

Dr hab. inż. Marcin Trojan, prof. PK
Katedra Procesów Ciepłych, Ochrony Powietrza i
Utylizacji Odpadów
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Kraków, 28.08.2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Oluwafunmilola Oladipo

pt. „Mathematical modelling of a HVAC system powered by photovoltaic panels incorporated with a seasonal thermal storage for a singlefamily plus-energy home”

1. Podstawa opracowania

Recenzję opracowano w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej nr 985/43/RDND08/2021-2024 z dnia 12 czerwca 2024 roku.

2. Informacje ogólne

Oceniana rozprawa doktorska wykonana została na Politechnice Wrocławskiej w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka pod kierunkiem Pana Prof. dr. hab. inż. Jacka Kasperskiego, pełniącego w przewodzie doktorskim obowiązki promotora.

Praca doktorska została napisana w języku angielskim i liczy łącznie 170 stron tekstu zasadniczego. Praca doktorska zawiera 7 rozdziałów (str. 14-158), które poprzedza streszczenie w języku polskim, streszczenie w języku angielskim, podziękowania, przedmowa, spis treści, spis rysunków oraz wykaz stosowanych symboli. Na końcu pracy doktorskiej zamieszczona została bibliografia zawierająca 209 pozycji reprezentatywnych dla tematu dysertacji, w tym dwie współautorskie doktorantki (str. 159-170) oraz 7 rysunków w postaci przekrojów i widoków analizowanego budynku.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 21.08.2024

3. Ocena tematyki pracy

Praca doktorska dotyczy koncepcji innowacyjnego systemu magazynowania ciepła zasilanego energią elektryczną wyprodukowaną przez instalację fotowoltaiczną. W rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki symulacji komputerowych pracy proponowanego systemu w oparciu o opracowane modele matematyczne, a także wyniki badań eksperymentalnych wybranych materiałów do magazynowania energii cieplnej oraz wybranych materiałów stosowanych jako izolacje.

Podjęta tematyka ma istotne znaczenie przede wszystkim pod kątem efektywności energetycznej budynków. Optymalizacja zużycia energii w budynkach, redukcja kosztów ogrzewania i chłodzenia, zmniejszenie strat energii, magazynowanie sezonowe, czy wykorzystanie zintegrowanych systemów energetycznych przekłada się na znaczne oszczędności finansowe dla konsumentów oraz zwiększa stabilność systemu energetycznego. Skuteczne magazynowanie energii zarówno cieplnej jak i elektrycznej może pomóc w ograniczeniu zużycia paliw kopalnych, a tym samym emisji gazów cieplarnianych. Proponowany w pracy doktorskiej system może być alternatywą dla tradycyjnych systemów grzewczych opartych na spalaniu paliw.

Z uwagi na złożoność zagadnienia, wynikającą z konieczności uwzględnienia, zarówno na etapie opracowania koncepcji systemu, jak i w opisie matematycznym:

- zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło w długim okresie
- dostępność energii słonecznej w ciągu roku
- optymalizacji sezonowego magazynu ciepła pod kątem wyboru odpowiedniego medium magazynującego ciepło oraz minimalizacji strat ciepła na przestrzeni miesięcy
- odpowiedniego skalowania systemu magazynującego w celu zapewnienia stabilności temperaturowej
- integrację systemów zapewniającą przepływ energii elektrycznej i cieplnej w zależności od bieżących potrzeb i warunków
- koszty inwestycyjne

podjęta tematyka jest trudna i wymagająca przemyślanych badań. Biorąc pod uwagę powyższe, a także prowadzoną politykę klimatyczną zmierzającą do ograniczenia emisji CO₂ i promowania zrównoważonego rozwoju, rosnące ceny energii oraz potrzebę stabilności i niezależności energetycznej należy stwierdzić, że **tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Oluwafunmilola Oladipo jest ważna i aktualna**. Aktualność podjętej tematyki potwierdza również duża ilość publikacji naukowych z ostatnich lat cytowanych w pracy.

4. Cel i zakres pracy

Głównym celem badań przedstawionych w pracy doktorskiej było opracowanie koncepcji zrównoważonego systemu ogrzewania, wentylacji i chłodzenia domu jednorodzinnego, połączonego z sezonowym magazynem energii cieplnej, co wiązało się z udowodnieniem postawionych tez:

- Możliwe jest zaprojektowanie systemu energetycznego dla domu jednorodzinnego o dodatnim zużyciu energii dla 4 mieszkańców we Wrocławiu w Polsce
- Energia elektryczna generowana przez instalację fotowoltaiczną zainstalowaną na dachu takiego domu może nie tylko zaspokoić potrzeby energetyczne związane z ogrzewaniem, chłodzeniem i zużyciem przez urządzenia elektryczne, ale także wygenerować nadwyżki, które można sprzedać do sieci elektroenergetycznej
- Możliwe jest zaprojektowanie efektywnego magazynu ciepła, wykonanego z dobrze izolowanych bloków ceramicznych, granitowych lub betonowych, który ładowany energią elektryczną z paneli fotowoltaicznych może zaspokoić całoroczne zapotrzebowanie na ogrzewanie pomieszczeń
- Proponowane rozwiązanie magazynowania ciepła można zoptymalizować.

