



Poznań, 01.09.2025r.

dr hab. inż. Katarzyna Ratajczak, prof. PP
Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych
Ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań
e-mail: katarzyna.m.ratajczak@put.poznan.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
Seyedkeivan Nateghi
pt. „Analyses of selected methods
of limiting the spread of air
pollutants in occupied ventilated rooms”

1. Podstawa opracowania

Podstawą formalną wykonania recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Analyses of selected methods of limiting the spread of air pollutants in occupied ventilated rooms” jest Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 12.06.2025r., w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Seyedkeivana Nateghi.

2. Struktura i zawartość ocenianej rozprawy doktorskiej

2.1. Ocena układu rozprawy i informacje o częściach składowych

Rozprawa została przygotowana w języku angielskim z polskim streszczeniem. Zasadnicza część obejmuje 64 strony. Dodatkowo zawiera część wstępną (14 stron) oraz 6 załączników. Załączniki stanowią zbiór sześciu oryginalnych artykułów z listy Journal Citation Reports (JCR), w których Doktorant jest drugim autorem (artykuł 1) oraz pierwszym autorem (artykuły 2–6). Publikacje ukazały się w czasopiśmie: *Energies* (IF = 3.0), *Journal of Building Engineering* (IF = 6.7), *Building and Environment* (IF = 7.1), *Sustainable Cities and Society* (IF 2023 = 10.5).

Z przedstawionych oświadczeń wynika, że wkład Doktoranta w powstanie artykułów wynosił: 35% (artykuły 1, 4, 6), 50% (artykuł 5), 70% (artykuł 3) oraz 80% (artykuł 2). Obejmował on przygotowanie manuskryptu, przeprowadzenie badań i analiz, opracowanie koncepcji i metodologii badań, pozyskiwanie finansowania, wizualizację danych oraz walidację wyników.

2.2. Tytuł i tematyka rozprawy doktorskiej

Oceniana rozprawa doktorska zatytułowana jest „Analyses of selected methods of limiting the spread of air pollutants in occupied ventilated rooms”. Tytuł jest zgodny z zawartością pracy i odnosi się do dyscypliny naukowej inżynieria środowiska. Można jednak zauważyć, że mógłby on zostać doprecyzowany poprzez wskazanie, iż badania prowadzone były dla budynku edukacyjnego (klasy lekcyjnej).

Podjęta tematyka dotyczy zapewnienia właściwego środowiska wewnętrznego w klasach szkolnych. Jest to problem istotny i aktualny. Jakość środowiska wewnętrznego ma bezpośredni wpływ na zdrowie i samopoczucie ludzi, a w przypadku dzieci i młodzieży – również na ich rozwój. Nie bez znaczenia pozostaje także wpływ jakości powietrza na percepcję uczniów. W okresie pandemii COVID-19 znacząco wzrosło zainteresowanie badaniami nad rolą systemów wentylacyjnych w ograniczaniu rozprzestrzeniania się infekcji. Temat ten pozostaje aktualny również poza sytuacjami epidemicznymi, zwłaszcza w sezonie jesienno-zimowym. Zapewnienie właściwej jakości powietrza pod względem chemicznym, pyłowym i biologicznym jest niezwykle istotne, a każde rozwiązanie przyczyniające się do poprawy stanu środowiska wewnętrznego należy uznać za cenne z punktu widzenia rozwoju społeczeństwa. W rozprawie podjęto się badań, których wyniki mogą być zastosowane nie tylko w nowych budynkach. Tematyka rozprawy jest zgodna z celami zrównoważonego rozwoju i wspiera przede wszystkim cel Dobre zdrowie i jakość życia, a także w pewnym zakresie cele Dobra jakość edukacji i Zrównoważone miasta i społeczności (SDG 3, 4, 11).

2.3. Ocena poszczególnych części składowych rozprawy

Część wstępna rozprawy zawiera podziękowania, streszczenie w języku angielskim i polskim, spis treści, listę załączonych artykułów naukowych, opis wkładu Doktoranta w powstanie artykułów, spis stosowanych oznaczeń, ogólny opis struktury dalszej części rozprawy.

