



Wprowadzenie teoretyczne

Doświadczenie „STĘŻENIE CO₂”

Stężenie CO₂ w pomieszczeniach, w których przebywają ludzie i/lub zwierzęta może przekraczać, nawet kilkakrotnie stężenie CO₂ na świeżym powietrzu. Stężenie to jest dobrym wyznacznikiem jakości powietrza. Podstawowym źródłem CO₂ w pomieszczeniach jest oddychanie ludzi i zwierząt. Przykładowo jedna osoba emituje około 15-20 litrów CO₂ na godzinę w trakcie spoczynku (średnio emisja E to około 0,3 l/min = 0,0003 m³/min na osobę). Innym źródłem może być spalanie paliw, np. kuchenki, piecyki i kominki. Niech $C(t)$ oznacza stężenie CO₂ w ppm w chwili t (minuty). Bilans zmian wygląda tak:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\text{emisja CO}_2}{\text{objętość pomieszczenia}} \quad (1)$$

gdzie:

emisja CO_2 przez n osób to w przybliżeniu $n \cdot E = n \cdot 0,0003$ [m³/min].

Szybkość przyrostu stężenia CO₂ jest wyrażona w m³/min CO₂ na każdy m³ objętości powietrza. Szybkość ta pomnożona przez czas emisji daje nadmiarowe stężenie. Żeby to nadmiarowe stężenie otrzymać w ppm (part per milion), wynik trzeba pomnożyć przez 10⁶. W zamkniętym pomieszczeniu całkowite stężenie w czasie będzie rosła liniowo:

$$C(t) = C_{\text{pocz}} + \frac{10^6 \cdot n \cdot E}{V} \cdot t \quad [\text{ppm}] \quad (2)$$

Stężenie CO₂ w ppm

- około 420 ppm - świeże powietrze zewnętrzne (wartość bazowa)
- do 600 ppm: bardzo dobra jakość powietrza
- 600–1000 ppm: akceptowalna jakość powietrza, komfort użytkowników zwykle nie jest zakłócony
- 1000–1500 ppm: jakość powietrza pogarsza się; może wystąpić dyskomfort, uczucie duszności, zmęczenie
- Powyżej 1500 ppm: poziom uznawany za zbyt wysoki, konieczna jest natychmiastowa poprawa wentylacji
- Powyżej 5000 ppm – poziom alarmowy – stężenie niebezpieczne dla zdrowia (możliwość wystąpienia objawów zatrucia).

Wymiana powietrza w pomieszczeniach to proces dynamiczny, w którym świeże powietrze dostarczane do pomieszczenia miesza się z już obecnym. W praktyce całkowita wymiana powietrza nie następuje natychmiastowo, ponieważ powietrze wprowadzone do pomieszczenia stopniowo rozprasza się i miesza z powietrzem wewnętrznym.

Gdyby powietrze docierające z zewnątrz mogło zastępować to znajdujące się w pomieszczeniu bez mieszania, wtedy czas charakterystyczny wymiany powietrza to:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

gdzie: V – objętość pomieszczenia [m³]; Q – wydajność wentylacji, czyli ilość dostarczanego i odpływającego powietrza [m³/h]. Szybkość ta może być odczytana np. z wydajności wentylatora wyciągowego, pod warunkiem swobodnego dopływu powietrza z zewnątrz.

W praktyce musimy uwzględnić dwa efekty. Pierwszym jest mieszanie świeżego powietrza z tym, które już jest w pomieszczeniu. Drugim efektem jest emisja CO₂ przez osoby, które się w pomieszczeniu znajdują. Wtedy proces wymiany staje się bardziej złożony, a bilans CO₂ będzie opisany równaniem różniczkowym. Bilans zmian wygląda tak:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\text{emisja CO}_2 - \text{usuwanie CO}_2 \text{ przez wentylację}}{\text{objętość pomieszczenia}}, \quad (4)$$

gdzie $\text{usuwanie CO}_2 \text{ przez wentylację}$ jest proporcjonalne do aktualnego stężenia przewyższającego stężenie zewnętrzne: $Q \cdot (C - C_{\text{zewn}})$ [ppm · m³/min]

Po podstawieniu otrzymamy równanie:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{n \cdot E}{V} - \frac{Q}{V}(C - C_{zewn}), \quad (5)$$

Równanie to można rozwiązać analitycznie. Przy założeniu, że stężenie początkowe to C_{pocz} , oraz, że wyniki będą w ppm (mnożnik 10^6), otrzymamy:

$$C(t) = C_{zewn} + \left(C_{pocz} - C_{zewn} - \frac{10^6 \cdot n \cdot E}{Q} V \right) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} + \frac{10^6 \cdot n \cdot E}{Q} V \quad (6)$$

Proces ten jest znacznie prostszy, gdy wentylacja działa w pomieszczeniu, w którym nie przebywają ludzie (brak emisji CO_2). W tej sytuacji stężenie w czasie zmienia się eksponencjalnie:

$$C(t) = C_{zewn} + (C_{pocz} - C_{zewn}) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (7)$$

W praktyce, po około 4–5 charakterystycznych czasach wymiany (licząc $t = V/Q$), stężenie CO_2 spada do mniej niż 1% początkowego, co można uznać za "całkowitą wymianę".

