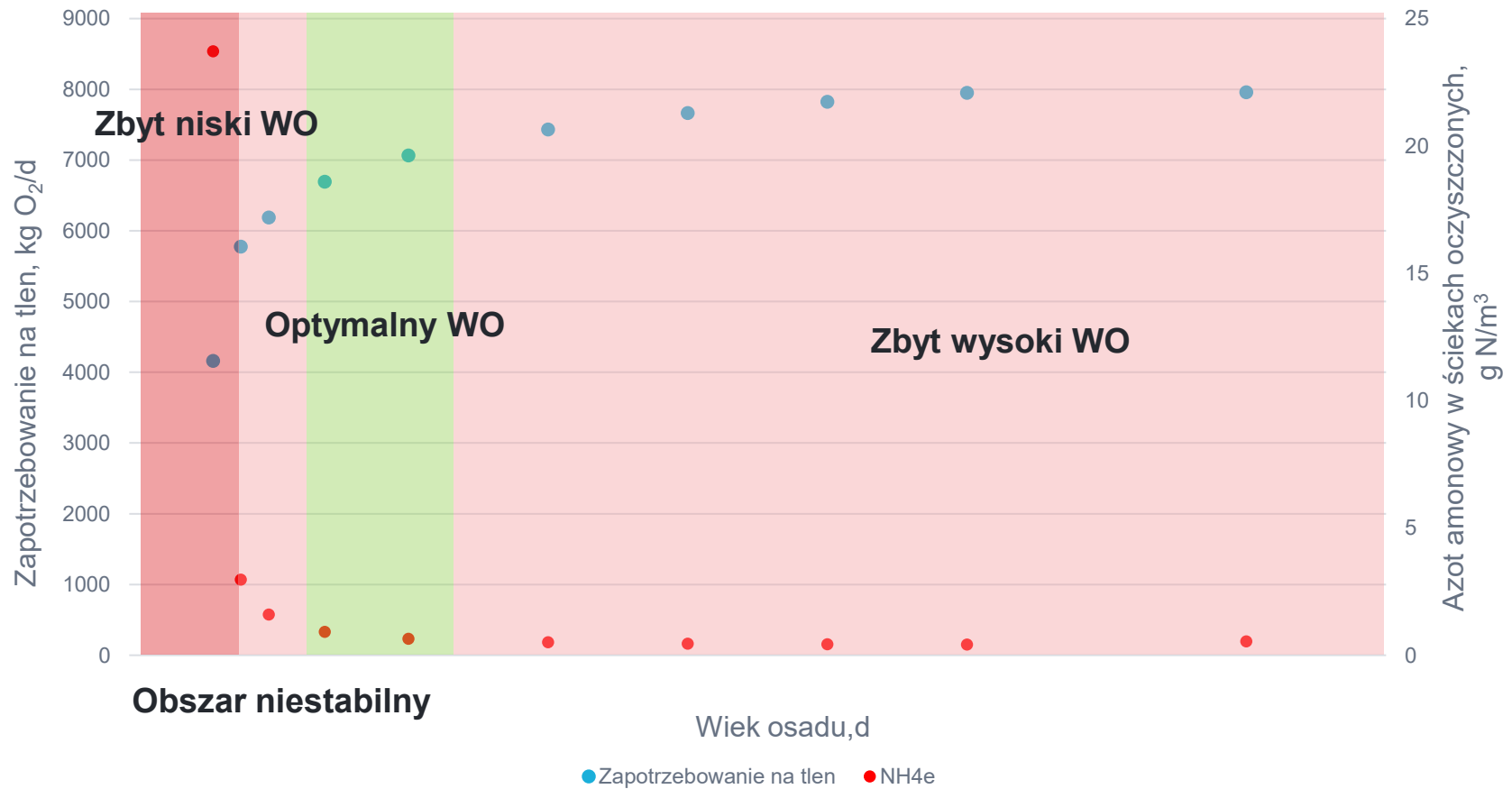
Taką część azotu w
odciekach należy poddać
nitryfikacji

$$Z_{O_2,SNIT} = \frac{Q_d \cdot 3,4 \cdot 0,56 \cdot S_{NO_3,odcieki}}{1000}$$

Stężenie azotu azotanowego w
odciekach oczyszczonych

Sterowanie wiekiem osadu

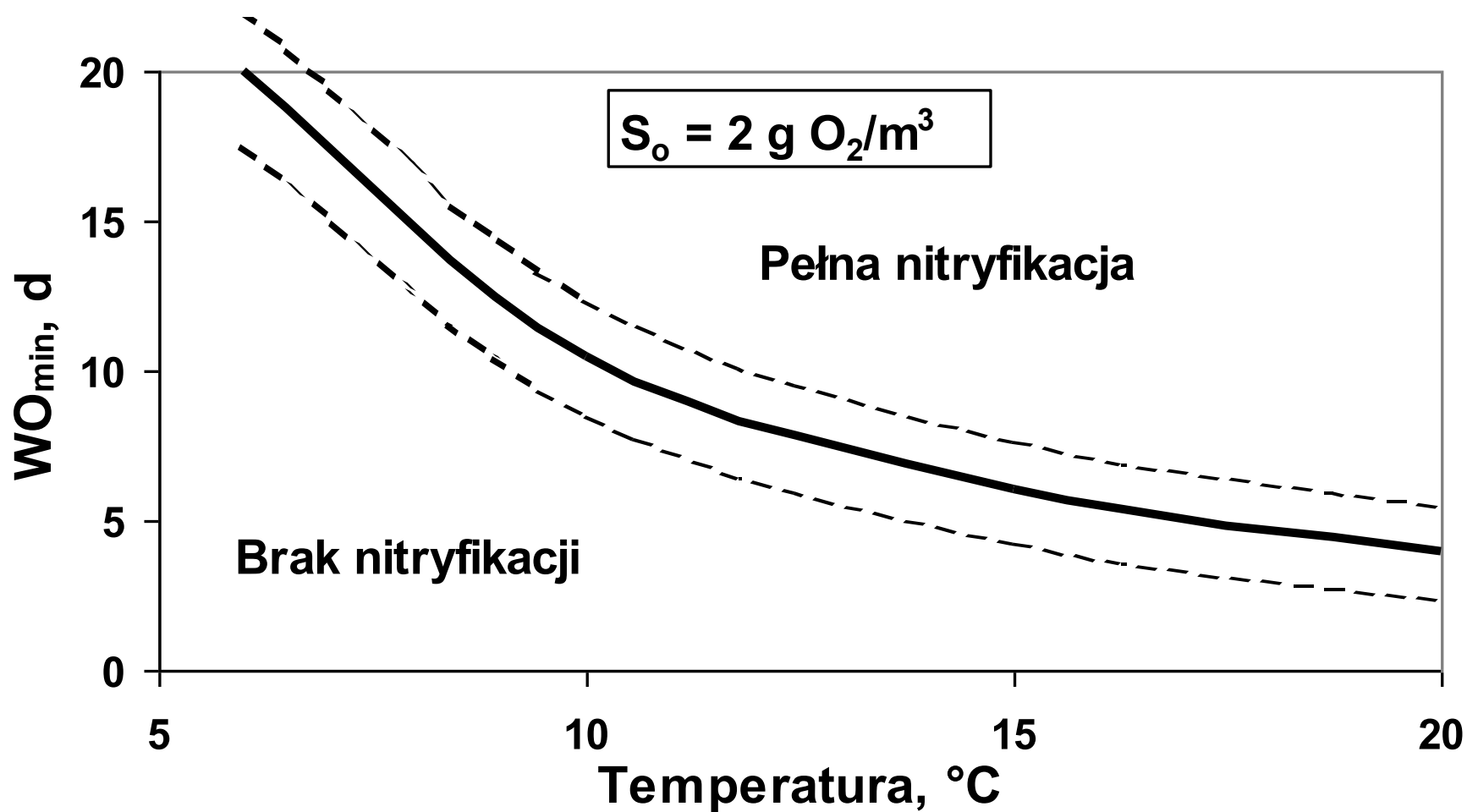
Zarys



Przykładowa symulacja

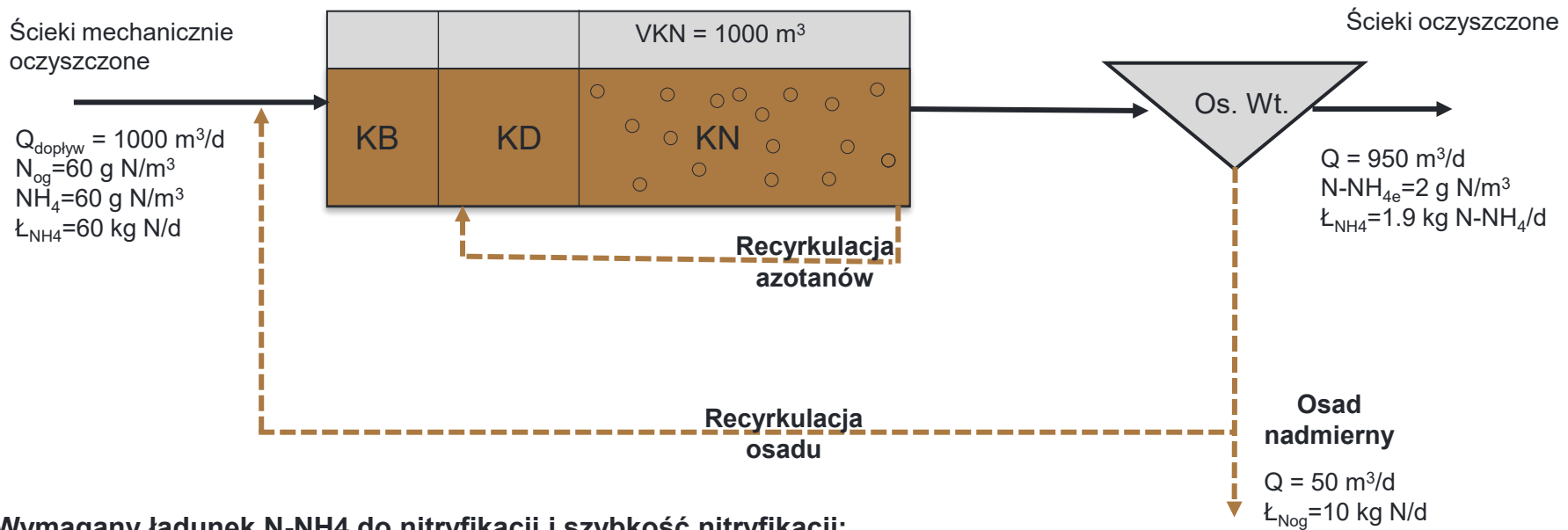
Sterowanie wiekiem osadu

Minimalny WO w funkcji T



Sterowanie napowietrzaniem

Stężenie azotu amonowego w komorze tlenowej – kluczowy parametr



Wymagany ładunek N-NH₄ do nityfikacji i szybkość nityfikacji:

Dla $N\text{-NH}_{4e} = 2 \text{ gN-NH}_4/\text{m}^3$

$60 - 10 - 1.9 = \underline{48.1 \text{ kgN-NH}_4/\text{d}}$ - wymagana $r_{\text{nit}} = 0.048 \text{ kgN/m}^3 \text{ d}$

Dla $N\text{-NH}_{4e} = 1.5 \text{ gN-NH}_4/\text{m}^3$

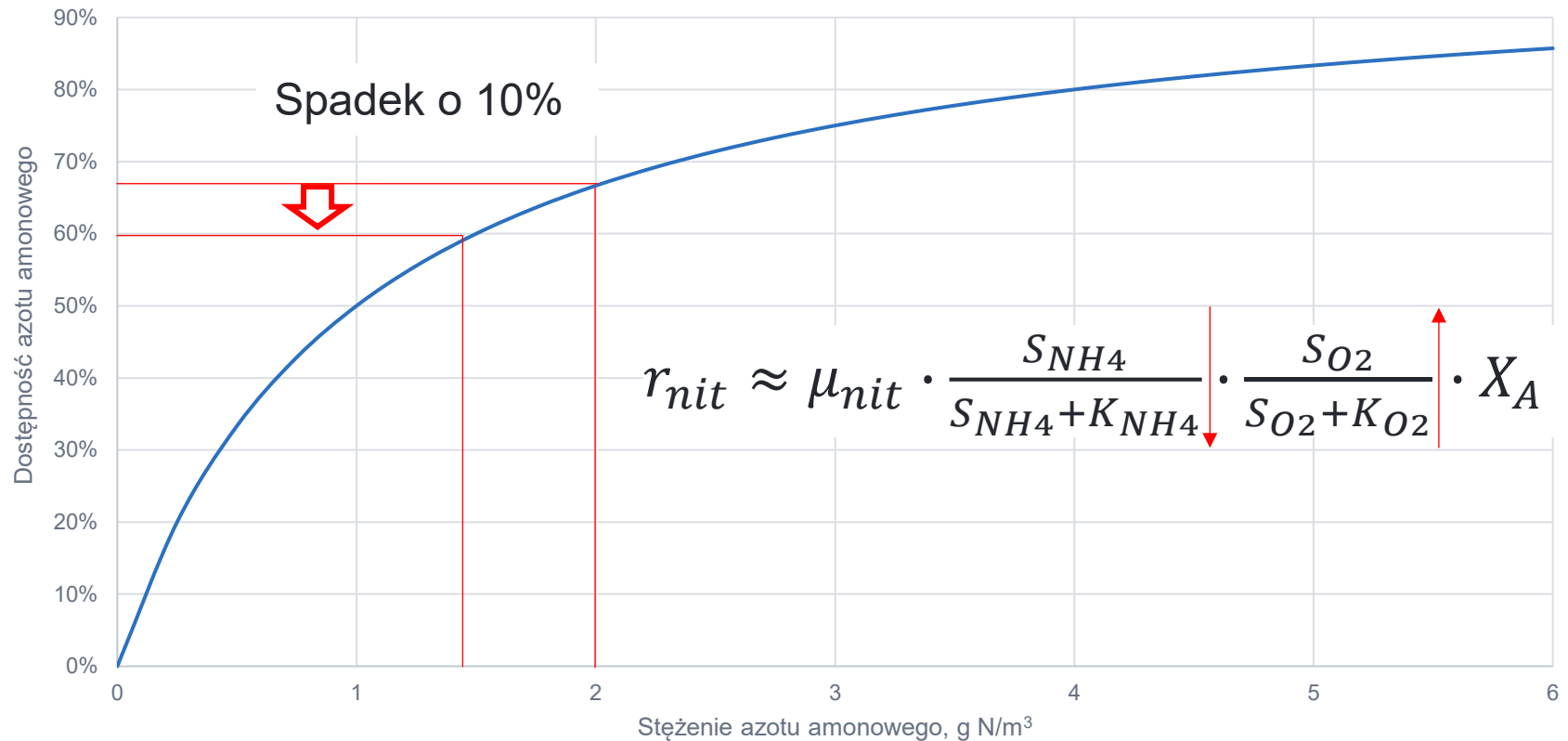
$60 - 10 - 1.42 = \underline{48.6 \text{ kgN-NH}_4/\text{d}}$ - wymagana $r_{\text{nit}} = 0.049 \text{ kgN/m}^3 \text{ d}$

Wniosek:

prawie żadna różnica –
praktyczny brak wpływu
na koszty napowietrzania
WNIOSEK BŁĘDNY!!

