

Prof. dr hab. inż. Dariusz Heim

Łódź, dn. 18.08.2025

Katedra Inżynierii Środowiska

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Politechnika Łódzka

ul. Wólczńska 213, 90-924 Łódź

tel. +48426313920, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl

RECENZJA

**pracy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Stachery
pt. „Wielokryterialna metoda wyznaczania globalnego wskaźnika
energochłonności budynków”**

wykonanej na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowej Akademii Technicznej

Promotor: Prof. dr hab. inż. Adam Stolarski

Promotor pomocniczy: dr inż. Mariusz Owczarek

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport Wojskowej Akademii Technicznej z dnia 13 maja 2025 r. (nr 24/RDN/ILGiT/2025) w sprawie wyznaczenia recenzentów. Merytoryczną podstawę opracowanej recenzji stanowi przedmiotowa rozprawa przesłana w wersji drukowanej.

2. Ocena zasadności podjęcia tematu

Aktualne i przyszłe wymagania stawiane budynkom w obszarze efektywności energetycznej i oddziaływania na środowisko stwarzają potrzebę rzetelnej oceny właściwego doboru rozwiązań projektowych, zarówno w budynkach modernizowanych jak i nowoprojektowanych. Ocena ta, najczęściej dokonywana jest na podstawie metod uproszczonych, jednokryterialnych i jednoskładnikowych, rzadziej zaś za pomocą optymalizacji wielokryterialnej, pozwalającej na określenie, przy różnych funkcjach celu i ograniczeniach, wpływu poszczególnych składników na cechy budynku. Oryginalnym zadaniem postawionym przez Autorkę rozprawy jest wykorzystanie metody optymalizacji wielokryterialnej do oceny wpływu zbioru wielu składników na energochłonność budynku.

Opracowanie dokładnej metodyki wyboru wariantu projektowego lub wariantu modernizacji, jest ważnym głosem w dyskusji nad obecnie stosowanymi metodami oceny inwestycji przeznaczonych do finansowania z funduszy publicznych. Należą do nich zarówno inwestycje poprawiające charakterystykę energetyczną budynków istniejących („Fundusz Termomodernizacji i Remontów”, „Program Czyste Powietrze”) jak i wsparcie dla nowych budynków o radykalnie obniżonym zapotrzebowaniu na energię. Tym, samym oceniana rozprawa doktorska, poza elementami stricte naukowymi posiada również istotną wartość użytkową.

Optymalizacja wielokryterialna cech fizycznych budynków jest sama w sobie zadaniem wieloaspektowym i złożonym, gdyż współczesne budynki projektowane są jako skomplikowane systemy techniczne. Tym samym, każde zadanie polegające na teoretycznym opracowaniu uniwersalnej metody oceny energochłonności budynku poparte analizą parametryczną zasługuje na uznanie.

Wyniki obliczeń zamieszczone w pracy stanowią istotny materiał źródłowy w dyskusji nad koniecznością udoskonalenia metod oceny i wyboru rekomendowanego wariantu inwestycyjnego. Sama metoda może być zaś dalej rozwijana i udoskonalana, a jej wdrożenie do praktyki inżynierskiej uzależnione jest od dostępności aktualnych baz danych zawierających właściwości materiałów i wyrobów budowlanych, parametrów technicznych urządzeń, kosztów prac oraz cen energii.

3. Zakres i struktura rozprawy

Praca pt. „Wielokryterialna metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków” została przygotowana w formie maszynopisu. Część zasadnicza pracy, składająca się z 9 rozdziałów liczy łącznie 148 stron i nie posiada załączników. Wielkość rozdziałów głównych, rozdziały 2-8, w tym zawierających oryginalne wyniki obliczeń Autorki jest do siebie zbliżona i właściwa. Znacznie mniej obszerne, co wynika z ich specyfiki są 2 rozdziały: 1) Wstęp i 9) Zakończenie - Wnioski. W pracy zamieszczono jedynie 6 rysunków i aż 77 tabeli, bez ich zestawienia na końcu opracowania. Brakuje także spisu użytych symboli, indeksów i skrótów co niewątpliwie ułatwiłoby czytanie rozprawy i interpretację podanych wzorów. Natomiast na końcu pracy zamieszczono streszczenie w języku polskim i angielskim. Dodatkową dyskusję wyników znaleźć można w każdym z rozdziałów opisujących analizy dla poszczególnych przypadków, rozdziały 6-8.