We wprowadzeniu przedstawiono motywację podjęcia kompleksowych badań nad ograniczaniem rozprzestrzeniania się infekcji w pomieszczeniach zamkniętych, z uwzględnieniem wentylacji i filtracji, komfortu cieplnego oraz aspektów ekonomicznych, w kontekście zrównoważonego rozwoju. Podkreślono konieczność prowadzenia badań w budynkach edukacyjnych, w których dzieci spędzają wiele godzin dziennie. Scharakteryzowano zanieczyszczenia chemiczne, pyłowe i biologiczne wraz z przeglądem metod ich ograniczania. Wskazano również wpływ strategii zarządzania jakością powietrza wewnętrznego (IAQ) i kontroli infekcji na komfort, efektywność energetyczną i cele zrównoważonego rozwoju. Cel i zakres pracy zdefiniowano w sekcji 1.6.

Rozdział 2 opisuje osiągnięcia opublikowane w trzech artykułach dotyczących sposobów wentylacji oraz ich sterowania. Opisano badania, których podstawą były symulacje różnych rozwiązań wentylacji sali lekcyjnej użytkowanej przez 30 uczniów zlokalizowanej w różnych klimatach (Warszawa, Bangkok, Delhi i Sztokholm). Wykazano korzyści strategii wentylacji hybrydowej zintegrowanej z systemem EMS (dynamiczne przełączanie wentylacji naturalnej i mechanicznej w funkcji stężenia zanieczyszczeń), zarówno dla jakości powietrza, jak i zużycia energii oraz komfortu cieplnego. Dla przykładu, względem scenariusza z wyłącznie wentylacją mechaniczną uzyskano redukcję zużycia energii rzędu 65% (Warszawa), 57% (Sztokholm) i 13% (Delhi), przy jednoczesnej poprawie jakości powietrza (m.in. wzrost udziału czasu w kategorii I EN 16798-1 w Warszawie do 43%) i zachowaniu komfortu (PMV w zalecanym zakresie). Wykazano też ograniczenia wentylacji naturalnej w miastach o wysokim stężeniu PM2.5.

Rozdział 3 opisuje osiągnięcia opublikowane w trzech kolejnych artykułach dotyczących strategii ograniczania ryzyka infekcji. Opisano badania skupiające się na ocenie i optymalizacji różnych strategii umożliwiających kontrolę rozprzestrzeniania się infekcji w zamkniętej klasie lekcyjnej. Przedmiotem badań była ta sama sala, która była tematem badań opisanych w rozdziale 2. Analizowano zastosowanie przegród fizycznych oraz indywidualnych systemów wyciągowych, a także efektywność wentylacji przy różnych sposobach dystrybucji powietrza (wentylacja mieszająca i wyporowa). Przeprowadzono

również walidację eksperymentalną z symulacjami CFD oraz zastosowano je w optymalizacji systemu uwzględniającego przegrody fizyczne i wyciągi indywidualne.

Rozdział 4 opisuje badania dotyczące oceny cyklu życia wybranych strategii kontroli zakażeń. Jest to część badań nieopublikowana. Badaniom poddano tą samą klasę wyposażoną w system wentylacji oraz zastosowanie oczyszczaczy powietrza, zastosowanie maseczek jednorazowych oraz zintegrowany system przegród fizycznych i indywidualnego odciągu powietrza (badania opisane w rozdziale 3). Do analizy skuteczności zastosowanych rozwiązań wykorzystano model Wellsa-Rileya. Wyniki pokazały, że zestawy łączone (maseczki + oczyszczacze) minimalizują ryzyko zakażeń, ale generują najwyższy wpływ środowiskowy, podczas gdy wyciągi indywidualne i przegrody fizyczne są najkorzystniejsze.

Rozdział 5 zawiera wnioski podsumowujące uzyskane rezultaty i rekomendacje dla praktyki eksploatacyjnej obiektów edukacyjnych.

3. Ocena ważnych części rozprawy

3.1. Ocena celu i tez rozprawy

Cele rozprawy zostały sformułowane jasno i adekwatnie do problematyki; obejmują pogłębienie wiedzy oraz rozwój skutecznych i zrównoważonych strategii poprawy jakości powietrza wewnętrznego i ograniczania ryzyka zakażeń w salach lekcyjnych, z jednoczesnym uwzględnieniem komfortu cieplnego i zużycia energii. Tezy sformułowano jako hipotezy i pytania badawcze; są one weryfikowalne i spójnie powiązane z metodyką oraz zakresem kolejnych rozdziałów i publikacji w cyklu.

