



Wprowadzenie teoretyczne

Doświadczenie „WYMIANA POWIETRZA”

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:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\text{emisja CO}_2}{\text{objętość pomieszczenia}} \left[\frac{1}{\text{min}} \right] \quad (1)$$

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, w którym przebywa n osób, całkowite stężenie w czasie będzie rosło 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 rozprasa 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] lub [m³/min]. 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: $Q \cdot (C - C_{\text{zewn}})$ [m³/min · ppm]

Po podstawieniu otrzymamy równanie:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{10^6 \cdot n \cdot E}{V} - \frac{Q(C - C_{zewn})}{V}, \quad (5)$$

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

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

Proces ten jest znacznie prostszy, gdy wentylacja działa w pomieszczeniu, w którym nie przebywają ludzie (brak emisji E). W tej sytuacji stężenie w czasie maleje eksponencjalnie, zbliżając się do stężenia zewnętrznego:

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

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 wentylowanym pomieszczeniu, **wydajność wentylacji Q** można obliczyć na kilka sposobów:

1. Po usunięciu źródeł emisji E (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 odgadując wartość Q .

Ad 1. W pomieszczeniu w którym nie ma emisji, wyznaczenie nieznanej 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:

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

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 odgadując wartość Q , próbować dopasować wynik stężenia do wyniku pomiaru.

Pytania do przygotowania:

„WYMIANA POWIETRZA”

1. Co oznacza jednostka *ppm* oraz *ppb*?
2. Jeśli stężenie CO_2 wynosi 420 ppm, ile to procent?
3. Ile razy więcej jest cząsteczek tlenu O_2 w atmosferze od cząsteczek CO_2 ?
4. Jakie są typowe stężenia CO_2 w powietrzu zewnętrznym i w pomieszczeniach?
5. Dlaczego CO_2 jest wskaźnikiem jakości powietrza w pomieszczeniu?
6. Jak zmienia się stężenie CO_2 w zamkniętym pomieszczeniu, w którym przebywają ludzie?
7. Dlaczego podczas wentylacji spadek stężenia CO_2 ma charakter wykładniczy?
8. Co oznacza wydajność wentylacji Q ?
9. Co oznacza liczba wymian powietrza na godzinę?

Wskazówki do wykonania pomiarów

1. Pobierz detektor CO_2 od pracownika technicznego.
2. Włącz detektor w pomieszczeniu i zmierz czas po którym wskazane stężenie stabilizuje się (przestaje rosnać).
3. Dokonaj pomiaru początkowego stężenia CO_2 w pomieszczeniu laboratoryjnym C_{pocz} .
4. Pamiętając o czasie stabilizacji wskazań detektora, dokonaj pomiaru C_{zewn} , trzymając detektor za oknem.
5. Wyznacz objętość sali laboratoryjnej V .
6. Zanotuj ilość osób przebywających w pomieszczeniu n .
7. Powtarzaj pomiary stężenia $C(t)$ w zamkniętej sali co 2 minuty przez 20 minut.
8. Na podstawie tych pomiarów wyznacz emisję E i porównaj ją z wartością $0,0003 \text{ [m}^3/\text{min]}$.
9. Otwórz (uchyl) okno lub/i drzwi na korytarz oraz ponów pomiary stężenia CO_2 co 2 minuty.
10. Notuj wszystkie zdarzenia w sali, takie jak np. otwarcie drzwi, wchodzenie lub wychodzenie osób z sali.
11. W arkuszu kalkulacyjnym wprowadź wzór na teoretyczne stężenie CO_2 (równanie 6) i zmieniaj wartość Q w formule, tak aby jak najlepiej dopasować teoretyczne $C(t)$ do zmierzonego $C(t)$.
12. Zapisz wnioski dotyczące wydajności wentylacji w różnych warunkach

„WYMIANA POWIETRZA”

Część A. Wzrost CO₂ w zamkniętej 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):

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

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

Część B. Spadek CO₂ w wyniku wentylacji

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.