

Załącznik 2

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Autoreferat

dr inż. Artur Nemś
Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Politechnika Wrocławska
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Spis treści

1. Imię i nazwisko.....	2
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe.....	2
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	2
4. Osiągnięcie naukowe.....	2
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.....	2
4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego.....	2
4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników.....	4
4.3.1. Badania procesu akumulacji w ceglach.....	7
4.3.2. Badania procesu akumulacji w granicie.....	10
4.3.3. Badania procesu akumulacji w materiałach zmiennofazowych.....	14
4.3.4. Podsumowanie osiągnięcia naukowego.....	25
5. Pozostałe osiągnięcia naukowe.....	26
6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę.....	29
6.1. Działalność dydaktyczna.....	29
6.2. Działalność organizacyjna oraz popularyzująca naukę.....	30
7. Podsumowanie.....	30

1. Imię i nazwisko: **Artur Nemś**

2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:**

- Dr nauk technicznych, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno – Energetyczny, dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn
Temat pracy doktorskiej: *Modelowanie zjawisk cieplnych i przepływowych w silnikach cieplnych wewnętrznego spalania pracujących z mieszkanką paliwowo-powietrzną wzbogaconą w tlen*, 2013 r.
Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Gnutek
- Mgr inż. Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno – Energetyczny, kierunek: Energetyka, specjalizacja: Technologie spalania i ochrona środowiska w energetyce
Tytuł pracy dyplomowej: *Termodynamiczna analiza turbosprężarkowego układu membranowego do rozdziału powietrza współpracującego z silnikiem cieplnym wewnętrznego spalania*, 2009 r.
Promotor: dr inż. Sławomir Pietrowicz
- Mgr inż. Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno – Energetyczny, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, specjalizacja: Eksploatacja systemów i urządzeń energetycznych
Tytuł pracy dyplomowej: *Projekt i obliczenia cieplne bloku energetycznego o mocy 460 MW na parametry nadkrytyczne*, 2007 r.
Promotor: doc. dr inż. Janusz Zabokrzycki

3. **Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

- 10.2013 – obecnie: adiunkt naukowo-dydaktyczny na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Wroclawskiej, w Katedrze Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii.
- 10.2011-09.2013: asystent naukowo-dydaktyczny na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Wroclawskiej, w Zakładzie Termodynamiki.

4. **Osiągnięcie naukowe** (Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy)

4.1. **Tytuł osiągnięcia naukowego**

Badania eksperymentalne i modelowe akumulatorów stało- i zmiennofazowych

4.2. **Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego**

[A1] Artur Nemś, Agata Hołowczak, Magdalena A. Nemś, *Investigation of the efficiency of a high temperature heat storage charging*, International Conference on the Sustainable Energy and Environment Development (SEED), 2016, Kraków, Poland, May 17-19, 2016; doi.org/10.1051/e3sconf/20161000063; Web of Science, punktacja MNiSW (przed reformą^[1]): 15

¹ Komunikat Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 18 grudnia 2019 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych, zmienił dotychczasową punktację czasopism (skala 0-50 punktów). Nowy wykaz czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych posiada skalę punktową 0-200. „Przed reformą” oznacza czasopisma opublikowane i punktowane zgodnie z punktacją do roku 2018, „po reformie” oznacza czasopisma opublikowane i punktowane zgodnie z punktacją po 2018 r.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań, analizie i opracowaniu wyników, napisaniu artykułu. Mój udział szacuję na 85%.

- [A2] Magdalena A. Nemś, Artur Nemś, Jacek Kasperski, Michał Pomorski, *Thermo-hydraulic analysis of heat storage filled with the ceramic bricks dedicated to the solar air heating system*, *Materials*, 2017, vol. 10, nr 8, s. 1-20; doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.020; Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (przed reformą): 35, IF: 2,467

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, wykonaniu modelu matematycznego, analizie i opracowaniu wyników, napisaniu artykułu. Mój udział szacuję na 80%.

- [A3] Magdalena A. Nemś, Jacek Kasperski, Artur Nemś, Anna Bać, *Validation of a new concept of a solar air heating system with a long-term granite storage bed for a single-family house*, *Applied Energy*, 2018, vol. 215, s. 384-395, doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.020; Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (przed reformą): 45, IF: 8,426

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu modelu matematycznego akumulatora ciepła, modyfikacja tego modelu dla akumulatora pracującego z kolektorem, w układzie zamkniętym oraz skalowanie modelu do akumulatora wielkogabarytowego. Mój udział szacuję na 30%.