Osiągnięcie założonego celu i udowodnienie postawionych tez Autorka uzyskała poprzez realizację przyjętego planu pracy, obejmującego:

- zdefiniowanie problemu i analizę aktualnego stanu wiedzy w odniesieniu do podjętej tematyki
- opracowanie koncepcji systemu bazującego na odnawialnych źródłach energii i wykorzystującego sezonowy magazyn energii cieplnej, pozwalającego na pokrycie zapotrzebowania na energię domu jednorodzinnego o powierzchni 70 m²
- budowę modelu matematycznego proponowanego systemu HVAC – PVPSTS
- projekt i budowę stanowiska laboratoryjnego stosu cieplnego i materiałów izolacyjnych
- badania doświadczalne na przygotowanym stanowisku badawczym w celu weryfikacji poprawności równania wymiany ciepła zaproponowanego do opisanego strat ciepła spowodowanych przewodzeniem ze stosu cieplnego
- analizę możliwości optymalizacji proponowanego systemu sezonowego magazynowania energii cieplnej.

5. Szczegółowa charakterystyka pracy

Rozdział pierwszy, obejmuje trzy podrozdziały, w których Doktorantka dokonała charakterystyki podjętej tematyki i zdefiniowała cele mające zostać osiągnięte w ramach realizacji pracy doktorskiej. Nawiązano do polityki prowadzonej przez Unię Europejską, która zobowiązała się do znacznego zmniejszenia zużycia energii i emisji CO₂, w czym kluczową rolę odgrywają budynki, odpowiadające

za 36% emisji w UE. Jednym z rozwiązań jest wykorzystanie energii słonecznej, wspieranej technikami magazynowania, aby stworzyć domy energetycznie niezależne, które mogą nawet generować nadmiar energii do sprzedaży.

Podrozdział 1.1 zawiera opis przyjętych celów badawczych oraz zdefiniowane tezy. Głównym celem podjętych badań jest opracowanie rozwiązania pozwalającego na pokrycie całości zapotrzebowania energetycznego domu jednorodzinnego poprzez wprowadzenie systemu ogrzewania, wentylacji i chłodzenia zasilanego energią odnawialną, wspieranego sezonowym magazynowaniem energii cieplnej. Założony cel pracy doktorskiej osiągnięty zostanie poprzez udowodnienie przyjętych tez:

- Możliwe jest zaprojektowanie systemu energetycznego dla domu jednorodzinnego we Wrocławiu, który zapewni zaspokojenie potrzeb 4 mieszkańców zachowując dodatni bilans energetyczny.
- Energia odnawialna generowana przez instalację fotowoltaiczną zamontowaną na dachu tego domu może pokryć zapotrzebowanie na ogrzewanie, chłodzenie oraz zużycie urządzeń elektrycznych, a także wygenerować nadwyżkę energii przeznaczoną do sprzedaży do sieci.
- Możliwe jest zaprojektowanie efektywnego magazynu ciepła, wykonanego z dobrze izolowanych bloków ceramicznych, granitowych lub betonowych, zasilanego energią odnawialną z paneli fotowoltaicznych, który zaspokoi całoroczne zapotrzebowanie na energię cieplną.
- Proponowane rozwiązanie sezonowego magazynowania ciepła można dodatkowo zoptymalizować.

Podrozdział 1.2 zawiera opis problematyki i motywację podjętych badań, które wynikały z wprowadzenia przez Unię Europejską dyrektywy mającej na celu osiągnięcie zerowej emisji budynków do 2050 roku, promując efektywność energetyczną, odnawialne źródła energii oraz zmniejszenie zależności od paliw kopalnych. W Polsce podjęto działania zgodne z tym celem, wprowadzając przepisy mające na celu poprawę efektywności energetycznej budynków, w tym zaostrzone normy dotyczące izolacji termicznej i zużycia energii pierwotnej, co ma również na celu dostosowanie budownictwa do unijnych wymagań dotyczących niemal zerowego zużycia energii.

Podrozdział 1.3 zawiera krótką charakterystykę poszczególnych rozdziałów pracy doktorskiej.