Zakres celów i tez obejmuje wszystkie kluczowe wymiary problemu: jakość powietrza wewnętrznego, komfort cieplny, efektywność energetyczną i środowisko, a przyjęta struktura pracy umożliwia ich weryfikację. Pytania badawcze dotyczą: (i) możliwości zapewnienia odpowiedniej jakości powietrza i kontroli infekcji przez wentylację naturalną; (ii) optymalizacji systemu wentylacji pod kątem energetycznym przy zachowaniu komfortu cieplnego; (iii) dostosowania systemu wentylacji hybrydowej do zmiennych warunków wewnętrznych i zewnętrznych; (iv) wpływu przegród fizycznych na efektywność wentylacji i rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń; (v) zasadności łączenia lokalnego wywiewu powietrza (PE) z barierami fizycznymi (PB) w celu kontroli transmisji patogenów.

Hipotezy badawcze zakładały, że: inteligentnie sterowana wentylacja naturalna może ograniczać rozprzestrzenianie się infekcji w budynkach bez wentylacji mechanicznej; optymalizacja wielokryterialna pozwala tak dobrać parametry systemu, aby zapewnić wymaganą jakość powietrza, komfort i racjonalne zużycie energii; wentylacja hybrydowa poprawia warunki środowiskowe i obniża zapotrzebowanie na energię; przegrody fizyczne ograniczają transmisję patogenów, a ich połączenie z lokalnym wywiewem istotnie redukuje ekspozycję.

Tezy i cele oceniam jako precyzyjne, mierzalne i zrealizowane w ramach przedstawionych badań. Ewentualnym doprecyzowaniem — zwiększającym transparentność — mogłoby być jawne przypisanie każdej hipotezy do konkretnego artykułu oraz wskazanie przyjętych mierników sukcesu w podsumowaniu rozdziału z celami.

Na podstawie wyników z rozdziałów 2–4 stwierdzam, że cele rozprawy zostały zrealizowane, a hipotezy potwierdzone w większości: w pełni – zasadność wielokryterialnej optymalizacji i wentylacji hybrydowej sterowanej EMS (korzyści dla IAQ i energii); warunkowo – skuteczność samej wentylacji naturalnej (ograniczana jakością powietrza zewnętrznego i kompromisami energetycznymi); częściowo – uniwersalność przegród fizycznych (skuteczność zależna jest od systemu rozdziału powietrza);

jednoznacznie – efektywność konfiguracji PB+PE oraz możliwość jej optymalizacji pod względem zasobów.

3.2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Spis literatury obejmuje 97 pozycji. Większość to artykuły z recenzowanych czasopism w języku angielskim. W wykazie ujęto też pozycje autorstwa/współautorstwa Doktoranta (cykl publikacji). Literatura dobrze odpowiada tematyce rozprawy (IAQ, wentylacja, transmisja aerozoli, CFD, normy) i jest aktualna – dominują lata 2020–2024, z uzupełnieniem o klasyczne prace (Riley 1978; Gammaitoni & Nucci 1997). Literaturę wykorzystano we właściwy sposób.

3.3. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych oraz części rozprawy z wynikami i wnioskami z badań

Do realizacji badań Doktorant wykorzystał metody powszechnie stosowane w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, łącząc modelowanie energetyczne i przepływów powietrza, optymalizację wielokryterialną, eksperymenty w skali rzeczywistej, modelowanie CFD, ocenę ryzyka infekcji (Wellsa–Rileya) oraz analizę cyklu życia (LCA). Zarówno część symulacyjna, jak i eksperymentalna odnosiły się do tej samej przestrzeni referencyjnej – pełnowymiarowej sali lekcyjnej – co zapewniało porównywalność scenariuszy i wyników.

Pierwsza część badań dotyczyła symulacji i optymalizacji proponowanych rozwiązań. Zastosowano EnergyPlus do symulacji energetycznych oraz CONTAM do modelowania przepływów i stężeń zanieczyszczeń. Opracowano strategię inteligentnego sterowania oknami (wentylacja naturalna) oraz warianty wentylacji hybrydowej z systemem EMS (Energy Management System), który przełączał tryby między naturalnym a mechanicznym w zależności od warunków wewnętrznych i jakości powietrza zewnętrznego. Uwzględniono różne klimaty (Warszawa, Bangkok, Delhi, Sztokholm), reprezentatywną liczbę użytkowników (30 uczniów) oraz progi decyzyjne oparte na stężeniu CO₂, komforcie cieplnym i stężeniu pyłu PM_{2.5}.