- [A4] Anna Bać, Magdalena A. Nemś, Artur Nemś, Jacek Kasperski, *Sustainable Integration of a Solar Heating System into a Single-Family House in the Climate of Central Europe—A Case Study*, *Sustainability* 2019, 11, 4167; doi.org/10.3390/su11154167; Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (po reformie): 70, IF: 2,576

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu modyfikacji napisanego przeze mnie modelu matematycznego wielkogabarytowego akumulatora ciepła do zastosowania w różnych wariantach architektonicznych budynku. Mój udział szacuję na 30%.

- [A5] Artur Nemś, Antonio M. Puertas, *Model for the discharging of a dual PCM heat storage tank and its experimental validation*, *Energies*, 2020, vol. 13, nr 21, art. 5687, s. 1-16; doi.org/10.3390/en13215687; Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (po reformie): 140, IF: 2,702

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i napisaniu modelu matematycznego, analizie i opracowaniu wyników oraz napisaniu artykułu. Mój udział szacuję na 85%.

- [A6] Artur Nemś, Magdalena A. Nemś, Sabina Rosiek, Antonio M. Puertas, Bartosz Gil, Jacek Kasperski, Francisco J. Batlles, *Modeling of the discharging process of a heat storage tank filled with PCM to cover the heat demand of a building*, *Proceedings of the ISES Solar World Conference 2019*, Santiago, Chile 04-07 November, 2019, s. 1341-1352; doi:10.18086/swc.2019.24.07; punktacja MNiSW (po reformie): 5

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wykonaniu obliczeń dla akumulatora ciepła, analizie i opracowaniu wyników oraz napisaniu artykułu. Mój udział szacuję na 85%.

[A7] Artur Nemś, Mateusz Kowalewski, *Wpływ dodatku metali na czas chłodzenia materiałów zmiennofazowych*, Przemysł Chemiczny, 2016, vol. 95, nr 5, s. 989-992; doi.org/10.15199/62.2016.5.19; Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (przed reformą): 15, IF: 0,385

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji, pracach przy budowie stanowiska, analizie i opracowaniu wyników oraz napisaniu artykułu. Mój udział szacuję na 80%.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników

Gospodarka światowa bardzo szybko się rozwija, przez co zapotrzebowanie na różne formy energii rośnie. Powoduje to, że coraz więcej uwagi zwraca się na efektywność procesów i energię traconą oraz brak możliwości wykorzystania jej w danym miejscu i czasie. Jest to szczególnie widoczne w systemach wykorzystujących odnawialne źródła energii, których nie można w łatwy sposób dopasować do odbiorników energii, ze względu na czasową dostępność i zmienną intensywność, nie pokrywającą się w pełni z potrzebami konsumentów. Dlatego magazynowanie nabrało w ostatnich czasach nowego znaczenia. Sytuacja taka była już od dawna przewidywana, m.in. przez Starr Ch., który w latach 90-tych prognozował szybki wzrost roli magazynowania w światowym bilansie energetycznym w latach 1980-2060^[2]. Zakładał on, że w obecnych latach energia zmagazynowana powinna pokrywać około 20% globalnego zapotrzebowania.

Akumulatory ciepła stanowią dobre uzupełnienie systemów wykorzystujących odnawialne źródła ciepła o zmiennej czasowej dostępności i intensywności, jakimi są np. kolektory słoneczne. Wśród akumulatorów ciepła dominują akumulatory stałofazowe, a spośród tych najpopularniejsze są akumulatory wodne. Akumulatory te są najlepiej przebadane i łatwe w eksploatacji. Jednak oprócz nich można wyróżnić wiele innych, wykorzystujących ciepło właściwe materiału. Przeglądu takich substancji dokonał Domański^[3], wymieniając m.in. materiały takie jak skały, piasek, beton, cegła, żeliwo czy kwarc.

Akumulatory zawierające materiały stałe poza możliwością pracy w szerokim zakresie temperatur, posiadają szereg innych zalet, wśród których warto wymienić: wytrzymałość oraz prostotę budowy i eksploatacji, a także bezpieczeństwo w stosunku do otoczenia, w którym się znajdują oraz niski koszt. Czynnikiem roboczym w tego typu układach są przeważnie gazy, wśród których dominuje powietrze.