Rozdział drugi obejmuje 4 podrozdziały zawierające opis istniejącego stanu wiedzy w odniesieniu do budynków o niskim zużyciu energii, technologii fotowoltaicznej, systemów magazynowania energii cieplnej i typowego roku meteorologicznego.

Na początku rozdziału drugiego dokonano klasyfikacji energetycznej budynku. Zwrócono uwagę, że w Polsce od 1 stycznia 2021 r. zgodnie z normą WT 2021 wartość rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną (wskaźnik EP) potrzebną do ogrzewania, wentylacji, chłodzenia i oświetlenia nowych budynków nie może przekraczać 70 kWh/m². Dlatego też jedynie budynki z klasy energetycznej B (budynki energooszczędne) i wyższej uzyskają niezbędne pozwolenie na budowę.

W dalszej kolejności omówiono poszczególne kategorie zapotrzebowania na energię w budynkach, w szczególności ogrzewanie i chłodzenie pomieszczeń, oświetlenie, pracę urządzeń elektrycznych.

Podrozdział 2.1 zawiera opis budynków o niskim zużyciu energii (budynki pasywne), które minimalizują zapotrzebowanie na energię, głównie poprzez optymalne wykorzystanie promieniowania słonecznego. Budynki te stanowią odpowiedź na wyzwania klimatyczne, redukując emisje gazów cieplarnianych i zależność od paliw kopalnych, dlatego Unia Europejska dąży, by wszystkie nowe budynki były niemal zeroenergetyczne. W dalszej części podrozdziału omówiono ogrzewanie i chłodzenie pasywne, wskazując metodologię wyznaczania bilansu energetycznego budynku. Scharakteryzowano również poszczególne rodzaje budynków niskoenergetycznych, w tym domy pasywne, budynki o niemal zerowym zużyciu energii, budynki plusenergetyczne. Zwrócono uwagę na cechy projektowe domów niskoenergetycznych, takie jak okna, mostki cieplne, ściany, izolacje cieplne, urządzenia do odzysku ciepła z wentylacji, szczelność budynku.

Podrozdział 2.2 zawiera opis technologii i instalacji fotowoltaicznych. Omówiono promieniowanie słoneczne i efekt fotowoltaiczny oraz zasadę działania złącza typu P-N. Dokonano charakterystyki trzech rodzajów systemów fotowoltaicznych: OFF-GRID, ON-GRID i hybrydowych oraz omówiono typowe problemy systemów fotowoltaicznych i ich trwałość.

Podrozdział 2.3 dotyczy magazynowania ciepła. Doktorantka zauważa, że ostatnie postępy technologiczne w wytwarzaniu energii są znaczące, ale oszczędzanie i magazynowanie energii wciąż stanowi wyzwanie. Kluczowym problemem jest niezgodność między szczytowym wytwarzaniem a zapotrzebowaniem na energię, co sprawia, że magazynowanie jest niezbędne. Istnieją dwa typy systemów magazynowania ciepła TES: pasywne, które minimalizują utratę ciepła, i aktywne, które sztucznie przenoszą ciepło do materiału magazynującego. Dalsza część podrozdziału dotyczy termodynamiki magazynowania ciepła oraz technik przenoszenia ciepła opartych na przewodzeniu, konwekcji i promieniowaniu. Następnie dokonana została klasyfikacja systemów TES w oparciu o medium magazynujące na systemy termochemiczne, systemy magazynowania ciepła utajonego lub przemiany fazowej oraz systemy magazynowania ciepła jawnego. Przeprowadzono również charakterystykę tych systemów. Ważnym aspektem jest również ograniczenie strat ciepła do otoczenia i poprawa wydajność systemów HVAC. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie odpowiedniej izolacji cieplnej. W podrozdziale 2.3 Doktorantka przeprowadziła charakterystykę izolacji nisko-, średnio- i wysokotemperaturowych zwracając uwagę, że wydajność izolacji zależy od takich czynników jak przewodność cieplna, grubość materiału, gęstość i zawartość wilgoci. Omówiono również wybrane, najczęściej stosowane materiały termoizolacyjne. Część podrozdziału 2.3 poświęcona została podziemnemu magazynowaniu ciepła, w której omówiono systemy otwarte i zamknięte z uwzględnieniem czasu trwania magazynowania, w szczególności magazynowania sezonowego (przeprowadzono analizę dostępnych na rozwiązania technicznych). Na końcu podrozdziału zaznaczono, że wybierając metodę magazynowania energii, należy wziąć pod uwagę zastosowanie, czas trwania,

pożądaną temperaturę, czas życia cyklu, czas życia materiału, wydajność, inwestycje kapitałowe i koszty konserwacji, oraz ilość magazynowanej energii.