Dysponując pomiarami stężenia CO_2 w pomieszczeniu, **wydajność wentylacji Q** można obliczyć na kilka sposobów:

1. Po usunięciu źródeł emisji (wyjście wszystkich osób z sali), można przekształcić równanie (7) aby wyznaczyć Q
2. Przy długotrwałym przebywaniu ludzi i stabilnych warunkach wentylacji w pomieszczeniu ustali się podwyższony poziom stężenia CO_2 . Można wtedy skorzystać z metody równowagowej.
3. Przy przebywaniu ludzi w pomieszczeniu (istniejące emisje) nie da się analitycznie rozwiązać równania (6) aby wyznaczyć Q . Można to zrobić metodą iteracyjną, tzn. dopasowywać stężenie teoretyczne $C(t)$ do wyników pomiarów odgadyując wartość Q .

Ad 1. W pomieszczeniu w którym nie ma emisji, wyznaczenie nieznannej wydajności wentylacji Q , np. w sytuacji, gdy otworzymy lub uchylimy okno, wymaga przekształcenia równania (7) do postaci:

$$\ln \left(\frac{C(t) - C_{zewn}}{C_{pocz} - C_{zewn}} \right) = -\frac{Q}{V}t \quad (8)$$

Dla danych w postaci stężenia $C(t)$ mierzonego w kolejnych minutach lub co kilka minut, wykreślenie czasowej zmienności tego logarytmu pozwala wyznaczyć Q/V ze współczynnika kierunkowego.

Ad 2. Jeśli stężenie CO_2 osiągnęło stan równowagi (długotrwałe przebywanie tej samej liczby osób w pomieszczeniu i stałe warunki wentylacji), możemy skorzystać z:

$$C_{\infty} = C_{zewn} + \frac{10^6 \cdot n \cdot E}{Q} V \quad (9)$$

Ad 3. W przypadku, gdy w pomieszczeniu przebywają ludzie należałoby przekształcić odpowiednio równanie (6). Niestety, to równanie nie ma analitycznego rozwiązania dla Q . Przekształcenia prowadzą do postaci:

$$Q = -\frac{V}{t} \ln \left(\frac{C(t) - C_{zewn} - \frac{10^6 \cdot n \cdot E}{Q} V}{C_{pocz} - C_{zewn} - \frac{10^6 \cdot n \cdot E}{Q} V} \right), \quad (10)$$

w której Q nadal występuje po obu stronach równania. Można więc skorzystać z równania (6), wprowadzić jego formułę do arkusza kalkulacyjnego i odgadyując wartość Q , próbować dopasować wynik stężenia do wyniku pomiaru.

Pytania do przygotowania:

„STĘŻENIE CO₂”

1. Podaj stężenia podstawowych gazów w atmosferze.
2. Co to jest ppm oraz ppb?
3. Jeśli stężenie CO₂ wynosi 420 ppm, ile to procent?
4. Ile razy więcej jest cząsteczek tlenu O₂ w atmosferze od cząsteczek CO₂?
5. Jakie stężenie CO₂ w atmosferze występuje obecnie i jak się ono zmieniało w ostatnich dziesięcioleciach?
6. Jak działalność człowieka wpływa na sezonową zmienność stężenia CO₂? W których miesiącach stężenie CO₂ rośnie, a w których maleje?
7. Jak poziom CO₂ wpływa na zdrowie i komfort? Przy jakiej koncentracji wymagane jest włączenie wentylacji?
8. Jak przebiega proces wymiany powietrza w pomieszczeniu?
9. Jakie są główne źródła emisji CO₂ do atmosfery?
10. Jakie procesy naturalne powodują pochłanianie CO₂ z atmosfery?
11. Jakie inne gazy cieplarniane poza CO₂ mają wpływ na klimat? Podaj ich stężenia w atmosferze.
12. Co to jest efekt cieplarniany i jak gazy cieplarniane go powodują?
13. Jakie działania globalne mają na celu ograniczenie emisji CO₂ do atmosfery?
14. Czym jest ślad węglowy i jak można go zmniejszyć?
15. Dlaczego w nowoczesnych budynkach o dobrej izolacji termicznej wymagana jest wentylacja mechaniczna?

Wskazówki do wykonania pomiarów

1. Pobierz detektor CO₂ od pracownika technicznego.
2. Włącz detektor w pomieszczeniu i zmierz czas po którym wskazane stężenie stabilizuje się (przestaje rosnąć).
3. Dokonaj pomiaru CO₂ w pomieszczeniu laboratoryjnym.
4. Pamiętaj o czasie stabilizacji wskazań detektora, dokonaj pomiaru C_{zewn} , trzymając detektor za oknem.