Praca rozpoczyna się bardzo ogólnym i krótkim „Wstępem” uzasadniającym podjętą tematykę a także zawierającym tezę, cele i zakres rozprawy, rozdział 1. W rozdziale 2 podjęto próbę scharakteryzowania składników mających wpływ na efektywność energetyczną budynków. Rozdział 3 to przegląd aktualnego stanu wiedzy na temat metod optymalizacji wielokryterialnej, zaś rozdział 4 dotyczy energetyczno-ekonomicznych kryteriów oceny budynków i inwestycji budowlanych. W rozdziale 5 o charakterze teoretycznym opisano zaproponowaną metodę wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynku wraz z dwoma sposobami jego obliczania: hybrydowym i bezpośrednim. Następne 3 rozdziały nazwane jako studia przypadków, to tak naprawdę analizy parametryczne wykonane dla

przykładowego, jednorodzinnego budynku mieszkalnego. W rozdziale 6 przyjęto, że jest to budynek modernizowany i do wyznaczenia globalnego wskaźnik energochłonności zastosowano metodę hybrydową. Natomiast w rozdziałach 7 i 8 przeprowadzono analizę dla budynku nowoprojektowanego z wykorzystaniem obu metod, hybrydowej (rozdział 7) i bezpośredniej (rozdział 8). Ostatni, 9 rozdział poza najważniejszymi wnioskami, zawiera odniesienie do jej tezy oraz realizacji poszczególnych celów rozprawy. W pracy wykorzystano łącznie 251 pozycji bibliograficznych w tym monografie, artykuły naukowe (w znacznej części anglojęzyczne) i referaty konferencyjne, w większości powiązane z tematyką rozprawy. W większości są to prace, które ukazały się po roku 2000. Brakuje natomiast publikacji własnych Doktorantki. Ponadto przywołano 7 aktów prawnych, 21 norm, patentów lub raportów, oraz 7 odniesień do źródeł internetowych.

4. Ocena formalna

Przedstawiona praca ma charakter teoretyczno-obliczeniowy z obszaru fizyki budowli i dotyczy zagadnień efektywności energetycznej budynków. Istotnym elementem pracy są kwestie związane z optymalizacją wielokryterialną z wykorzystaniem aktualnych, zaawansowanych metod teoretycznych.

Celami pracy było:

1. *Opracowanie nowej, uniwersalnej metody wyboru optymalnej kombinacji składników określających energochłonność budynków za pomocą proponowanego, globalnego wskaźnika energochłonności.*
2. *Weryfikacja zaproponowanej metody na podstawie studiów przypadków, obejmujących zarówno budynek modernizowany, jak i budynek nowoprojektowany.*
a także
3. *Opracowanie bazy danych zawierającej wymagane parametry składników wpływających na energochłonność budynków wraz z charakterystyką ich właściwości, kosztów wbudowania, okresów trwałości, emisyjności CO₂.*
4. *Opracowanie bazy danych obejmujących wymagane parametry architektoniczne, funkcjonalne, konstrukcyjne, budowlane i instalacyjne budynku referencyjnego/bazowego.*
5. *Wybór kryteriów oceny składników i wariantów rozwiązań konstrukcyjnych, budowlanych i instalacyjnych wpływających na energochłonność budynku i obliczenie bezwzględnych wartości kryteriów: względnego rocznego zapotrzebowania na energię końcową, kosztu, trwałości, czasu zwrotu nakładu inwestycyjnego dla budynku bazowego, emisyjności CO₂.*
6. *Opracowanie autorskiego programu obliczeniowego, którego podstawą jest algorytm zawierający wszystkie równania opisujące proponowaną metodę wielokryterialnej oceny energochłonności budynków.*

Moim zdaniem, oryginalna i najbardziej cenna z naukowego punktu widzenia jest realizacja celu 1. Ponadto uważam, że w ramach celu 2, dokonano raczej analizy parametrycznej niż weryfikacji zaproponowanej metody. W treści pracy brakuje ponadto opracowanych baz danych, które moim zdaniem powinny być dość obszerne i umieszczone w załącznikach. Nie znalazłem także opisu lub przynajmniej wzmianki na temat opracowanego, autorskiego programu obliczeniowego, a jedynie algorytmy obliczeń. Tym samym sugeruję, aby wykazane elementy zostały uzupełnione i przedstawione w prezentacji końcowej.