Podrozdział 2.4 dotyczy typowego roku meteorologicznego. Nie można przewidzieć zapotrzebowania budynku na energię bez wcześniejszej analizy i obliczenia typowego roku meteorologicznego wybranej lokalizacji. W podrozdziale omówiono różne metody obliczania typowego roku meteorologicznego oraz porównano wartości wybranych parametrów meteorologicznych dla Wrocławia wyznaczonych przy wykorzystaniu różnych obliczania typowego roku meteorologicznego.

Rozdział trzeci obejmuje 5 podrozdziałów, w których przedstawiono projekt budynku wykorzystany w pracy doktorskiej oraz opisano proponowany system, który ma zaspokoić zapotrzebowanie energetyczne domu.

Podrozdział 3.1 zawiera opis projektu budynku o powierzchni zewnętrznej 70 m², opracowany przez architekta, który został wykorzystany w pracy doktorskiej.

Podrozdział 3.2 zawiera ogólną koncepcję proponowanego systemu który może zaspokoić całoroczne potrzeby energetyczne domu jednorodzinnego. System energetyczny jest zasilany energią słoneczną przekształcaną w użyteczną energię elektryczną za pomocą modułów fotowoltaicznych. W skład systemu wchodzi sezonowy magazyn ciepła z grzałkami. Grzejnik elektryczny zasilany jest energią elektryczną z instalacji fotowoltaicznej zamieniając ją na energię cieplną, która jest następnie wykorzystywana do podgrzewania stosu magazynu ciepła. Sezonowy magazyn energii cieplnej jest rozszerzeniem urządzenia do codziennego magazynowania energii cieplnej. Rozszerzenie dotyczy objętości, wagi, a także czasu ładowania i rozładowywania.

Podrozdział 3.3 obejmuje opis proponowanej koncepcji sezonowego magazynowania energii cieplnej, która oparta jest na dwutaryfowym grzejniku elektrycznym. Cegły w magazynie ciepła ułożone są w zwartą strukturę, a grzałki elektryczne ułożone są równolegle do boków. Całość zabezpieczona jest warstwą izolacji o grubości 100 cm. Magazyn ciepła może zostać nagrany do temperatury 600°C.

Podrozdział 3.4 zawiera szczegółowy opis proponowanego innowacyjnego systemu HVAC-PVPSTS. Istotą systemu jest dostarczanie energii w celu zaspokojenia zapotrzebowania na energię domu jednorodzinnego przy użyciu wyłącznie odnawialnych źródeł energii (instalacji PV zainstalowanej na południowym dachu). Energia ta zasila grzejniki elektryczne, podgrzewające bloki magnezytowe w izolowanym magazynie ciepła do temperatury 600°C. Ciepło jest wykorzystywane pasywnie przez kominek, a w razie potrzeby aktywnie za pomocą wentylatora. Gorące powietrze o stabilnej temperaturze 50°C trafia do wymiennika ciepła. System może eksportować nadwyżkę energii do sieci, a także zasilać ogrzewanie wody i klimatyzację.

Podrozdział 3.5 stanowi analizę energetyczną budynków, która przeprowadzona została w oparciu wprowadzone od 1 stycznia 2021 roku przepisy. Aby obliczyć bilans energetyczny budynku, należy uwzględnić wszystkie źródła energii i jej pochłanianie, a także stały dopływ i odpływ energii spowodowany wpływami zewnętrznymi.

Rozdział czwarty obejmuje 6 podrozdziałów, w których przedstawiono model matematyczny proponowanego systemu HVAC – PVPSTS oraz opisano badania eksperymentalne mające na celu pomiar szybkości wymiany ciepła w stosie (akumulatorze) ciepłym (przy użyciu trzech różnych materiałów izolacyjnych), w celu udowodnienia słuszności równania wymiany ciepła zaproponowanego do opisanego strat ciepła spowodowanych przewodzeniem z bloku akumulacyjnego.

Podrozdział 4.1 dotyczy wyznaczania strat ciepła z izolowanego stosu magazynującego ciepło. Dla analizowanego domu we Wrocławiu straty ciepła z akumulatora ciepła nie powinny przekraczać 500 W. Z tego powodu stosowana izolacja cieplna powinna być gruba, co powoduje, że powierzchnia zewnętrzna izolacji stosu (akumulatora ciepła) znacznie przekracza powierzchnię zewnętrzną wypełnienia stosu. Przyjęto, że struktura izolacji jest jednorodna w całej objętości. Dla tak zdefiniowanych warunków przedstawiona została procedura obliczeniowa strat ciepła z izolowanego magazynu ciepła.