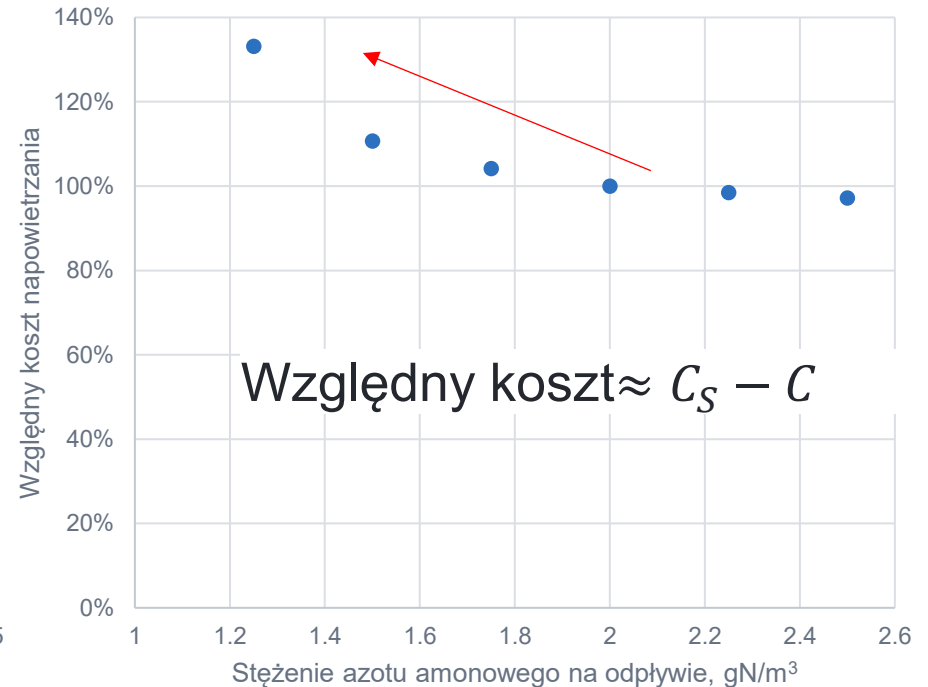
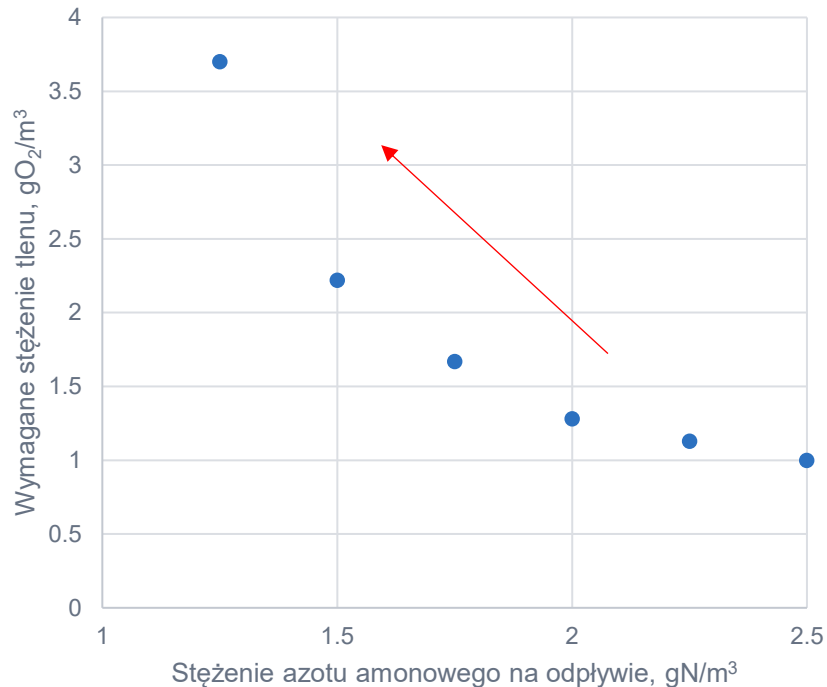
Sterowanie napowietrzaniem

Stężenie azotu amonowego w komorze tlenowej – kluczowy parametr



Sterowanie napowietrzaniem

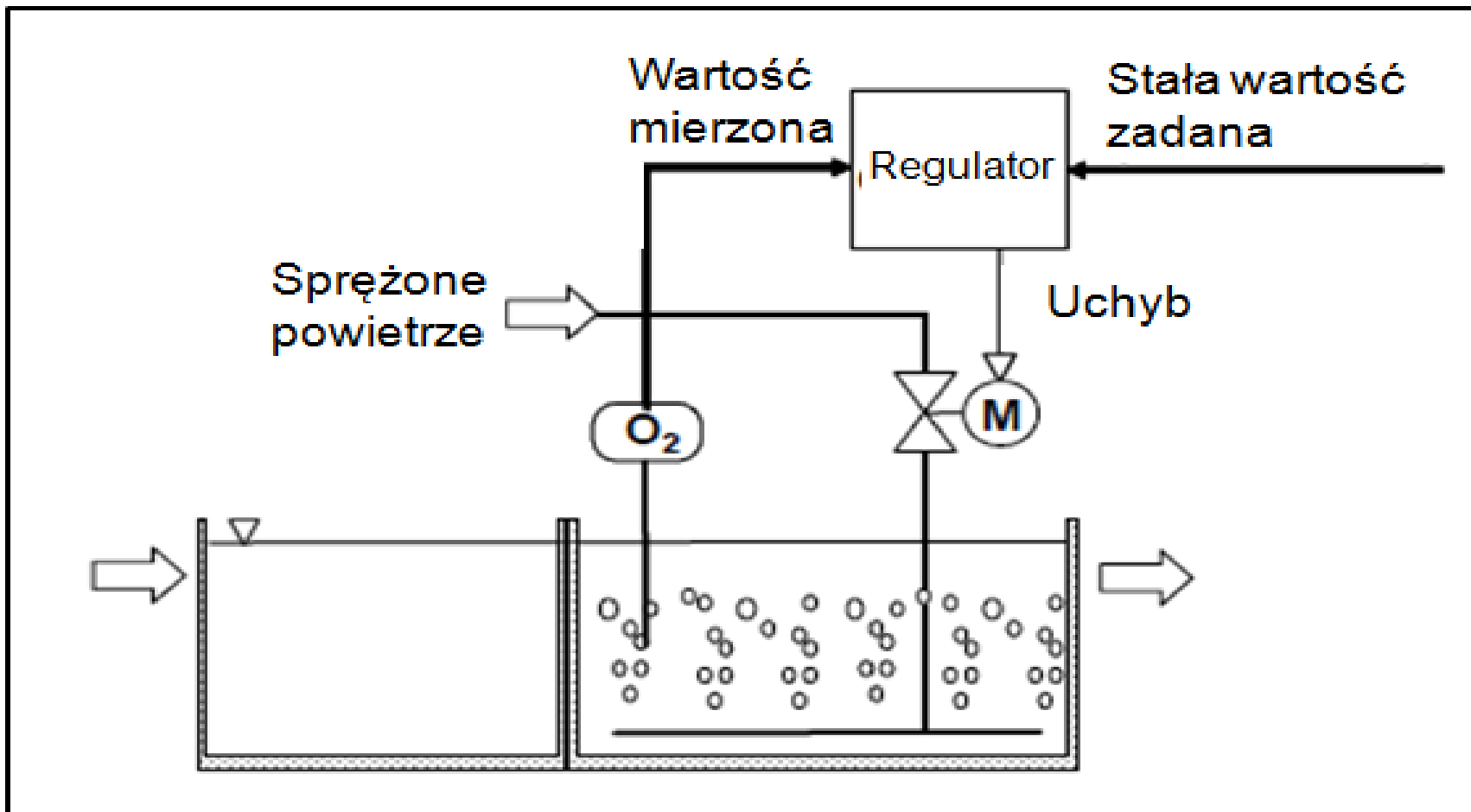
Stężenie azotu amonowego w komorze tlenowej – kluczowy parametr



Wzrost kosztów napowietrzania z powodu wzrostu stężenia tlenu w reaktorze – spadek szybkości dyfuzji

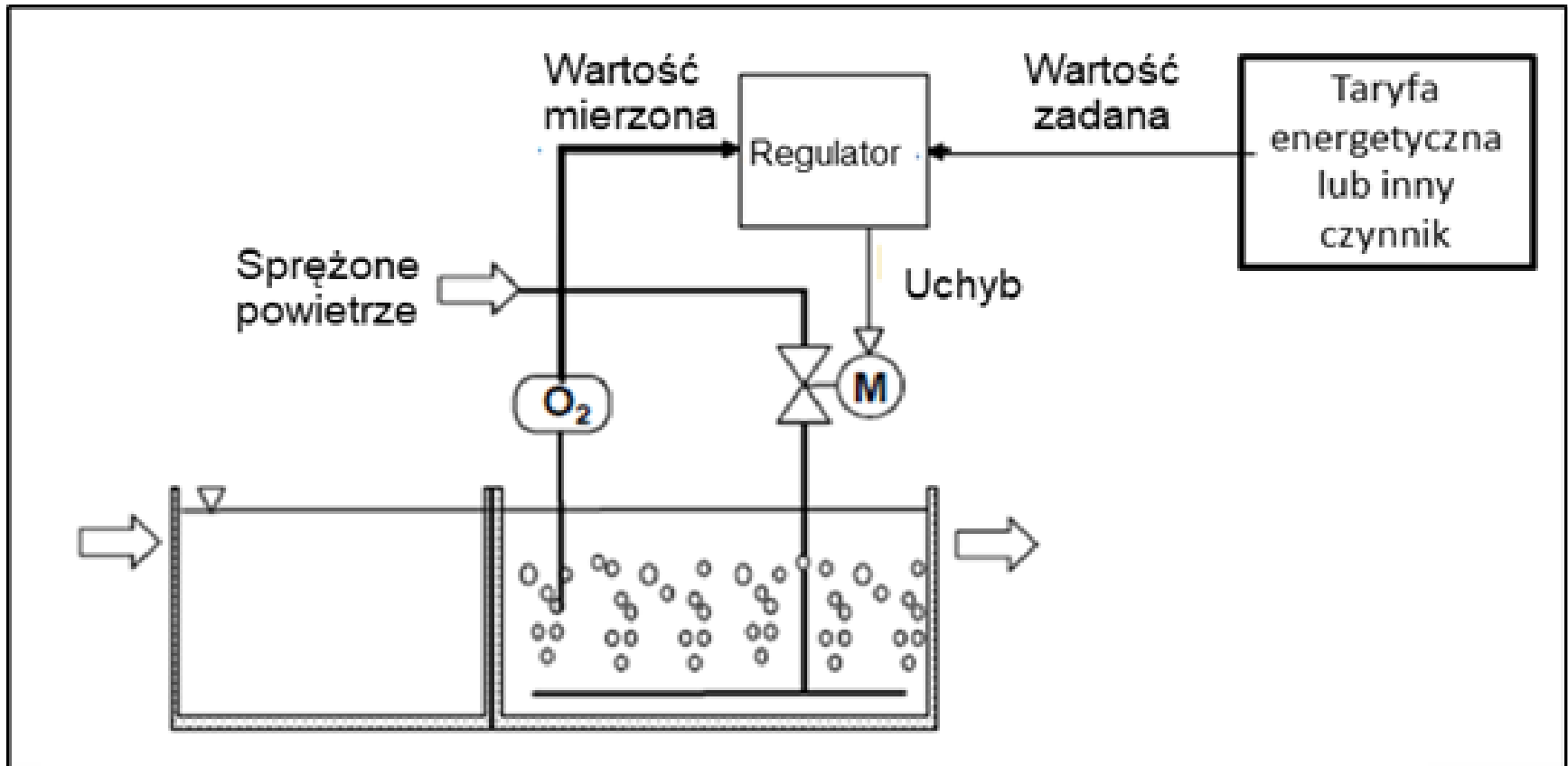
Sterowanie napowietrzaniem

Algorytmy sterowania napowietrzaniem – regulacja stałowartościowa



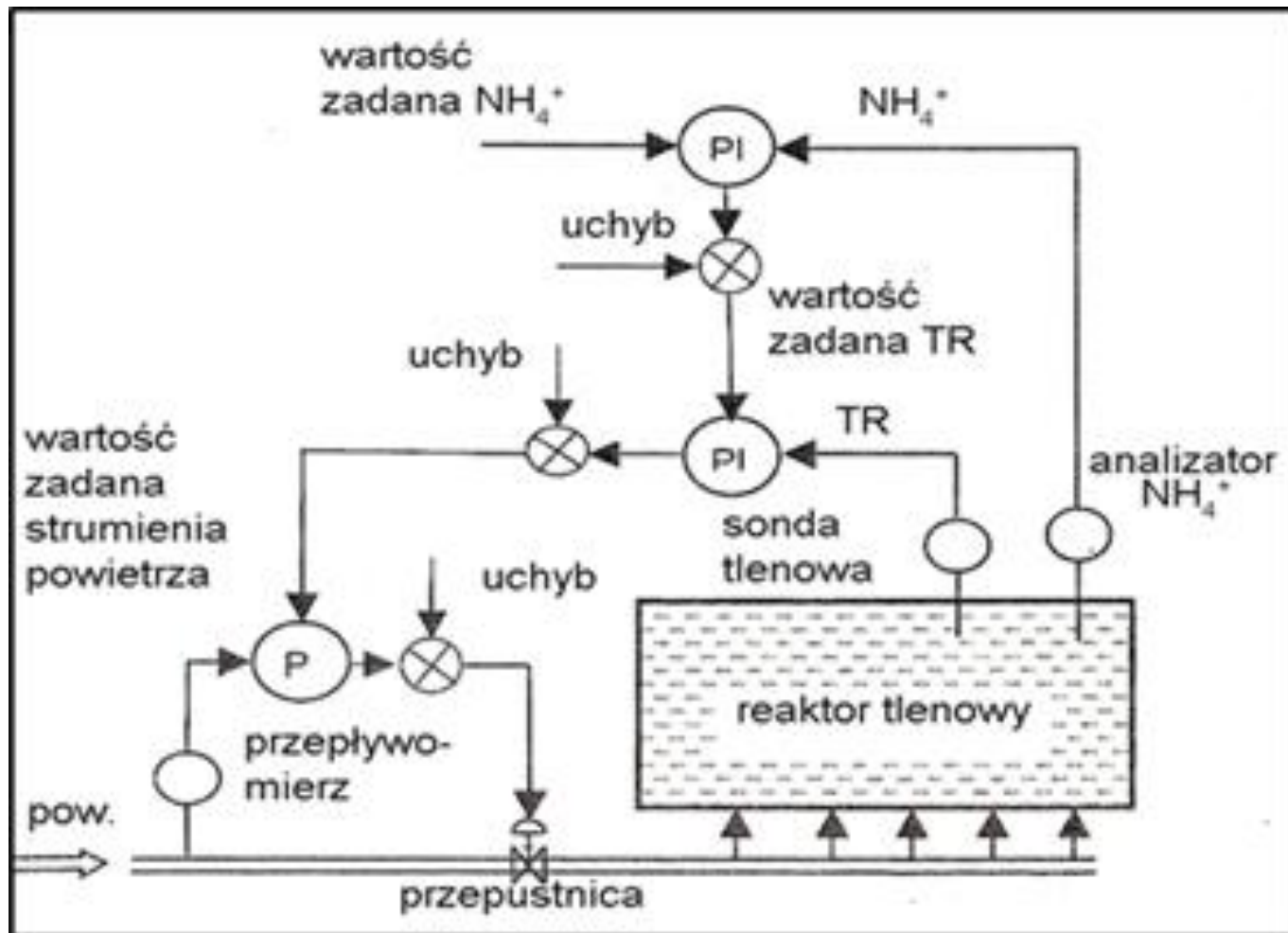
Sterowanie napowietrzaniem

Algorytmy sterowania napowietrzaniem – regulacja okresowa



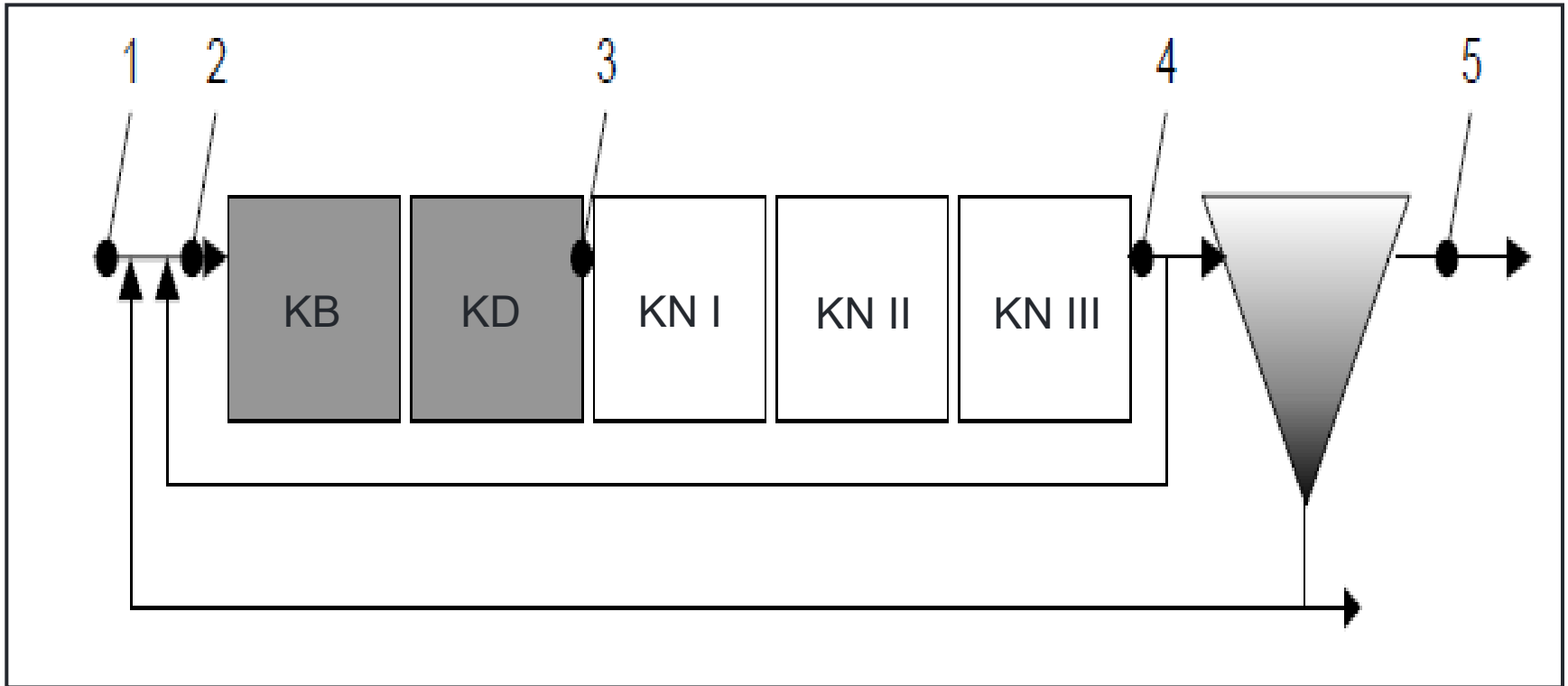
Sterowanie napowietrzaniem

Algorytmy sterowania napowietrzaniem – regulacja zmiennowartościowa



Sterowanie napowietrzaniem

Algorytmy sterowania napowietrzaniem – regulacja zmiennowartościowa – możliwe lokalizacje sond azotu amonowego