Autorka sformułowała następującą tezę rozprawy „*Możliwe jest wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku na podstawie metody optymalizacji wielokryterialnej*”, która została udowodniona na podstawie przeprowadzonych analiz i uzyskanych wyników.

Praca ma klasyczny układ rozprawy doktorskiej. Część autorska, teoretyczna, obliczeniowa i analityczna pracy została poprzedzona przeglądem aktualnego stanu wiedzy. Rozdziały ułożone są we właściwym porządku, choć brakuje pewnych elementów, takich jak spis symboli, tabel i rysunków. Brakującym elementem wydaje się być także wyznaczenie globalnego wskaźnika energochłonności budynku istniejącego sposobem bezpośrednim. Niewątpliwie cenne w kontekście całej pracy jest określenie dla każdego z przypadków wpływu na uzyskane wyniki przyjętych wag kryterialnych i ich kombinacji.

Biorąc pod uwagę łączną liczbę stron, recenzowaną pracę należy uznać za typową. Praca stanowi opracowanie spójne, nakierowane na rozwiązanie szczegółowego problemu. W mojej opinii praca jest natomiast dość skromna ze względu na zakres oraz liczbę przeanalizowanych przypadków (zarówno pod względem rozwiązań budowlanych jak i instalacyjnych), a także uzyskanych wyników. Dobór metod badawczych, sposób przeprowadzenia analiz, przyjęty zakres badań, jak i zawartość całej rozprawy nie budzą zastrzeżeń.

Praca została napisana prawidłową polszczyzną z niewielką liczbą błędów edytorskich. Autorka dokonała analizy uzyskanych wyników i ich dyskusji, osobno na każdym etapie pracy. Przeprowadziła rzetelną dyskusję wyników i precyzyjnie sformułowała wnioski końcowe. Drobne błędy o charakterze ogólnym bądź redakcyjnym, a także nieprecyzyjne sformułowania wykazane w dalszej części recenzji nie mają wpływu na całościową, pozytywną ocenę.

5. Ocena merytoryczna

Ze względu na trafnie sformułowany problem naukowy, satysfakcjonujący zakres wykonanych obliczeń i analiz, prawidłową interpretację uzyskanych wyników oraz umiejętność sformułowania wniosków, moja ocena merytoryczna prezentowanej pracy jest wysoka. Jednakże dokładna analiza tekstu rozprawy nakłada na mnie obowiązek sformułowania kilku uwag będących przyczynkiem do dyskusji przed lub w trakcie publicznej obrony, nie podważających jednakże pierwotnej oceny.

5.1. Uwagi wymagające odpowiedzi w czasie publicznej obrony

5.1.1. Pierwsze pytanie dotyczy potencjału wykorzystania zaproponowanego podejścia w praktyce. W pracy zabrakło odniesienia do istniejącej metody wyboru wariantów optymalnych przedsięwzięć modernizacyjnych, stosowanych na przykład w audytingu energetycznym budynków. Brakuje odniesień do innych opracowań w tym zakresie, na przykład prac Aleksandra Dariusz Panka i Jerzego Sowy takich jak „*Energy performance indicator and energy performance requirements: a Polish approach to implementation of EPBD*”,

5.1.2. Uwaga druga związana jest z charakterem uzyskanych zależności wartości wskaźnika energochłonności $\Delta_{ec,v}$ w funkcji parametru redystrybucji β (rys. 6.2, 7.1 i 8.1). W większości przypadków zależność tę można aproksymować funkcją liniową, zaś w pozostałych krzywą. Na przykład dla budynku nowoprojektowanego z wykorzystaniem bezpośredniego sposobu wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności, zależności krzywoliniowe dotyczą wariantów, w których występuje kocioł na pelet. Dlaczego akurat to źródło zasilania w ciepło powoduje zmianę charakteru zależności?

