

**prof. dr hab. inż. Halina Koczyk**

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych

Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza

ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań

Poznań, 17 marca 2022r.

## **Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Chwieduka pt.

**„Analiza sezonowej efektywności energetycznej wieloźródłowych  
niekonwencjonalnych systemów energetycznych mikro skali”**

Promotor: dr hab. inż. Hanna Jędrzejuk

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego (nr pisma RND-IŚGiE/7/2022) zgodnie z Uchwałą nr 3/II/2022 RNDIŚiE z dnia 11.01.2022 roku (data otrzymania pisma 27.01.2022).

### **2. Krótka charakterystyka pracy**

Praca pt. **„Analiza sezonowej efektywności energetycznej wieloźródłowych niekonwencjonalnych systemów energetycznych mikro skali”** obejmuje 216 stron wraz z tablicami i rysunkami oraz dodatkowo 35 stron załączników.

Bibliografia pracy zawiera 127 pozycji literatury, w tym 52 angielskojęzyczne, 4 ustawy rozporządzenia, dyrektywy oraz 14 norm, a także 34 zasoby internetowe. W bibliografii znajduje się jedna pozycja Autora.

Problematyka pracy wiąże się z projektowaniem i analizą zaawansowanych technologicznie niekonwencjonalnych źródeł energii stosowanych w budownictwie mieszkalnym wielo- i jednorodzinym. W projektowaniu takich systemów energetycznych niezbędne jest podejście interaktywne związane ze współpracą projektantów architektury, konstrukcji, technicznego wyposażenia budynków i systemów zaopatrzenia w energię, a więc projektowanie zintegrowane.

Praca dotyczy analizy zużycia energii przez systemy technicznego wyposażenia budynków (TWB) zaopatrywanych w energię poprzez **wieloźródłowe systemy energetyczne** mikro skali oraz oceny ich efektywności energetycznej. Jest to problematyka aktualna i bardzo ważna nie tylko z technicznego ale również ekonomicznego i ekologicznego punktu widzenia.

Każde działanie naukowe i techniczne służące ograniczeniu zużycia energii pierwotnej przyczynia się nie tylko do efektów ekonomicznych, ale przede wszystkim do mniejszego zanieczyszczenia środowiska w procesach użytkowania paliw i tym samym przybliża do zrównoważonego czerpania zasobów naturalnych.

Główne cele poznawcze pracy to:

- opracowanie metodyki **analizy efektywności energetycznej** wieloźródłowych **niekonwencjonalnych systemów energetycznych** stosowanych w budownictwie mieszkalnym jedno- i wielorodzinnym,
- stworzenie, podanie zasad wyznaczania i ocena stosowalności rodziny współczynników oceny efektywności energetycznej badanych niekonwencjonalnych źródeł energii opisujących ich współpracę z systemami TWB wraz z rekomendacją wybranych współczynników
- dokonanie analizy zużycia energii i struktury tego zużycia przez systemy TWB wybranego budynku modelowego przy różnych założeniach wejściowych dotyczących schematów technologicznych wieloźródłowych niekonwencjonalnych systemów energetycznych i układów sterowania, a także profili użytkowania,
- przeprowadzenie analizy zużycia energii i ocena efektywności energetycznej niekonwencjonalnych systemów energetycznych zainstalowanych w budynku rzeczywistym w celu weryfikacji wyników analiz teoretycznych.

Cały tekst jest podzielony na osiem rozdziałów poza streszczeniem, wykazem najważniejszych oznaczeń i bibliografią.

W części wstępnej (rozdziały 1 – 2) zawarto wprowadzenie, cel i zakres pracy, sformułowanie tez.

W rozdziale 3 scharakteryzowano rozwiązania instalacyjne będące przedmiotem rozważań w rozprawie. Podstawowe wyposażenie techniczne budynku modelowego to: instalacje ogrzewania, wentylacji i przygotowania ciepłej wody użytkowej, a dla wybranych wariantów również chłodzenie.

Spośród źródeł energii i ich elementów dedykowanych dla zaopatrzenia w energię elektryczną i ciepłą nowoczesnego budownictwa mieszkalnego wzięto pod uwagę: gruntowe pompy ciepła, termiczne kolektory słoneczne, mikroinstalacje fotowoltaiczne, moduły fotowoltaiczno-ciepne, małe turbiny wiatrowe, elektrownie dwuźródłowe oraz chłodzenie słoneczne.