Sterowanie napowietrzaniem

Algorytmy sterowania napowietrzaniem – regulacja zmiennowartościowa – przykładowe algorytmy

Nr algorytmu	Algorytm
1	$\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} > 1.8 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Wartość zadana = $2 \text{ gO}_2/\text{m}^3$ $\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} < 1.6 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Utrzymuj minimalny przepływ = $0.7 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ dyfuzor
2	$\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} > 1.8 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Wartość zadana = $2 \text{ gO}_2/\text{m}^3$ $\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} < 1.5 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Wartość zadana = $0.5 \text{ gO}_2/\text{m}^3$
3	$\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} = 0 \dots 1.5 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Wartość zadana = $0.5 \text{ gO}_2/\text{m}^3$ $\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} > 1.7 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Wartość zadana = $1.2 \text{ gO}_2/\text{m}^3$ $\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} > 2.0 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Wartość zadana = $2.0 \text{ gO}_2/\text{m}^3$ $\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} > 2.2 \text{ gN/m}^3 \rightarrow$ Wartość zadana = $2.5 \text{ gO}_2/\text{m}^3$
4	Algorytm 1 + pełne włączenie napowietrzania (po odpowiednim opóźnieniu związanym z obecnością komory anoksydacyjnej) gdy ładunek azotu amonowego w dopływie do bloku biologicznego większy niż obliczona szybkość nitrifikacji.
5	Wartość zadana = Wartość zadana według $\text{NH}_{4,\text{biol ocz.}} + \text{S}_{\text{O}_2,\text{FF}}$ $\text{S}_{\text{O}_2,\text{FF}} = 0$ gdy $Q_d \cdot \text{S}_{\text{NH},\text{mech.ocz.}} \leq 1000 \text{ kgN/d}$ $\text{S}_{\text{O}_2,\text{FF}} = 0.02 \cdot (Q_d \cdot \text{S}_{\text{NH},\text{mech.ocz.}} - 1000)$ gdy $Q_d \cdot \text{S}_{\text{NH},\text{mech.ocz.}} > 1000 \text{ kgN/d}$
6	Wartość zadana stężenia tlenu obliczona na podstawie ładunku azotu amonowego w dopływie do bloku biologicznego i kinetyki Monoda

Sterowanie napowietrzaniem

Algorytmy sterowania napowietrzaniem – efekty

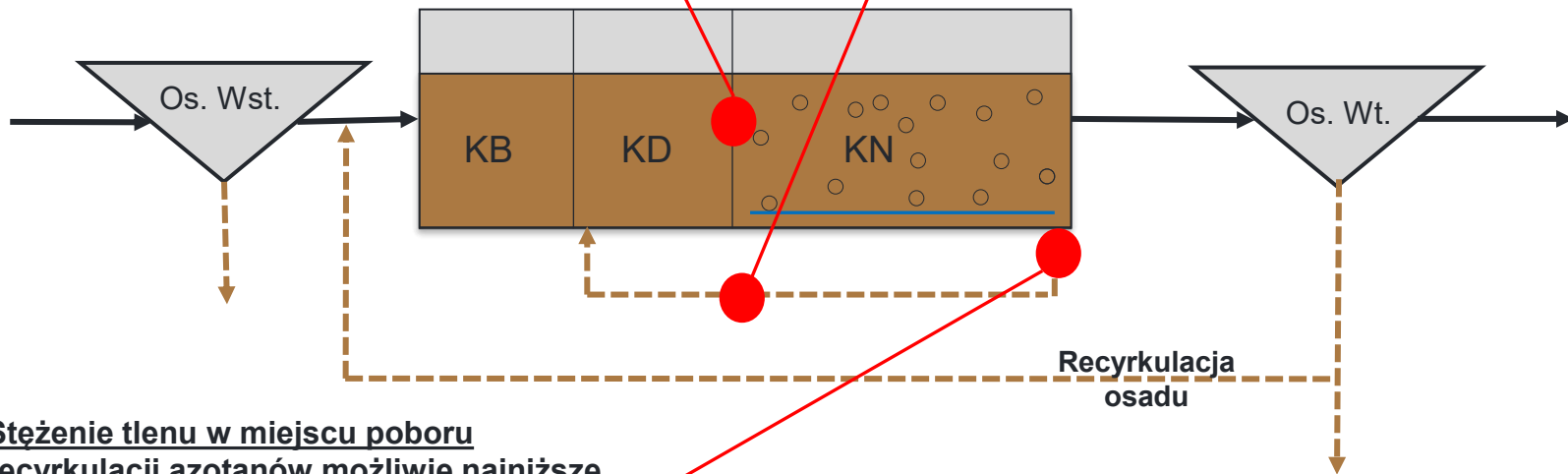
Lp.	Regulacja	Stężenie azotu ogólnego w ściekach ocz. (T=16°C) [g N/m ³]	Stężenie azotu ogólnego w ściekach ocz. (T=10°C) [g N/m ³]	Koszty napowietrzania (T=16°C) [tyś PLN/rok]
Obecnie stosowana regulacja				
1	Stałowartościowa (O ₂ = 2,0 g O ₂ /m ³)	7,5 (100%)	7,6 (100%)	355 (100%)
Testowane rodzaje regulacji				
2	Stałowartościowa (O ₂ = 1,0 g O ₂ /m ³)	6,5 (-13%)	6,9 (-9%)	295 (-17%)
3	Przerywane napowietrzanie (wariant 2, T _{cyklu} = 90 min, U _T =60%)	6,0 (-20%)	11,9 (+57%)	277 (-22%)
4	Przerywane napowietrzanie (wariant 2, T _{cyklu} = 90 min, U _T =80%)	6,2 (-17%)	7,8 (+3%)	284 (-20%)
5	Zmiennowartościowa (alg. 1, wariant 1, NH ₄ =1, O ₂ =1)	5,1 (-32%)	6,9 (-9%)	287 (-19%)
6	Zmiennowartościowa (alg. 1, wariant 1, NH ₄ =1, O ₂ =2)	4,4 (-41%)	6,1 (-20%)	336 (-5%)
7	Zmiennowartościowa (alg. 1, wariant 2, NH ₄ =1, O ₂ =1)	5,2 (-31%)	5,8 (-24%)	289 (-19%)

Metody intensyfikacji denitryfikacji

Zarys

Zalecane stężenie azotanów w odpływie z komory KD to 2-4 gN-NO₃/m³

Recyrkulacją sterujemy tak, aby uzyskać zadane stężenie N-NO₃ w odpływie z KD

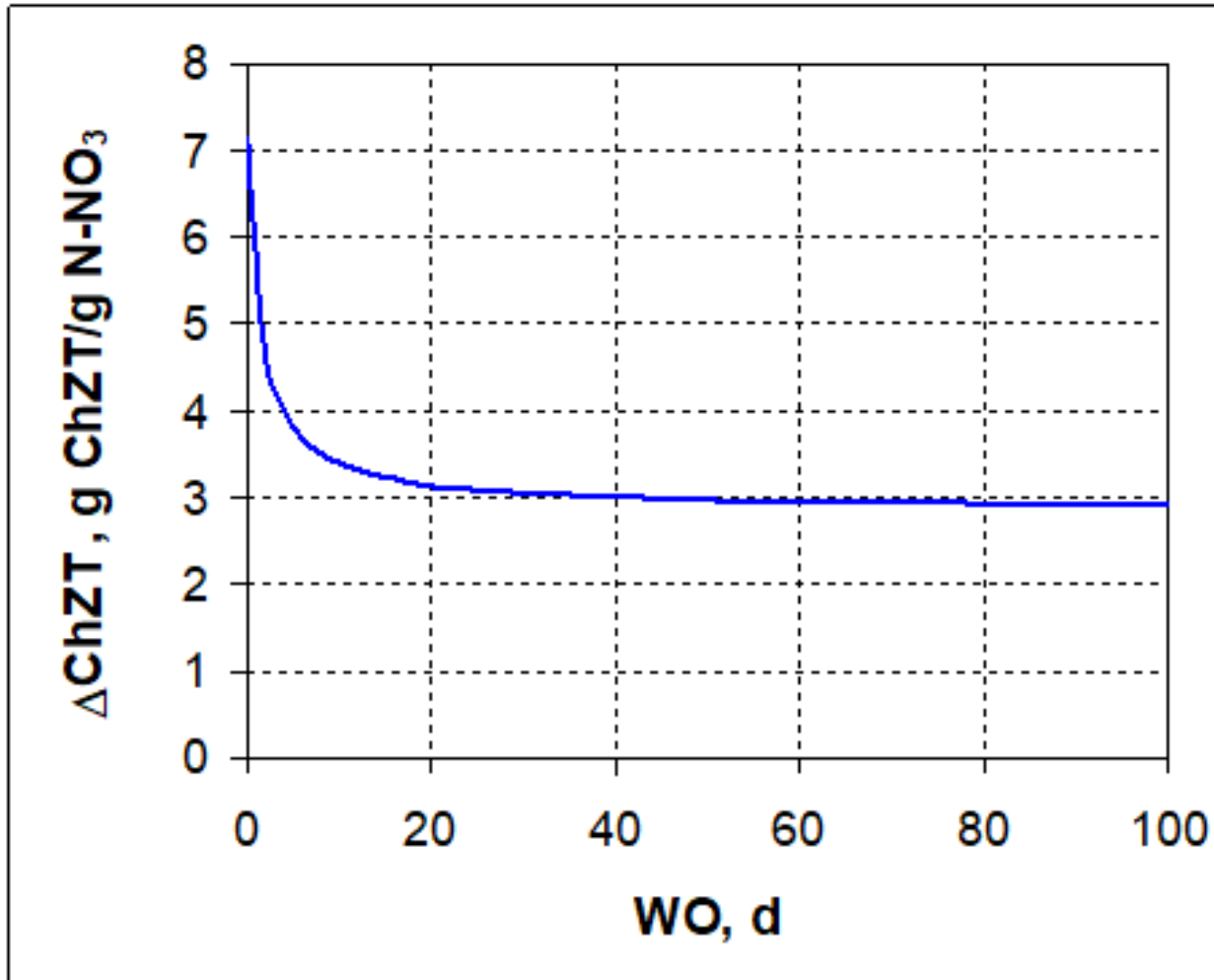


Stężenie tlenu w miejscu poboru recyrkulacji azotanów możliwie najniższe

Generalna zasada: im więcej azotanów zużyjemy w komorze KD tym mniejsze zużycie tlenu w komorze tlenowej – **każdy 1g N-NO₃ zdenitryfikowany to 2.9 gO₂ mniej tlenu wpompowane do reaktora**