5.2.3. Trzecie pytanie nawiązuje do przyjętych sposobów wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności. W przypadku budynku modernizowanego pokazano bowiem jedynie analizę z wykorzystaniem sposobu hybrydowego. Czy możliwe jest stwierdzenie, który ze sposobów, hybrydowy lub bezpośredni jest zalecany do zastosowania w budynkach modernizowanych, który zaś w budynkach nowoprojektowanych?

5.2. Pozostałe uwagi merytoryczne

5.2.1. Czy zaproponowana metoda jest możliwa do rozbudowania o zagadnienia związane z oceną śladu węglowego?

5.2.2. Na stronie 7 autorka podaje graniczne wartości zapotrzebowania na ciepło/energię, a w zasadzie wskaźniki zapotrzebowania. Proszę o doprecyzowanie jakiej energii one dotyczą, użytkowej, końcowej czy pierwotnej?

5.2.3. Czy przyjęte w analizie względne zapotrzebowanie na energię końcową nie powinno być nazwane wskaźnikiem zapotrzebowania na energię końcową, EK? Dlaczego przy jego wyznaczaniu odniesiono się do powierzchni użytkowej, nie zaś do powierzchni pomieszczeń o regulowanej temperaturze powietrza wewnętrznego?

5.2.4. Kryteria przyjęte do analizy (takie jak: zapotrzebowanie na energię końcową, koszt i czas zwrotu nakładu) są częściowo współzależne. Czy w takiej sytuacji możliwe byłoby ograniczenie ich liczby, pomijając na przykład kryterium kosztu lub czasu zwrotu inwestycji?

5.2.5. Przedstawiona lista składników wpływających na efektywność energetyczną (rozdział 2.2) jest niepełna. Brakuje opisu wyrobów stolarki okiennej i drzwiowej, mających istotny wpływ na różne elementy bilansu cieplnego budynku, straty ciepła przez przenikanie i na podgrzanie powietrza wentylacyjnego oraz zyski ciepła od promieniowania słonecznego.

5.2.6. Wybór materiałów i komponentów opisanych w sekcji 2.2.1 „konstrukcja nośna” jest niejednoznaczny i nieadekwatny. Niektóre podpunkty dotyczą materiału tworzywa, na przykład ceramika, beton, silikaty. Niektóre natomiast konkretnych wyrobów, na przykład pustak gipsowy, betonowa perforowana cegła warstwowa. Nie wszystkie z nich można uznać za materiał konstrukcyjny lub użycie ich jako materiału konstrukcyjnego posiada znaczne ograniczenia (gips). Niektóre z nich to wyroby niszowe, takie jak stabilizowana cegła ziemna. Istotnym mankamentem całego zestawienia przedstawionego w punkcie 2.2 jest brak podania właściwości fizycznych materiałów i wyrobów budowlanych. Podobnie w grupie instalacje dobrze byłoby podać podstawowe informacje techniczne, na przykład sprawności urządzeń.

5.2.7. Dlaczego w odniesieniu do kotłów kondensacyjnych Autorka odwołuje się do Niemieckiego Rozporządzenia w sprawie oszczędzania energii (str. 35), podczas gdy istnieją polskie przepisy prawne regulujące te kwestie?

5.2.8. W punkcie „Chłodzenie”, 2.3.2, Doktorantka opisuje jedynie jeden system i w dodatku dość nietypowy. Punkt ten należałoby uzupełnić o opis pozostałych systemów.

5.2.9. Definicja „energii końcowej” podana na stronie 52 jest tak naprawdę definicją energii dostarczonej. Czy w obliczeniach rozróżniano te pojęcia, zwłaszcza w sytuacji gdy stosowano systemy wytwarzające odnawialną energię na miejscu, na przykład panele PV.

5.2.10 Proszę uzasadnić wybór powierzchni użytkowej, a nie powierzchni o kontrolowanej temperaturze wewnętrznej do wyznaczania względnego zapotrzebowania na energię, str. 52.