W literaturze dostępnych jest wiele wyników badań procesu akumulacji w materiałach stałych. Badania złóż kamiennych były bardzo popularne w latach 80-tych i 90-tych, z których to pochodzi najwięcej publikacji na ten temat. Były one związane m.in. z badaniem spadku ciśnienia w złożach o dużych elementach wypełnienia^[4,5], badaniem eksperymentalnym akumulatora wysokotemperaturowego (do 700 °C)^[6] oraz badaniem kolektorów słonecznych z wewnętrznymi złożami kamiennymi^[7]. Obecne prace badawcze poświęcone materiałom stałofazowym dotyczą

² Starr, C.H. Global energy and electrical futures. Energy **1993**, 18, 33–39

³ Domanski, R. Magazynowanie energii cieplnej; PWN, Warszawa, 1990

⁴ Chandra, P.; Willits, D.H. Pressure drop and heat transfer characteristics of air-rock bed thermal storage systems. Sol. Energy **1981**, 27, 547–553

⁵ Sagara, K.; Nakahara, N. Thermal performance and pressure drop of rock beds with large storage materials. Sol. Energy **1991**, 47, 157–163

⁶ Meier, A.; Winkler, C.; Wuillemin, D. Experiment for modeling high temperature rock bed storage. Sol. Energy Mater. **1991**, 24, 255–264

⁷ Garg, H.P.; Bandyopadhyay, B.; Sharma, V.K. Investigation of rock bed solar collector cum storage system. Energy Convers. Manag. **1981**, 21, 275–282

wpływu ich kształtu na wymianę ciepła^[8], spadku ciśnienia^[9], oraz wyznaczania charakterystyk roboczych złóż. Wśród zastosowań praktycznych, dominuje ich wykorzystanie w połączeniu z instalacjami słonecznymi. Niskotemperaturowe akumulatory kamienne są wykorzystywane w krajach o ciepłym klimacie, gdzie w połączeniu z kolektorami płaskimi służą do wyrównywania temperatur w budynkach mieszkalnych^[10]. Wykorzystuje się również naturalne grotty skalne, które stanowią sezonowe zbiorniki ciepła dla całych osiedli, a ich ładowanie następuje w okresie letnim^[11]. Akumulatory wysokotemperaturowe są stosowane w zaawansowanych instalacjach. Można je spotkać w elektrowniach słonecznych^[12,13] wykorzystujących przeważnie skupiające kolektory słoneczne czy w szklarniach^[14].

Drugą, coraz lepiej poznaną grupę akumulatorów, stanowią akumulatory zmiennofazowe, w których ciepło magazynowane jest podczas zmiany fazy materiału akumulacyjnego. Akumulacja ciepła w materiałach zmiennofazowych (PCM) jest obecnie tematem wielu prac z zakresu materiałoznawstwa, termodynamiki czy inżynierii. Chęć uzyskania wysokiej gęstości akumulacji energii wiąże się z szeregiem prac w których jednym z efektów końcowych jest współpraca akumulatora ciepła z instalacją grzewczą lub chłodniczą^[15]. Badania doświadczalne są efektem finalnym wielu badań. Jednak już na etapie projektowania potrzebne są informacje o pracy akumulatora. Dlatego różnymi technikami tworzy się modele matematyczne opisujące proces akumulacji ciepła. W akumulacji ciepła w PCM opis wymiany ciepła podczas procesu topnienia i krzepnięcia to podstawowe zagadnienie, które determinuje wydajność całego systemu. Duże znaczenie ma niski współczynnik przewodzenia ciepła PCM, a mechanizm wymiany ciepła nie został jeszcze dostatecznie dobrze zbadany i zrozumiany^[16]. Dlatego stosuje się różne techniki aby możliwie jak najlepiej odwzorować ten proces.