Podrozdział 4.2 stanowi opis badań eksperymentalnych w celu sprawdzenia dokładności równania opisującego straty ciepła z niezwykle dużego stosu o kształcie prostopadłościanu, które zaproponowane zostało w podrozdziale 4.1. Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu trzech różnych materiałów izolacyjnych (izolacja Promat, płyty kominkowe Fire-rock z wełny mineralnej oraz aerożel Aeromat 650) i tego samego wypełnienia z bloczków betonowych, na zaprojektowanym i wykonanym przez Doktorantkę stanowisku badawczym. Wyniki uzyskane z modelu matematycznego porównano z wynikami eksperymentu. Osiągnięto zadowalającą zgodność. Najniższa średnia różnica w uzyskanych wartościach strat ciepła wystąpiła dla izolacji z wełny skalnej Fire-rock i wynosiła 5%. Dla izolacji Promat uzyskano maksymalną różnicę 13,1% przy temperaturze 514°C i średnią różnicę 6,4%. Jednak w przypadku izolacji Aeromat 650 maksymalna różnica była bardzo wysoka, na poziomie 31%, co mogło być spowodowane zauważalnymi szczelinami powietrznymi powstałymi podczas układania izolacji.

Podrozdział 4.3 zawiera procedury obliczeniowe dotyczące procesu ładowania i rozładowania stosu akumulacyjnego. Wyznaczono temperaturę akumulatora ciepła w dowolnym momencie oraz moc jego ładowania lub rozładowania.

Podrozdział 4.4 dotyczy metodyki „prób i błędów” stosowanej do znalezienia rozwiązania i zawiera opis założeń niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń i zaprojektowania systemu.

Podrozdział 4.5 zawiera opis sposobu wyznaczania produkcji energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną.

Podrozdział 4.6 zawiera wyniki przeprowadzonych symulacji przy wykorzystaniu opracowanego modelu matematycznego. Modelowanie matematyczne proponowanego innowacyjnego systemu obejmowało analizę wymiany ciepła pomiędzy elementami budynku, otoczeniem i stosem magazynującym ciepło. Godzinowy bilans energetyczny przeprowadzono w jednogodzinnych krokach przez 24 godziny na dobę, kolejno przez wszystkie 365 dni w roku, przy użyciu TMY dla Wrocławia. Przed rozpoczęciem obliczeń energetycznych dla całego roku należało wybrać odpowiednio określoną

wartość temperatury akumulatora ciepła. Wartość ta, wybrana na początku roku (1 stycznia, 00:00), okaże się odpowiednia, gdy obliczenia energetyczne dla roku zakończą się tą samą wartością o godzinie 23:00 31 grudnia. Aby móc dokładnie określić taką wartość, przeprowadzono dwa cykle obliczeń rocznych, cykl wstępny i cykl precyzyjny. Innym ważnym parametrem, który należało określić przed przystąpieniem do symulacji, była odpowiednia wielkość magazynu ciepła. Wielkość akumulatora ciepła można poprawnie dobrać poprzez obserwację krzywej zmian temperatury magazynu w ciągu roku. Magazyn ciepła powinien być tak dobrany, aby po wstępnym podgrzaniu jesienią jego temperatura stopniowo spadała do końca okresu grzewczego (15 maja). Odpowiednią wielkość magazynu ciepła określono metodą „prób i błędów”. Stosowanie tej metody polegało na określeniu wartości wszystkich zmiennych wejściowych i zmianie tylko jednej z nich (wielkości akumulatora), aby ocenić, czy uzyskane wyniki spełniają potrzeby prawidłowej pracy systemu. Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na dobranie magazynu ciepła o wymiarach 1.6x1.6x0.3 m i grubości izolacji 1m. W podrozdziale 4.6 zestawiono także wyniki symulacji działania instalacji w okresie całego roku. Temperatura akumulatora ciepła o godzinie 00:00 1 stycznia wynosiła 436°C, co stanowiło taką samą temperaturę pod koniec roku, 31 grudnia o godzinie 23:00. Dowodzi to, że obliczenia były zrównoważone dla całego roku i można je uznać za precyzyjne. Przeprowadzone symulacje pokazały, że eksploatacja instalacji powinna rozpocząć się od ostatnich dni września, kiedy to magazyn ciepła zostanie rozładowany do minimalnej temperatury (50°C). Jesienny proces ładowania stosu magazynowego rozpoczyna się od pierwszego dnia października i trwa przez okres 1 miesiąca. Po tym czasie (od początku listopada do końca lutego) intensywność i dostępność promieniowania słonecznego znacznie spada, a zapotrzebowanie budynku na ogrzewanie osiąga szczyt. Temperatura akumulatora ciepła spada z powodu strat ciepła z magazynu wykorzystywanego do zaspokojenia zapotrzebowania budynku na ciepło. Przewidziana w projekcie instalacja PV wyprodukowała w ciągu roku 13.339 MWh energii elektrycznej. Wybór dnia rozpoczęcia intensywnego ładowania magazynu ciepła jest bardzo ważny w regulacji ogólnej pracy akumulatora. Korzystając z metody „prób i błędów”, przeprowadzono analizę rozpoczęcia procesu ogrzewania w dniach: 1 września, 15 września, 1 października, 15 października i 1 listopada. Przeprowadzone symulacje pokazały, że rozpoczęcie ładowania magazynu ciepła 1 września, 15 września lub 1 października nie ma znaczącego wpływu na temperaturę magazynu zimą i wiosną. Jednak rozpoczęcie procesu ładowania od połowy października lub później powoduje, że akumulator ciepła nie jest w stanie osiągnąć maksymalnego ładowania pod koniec roku.

