

Streszczenie

Utrzymanie wysokiej jakości środowiska wewnętrznego, w tym jakości powietrza, jest istotnym wyzwaniem w gęsto zaludnionych przestrzeniach, takich jak sale lekcyjne, co stało się szczególnie ważne w czasie pandemii COVID-19. Niniejsza rozprawa przedstawia badania nad zaawansowanymi strategiami wentylacji i kontroli przenoszenia się infekcji drogą powietrzną. Badania obejmowały analizy szeregu rozwiązań, od inteligentnej wentylacji naturalnej, przez systemy hybrydowe, aż po lokalne i zintegrowane systemy wentylacji osobistej z zastosowaniem fizycznych barier.

W pierwszym etapie opracowano automatyczny sterownik otwierania okien, który został zasymulowany do kontroli naturalnej wentylacji pomieszczenia klasowego. Podejście to znacząco poprawiło jakość powietrza wewnętrznego i komfort cieplny, choć bez dodatkowych środków, takich jak oczyszczacze powietrza czy maseczki, ryzyko zakażenia pozostawało wysokie. W kolejnym etapie opracowano wielokryterialne podejście optymalizacyjne, które zakładało jednoczesną regulację otwarcia okien oraz ustawień termostatu. Model ten minimalizował zużycie energii, średnie stężenie CO₂ w pomieszczeniu oraz poziom niezadowolenia użytkowników. Rozwiązanie to przeanalizowano dla dwóch różnych klimatów. Następnie opracowano nowatorską strategię wentylacji hybrydowej, synchronizującą współpracę wentylacji naturalnej i mechanicznej w zależności od poziomu zanieczyszczenia powietrza na zewnątrz i ryzyka ich przenoszenia do wnętrza budynku. Przeprowadzono optymalizację tej strategii w celu spełnienia norm środowiska wewnętrznego przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii dla trzech miast o zróżnicowanej jakości powietrza zewnętrznego i znajdujących się w różnych klimatach.

Badania eksperymentalne rozpoczęto od oceny roli barier fizycznych w rozprzestrzenianiu aerozoli w pomieszczeniach wyposażonych w wentylację mechaniczną. Eksperymenty przeprowadzono w komorze testowej wyposażonej w dwa różne systemy wentylacji mieszającej. Do symulacji transmisji zakażeń drogą powietrzną użyto rozpylonych aerozoli oraz bioaerozoli. Wyniki wskazały, że bariery fizyczne o wysokości 65 cm redukują transmisję aerozoli, w przypadku sprawnie działającej wentylacji mieszającej. Jednak gdy mieszanie powietrza jest niewystarczające stosowanie barier fizycznych może prowadzić do lokalnej akumulacji zanieczyszczeń. W kolejnym etapie bariery fizyczne wyposażono w lokalny system wyciągu powietrza w ilości 9 l/s na osobę, co pozwoliło zaobserwować znaczący lokalny spadek stężenia zanieczyszczeń dla wszystkich analizowanych systemów dystrybucji powietrza. Ponadto, badania numeryczne z wykorzystaniem obliczeniowej mechaniki płynów

(CFD) wykazały, że redukcja wysokości barier do 0.45 cm i przepływu powietrza w systemie wyciągowym do 6 l/s na osobę spowoduje spadek efektywności usuwania aerozoli jedynie o ~5%, a jednocześnie pozwoli ograniczyć zużycie energii i materiałów.

Ostatnia część pracy zawiera analizy porównawcze kilku strategii kontroli zakażeń łączące ocenę ryzyka zakażenia z analizą cyklu życia (LCA) . Wykazano, że choć niektóre strategie hybrydowe (maseczki i oczyszczacze) charakteryzują się najniższym ryzykiem zakażenia, to generują one znaczne obciążenia środowiskowe. Najbardziej zrównoważonym rozwiązaniem, uwzględniającym zarówno skuteczność redukcji ryzyka zakażenia, jak i wpływ na środowisko, okazał się zintegrowany system fizycznych barier i lokalnej wentylacji wyciągowej.

Słowa kluczowe: redukcja zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego; rozprzestrzenianie zanieczyszczeń powietrza; strategie wentylacyjne; bariery fizyczne; analiza cyklu życia.