Wspomniany wcześniej niski współczynnik przewodzenia ciepła powoduje problem z uzyskiwaniem dużych strumieni ciepła, co znacznie wpływa na czas ładowania i rozładowywania akumulatorów. Na przykład parafiny, stanowiące dużą grupę wśród materiałów zmiennofazowych, charakteryzują się współczynnikiem przewodzenia ciepła wynoszącym przeważnie około $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[17]. Materiały te są stosunkowo popularne ze względu na łatwą dostępność, wysokie wartości ciepła topnienia ($190 - 260 \text{ kJ/kg}$) oraz szeroki zakres temperatur topnienia ($23 - 67 \text{ }^\circ\text{C}$)^[18]. Ponadto w trakcie przejścia fazowego nie zachodzi rozdział faz, a parametry cieplne są stabilne nawet po wielu cyklach przemian. Pozwala to na długi czas użytkowania ich jako akumulatorów

⁸ Singh, R.; Saini, R.P.; Saini, J.S. Nusselt number and friction factor correlations for packed bed solar energy storage system having large sized elements of different shapes. *Sol. Energy* **2006**, *80*, 760–771

⁹ Allen, K.G.; von Backström, T.W.; Kröger, D.G. Packed bed pressure drop dependence on particle shape, size distribution, packing arrangement and roughness. *Powder Technol.* **2013**, *246*, 590–600

¹⁰ Abbud, I.A.; Löf, G.O.G.; Hittle, D.C. Simulation of solar air heating at constant temperature. *Sol. Energy* **1995**, *54*, 75–83

¹¹ Xu J., Wang R.Z., Li Y.; A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. *Sol. Energy* **2014**, *103*, 610–638

¹² Allen, K.G.; Von Backstrom, T.W.; Kroger, D.G.; Kisters, A.F.M. Rock bed storage for solar thermal power plants: Rock characteristics, suitability, and availability. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2014**, *126*, 170–183

¹³ Zanganeh, G.; Pedretti, A.; Zavattoni, S.; Barbato, M.; Steinfeld, A. Packed-bed thermal storage for concentrated solar power—Pilot-scale demonstration and industrial-scale design. *Sol. Energy* **2012**, *86*, 3084–3098

¹⁴ Kurklu, A.; Bilgin, S.; Ozkan, B. A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renew. Energy* **2003**, *28*, 683–697

¹⁵ Beaudin, M.; Zareipour, H. A Review of PCM Energy Storage Technology Used in Buildings for the Global Warming Solution. In *Energy Solutions to Combat Global Warming*; Springer: Cham, Switzerland, 2017; Vol.33

¹⁶ Mohammadnejad, F.; Hossainpour, S.A. CFD modeling and investigation of a packed bed of high temperature phase change materials (PCMs) with different layer configurations. *J. Energy Storage* **2020**, *28*, 101209

¹⁷ Mehling H.; Cabeza L. *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications*, Springer, Berlin 2008

¹⁸ Ukrainczyk N.; Kurajica S.; Sipusic J. Thermophysical comparison of five commercial parafin waxes as latent heat storage materials. *Chem. Biochem. Eng. Q.* **2010**, *2*, 129–137

ciepła^[19,20]. Wartości przewodności cieplnej mogą być niższe jeśli materiały te stosuje się jako dodatki np. do materiałów budowlanych^[21]. Duża pojemność cieplna sprawia, że materiały takie jak parafiny są dobrymi nośnikami ciepła, jednak problemy z wymianą ciepła powodują, że konieczne są działania podwyższające niską przewodność cieplną. W tym celu tworzy się kompozyty, składające się z parafiny oraz materiału o wysokiej przewodności cieplnej. Wyróżnić można kilka sposobów tworzenia materiałów kompozytowych. Należą do nich: impregnacja parafiną porowatych matryc, dyspersja drobnych cząstek materiału dobrze przewodzącego lub umieszczenie w zasobniku metalowych struktur^[22]. Wyniki badań przewodności cieplnej takich kompozytów pokazują znaczny wzrost strumienia ciepła w parafinach^[23,24]. Prowadzi to do skrócenia czasu krzepnięcia i topnienia materiału zmiennofazowego. Wiąże się to jednak ze zmniejszeniem możliwości akumulacyjnych oraz nieznaczną zmianą temperatury przejścia fazowego. Ważnym aspektem jest tu odpowiedni dobór udziałów masowych komponentów.