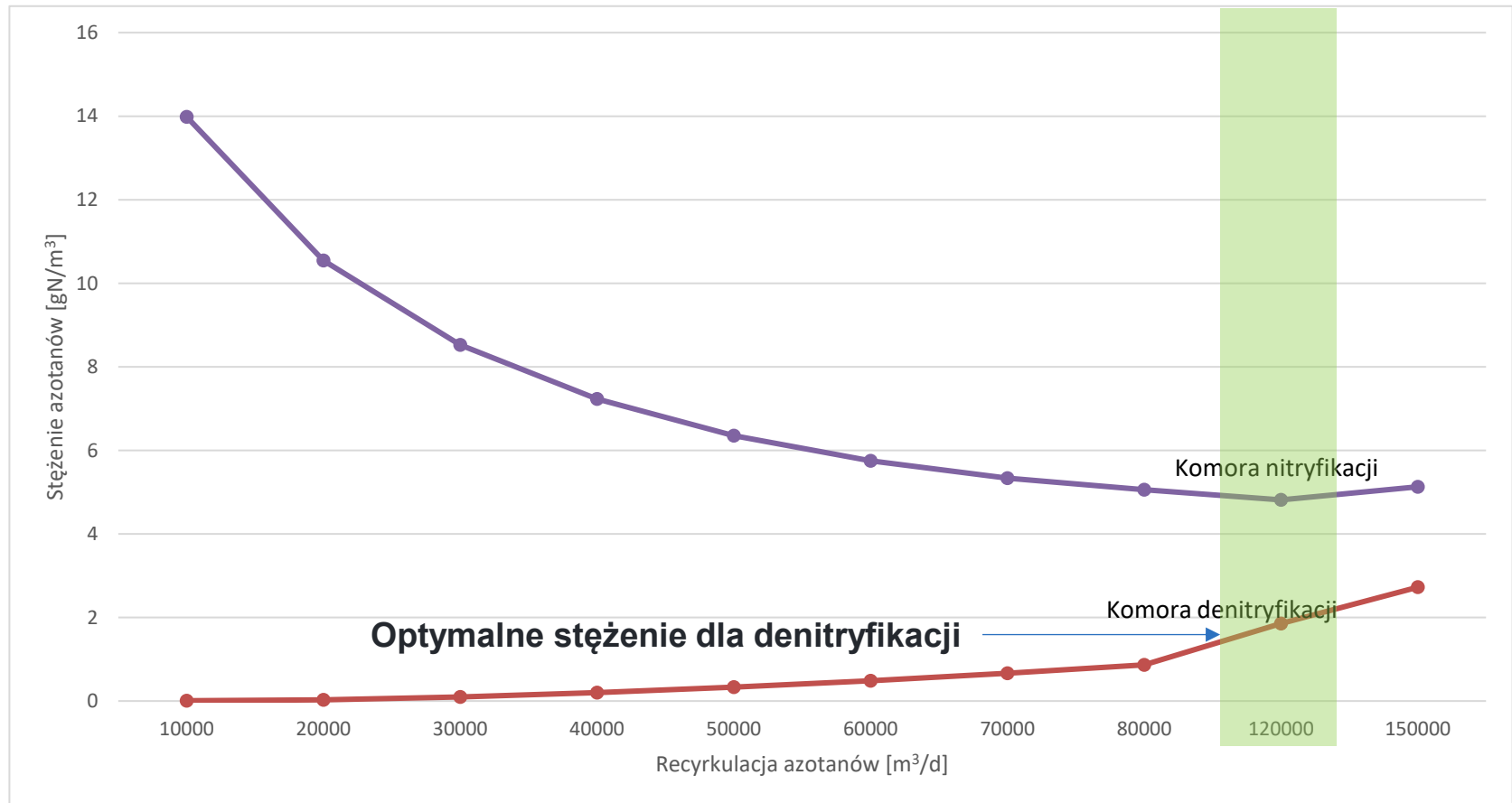
Metody intensyfikacji denitryfikacji

Zużycie ChZT, a wiek osadu



Metody intensyfikacji denitryfikacji

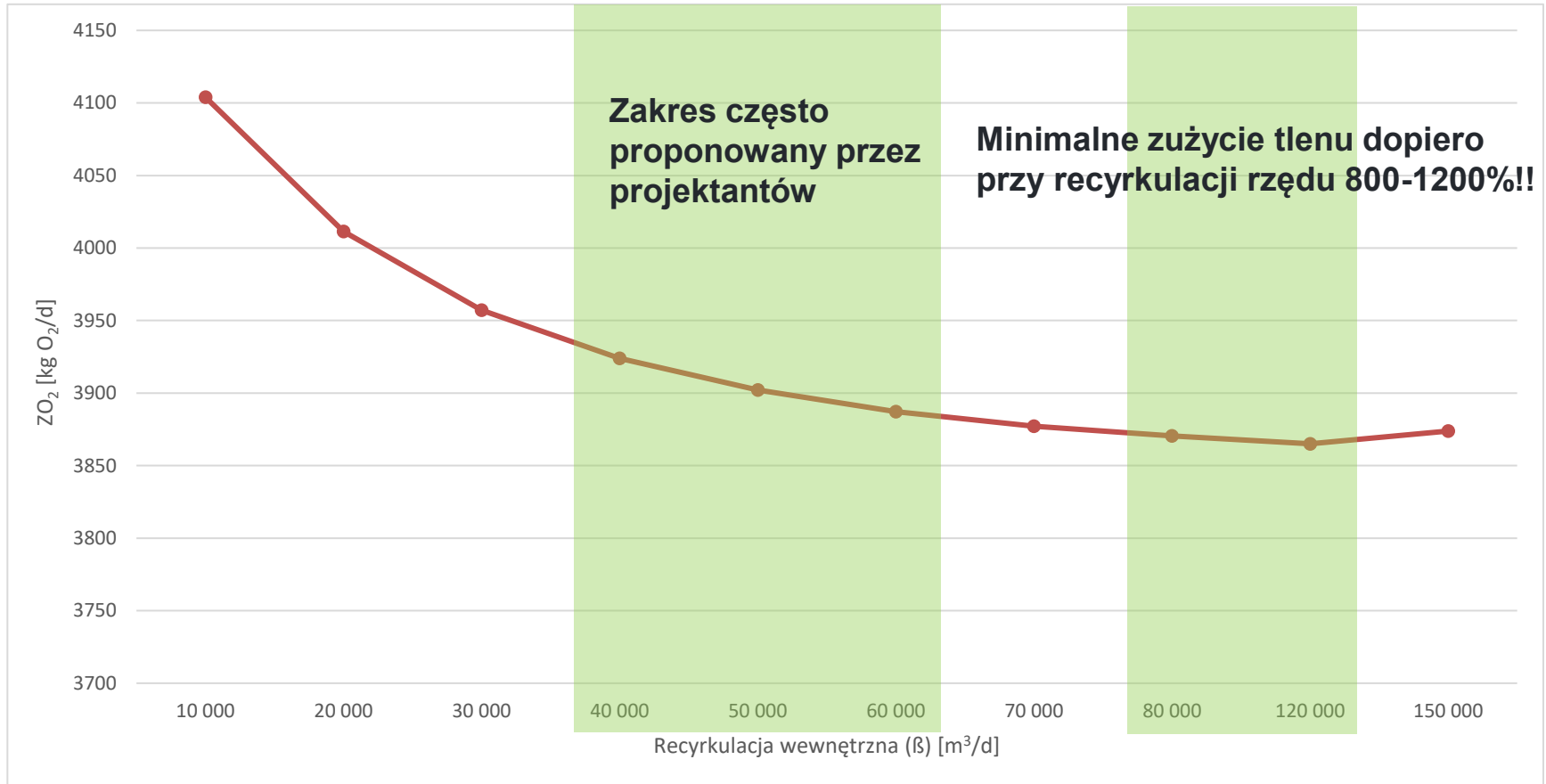
Stężenie azotanów w KD, a jakość ścieków oczyszczonych



Przepływ ścieków = 10 000 m³/d Stężenie tlenu rozpuszczonego w KOCZ: $S_o = 2 \text{ g O}_2/\text{m}^3$
Temperatura w KOCZ: $T_2 = 14,2^\circ\text{C}$ $WO=27 \text{ d}$, $WO_{OX}=13.5 \text{ d}$ Typowe ścieki bytowo-gospodarcze

Metody intensyfikacji denitryfikacji

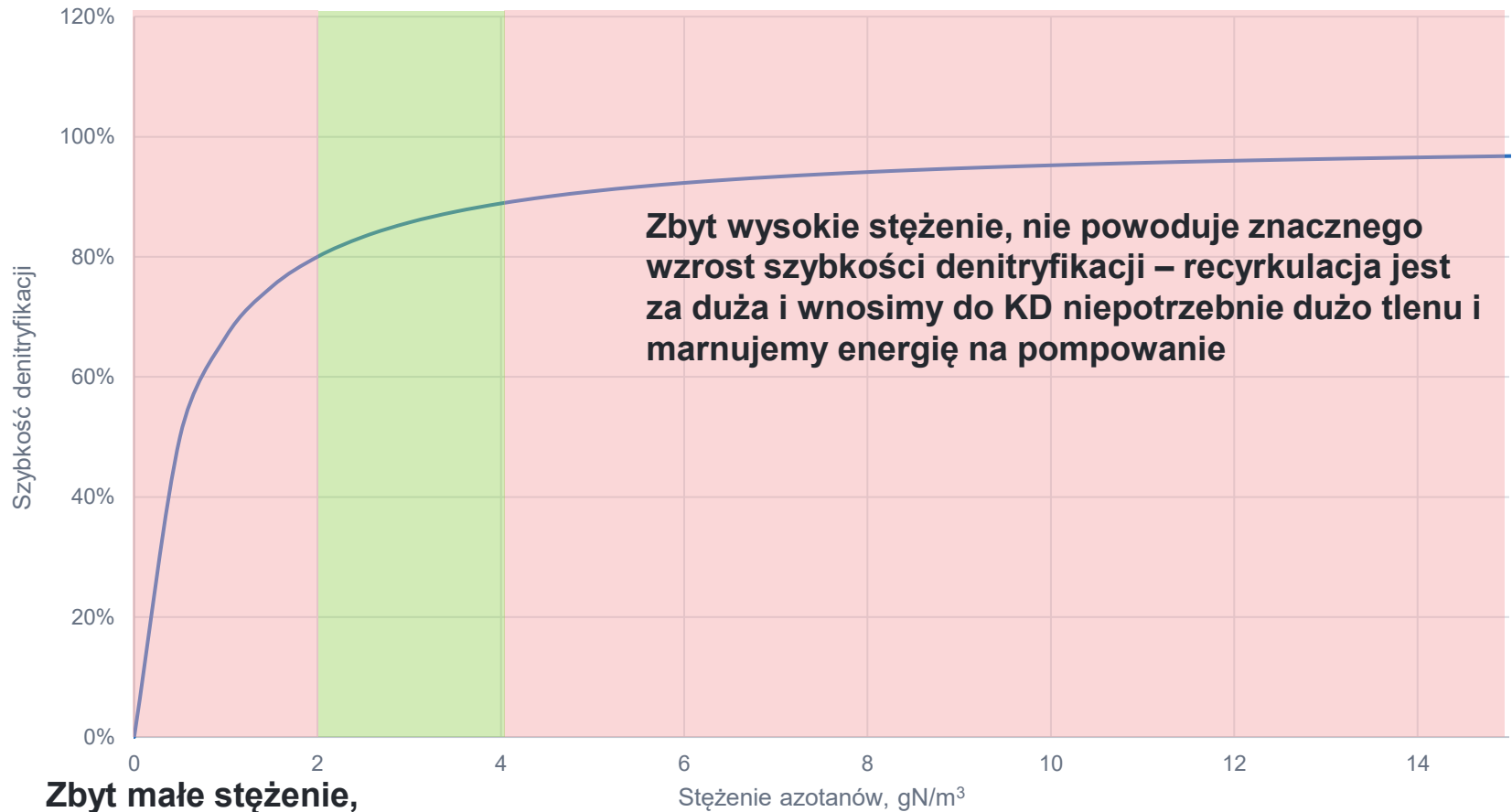
Recykulacja, a zużycie tlenu



Przepływ ścieków = 10 000 m³/d Stężenie tlenu rozpuszczonego w KOCZ: $S_o = 2 \text{ g O}_2/\text{m}^3$
Temperatura w KOCZ: $T_2 = 14,2^\circ\text{C}$ $WO=27 \text{ d}$, $WO_{OX}=13.5 \text{ d}$ Typowe ścieki bytowo-gospodarcze

Metody intensyfikacji denitryfikacji

Co się dzieje, gdy stężenie azotanów nie jest optymalne?



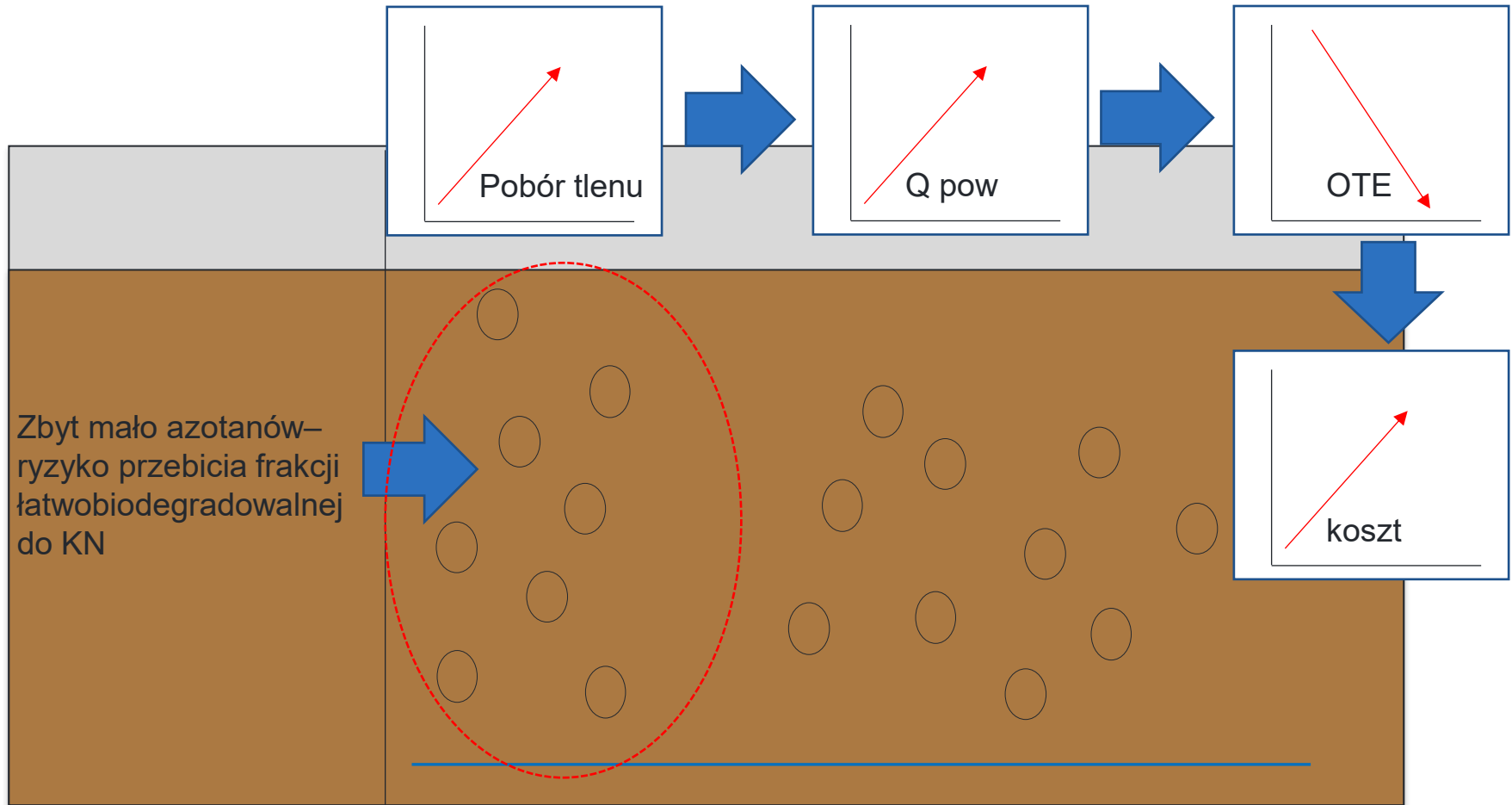
Zbyt wysokie stężenie, nie powoduje znacznego wzrostu szybkości denitryfikacji – recyrkulacja jest za duża i wnosimy do KD niepotrzebnie dużo tlenu i marnujemy energię na pompowanie

Zbyt małe stężenie, denitryfikacja jest limitowana dostępnością azotanów

Symulacja dla $\text{KNO}_3 = 0.5 \text{ gN/m}^3$

Metody intensyfikacji denitryfikacji

Co się dzieje, gdy stężenie azotanów nie jest optymalne?



Zarastanie dyfuzorów

Podstawy

Zarastanie dyfuzorów (zwane też foulingiem): Samoczynne zjawisko powstawania osadów biologicznych i mineralnych na powierzchni i wewnątrz dyfuzorów.

Może skutkować wzrostem strat ciśnienia i spadkiem szybkości transferu tlenu.

Jego wpływ jest wyrażany współczynnikami F i P.

$$F = \frac{SOTE_{zak}}{SOTE_{nowy}}$$

$SOTE_{zak}$ – standardowy stopień wykorzystania tlenu dyfuzora zakolmatowanego,
g O₂/m³_N·m_{gł}
 $SOTE_{nowy}$ – standardowy stopień wykorzystania tlenu dyfuzora nowego, g O₂/m³_N·m_{gł}

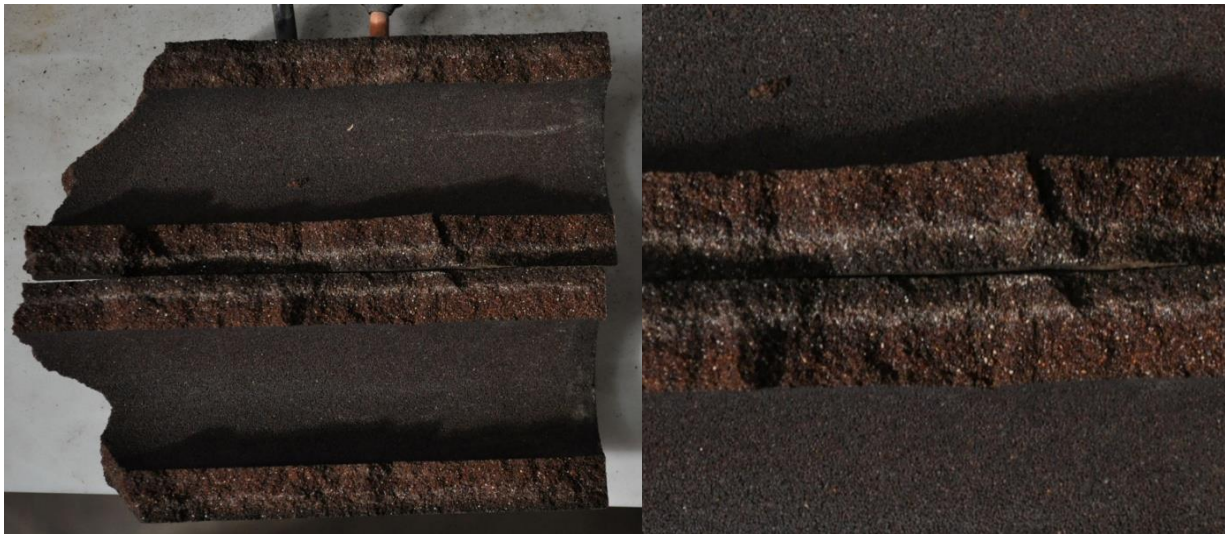
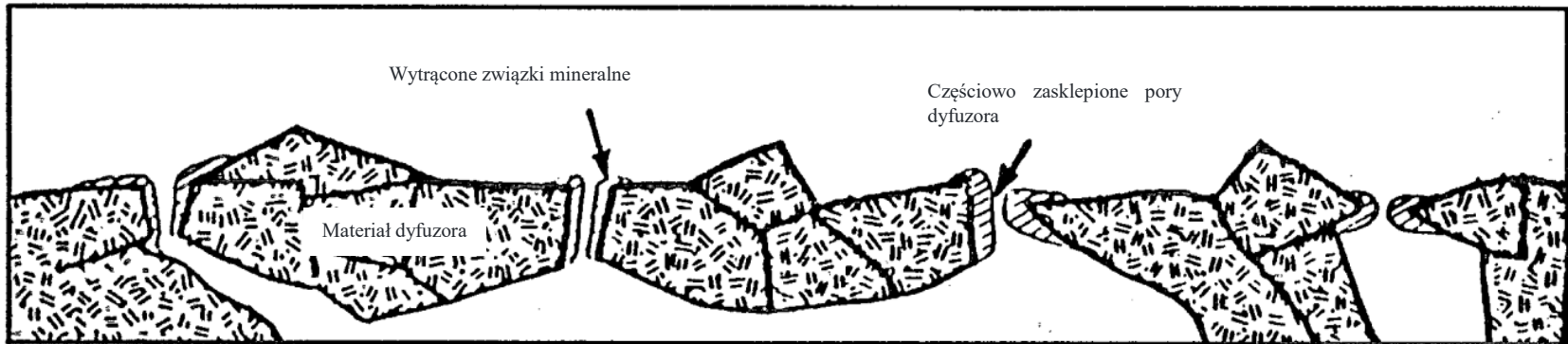
$$P = \frac{DWP_{zak}}{DWP_{nowy}}$$