Z tych elementów skompletowano dziesięć rozwiązań źródła energii, a mianowicie:

- gruntowa pompa ciepła (**PC**) pokrywająca potrzeby c.o. i kolektory słoneczne (**KS**) wspomagane konwencjonalnym podgrzewaczem (**P**) na potrzeby c.w.u. – **A1**,
- gruntowa pompa ciepła (**PC**) i kolektory słoneczne (**KS**) na potrzeby c.o. i c.w.u. z podgrzewaczem dodatkowym (**P**) – **A2**,
- gruntowa pompa ciepła (**PC**) i kolektory słoneczne (**KS**) na potrzeby c.o. i c.w.u. oraz instalacja fotowoltaiczna podłączona do sieci elektroenergetycznej „on grid” – **B1**,
- (**PC**) i (**KS**) oraz turbiny wiatrowe włączone do sieci elektroenergetycznej – **B2**,
- (**PC**) i (**KS**) zasilane przez moduły fotowoltaiczne oraz turbinę wiatrową włączone do sieci elektroenergetycznej – **B3**,
- (**PC**) i moduły (**PV/T**) włączone do sieci elektroenergetycznej – **B4**,
- gruntowa pompa ciepła (**PC**) i kolektory słoneczne (**KS**) na potrzeby c.o. i c.w.u. oraz instalacja fotowoltaiczna niepodłączona do sieci elektroenergetycznej „off grid” – **C1**,
- (**PC**) i (**KS**) oraz turbiny wiatrowe niewłączone do sieci elektroenergetycznej – **C2**,
- chłodzenie zasilane przez mikroinstalację fotowoltaiczną „on grid” – **D1**,
- gruntowa pompa ciepła (**PC**) i kolektory słoneczne (**KS**) na potrzeby c.o. i c.w.u. oraz instalacja fotowoltaiczna, na potrzeby chłodzenia, oświetlenia, AGD i RTV, podłączona do sieci elektroenergetycznej „on grid” – **D2**.

Do analizy i oceny rozwiązań badanych niekonwencjonalnych źródeł energii zaproponowano własne współczynniki efektywności energetycznej:

- zintegrowany współczynnik efektywności energetycznej  $SPF_1$  wyrażający stosunek energii użytkowej na cele c.o. i c.w.u. do energii elektrycznej pobranej z sieci elektroenergetycznej na pokrycie tych potrzeb,
- współczynnik efektywności wykorzystania energii odnawialnej  $REF$  podający stopień wykorzystania instalacji wyspowej wytwarzającej energię elektryczną na pokrycie całkowitego zapotrzebowania energii elektrycznej w budynku autonomicznym,
- współczynnik sezonowej efektywności energetycznej chłodzenia  $SPF_c$  wyrażający stosunek energii użytkowej na cele chłodzenia do energii elektrycznej pobranej z sieci elektroenergetycznej na pokrycie tych potrzeb.

Rozdziały 4, 5, 6, 7 stanowią podstawową badawczą część pracy.

W rozdziałach 4, 5, 6 zaprezentowano analizę symulacyjną wyspecyfikowanych poprzednio rozwiązań źródła energii dla modelowego domu jednorodzinnego (tzw. hipotetycznego) poddanego oddziaływaniu otoczenia zewnętrznego.

Rozdział 4 prezentuje podstawowe zależności modeli obliczeniowych funkcjonowania instalacji **KS**, **PV** i **PV/T**, które pozwalają wyznaczyć zyski: cieplne oraz energii elektrycznej, a także modelu funkcjonowania małej elektrowni wiatrowej.

W obliczeniach zysków słonecznych przyjęto model anizotropowy promieniowania słonecznego **HDKR** (Haya, Daviesa, Reindla i Kluchera). Do określenia profilu prędkości wiatru posłużono się tzw. wzorem logarymicznym, natomiast do wyznaczenia zysków energetycznych wywołanych oddziaływaniem wiatru posłużono się uśrednionymi danymi 10-minutowymi jego prędkości.

W modelach funkcjonowania instalacji słonecznych wykorzystano dane katalogowe **KS** określające ich moc użyteczną i dane techniczne modułów **PV** i **PV/T**, które pozwalają wyznaczyć zmienność temperatury ogni w zależności od warunków atmosferycznych.