5.2.11 Systemy materiałowe i konstrukcyjne nie są to systemy techniczne budynku, str. 54. Zwyczajowo przyjmuje się, że systemy techniczne dotyczą jedynie instalacji i urządzeń.

5.2.12. Na jakiej podstawie przyjęto krotność wymiany powietrza dla budynków mieszkalnych i biurowych, str. 56?

5.2.12. Przyjęcie wewnętrznych zysków ciepła na podstawie pracy Kaczmarzyk i in. (2020), str. 57 jest niezasadne. Publikacja dotyczy budynków zlokalizowanych na księżycu i innych warunków użytkowania. Istnieje wiele źródeł naukowych określających te wartości dla warunków ziemskich.

5.2.13. Dlaczego w podrozdziale 4.3. pominięto koszty ewentualnych remontów i modernizacji, które są niezbędne do wykonania w okresie eksploatacji obiektów budowlanych? Czy w analizie uwzględniono wpływ trwałości, str. 61, na liczbę cykli użytkowania $N_{C,i}$ a tym samym koszty, str. 60.

5.2.14. Proszę o wyjaśnienie dlaczego w analizie (na przykład strona 82) zakłada się zawsze tę samą grubość materiału izolacyjnego, różnicując jego rodzaj a tym samym współczynnik przewodzenia ciepła? Takie podejście powoduje uzyskanie innych parametrów izolacyjności cieplnej, a tym samym preferuje rozwiązania o niższym współczynniku λ . Tym bardziej, że docelowo zakładane jest spełnienie wymagań sformułowanych w Warunkach Technicznych (str. 87). Czy nie lepszym podejściem byłoby założenie, że warstwy poszczególnych izolacji powinny charakteryzować się takim samym oporem cieplnym uzyskanym przy różnych grubościach?

5.2.15. Podając projektowany czas użytkowania obiektu budowlanego P_i nieuzasadnione jest wpisywanie tak dokładnej wartości tego parametru, na przykład tabela 6.5.

5.2.16. Dla wyników zamieszczonych w tabeli 6.17 i 6.18 nie doprecyzowano czego dotyczą wartości oznaczone odpowiednio czcionką czarną i czerwoną.

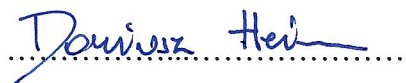
6. Uwagi o charakterze edytorskim i ogólnym

Autorka w tekście pracy używa niezbyt trafnych określeń, które przy dalszej publikacji wyników rozprawy należałoby skorygować. Są to na przykład pojęcia: „składniki te ulegają utlenieniu”, str. 18; „mikrokapsułowane materiały do przemiany fazowej”, str. 21; „stabilna cegła ziemna”, str. 23; „charakteryzuje się interesującym zachowaniem”, str. 25, „gliny bez luz”, str. 26, „formowanie dowolnego mikroklimatu”, str. 37, „współczynnika oporu cieplnego materiału”, str. 56, „grzejniki czołowe”, str. 78, „przyjmowane są”, str. 101, „przeznaczony do”, str. 102, „kotłem zgazowującym”, str. 104. Pozostałe błędy o charakterze edytorskim występują w niewielkiej liczbie i nie zostały przytoczone w niniejszej recenzji.

7. Wniosek końcowy

Uwagi jakie zawarłem w swojej opinii w dużym stopniu mają charakter dyskusyjny i nie podważają w istotny sposób wartości naukowej pracy, jak również nie obniżają pozytywnej oceny samej Doktorantki. Stwierdzam, że Autorka opracowania podejmując istotny problem naukowy rozwiązała go samodzielnie, poprawnymi metodami badawczymi przez co wykazała się umiejętnością wymaganą od osób ubiegających się o stopień doktora. Otrzymane wyniki wnoszą nowe elementy do wiedzy w obszarze optymalizacji energetycznej budynków, w ramach dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport, które obok aspektu teoretycznego posiadają również istotną wartość użytkową.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Aleksandry Stachery pt.: „Wielokryterialna metoda wyznaczania globalnego wskaźnika energochłonności budynków” spełnia wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 wraz z późniejszymi zmianami), dlatego wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie o jej przyjęcie i dopuszczenie Kandydatki do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Dariusz Heim