Rozdział piąty obejmuje 4 podrozdziały, w których omówiono możliwości optymalizacji proponowanego systemu sezonowego magazynowania energii cieplnej.

Podrozdział 5.1 pokazuje możliwości regulacji wielkością akumulatora ciepła i grubością izolacji. Zastosowanie akumulatora ciepła o mniejszych wymiarach z grubszą izolacją wymaga droższych materiałów, odpornych na wysokie temperatury. Z kolei zastosowanie magazynu ciepła o większych

gabarytach z cieńszą izolacją pozwala na użycie tańszych materiałów. Analizowane były różne materiały dostępne w Polsce pod kątem rozmiaru i kosztu, aby znaleźć optymalne rozwiązanie.

Podrozdział 5.2 poświęcony został materiałom stosowanym na wypełnienie akumulatora ciepła. Krótko omówiono właściwości materiałów nadających się do wykorzystania jako wypełnienie, zwracając uwagę na ich ciepło właściwe, gęstość, odporność na temperaturę i koszt.

Podrozdział 5.3 dotyczy materiałów izolacyjnych możliwych do zastosowania w proponowanym systemie. W podrozdziale przedstawiono różne konfiguracje materiałów wypełniających akumulator ciepła i materiałów termoizolacyjnych, z podziałem na grupy: nowoczesne technologie, średniej i podstawowej grupy technologicznej.

Podrozdział 5.4 stanowi analizę energetyczną konfiguracji „rodzaj wypełnienia – rodzaj izolacji” przedstawionych w podrozdziale 5.3. Dla każdego wariantu obliczenia przeprowadzono dla kilku wartości maksymalnej temperatury wypełnienia magazynu ciepła, zwykle z krokiem 100°C. Przedstawione wyniki pokazują, że wzrost maksymalnej temperatury roboczej akumulatora ciepła prowadzi do zmniejszenia objętości jego wypełnienia przy jednoczesnym zwiększeniu izolacji cieplnej. Koszt wypełnienia akumulatora ciepła jest z reguły niższy niż koszt izolacji cieplnej, a koszt budowy magazynu ciepła waha się od 1500 € do 190 000 €, w zależności od zastosowanej technologii. Ilość zmagazynowanej energii cieplnej była zbliżona dla wszystkich wariantów i wynosiła około 11 MWh. Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że materiały wypełniające o gęstości mniejszej niż 1500 kg/m³ oraz materiały izolacyjne z przewodnictwem cieplnym wyższym niż 0,05 W/mK nie są zalecane do magazynowania ciepła w wysokich temperaturach, aby uniknąć nadmiernych rozmiarów wypełnienia i grubości izolacji.

Rozdział szósty stanowi porównanie proponowanego akumulatora ciepła z dostępnymi na rynku rozwiązaniami: systemem magazynowania ciepła w wodzie i systemem magazynowania energii elektrycznej w bateriach. Przedstawiona analiza wskazuje, że magazynowanie ciepła w akumulatorze z wypełnieniem w postaci bloczków betonowych lub cegły klinkierowej wymaga poniesienia mniejszych kosztów finansowych niż w przypadku akumulatorów wodnych czy akumulatorów energii elektrycznej.