Część A. Stężenie CO₂ w pomieszczeniu

5. Wyznacz objętość sali laboratoryjnej V .
6. Zanotuj ilość osób przebywających w pomieszczeniu n .
7. Zmierz początkową wartość C_{pocz} stężenia CO₂ w sali.
8. Powtarzaj pomiary w zamkniętej sali co 2 minuty przez 20 minut.
9. Na podstawie tych pomiarów wyznacz emisję E i porównaj ją z wartością 0,0003 [m³/min]
10. Otwórz (uchyl) okno lub/i drzwi na korytarz oraz ponów pomiary stężenia CO₂ co 2 minuty.
11. Notuj wszystkie zdarzenia w sali, takie jak np. otwarcie drzwi, wchodzenie lub wychodzenie osób z sali
12. W arkuszu kalkulacyjnym wprowadź wzór na teoretyczne stężenie CO₂ (równanie 6) i zmieniaj wartość Q w formule, tak aby jak najlepiej dopasować teoretyczne $C(t)$ do zmierzonego $C(t)$
13. Zapisz wnioski dotyczące wydajności wentylacji w różnych warunkach

Część B. Stężenie CO₂ w atmosferze

14. Włącz w przeglądarce stronę internetową <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html>
15. Porównaj wskazanie detektora wystawionego za oknem z wskazaniami średniego stężenia CO₂ z poprzedniego dnia (zakładka Last Month).
16. Pobierz miesięcznie uśrednione stężenie CO₂ zmierzone na Mauna Loa na Hawajach https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt
17. Z tabeli wybierz dane dla miesiąca swoich urodzin (np. styczeń) i wklej do arkusza kalkulacyjnego średnie stężenia CO₂ w miesiącach wszystkich twoich dotychczasowych urodzin
18. Dla wybranych danych przy pomocy regresji funkcją kwadratową określ funkcję zmiany stężenia CO₂ w kolejnych latach.
19. Korzystając z tej funkcji oszacuj przyszłe średnie stężenie CO₂ w atmosferze w latach, w których będziesz obchodził swoje 40, 60 i 80 urodziny.

„STĘŻENIE CO₂”

Część A. Stężenie CO₂ w sali laboratoryjnej

Przy pomocy detektora CO₂

Zamknięte okna			Uwagi
Numer pomiaru	Czas od początku t [min]	Stężenie CO ₂ C [ppm]	
0			
1			
2			
3			
4			
5			

Wyznacz emisję CO₂ od jednej osoby, przy zamkniętych oknach, korzystając z regresji liniowej dla zależności (2):

$$\underbrace{C(t)}_Y = \underbrace{\frac{10^6 \cdot n}{V} \cdot E}_A \cdot \underbrace{t}_X + \underbrace{C_{pocz}}_B$$

Zakładając, że przy zamkniętych oknach inne formy wentylacji są pomijalnie małe, emisja CO₂ wynosi:
E =

Wietrzenie			Uwagi
Numer pomiaru	Czas od początku t [min]	Stężenie CO ₂ C [ppm]	
0			
1			
2			
3			
4			
5			

W arkuszu kalkulacyjnym oblicz hipotetyczną zmienność stężenia CO₂, w kolejnych chwilach czasu. W obliczeniach uwzględnij:

- wyznaczoną emisję E =
- ilość osób n =
- objętość sali V =
- stężenie CO₂ za oknem sali laboratoryjnej C_{zewn} =
- stężenie początkowe (pomiar numer 0) C_{pocz} =

Podstawiaj przy tym odpadywane wydajności wentylacji Q wyrażone w m³/min.

Porównaj hipotetyczną wartość stężenia CO₂, z wartością zmierzoną. Na tej podstawie określ wydajność wentylacji podczas wietrzenia sali. Podaj zakres zmienności Q i warunki, w których ta wydajność została uzyskana.

„STĘŻENIE CO₂”

Część B. Stężenie CO₂ w atmosferze

Aktualne średnie stężenie CO₂ z ostatnich dni „Recent Daily Average Mauna Loa CO₂” zaokrąglone do 1 ppm wynosi: (baza danych <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html>)

Urodziłem się w miesiącu

Średnie miesięczne stężenie C_{ma} (monthly average) CO₂ dla roku i miesiąca urodzenia oraz dla miesięcy kolejnych moich urodzin:

Urodziny B	Rok	Stężenie CO ₂ C_{ma} [ppm]	Urodziny	Rok	Stężenie CO ₂ [ppm]
0			10		
1			11		
2			12		
3			13		
4			14		
5			15		
6			16		
7			17		
8			18		
9			19		

Zakładając liniową zmienność koncentracji w kolejnych latach, funkcja $C_{ma}(B)$ przyjmuje postać:

$$C_{ma}(B) = \cdot B +$$

Przewidywane przyszłe stężenia CO₂ (średnie miesięczne) w trakcie moich urodzin będą wynosiły:

$$C_{ma}(40 \text{ lat}) = \text{ppm}$$

$$C_{ma}(60 \text{ lat}) = \text{ppm}$$

$$C_{ma}(80 \text{ lat}) = \text{ppm}$$