Część druga badań obejmowała eksperymenty z użyciem gazów znacznikowych, aerozoli i bioaerozoli. Skuteczność wymiany powietrza i dystrybucji zanieczyszczeń oceniano metodą gazów znacznikowych (CO₂, N₂O) oraz pomiarami stężeń aerozoli/bioaerozoli w pełnowymiarowej sali z sześcioma termicznie aktywnymi manekinami. Krotność wymian powietrza (ACH) wyznaczano metodą zaniku stężenia; dodatkowo obliczano wskaźniki skuteczności wymiany powietrza (ACE). Generację aerozoli realizowano nebulizatorem Collisona; w badaniach bioaerozoli stosowano *Micrococcus luteus* jako bezpieczny substytut biologiczny. Warunki wentylacyjne utrzymano stałe: ACH = 3 h⁻¹, temperatura nawiewu 20 °C, RH 40%. Testowano warianty dystrybucji powietrza: trzy systemy wentylacji mieszającej (MV1–MV3) oraz wentylację wyporową (DV), co pozwoliło ocenić wpływ mechanizmu rozdziału na skuteczność lokalnych strategii. W modelowaniu CFD zastosowano model cząstek dyskretnych (DPM) z uwzględnieniem dyfuzji molekularnej (ruchów Browna) i charakterystyki cząstek (liczba Stokesa), co umożliwiło realistyczne odwzorowanie trajektorii i depozycji w przepływie turbulentnym. Obliczenia walidowano danymi eksperymentalnymi; zweryfikowane modele wykorzystano do analiz przepływu i oceny skuteczności układów PB+PE.

Następnie wykonano ocenę ryzyka infekcji. Ryzyko transmisji patogenów drogą powietrzną szacowano z użyciem modelu Wellsa–Rileya, definiując scenariusze właściwe dla zajęć lekcyjnych (m.in. lekcja trwająca 45 minut). Parametry modelu powiązano ze zdefiniowanymi scenariuszami i danymi z części symulacyjnej/eksperymentalnej.

Ostatnia część badań dotyczyła oceny rozwiązań w cyklu życia (LCA). Przeprowadzono kompleksową ocenę w OpenLCA (v2.3.1) z wykorzystaniem bazy Environmental Footprint (EF) v3.0, obejmując cały cykl życia (od wydobycia surowców po koniec życia). Porównano trzy strategie: przenośne oczyszczacze HEPA, jednorazowe maseczki oraz zintegrowany system PB+PE. Warunki środowiskowe i użytkowania sali lekcyjnej były tożsame z założeniami wcześniejszych etapów badań. Wyniki wpływu środowiskowego znormalizowano i zważono do wskaźnika jednopunktowego (Pt), co umożliwiło połączenie oceny środowiskowej z oceną ryzyka (Wells–Riley) w narzędziu decyzyjnym.

Wyniki potwierdziły, że wentylacja hybrydowa sterowana EMS zmniejszała zużycie energii względem wariantu z wentylacją mechaniczną o około 65% w Warszawie, 57% w Sztokholmie i 13% w Delhi, przy zachowaniu lub poprawie jakości powietrza oraz komfortu cieplnego. Skuteczność wentylacji naturalnej była ograniczona przez jakość powietrza zewnętrznego i mogła być stosowana orientacyjnie przez 11% roku w Delhi, 44% w Warszawie i 31% w Sztokholmie. W badaniach strategii lokalnych układ PB+PE konsekwentnie obniżał narażenie na infekcję; przepływ odciągu rzędu 9 L/s na osobę okazał się efektywny, a zmniejszenie wysokości przegrody z 65 do 45 cm powodowało jedynie około 5% spadek skuteczności.

Dobór metod badawczych jest bardzo szeroki i adekwatny do celu pracy; wykorzystanie jednego modelu referencyjnego sali oraz łączenie symulacji, eksperymentów, CFD, modelu ryzyka infekcji i LCA zapewnia spójność metodologiczną i pozwala wiarygodnie ocenić rekomendowane rozwiązania pozwalające ograniczyć rozprzestrzenianie się infekcji w wentylowanej sali lekcyjnej.

Sformułowane wnioski są spójne z celami pracy i wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych badań. Można je podzielić na wnioski ogólne i szczegółowe. Brakuje nieco sformułowania ograniczenia co do uogólniania wyników. Prosiłabym o doprecyzowanie warunków ograniczających dla sformułowanych wniosków. Ograniczenia nie podważają wniosków, ale ich podanie pozwala na określenie ich uniwersalności.