W modelu ogrzewania słonecznego wykorzystano dodatkowo równanie bilansu cieplnego akumulatora ciepła oraz bilans potrzeb cieplnych budynku modelowego. W obliczeniach zapotrzebowania energii użytkowej na cele ogrzewania i wentylacji w sezonie grzewczym posłużono się aktualnie obowiązującą metodologią wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku, zawartą w rozporządzeniu ministerialnym.

W rozdziale 5 przedstawiono przyjęty do symulacji energetycznych jednorodzinny **budynek modelowy** położony w **Warszawie**, podano jego ogólną charakterystykę wymiarową i cieplną oraz wyniki obliczeń podstawowych bilansów energetycznych budynku. Zaprezentowano wyniki obliczeń zapotrzebowania na:

- energię elektryczną do zasilania urządzeń **RTV, AGD i oświetlenia** dla dwóch profili użytkownika domu (zużycia energii elektrycznej),
- energię użytkową na cele **przygotowania c.w.u.** dla dwóch profili zużycia c.w.u.,
- energię użytkową na cele **ogrzewania i wentylacji** oraz **chłodzenia**.

W rozdziale 6 przedstawiono analizę efektywności działania badanych niekonwencjonalnych źródeł energii zasilających systemy **TWB** wybranego **budynku modelowego** przy różnych założeniach wejściowych dotyczących źródła energii.

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla **dziesięciu rozwiązań źródła energii** scharakteryzowanych w rozdziale trzecim, a do oceny ich efektywności wykorzystano zaproponowane przez Autora **własne współczynniki efektywności energetycznej**.

Celem obliczeń porównawczych było:

- opracowanie wskazań praktycznych dotyczących zasad doboru wybranych elementów symulowanych źródeł energii,
- ocena przydatności zaproponowanych współczynników efektywności energetycznej rozwiązań niekonwencjonalnych źródeł energii oraz opracowanie zaleceń co do ich stosowania.

Rozdział 7 zawiera wyniki analizy zużycia energii i oceny efektywności energetycznej niekonwencjonalnych systemów energetycznych zainstalowanych w budynku rzeczywistym w celu weryfikacji wyników analiz teoretycznych, w tym zwłaszcza zaproponowanego przez Doktoranta zintegrowanego współczynnika efektywności energetycznej **SPF<sub>1</sub>**. Współczynniki efektywności istniejących instalacji **KS** i **PV** wyznaczono w oparciu o wyniki pomiarów w rzeczywistym roku klimatycznym (1.07.2019 – 30.06.2020), a także na podstawie wieloletnich uśrednionych danych meteorologicznych z wykorzystaniem profili: zużycia energii elektrycznej **X1** oraz zużycia ciepłej wody **Y1**.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie wyników pracy.

Załączniki stanowią uzupełnienie danych wejściowych oraz prezentację wybranych szczegółowych obliczeń i zawierają:

- dane techniczne urządzeń stanowiących komponenty porównywanych systemów,
- obliczeniowe opory cieplne komponentów budowlanych budynku modelowego,

- profile zużycia energii elektrycznej przez urządzenia zainstalowane w budynku,
- analizę funkcjonowania instalacji z kolektorami słonecznymi w wybranych dniach roku dla dwóch przyjętych profili zużycia c.w.u.,
- analizę podstawowych wielkości wyjściowych dla funkcjonowania systemu z turbinami wiatrowymi (zmiennosc średniej 10-minutowej prędkości wiatru dla dwóch lat, charakterystyki mocy dwóch wybranych turbin i charakterystyki sprawnościowe inwerterów),
- obliczeniowe opory cieplne komponentów budowlanych budynku rzeczywistego.

Cele badawcze pracy zostały zrealizowane szczegółowo i wyczerpująco, a postawione tezy rozprawy – udowodnione.