DWP_{zak} – straty ciśnienia przy przepływie powietrza przez zakolmatowane dyfuzor,
cm H₂O
 DWP_{nowy} – straty ciśnienia przy przepływie powietrza przez nowy dyfuzor, cm H₂O

$$F < 1 \quad P > 1$$

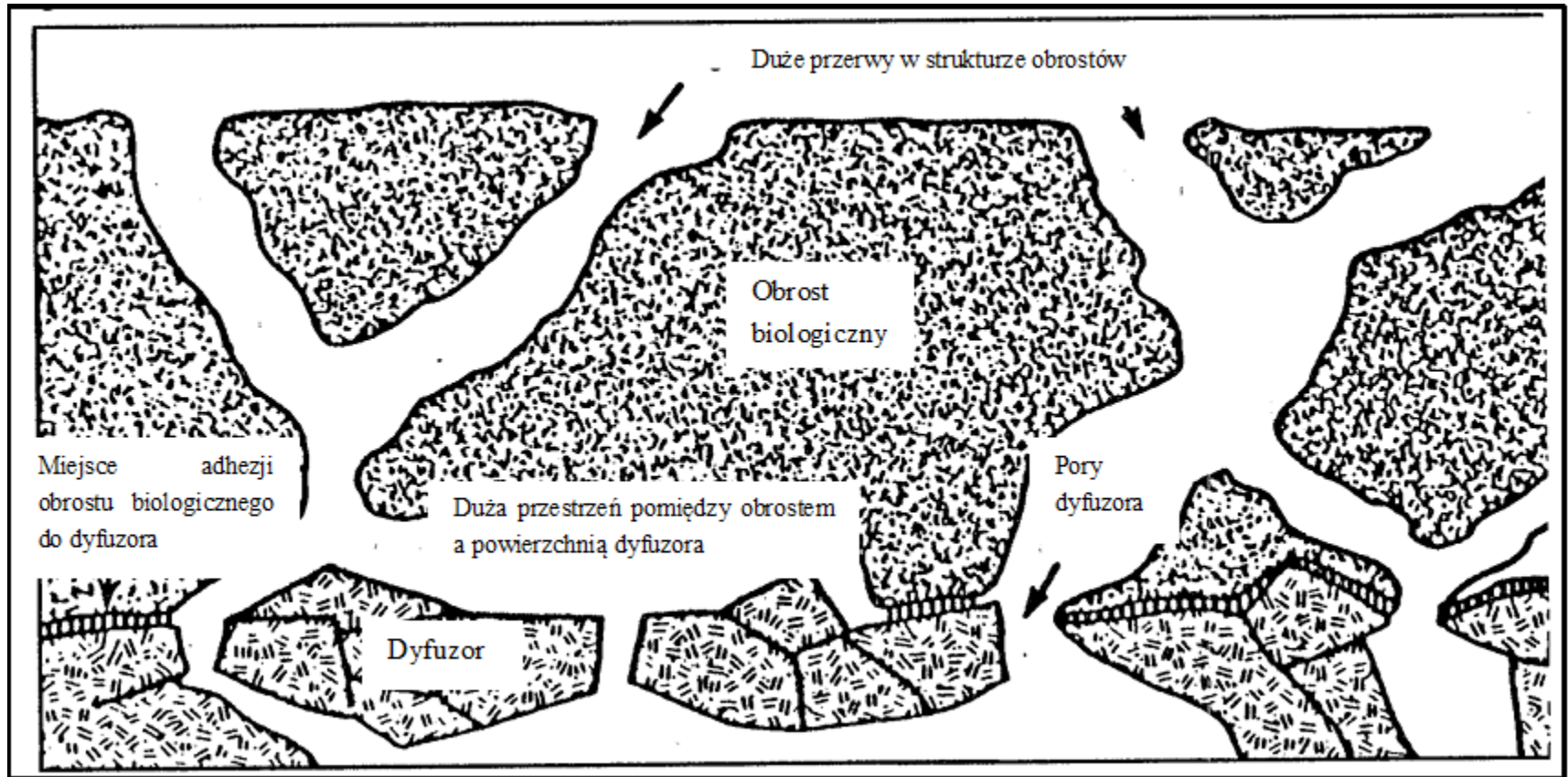
Zarastanie dyfuzorów

Obrost mineralny – obrost I typu



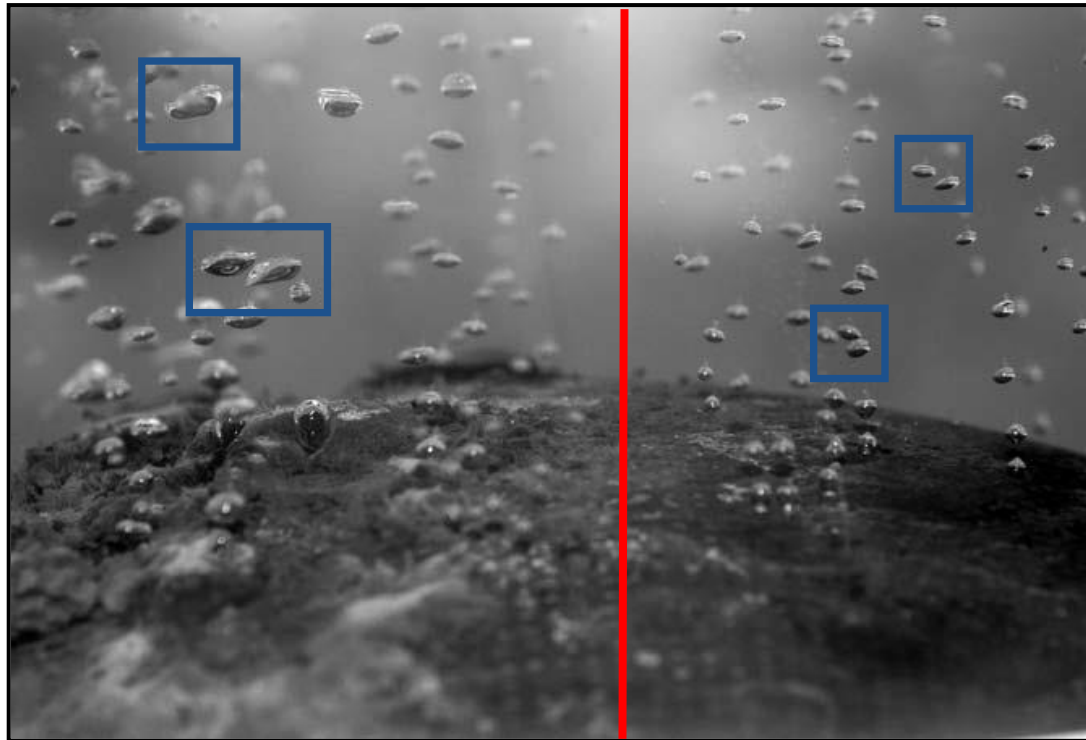
Zarastanie dyfuzorów

Obrost biologiczny– obrost II typu



Zarastanie dyfuzorów

Skutki – Spadek stopnia wykorzystania tlenu



Dyfuzor zakolmatowany

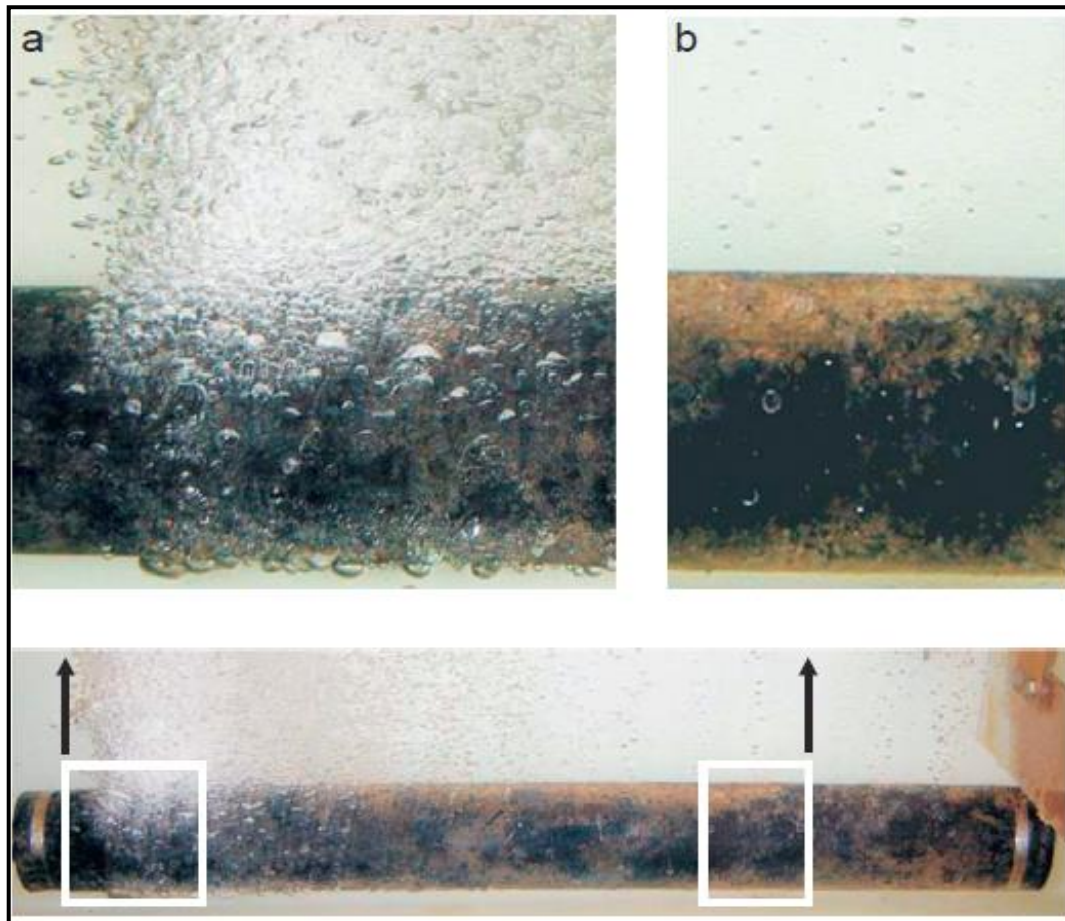
Dyfuzor czysty

Komentarz

- Większe pęcherzyki powietrza to mniejsze sumaryczne pole powierzchni wymiany gazowej
- Mniejsze pole powierzchni wymiany gazowej to mniejszy stopień wykorzystania tlenu
- **wyrazem tego jest: $F_{zakolm} < 1$**

Zarastanie dyfuzorów

Skutki - Nieodwracalne zniszczenie membran



Komentarz

- Mniejsza powierzchnia wypływu powietrza to większe straty ciśnienia i pęcherzyki
- Większe pęcherzyki powietrza to mniejsze sumaryczne pole powierzchni wymiany gazowej
- Mniejsze pole powierzchni wymiany gazowej to mniejszy stopień wykorzystania tlenu
- **wyrazem tego jest: $F_{zakolm} < 1$ i wzrost p**

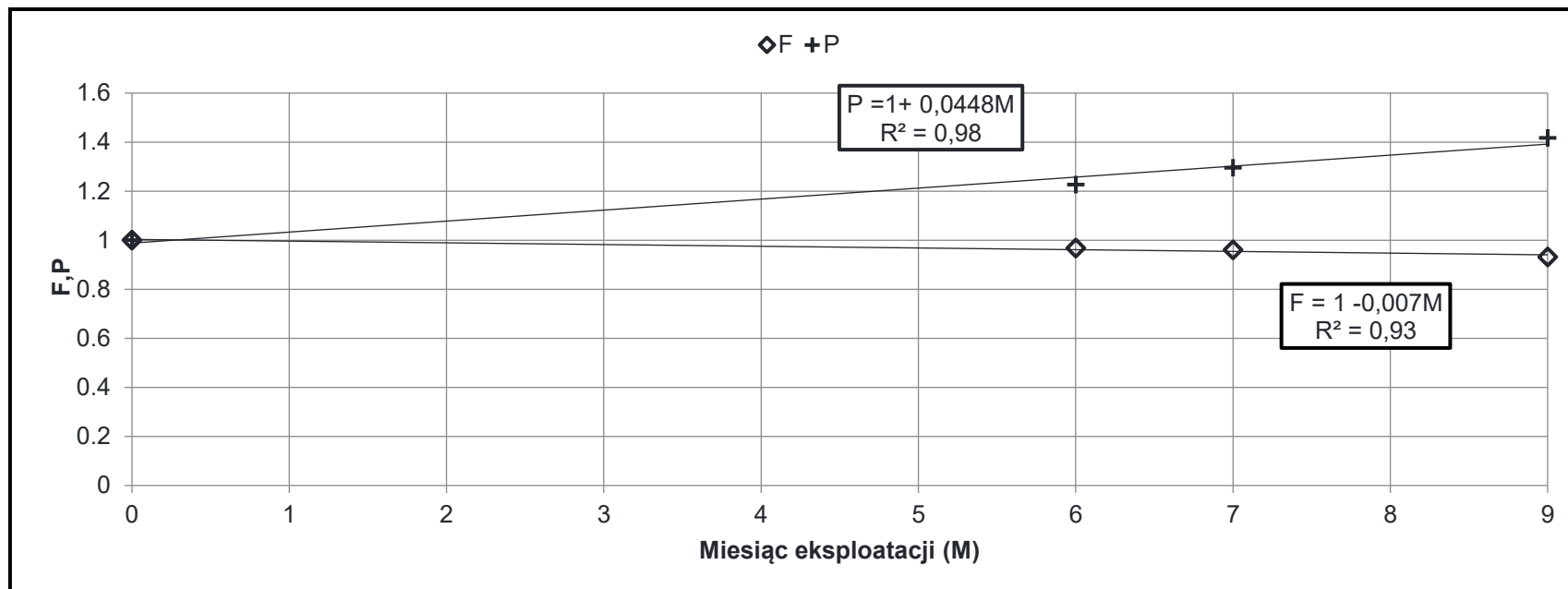
Zarastanie dyfuzorów

Skutki – Wzrost strat ciśnienia

Dyfuzor	Przepływ powietrza przez dyfuzor [m ³ /h]	Straty ciśnienia [cm H ₂ O]
nowy	5,0	17,2
	3,4	16,5
	1,7	16,5
Sekcja 1	5,0	83,3
	3,4	56,0
	1,7	28,7
Sekcja 2	5,0	-
	3,4	537,6
	1,7	206,8
Sekcja 3	5,0	284,2
	3,4	160,2
	1,7	79,4

Zarastanie dyfuzorów

Szybkość zarastania – [wyniki z jednej oczyszczalni](#)

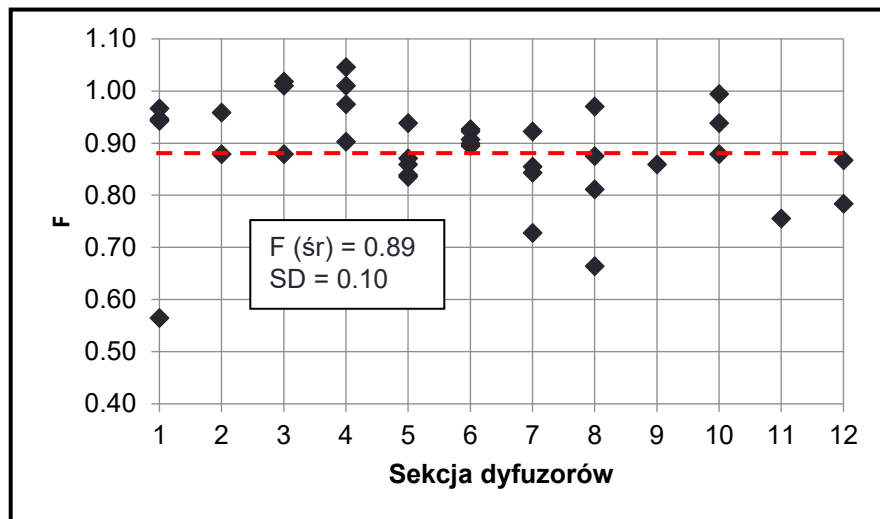


Zmiana SOTE – około 0.7%/miesiąc – mniej więcej 8% na rok – ale nie wiadomo na jakim poziomie by się zjawisko zatrzymało