Rozdział siódmy zawiera wnioski końcowe. W pracy analizowano innowacyjny budynek zgodny z nowymi przepisami, wyposażony w system HVAC-PVPSTS, który obejmuje instalację fotowoltaiczną i sezonowy magazyn ciepła. Badania wykazały, że proponowany system zapewnia stabilne ogrzewanie budynku przez cały rok. Akumulator ciepła z izolacją termiczną zajmuje niewielką część powierzchni mieszkalnej. Produkowana energia z instalacji PV pokrywa zarówno bieżące zapotrzebowanie na energię elektryczną, jak również zapotrzebowanie na ogrzewanie oraz pozwala na eksport nadmiaru energii do sieci. Sezonowy magazyn ciepła z materiałów budowlanych, takich jak cegły klinkierowe czy bloczki betonowe, jest tańszy i efektywniejszy niż popularne zbiorniki wodne. Zastosowanie systemu zwiększa koszt budowy domu o 20%, co jest akceptowalne. System jest

ekologiczny i spełnia cele klimatyczne UE na 2030 r. Badania potwierdziły, że dom z takim systemem może mieć dodatni bilans energetyczny.

6. Ocena pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi interesującą pracę o dużym znaczeniu w kontekście rozwoju i poszerzenia wiedzy na temat technologii sezonowego magazynowania ciepła. W pracy szczegółowo przeanalizowano innowacyjne podejście do projektowania budynków niskoenergetycznych, zgodnych z nowymi przepisami budowlanymi, które wspierają zrównoważony rozwój. Badania skupiły się na integracji instalacji fotowoltaicznych z budynkiem oraz zastosowaniu sezonowego akumulatora ciepła, co pozwala na efektywne zarządzanie energią przez cały rok. Przeprowadzone analizy matematyczne wykazały, że możliwe jest stworzenie systemu, który nie tylko zapewnia stabilne ogrzewanie budynku, ale także generuje nadmiar energii, który można przekazać do sieci energetycznej. Praca ta wnosi cenny wkład w rozwój technologii magazynowania ciepła, pokazując, że alternatywne rozwiązania, takie jak akumulatory ciepła wypełnione materiałami budowlanymi, mogą być bardziej efektywne i tańsze niż tradycyjne zbiorniki wodne. Autorka dowodzi, że zastosowanie takich systemów w budownictwie może znacząco przyczynić się do realizacji ambitnych celów klimatycznych Unii Europejskiej. Rozprawa ta, dzięki swoim praktycznym wnioskowaniom i solidnym podstawom teoretycznym, stanowi wartościowy krok w kierunku popularyzacji ekologicznych i ekonomicznych rozwiązań w nowoczesnym budownictwie.

6.1 Główne osiągnięcia Autora

Z ważniejszych osiągnięć Autora warto wskazać:

- Opracowanie koncepcji unikatowego rozwiązania w postaci systemu do zaspokojenia całorocznego zapotrzebowania na energię jednorodzinne domu mieszkalnego poprzez połączenie nieograniczonego zasobu energii słonecznej (wykorzystywanej przez instalację fotowoltaiczną) z nowatorską propozycją sezonowego magazynowania energii cieplnej. Wdrożenie zaproponowanego rozwiązania umożliwi stworzenie nie tylko energetycznie niezależnego domu, ale również domu o dodatnim bilansie energetycznym.
- Opracowanie modelu matematycznego zaproponowanego systemu, pozwalającego na symulacje jego pracy i ocenę efektywności.
- Opracowanie, przygotowanie i przeprowadzenie różnych wariantów badań eksperymentalnych pozwalających na walidację zapisanych modeli matematycznych.

6.2 Uwagi krytyczne

Praca przygotowana została prawidłowo, cel i teza pracy są jasne, tok prac zmierzających do ich udowodnienia jest prawidłowy, jednakże w trakcie szczegółowej lektury rozprawy doktorskiej można znaleźć elementy mogące wymagać dodatkowego wyjaśnienia lub dyskusji. Poniższe uwagi krytyczne nie umniejszają mojej dobrej ocenie merytorycznej rozprawy.