### 3. Uwagi krytyczne

W trakcie przygotowania oceny zaprezentowanego w pracy zakresu rozwiązania szczegółowych zadań nasunęły mi się uwagi krytyczne wyrażające raczej niedociągnięcia opisowe pracy lub wynikające z mojego dalszego zainteresowania wynikami rozprawy:

1. Niezależnie od zastosowanej metody projektowania (tradycyjne, wspomagane komputerowo, zintegrowane) najistotniejszym etapem procesu projektowania jest dobór urządzeń (ich mocy i charakterystyk) wraz z układem sterowania w nawiązaniu do wielkości i charakteru zmienności obciążeń energetycznych. Czy przeprowadzone obliczenia pozwoliły Autorowi na opracowanie wskazówek dotyczących relacji między projektowanymi mocami i charakterystykami urządzeń a obciążeniami budynku?
2. Praca zawiera wyniki analiz dziesięciu rozwiązań niekonwencjonalnych źródeł energii dostosowanych do współpracy z instalacjami domów mieszkalnych jednorodzinnych. Interesująca byłaby ocena nakładu pracy: na przygotowanie modelu obliczeniowego rozwiązania oraz czasu pracy komputera dla przeprowadzenia oceny: źródła energii i jego efektywności. Czy należy symulować pełen rok meteorologiczny czy wybrane okresy roku?
3. W modelowaniu klimatu zewnętrznego posłużono się różnymi danymi meteorologicznymi. Czy wykonane obliczenia pozwalają Autorowi na rekomendację danych meteorologicznych lub modeli klimatu zewnętrznego w dostępnych bazach?

4. W prezentacji wyników zarówno tabelarycznej jak i graficznej ujęto przebiegi dobowe lub roczne wielkości wejściowych do modelu obliczeniowego (dane meteorologiczne lub klimatyczne) oraz wielkości wyjściowych (zapotrzebowania energii, sprawności i współczynniki efektywności elementów źródeł, a także parametrów eksploatacyjnych, np. temperatury, czasu ładowania). Czy na ich podstawie można wskazać sposób prezentacji najbardziej przydatny do oceny rozwiązań w praktyce projektowej?

Inne uwagi szczegółowe dotyczą głównie obliczeń cieplnych budynku,

1. W obliczeniach obejmujących opory cieplne przegród przyjęto dla wszystkich przegród opory przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej jak dla przegród pionowych.
2. W wyznaczaniu oporu cieplnego podłogi na gruncie pominięto opór przejmowania po stronie wewnętrznej, a dla dachu zawyżono opór cieplny warstwy powietrznej.
3. W obliczeniach dla budynku rzeczywistego zaniżono współczynnik przenoszenia ciepła na drodze wentylacji.

Istnieje również kilka drobniejszych przeoczeń i błędów literowych, których nie przytaczam.

Przedstawione uwagi krytyczne nie umniejszają wartości pracy. Większość z nich jest dyskusyjna, a w przypadku pozostałych chciałam zwrócić uwagę na możliwość wprowadzenia korzystnych poprawek redakcyjnych przed dalszymi publikacjami.

#### **4. Ocena pracy**

Podsumowując uważam, że Doktorant przedstawił wartościową pracę wnoszącą nowe elementy do problematyki projektowania i oceny efektywności zaawansowanych technologicznie systemów zaopatrzenia w energię budynków mieszkalnych.

Mogę stwierdzić, że Doktorant wykazał znajomość literatury przedmiotu, umiejętność formułowania i rozwiązywania problemów naukowych.

Przedstawione w rozprawie doktorskiej wyniki mają wartości poznawcze, a jednocześnie stwarzają podstawę do ich wykorzystania w praktyce w sektorze energetycznym.

W stosunku do całej rozprawy mogę stwierdzić, że Doktorant dobrze opanował warsztat pisania rozpraw naukowych. Odnośniki literaturowe wskazują, że posiada także niezbędną orientację w bibliografii obejmującej podejmowane zagadnienia.

Całość oceny sprawia, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Ponadto biorąc pod uwagę aktualność tematyki, zakres opisanych prac i kompletność zrealizowanych obliczeń symulacyjnych w budynku modelowym, z częściową weryfikacją wyników modelu w budynku rzeczywistym, włącznie, można stwierdzić, że w kategorii rozpraw doktorskich o charakterze symulacyjno-eksperymentalnym zasługuje ona na wyróżnienie.

## **5. Wniosek końcowy**

Uwzględniając odnotowane oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze Doktoranta w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, jak również poznawcze i użyteczne walory rozprawy, a także to, że przedstawione uwagi o charakterze dyskusyjnym nie podważają jej podstawowych wartości stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Bartosza Chwieduka spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Z pełnym przekonaniem stawiam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