3.4. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników

Uzyskane wyniki i sformułowane wnioski są cenne i mają potencjał wdrożeniowy, natomiast kierunki dalszych badań wskazują potrzebę przeprowadzenia kolejnych prac przed implementacją konkretnych rozwiązań w praktyce. Doktorant wskazał, że konieczna jest walidacja zaproponowanych strategii w zróżnicowanych układach sal i warunkach eksploatacyjnych, pilotażowe wdrożenia systemu PB+PE oraz sterowania wentylacją hybrydową w szkołach, a także długookresowe pomiary jakości powietrza wewnętrznego, hałasu i ocena kosztów, jak również weryfikacja założeń z użyciem danych terenowych.

W tej części proszę o doprecyzowanie:

- 1) które elementy przedstawionych rozwiązań są możliwe do wdrożenia w istniejącej szkole już obecnie bez konieczności przeprowadzenia dalszych badań;
- 2) jakie działania o charakterze uniwersalnym Doktorant rekomendowałby do niezwłocznego zastosowania w szkołach w Polsce, wraz ze zwięzłym opisem oczekiwanego efektu, potencjalnych ograniczeń oraz nakładami jakie musiałyby ponieść szkoły.

4. Ocena rozprawy doktorskiej

4.1. Ocena oryginalności rozwiązania problemu naukowego

W rozprawie rozwiązano problem naukowy w sposób kompleksowy, wprowadzając do analizy zagadnienia związane z wentylacją, właściwym jej sterowaniem, zapewnieniem odpowiedniej jakości powietrza w pomieszczeniach przy jednoczesnym utrzymaniu komfortu cieplnego, a także ograniczaniem ryzyka rozprzestrzeniania się infekcji (z wykorzystaniem i walidacją rozwiązań lokalnych: przegród fizycznych PB i odciągów osobistych PE, wspartych modelowaniem CFD). Zwrócono również uwagę na aspekty energetyczne i środowiskowe proponowanych rozwiązań (ocena cyklu życia - LCA, integracja z modelem Wellsa–Rileya). Tak szerokie podejście do problemu, jakim jest poprawa warunków środowiskowych w klasach szkolnych, pozwoliło uzyskać bardzo cenne rezultaty, które – zastosowane w praktyce – mogą przynieść istotne korzyści użytkownikom pomieszczeń. Wyniki pokazują m.in. ograniczenia wentylacji naturalnej w silnie zanieczyszczonych miastach oraz skuteczność układu PB+PE w redukcji narażenia na infekcje, przy zachowaniu akceptowalnych kosztów energetycznych i środowiskowych.

Osiągnięcie naukowe należy uznać za istotne, a zaproponowane rozwiązanie problemu – za oryginalne.

4.2. Ocena czy rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz jego umiejętność samodzielnego prowadzenia badań

Tematyka podjęta w rozprawie jest ściśle związana z obszarem badań dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Doktorant przeprowadził szereg badań, które doprowadziły do rozwiązania postawionego problemu naukowego. Wyniki zostały opublikowane w cyklu sześciu artykułów naukowych, powiązanych tematycznie i rozwijających kolejne aspekty badań.

Z oświadczeń o wkładzie autorskim wynika, że udział Doktoranta w powstaniu publikacji w renomowanych czasopismach naukowych był znaczący – od 35% do 80% – i obejmował m.in. przygotowanie manuskryptu, opracowanie koncepcji i metodologii badań, przeprowadzenie analiz, wizualizację danych, walidację wyników oraz pozyskanie finansowania. Tak szeroki zakres prac świadczy o tym, że Doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

5. Wniosek końcowy

Recenzowaną rozprawę Pana mgr inż. Seyedkeivana Nateghi pt. *„Analyses of selected methods of limiting the spread of air pollutants in occupied ventilated rooms”* oceniam pozytywnie i stwierdzam, że spełnia wymagania formalne określone w ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, tj. prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność prowadzenia badań naukowych przez Doktoranta, a jednocześnie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Seyedkeivana Nateghi do dalszego etapu postępowania.

Biorąc pod uwagę kompleksowość przeprowadzonych badań, w których uwzględniono nie tylko strategie wentylacji ograniczające rozprzestrzenianie się infekcji w pomieszczeniach zamkniętych, ale także konieczność zapewnienia użytkownikom komfortu cieplnego przy równoczesnym podkreśleniu znaczenia aspektów energetycznych i ekonomicznych proponowanych rozwiązań, wnioskuję o nadanie rozprawie doktorskiej wyróżnienia.

Podpisała Katarzyna Ratajczak