- W tabeli 5.1 na stronie 146 podano złe jednostki dla ciepła właściwego. Podano jednostkę $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ a powinno być $\text{J/kg}\cdot\text{K}$. Należy sprawdzić w opracowanym modelu matematycznym jakie jednostki i wartości ciepła właściwego zostały użyte.
- Na rysunku 4.23 na stronie 139 pokazano zmiany temperatury w akumulatorze ciepła. Z wykresu wynika, że magazyn został nagrany do temperatury 600°C w ciągu miesiąca październik. W tabeli 5.5 na stronie 152 podano, że magazyn ciepła oddał blisko 11 MWh. Jaka energia została zmagazynowana w akumulatorze w ciągu tego miesiąca? Czy było to 11 MWh? Czy magazyn został naładowany do pełna? W październiku produkcja energii zaczyna znacznie spadać z powodu krótkich dni i niskiego stanu słońca. Szacuje się, że w październiku instalacja PV produkuje około 6% swojej rocznej produkcji. W tabeli 4.5 na stronie 140 podano, że przewidziana instalacja PV wyprodukuje w ciągu roku 13 339 kWh energii, co daje około 800 kWh energii elektrycznej w miesiącu październik. Nie ma więc możliwości zmagazynować w tym czasie 11 MWh energii cieplnej przy wykorzystaniu grzałek elektrycznych zasilanych z instalacji PV. Czy magazyn ciepła dogrzewany był energią pobraną z sieci? Jeżeli tak, to jakie przyłącze byłoby konieczne?
Opis działania sezonowego magazynu ciepła, w tym proces ładowania i rozładowania powinien być w pracy lepiej opisany.
- W tabeli 5.5 na stronie 152 podano całkowitą objętość (wraz z izolacją) różnych wariantów akumulatora ciepła. W jaki sposób wyznaczana była wymagana objętość magazynu ciepła? Czy objętość magazynu dobierana była do wskazanej w tabeli 5.5 ilości energii dostarczonej przez magazyn (około 11 MWh)? Chcąc zmagazynować taką ilość energii objętość samego wypełnienia (masa wypełnienia wyznaczona w oparciu o wzór 4.11 i przeliczona na objętość dla danej gęstości wypełnienia) będzie większa niż podana w tabeli 5.5 objętość całego akumulatora ciepła wraz z izolacją.
- Wyniki badań eksperymentalnych pokazały pewne rozbieżności względem wyników uzyskanych z modelowania numerycznego. W przypadku zastosowania izolacji Aeromat 650 maksymalna różnica pomiędzy uzyskanymi wynikami jest bardzo wysoka, sięga 31%. W obliczeniach współczynnik przewodzenia ciepła wyznaczany jest jako średnia ważona. Zauważono jednak, że wartość współczynnika przewodzenia ciepła jest silnie zależna od temperatury. Zdefiniowanie współczynnika przewodzenia ciepła izolacji w funkcji temperatury i wykorzystanie w obliczeniach byłoby zdecydowanie lepszym podejściem. Zapewne

rozbieżności między wynikami badań eksperymentalnych a wynikami symulacji byłyby mniejsze.

- W pracy odnoszono się w kilku miejscach do nieaktualnych informacji, np. podając, że „W 2018 roku w Polsce podłączono około 235 MW systemów fotowoltaicznych...”. Podawane informacje powinny odnosić się do aktualnego stanu.
- W obliczeniach wykorzystano metodę „prób i błędów”. Czy obliczenia były zautomatyzowane podczas powtarzania kroków obliczeniowych?
- Przyjęto założenie, że przed rozpoczęciem obliczeń energetycznych dla całego roku należy wybrać odpowiednio określoną wartość temperatury akumulatora ciepła. Wartość ta wybrana na początku roku, 1 stycznia o godzinie 00:00, będzie poprawna, gdy obliczenia energetyczne dla roku zakończą się tą samą wartością 31 grudnia o godzinie 23:00 (rysunek 4.20). W jaki sposób dobierana była wartość tej temperatury? Dlaczego przyjęto takie założenie? Warunki pogodowe w każdym roku są inne, więc zapotrzebowanie na energię i produkcja jest inna, a co za tym idzie, temperatura magazynu na końcu roku będzie inna niż na początku roku.
- Czego dotyczą parametry akumulatora ciepła podane w Tabeli 4.4 na stronie 138? Czy wypełnienie o wymiarach 1.6 x 1.6 x 0.3 m stanowi magazyn ciepła dobrany dla analizowanego budynku? Trudno zorientować się w tej kwestii. W rozdziale 5 podane są zupełnie inne parametry akumulatorów ciepła dobranych do analizowanego budynku.
- W pracy znajdują się błędy edytorskie, np.
 - w podrozdziale 1.3 podano, że praca zawiera 9 rozdziałów, a powinno być 7
 - błędy w numeracji wielu tabel i rysunków, np. Table 2.^:
 - błędy w odwołaniach do rysunków
 - błędy w numeracji wielu wzorów
 - jakość niektórych rysunków jest słaba
 - struktura rozdziału 2 jest skomplikowana i trudna do czytania

7. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska, mimo zauważonych usterek, może być uznana za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje odpowiednią wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i eksperymentalnej. Uważam, że podjęta przez Doktorantkę tematyka badawcza jest ważna, przede wszystkim ze względu na wykorzystanie sezonowego magazynu ciepła we współpracy z odnawialnymi źródłami energii i zwiększenie efektywności energetycznej budynków. Uzyskane przez Doktorantkę wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych mają w moim przekonaniu dużą wartość zarówno merytoryczną, jak i praktyczną.

Reasumując, uważam, że praca doktorska mgr inż. Oluwafunmilola Oladipo spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie Wyższym i Nauce* i stawiam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

.....
Marcin Tugaj