Zmiana DWP – około 5%/miesiąc – mniej więcej 60% na rok – ale nie wiadomo na jakim poziomie by się zjawisko zatrzymało

Zarastanie dyfuzorów

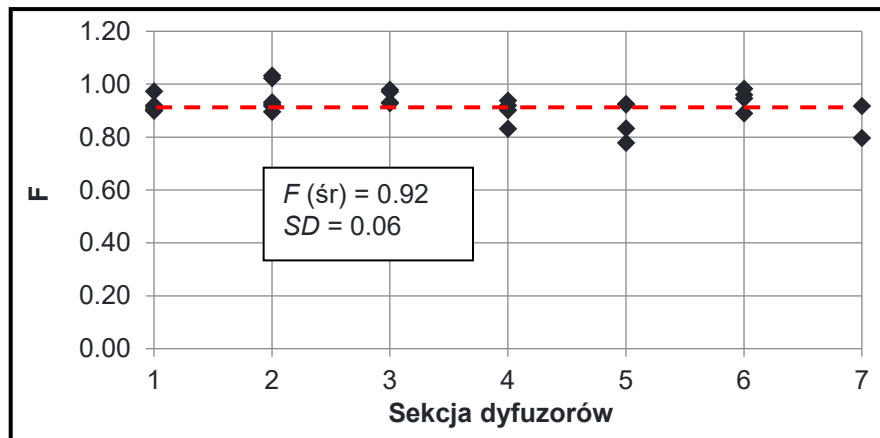
Skutki ekonomiczne



Komentarz

Przykład 1

- $F = 0.89$
- Dodatkowo 2.5 krotny wzrost strat ciśnienia na dyfuzorze
- Czas eksploatacji dyfuzorów >10 lat
- Wzrost kosztów napowietrzania o **15%**



Komentarz

Przykład 2

- $F = 0.92$
- Dodatkowo 3.0 krotny wzrost strat ciśnienia na dyfuzorze
- Czas eksploatacji dyfuzorów >10 lat
- Wzrost kosztów napowietrzania o **14%**

Zarastanie dyfuzorów – metody regeneracji dyfuzorów

Lp.	Nazwa metody	Zalety	Wady
1	Mycie konwencjonalne wodą z węża	<ul style="list-style-type: none"> Bardzo niskie koszty inwestycyjne Możliwość poprawy stopnia wykorzystania tlenu Brak zastosowania chemikaliów Niskie koszty eksploatacyjne Łatwość implementacji Rutynowo stosowana na oczyszczalni 	<ul style="list-style-type: none"> Konieczność opróżnienia reaktora Prawdopodobnie niewielki wpływ na straty ciśnienia przy przepływie powietrza przez dyfuzor Znaczna pracochłonność
2	Mycie dyfuzorów myjką wysokociśnieniową	<ul style="list-style-type: none"> Relatywnie niskie koszty inwestycyjne Możliwość poprawy stopnia wykorzystania tlenu Brak zastosowania chemikaliów Niskie koszty eksploatacyjne Łatwość implementacji 	<ul style="list-style-type: none"> Konieczność opróżnienia reaktora Prawdopodobnie niewielki wpływ na straty ciśnienia przy przepływie powietrza przez dyfuzor Znaczna pracochłonność
3	Dawkowanie kwasu mrówkowego do rurociągu sprężonego powietrza w warunkach ruchowych	<ul style="list-style-type: none"> Nie wymaga opróżniania reaktora Relatywnie niskie koszty inwestycyjne Relatywnie niskie koszty zakupu kwasu Możliwość zmniejszenia strat ciśnienia przy przepływie powietrza przez dyfuzor 	<ul style="list-style-type: none"> Prawdopodobnie niewielki wpływ na stopień wykorzystania tlenu Przy braku regularnej aplikacji efekty mogą być ograniczone

Zarastanie dyfuzorów – metody regeneracji dyfuzorów

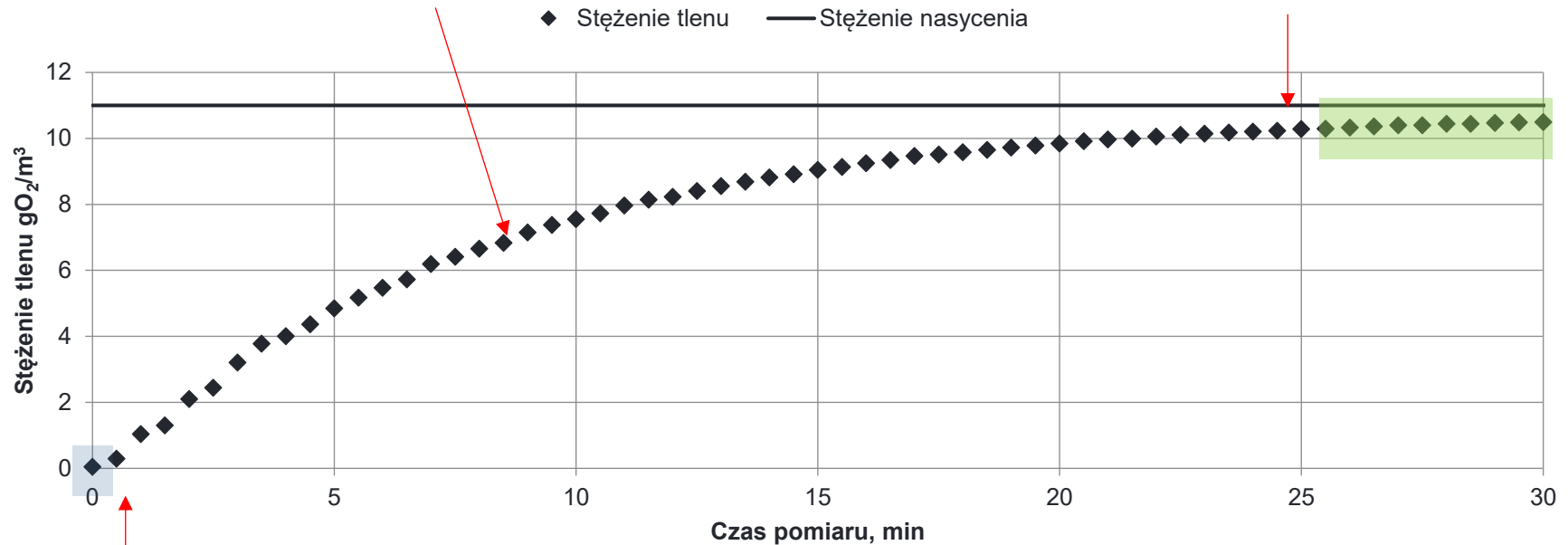
Lp.	Nazwa metody	Zalety	Wady
4	Polewanie dyfuzorów kwasem solnym	<ul style="list-style-type: none"> • Relatywnie niskie koszty zakupu kwasu • Prawdopodobne zmniejszenie strat ciśnienia przy przepływie powietrza przez dyfuzor, w stopniu wyższym niż w wyniku dawkowania kwasu mrówkowego 	<ul style="list-style-type: none"> • Konieczność opróżnienia reaktora • Znaczna pracochłonność • Ryzyko poparzeń w wyniku kontaktu z kwasem • Prawdopodobnie niewielka poprawa stopnia wykorzystania tlenu po czyszczeniu myjką ciśnieniową
5	Moczenie dyfuzorów w kwasie solnym	<ul style="list-style-type: none"> • Relatywnie niskie koszty zakupu kwasu • Prawdopodobne zmniejszenie strat ciśnienia przy przepływie powietrza przez dyfuzor, w najwyższym stopniu 	<ul style="list-style-type: none"> • Konieczność opróżnienia reaktora • Konieczność demontażu dyfuzorów • Znaczna pracochłonność • Ryzyko poparzeń w wyniku kontaktu z kwasem • Prawdopodobnie niewielka poprawa stopnia wykorzystania tlenu po czyszczeniu myjką ciśnieniową

Metody diagnostyki – metoda absorpcji tlenu

Istota

Natlenianie reaktora do osiągnięcia stężenia możliwie bliskiego nasyceniu

Test należy prowadzić, aż zostanie osiągnięte stabilne stężenie



Odtleniony reaktor

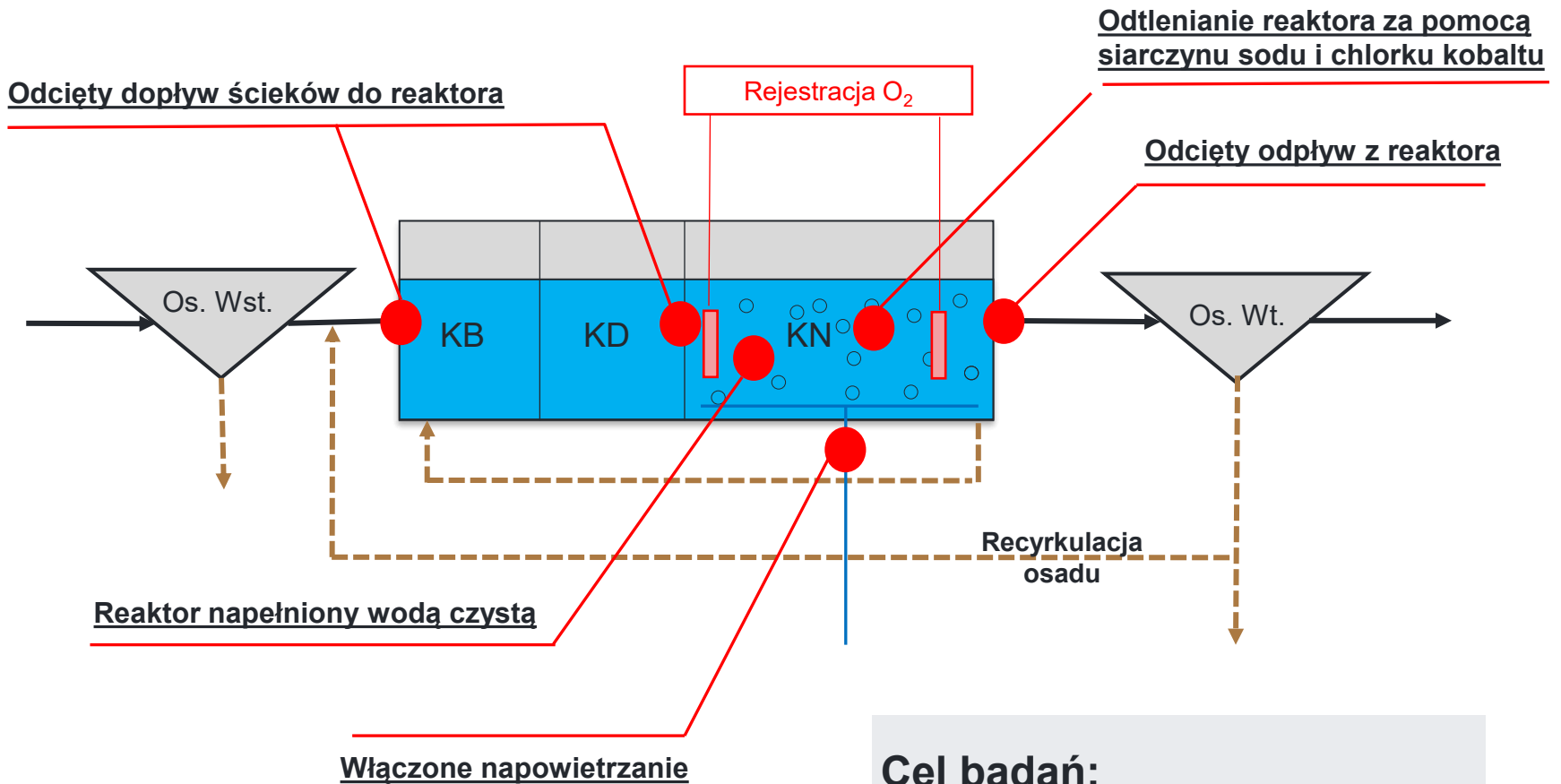
Na podstawie krzywej - dobór modelu

$$C_t = C_S - (C_S - C_0)e^{-k_L a_T t}$$

Kluczowy parametr przeliczany na pozostałe istotne parametr

Metody diagnostyki – metoda absorpcji tlenu

Test na wodzie czystej

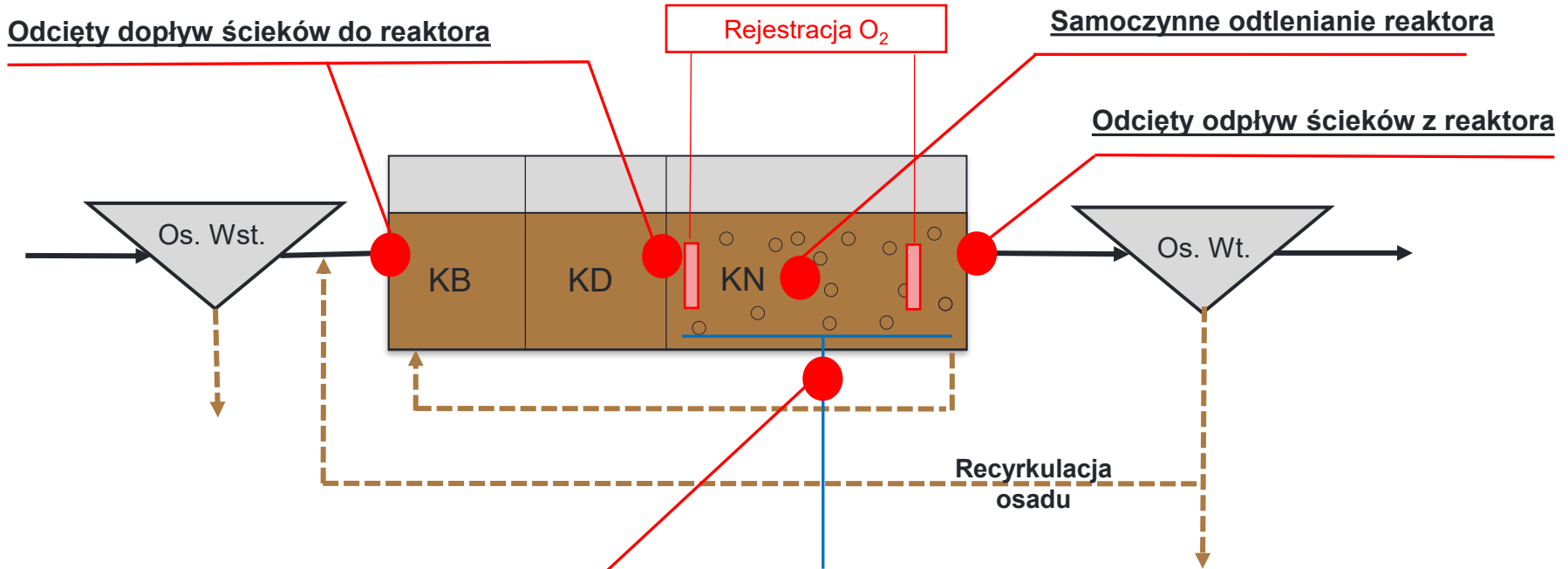


Cel badań:

Sprawdzenie gwarancji kontraktowych
Ocena stanu systemu napowietrzania

Metody diagnostyki – metoda absorpcji tlenu

Test na osadzie czynnym



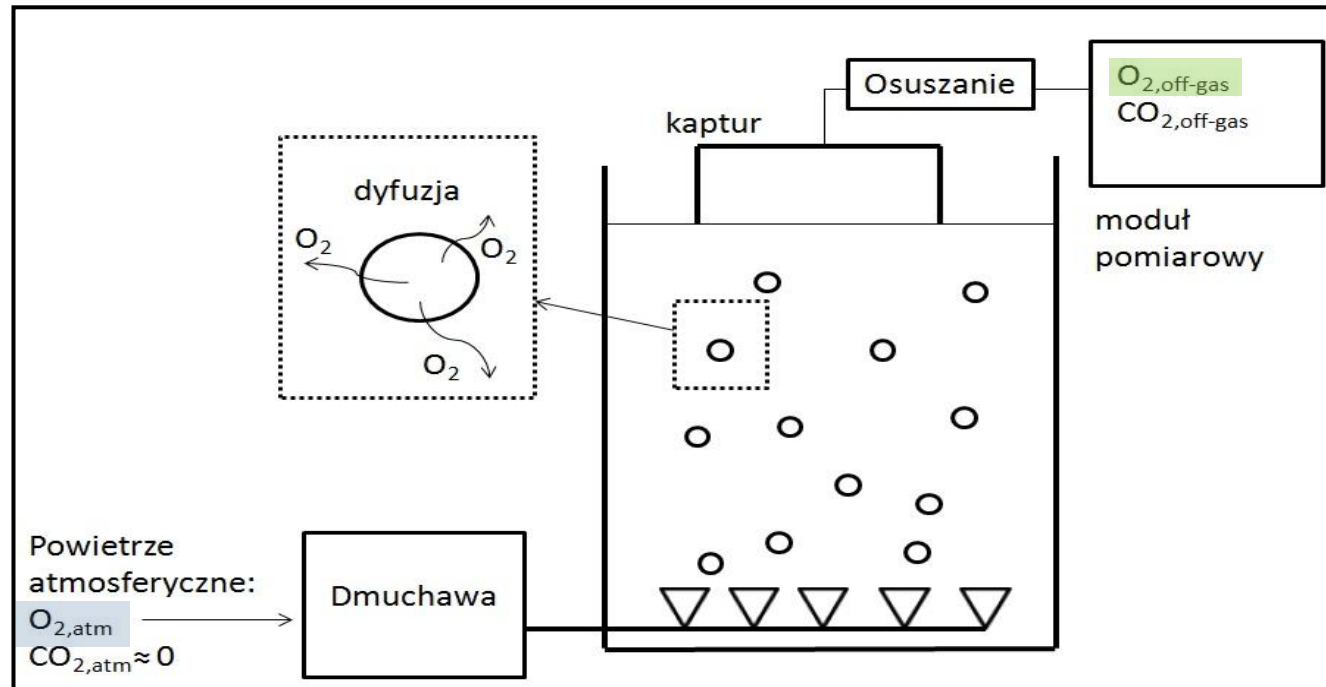
Zwykle system napowietrzania pracujący na maksymalnej wydajności

Cel badań:

Sprawdzenie gwarancji kontraktowych
Ocena stanu systemu napowietrzania

Metody diagnostyki – metoda off-gas

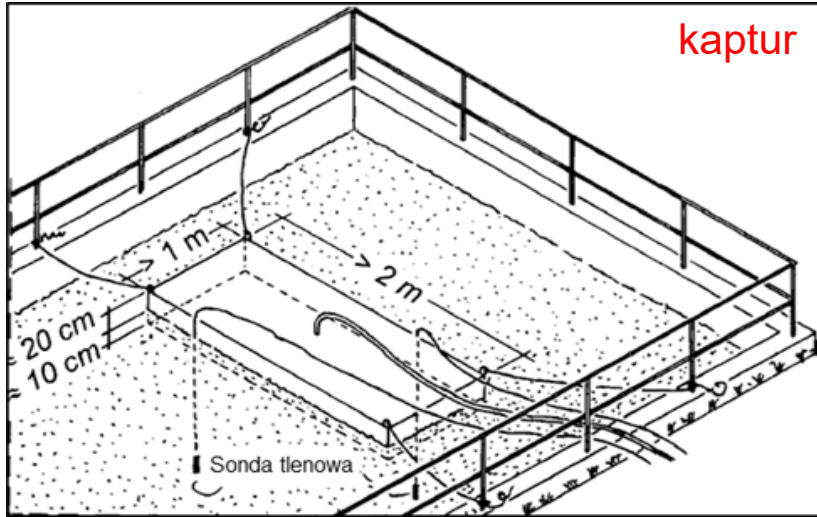
Istota



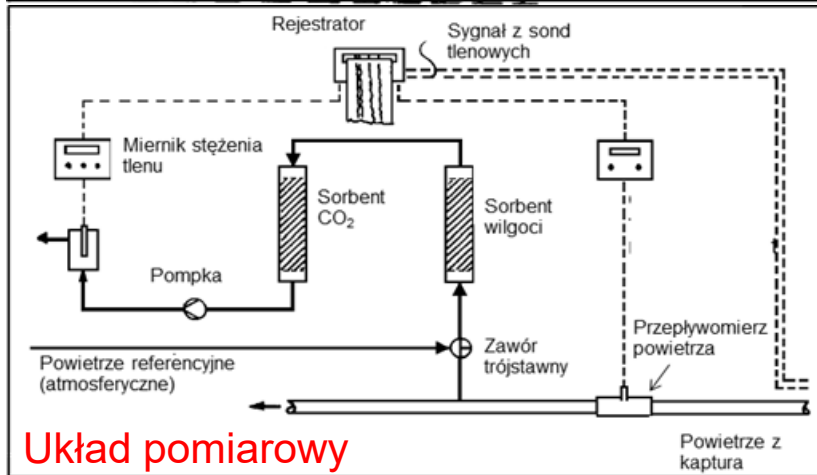
$$OTE = \frac{\frac{O_{2,atm}}{1 - O_{2,atm}} - \frac{O_{2,off-gas}}{1 - O_{2,off-gas} - CO_{2,off-gas}}}{\frac{O_{2,atm}}{1 - O_{2,atm}}}$$

Metody diagnostyki – metoda off-gas

Sprzęt



kaptur

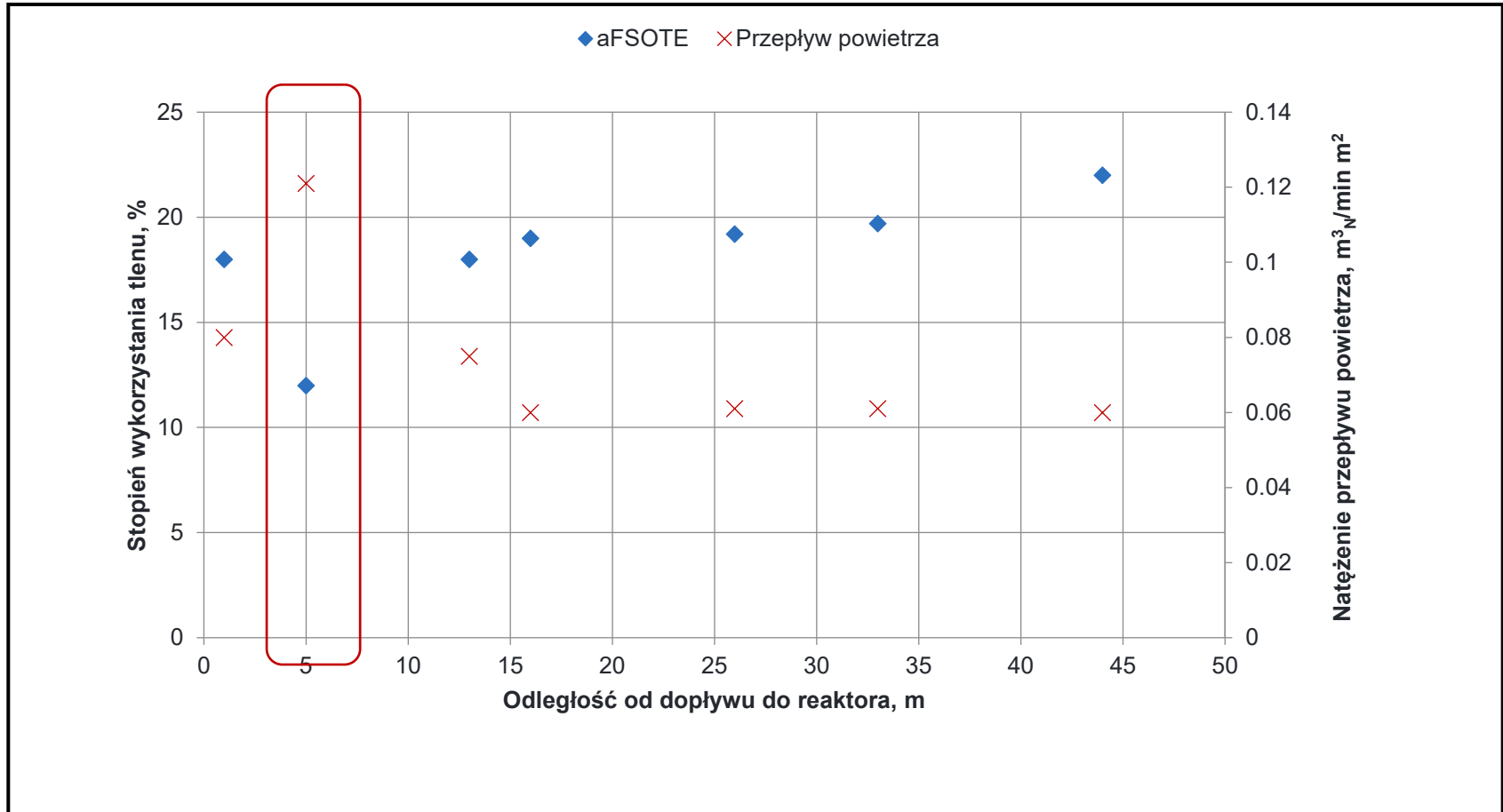


Układ pomiarowy



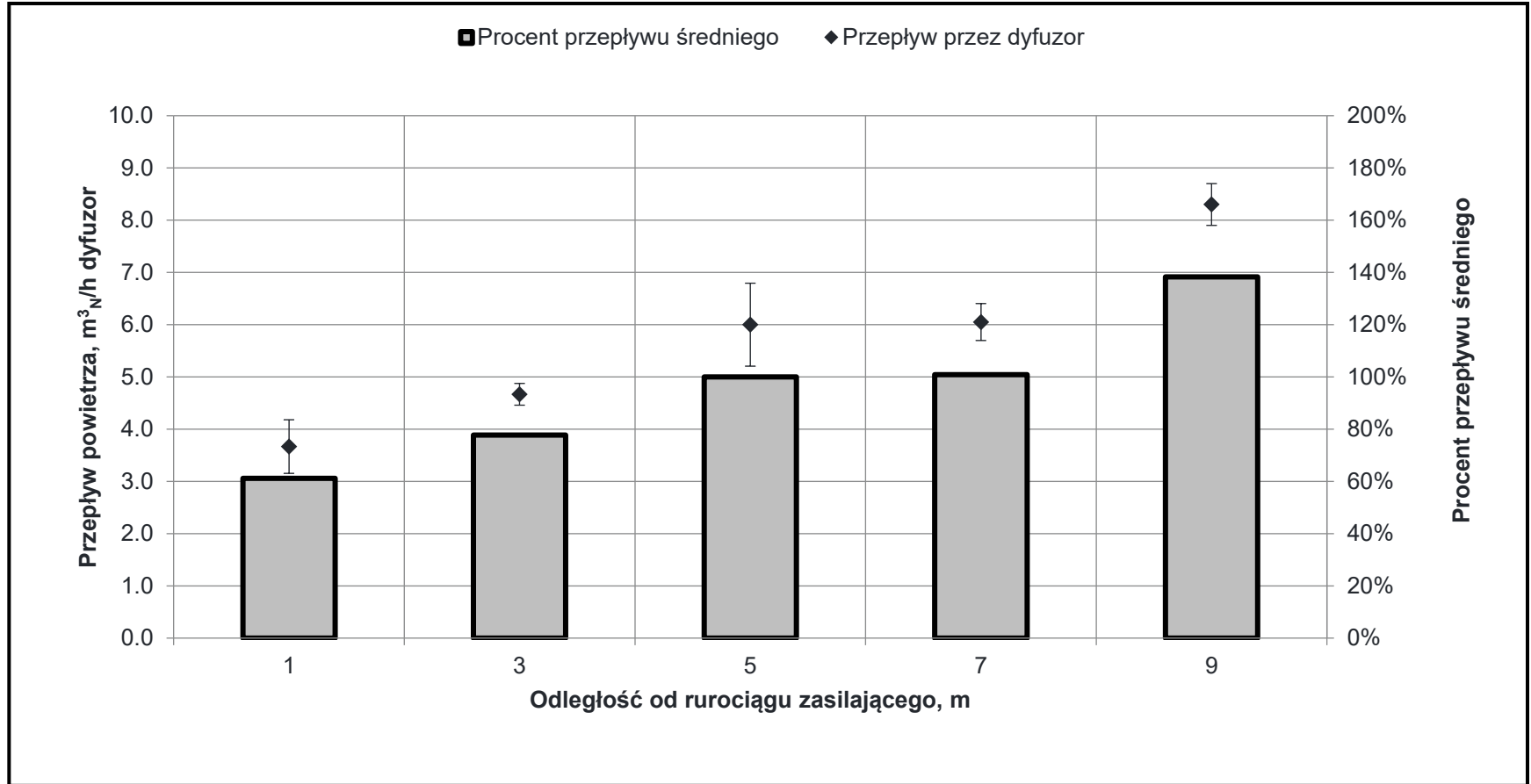
Metody diagnostyki – metoda off-gas

Możliwości – detekcja nieszczelności



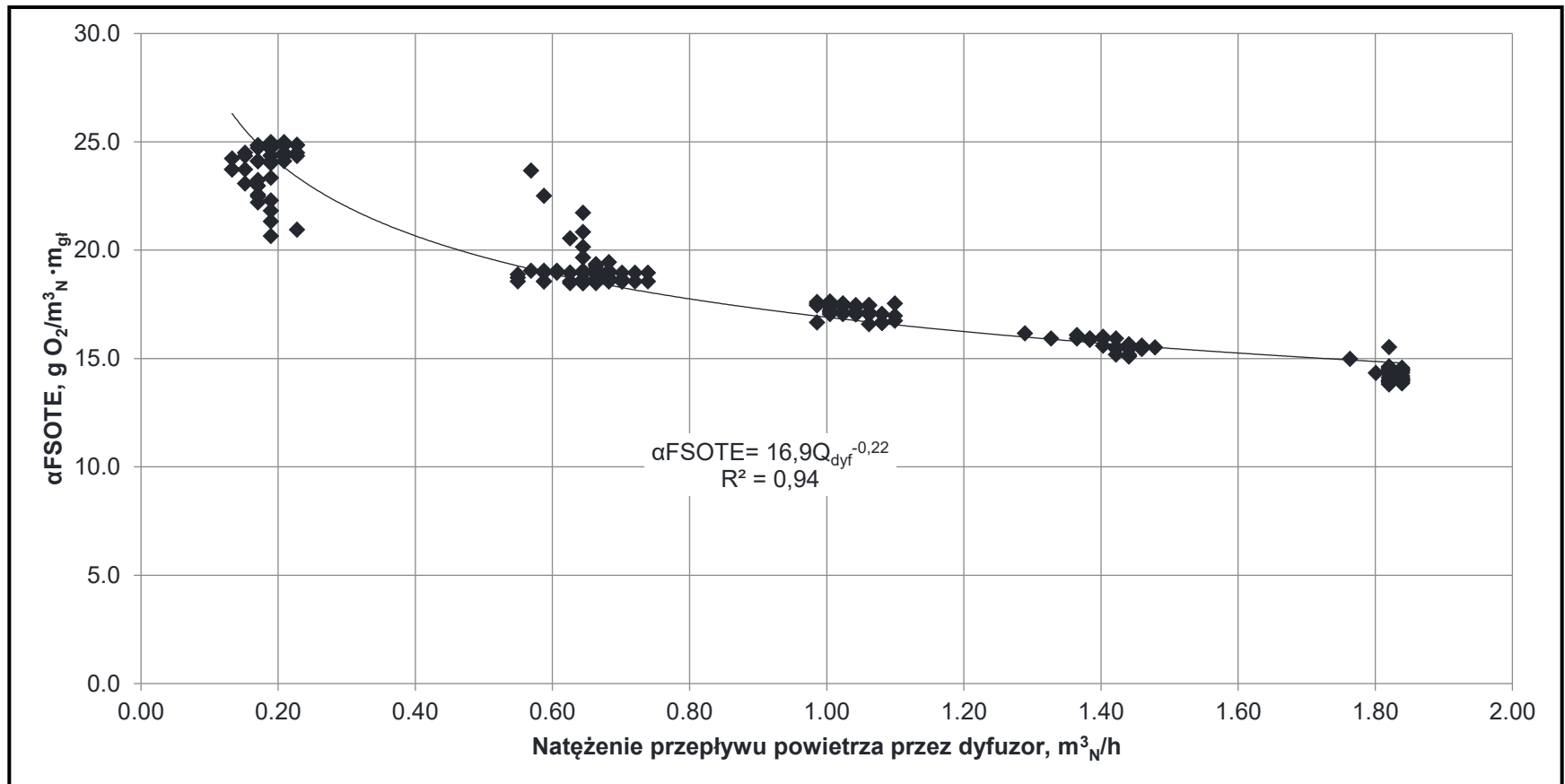
Metody diagnostyki – metoda off-gas

Możliwości – wypoziomowanie rusztów napowietrzających



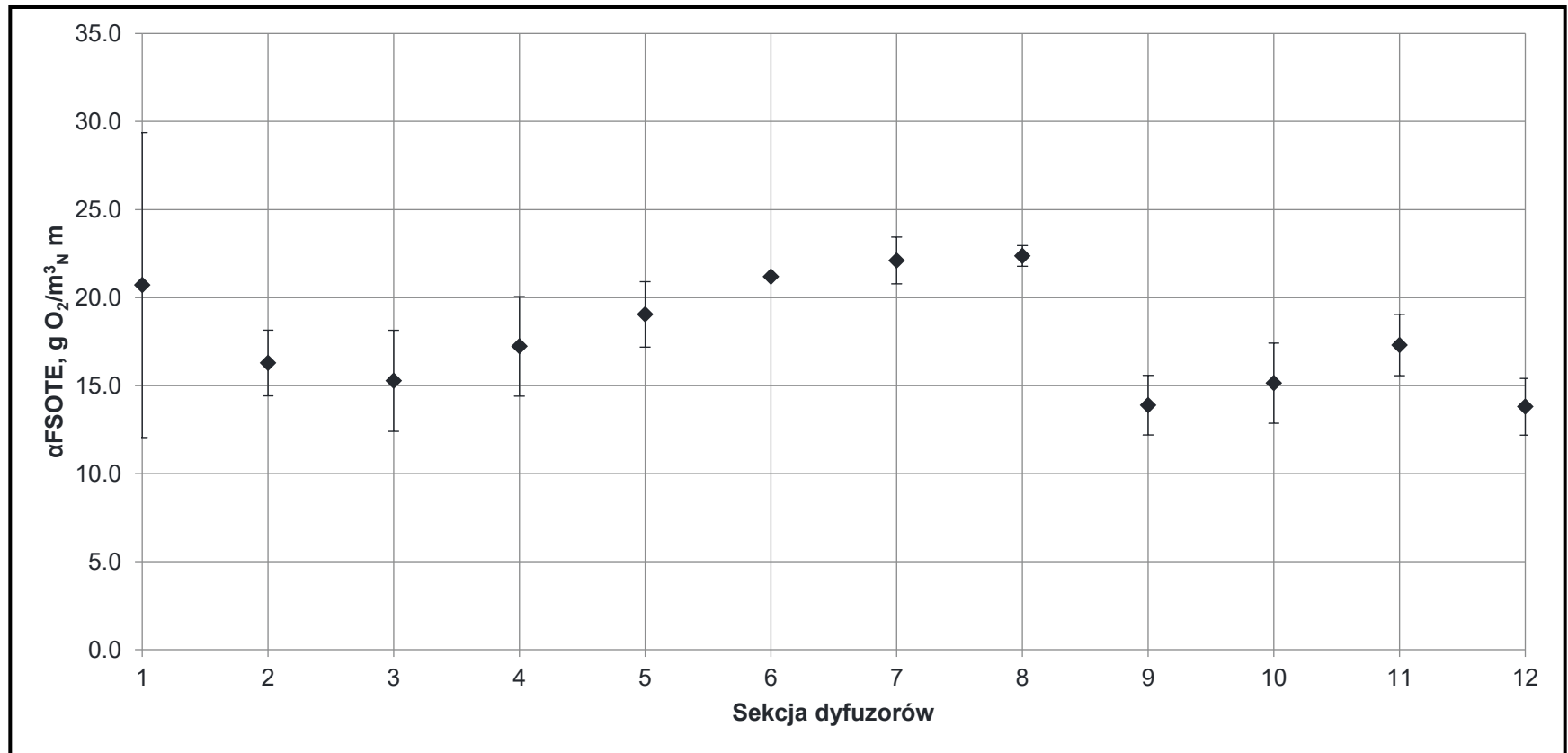
Metody diagnostyki – metoda off-gas

Możliwości – analiza zależności pomiędzy przepływem powietrza, a transferem tlenu



Metody diagnostyki – metoda off-gas

Możliwości – przestrzenny rozkład sprawności napowietrzania



Wady i zalety metody off-gas

Względem metody absorpcji tlenu



- Pomiary w warunkach eksploatacyjnych
- Badanie zmienności przestrzennej i czasowej
- Lokalizacja nieszczelności i innych wad technicznych
- Niewielki błąd pomiarowy
- Stosunkowo proste pomiary



- Skomplikowana aparatura
- Długi czas pomiaru
- Wyższy koszt badań

Metody diagnostyki – metoda absorpcji, metoda off-gas

Procedura

Procedura jest szczegółowo opisana w wytycznej ATV M209E – w razie zlecenia badań, warto oczekiwać od wykonawcy prowadzenia prac zgodnie z tą wytyczną.

Procedura precyzuje:

1. Wzory obliczeniowe
2. Dawki wykorzystywanych reagentów
3. Dokładność wykorzystywanych urządzeń
4. Sposób prowadzenia pomiaru
5. Sposób analizy danych

Metody diagnostyki – stan dyfuzorów

Procedura



1. Opróżnienie komory tlenowej
2. Demontaż dyfuzorów (w odpowiedniej liczbie)
3. Testy dyfuzorów w reaktorze zewnętrznym (metodą absorpcji lub metodą off-gas – dowolnie)

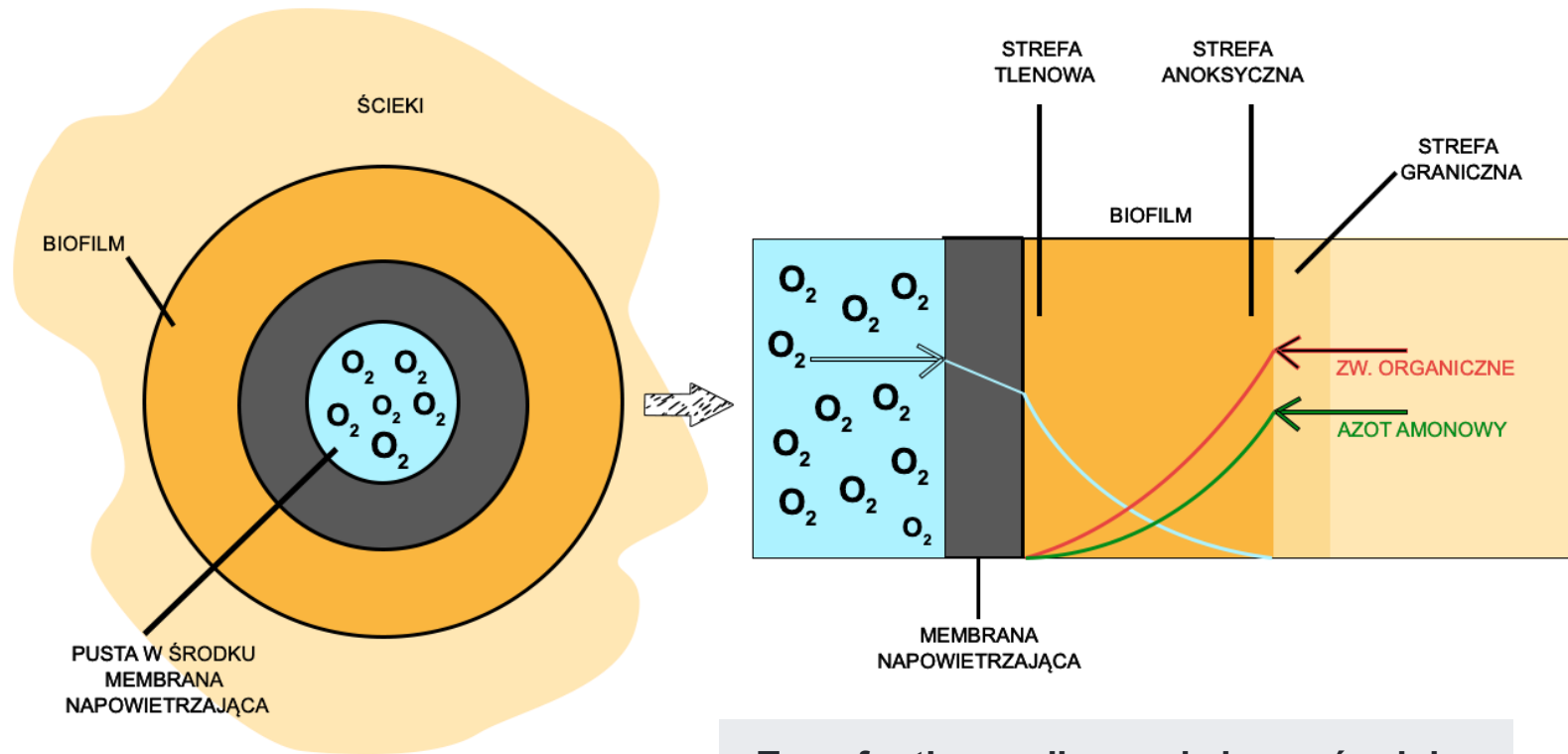


Przegląd nowych technologii napowietrzania

- **Napowietrzenie bezpęcherzykowe**
- **Czysty tlen**
- **MNB – napowietrzenie mikro i nano pęcherzykowe**

Napowietrzenia bezpęcherzykowe

Idea procesu



Transfer tlenu odbywa się bezpośrednio przez membranę do biofilmu, a jego struktura tworzy się w oparciu o gradient stężeń substratów poszczególnych grup bakterii

Napowietrzenia bezpęcherzykowe

Instalacja systemu



Źródło: <https://www.fluencecorp.com/wp-content/uploads/2020/02/how-does-mabr-work.jpg>

Rozwiązanie modułowe, możliwe do zaaplikowania do funkcjonujących obiektów bez konieczności realizacji prac ziemnych.

Wdrożenie może nie wymagać przerwy w pracy obiektu.



Źródło: https://dupont.scene7.com/is/image/Dupont/Spernal_Day_2_100

Napowietrzenia bezpęcherzykowe

Zalety i wady rozwiązania



- Nawet 100% wykorzystanie tlenu z uwagi na bezpośrednie dyfundowanie tlenu przez membrany do biofilmu
- OTE sięgające 69%
- Stosunkowo mało inwazyjna implementacja
- Samoczynnie tworzące się warstwy biofilmu tworzące środowisko umożliwiające symultaniczne usuwanie azotu i zw. Organicznych



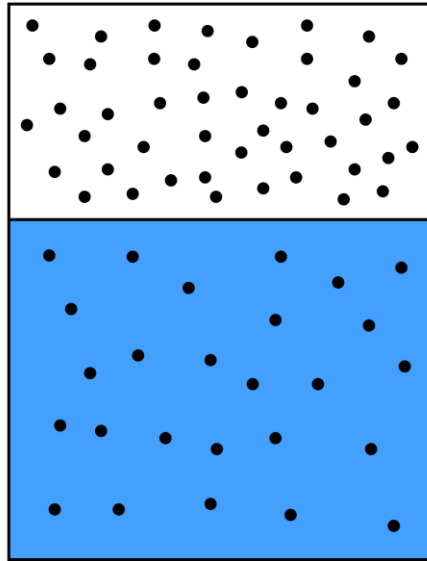
- Znacznie przyspieszony fouling membran zmniejszający efektywność procesu
- Konieczność stałych dodatkowych nakładów finansowych na czyszczenie membran
- Konieczność całkowitej zmiany podejścia do sterowania pracą obiektu
- Wysokie koszty zakupu membran mogące sięgać 90% kosztów całkowitych eksploatacji (w wariantcie OŚ o przepływie 10 000 m³/d)

Napowietrzenie czystym tlenem

Idea procesu

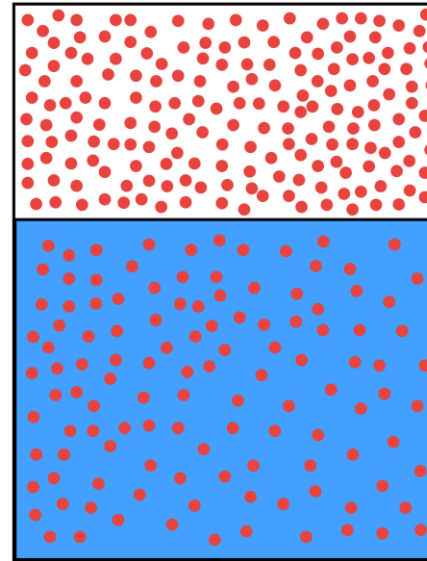
Rozpuszczalność gazu jest pochodną Prawa Henry'ego

$$C_{gazu} = k * P_{gazu}$$



NISKI WSPÓŁCZYNNIK k

Powietrze



WYSOKI WSPÓŁCZYNNIK k

Stężony Tlen

Napowietrzenie czystym tlenem

Zalety i wady rozwiązania



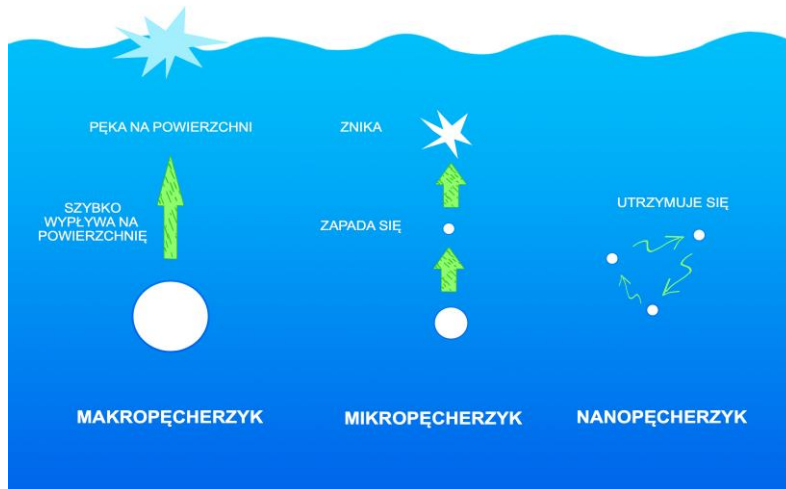
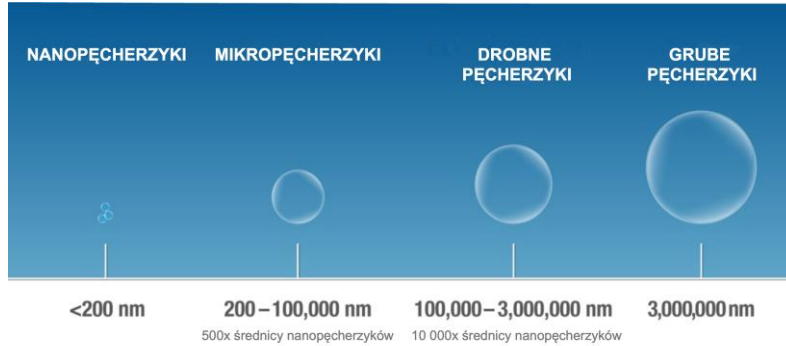
- Utrzymywanie wysokiego stężenia tlenu nawet w warunkach dużego obciążenia
- Wysoki OTE
- Daje możliwość pracy przy wyższych WO i niższych HRT
- Może zmniejszać skalę zjawiska pęcznienia osadu
- Zużycie energii na napowietrzanie mniejsze o nawet 5 razy (nie wliczając kosztów wytworzenia tlenu)



- Wysokie koszty inwestycyjne wytwornic tlenu
- Wysokie koszty zakupu zbiorników na tlen
- Powoduje zwiększone zagrożenie pożarowe

Napowietrzenia mikro i nano pęcherzykowe

Idea procesu



Ta sama ilość powietrza włączana do reaktora zawarta jest w większej ilości pęcherzyków. To z kolei zwiększa ich sumaryczną powierzchnię względem objętości i powoduje wzrost OTE.

W przypadku większych pęcherzyków część sprawności jest tracona z uwagi na ucieczkę powietrza przez powierzchnię. W przypadku mikropecherzyków, zanikają one w toni a wśród nanopęcherzyków powstają ruchy Browna wydłużające czas ich utrzymania w układzie.

Napowietrzenia mikro i nano pęcherzykowe

Zalety i wady rozwiązania



- Skuteczność energetyczna ($\xi_{us.zan}/kWh$) w stosunku do systemów konwencjonalnych większa o nawet 200%
- Możliwość osiągania wyższych stężeń DO przy tym samym przepływie powietrza
- Może indukować alternatywne ścieżki przemian azotu (SNIT, SND)



- Znacznie wyższe (3-45 krotnie) zużycie energii elektrycznej w analogicznym systemie konwencjonalnym
- Ryzyko nadmiernego napowietrzania
- Skomplikowane metody wytwarzania mikro- i nanopęcherzyków (hydrodynamiczna kawitacja, elektroliza, fluidalna oscylacja)
- Wysokie koszty inwestycyjne związane z metodami generowania mikro- i nanopęcherzyków