Jak wskazuje krytyczny przegląd literatury, prace prowadzone do tej pory nad akumulatorami ciepła wskazują znaczny stopień rozwoju niektórych akumulatorów stałofazowych, w tym przede wszystkim wodnych. Ze względu na specyficzne przeznaczenie złóż stałych i konieczność dopasowania parametrów pracy złoża do źródła ciepła, jakim przeważnie jest instalacja wykorzystująca odnawialne źródła energii, tematyka ta wciąż wymaga badań. Widoczna w literaturze niewielka ilość badań nad akumulatorami wykorzystującymi ciała stałe, współpracującymi z instalacjami grzewczymi na potrzeby budynku, wymaga uzupełnienia. Szczególnie, gdy coraz większą wagę zwraca się na energochłonność budynków. Kluczowe w tym miejscu może okazać się dopasowanie parametrów akumulatora wykorzystującego ciało stałe, do pracy sezonowej, w której akumulator będzie ładowany latem i rozładowywany w okresie grzewczym. Innym zagadnieniem jest praca akumulatora na pokrycie potrzeb grzewczych i chłodniczych budynku, wynikająca z rosnącej potrzeby utrzymania komfortu cieplnego również latem. Do tych zastosowań mogą zostać wykorzystane akumulatory zmiennofazowe, szczególnie jeśli w rozwiązaniu uwzględną się możliwość pracy z dwoma materiałami akumulacyjnymi, do przechowywania ciepła i chłodu. Jednak jak wykazał przegląd literaturowy, proces projektowania takich akumulatorów jest utrudniony, ze względu na wspomniane wcześniej problemy w opisie mechanizmu wymiany ciepła w materiale zmieniającym stan skupienia. Dlatego stworzenie modelu wymiany ciepła w takim akumulatorze jest niezwykle istotne i powinno zostać poddane dalszym pracom. Z praktycznego punktu widzenia istotne wydaje się znalezienie rozwiązania problemu niskiej przewodności cieplnej materiałów zmiennofazowych, która również utrudnia szersze zastosowanie takich materiałów jako wypełnienia akumulatorów.

W związku z powyższym, podstawowy obszar moich zainteresowań naukowych, a jednocześnie cel naukowy zaprezentowany w niniejszym wniosku stanowią ***badania eksperymentalne i modelowe akumulatorów stało- i zmiennofazowych***. W osiągnięciu habilitacyjnym przedstawionym w formie cyklu 7 prac, dokonałem analizy i syntezy wybranych

¹⁹ Pielichowska K.; Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. Prog. in Mat. Sci. **2014**, 65, 67–123

²⁰ Akgun M.; Aydin O.; Kaygusuz K. Experimental study on melting/solidification characteristics of paraffin as PCM. Energy Convers. Manage. **2007**, 48, 669–678

²¹ Zalba B.; Marin J.; Cabeza L.; Mehling H., Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Appl. Therm. Eng. **2003**, 23, 251–283

²² Jegadheeswaran S.; Pokchar S.D. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. **2009**, 13, 2225–2244

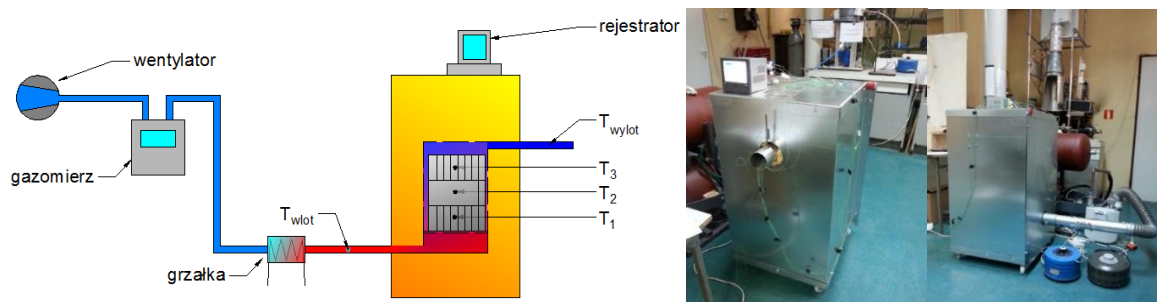
²³ Cardenas B.; Leon N. High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. Renew. Sustain. Energy Rev. **2013**, 27, 724–737

²⁴ Haillet D.; Py X.; Goetz V.; Benabdelkarim M. Storage composites for the optimalization of solar water heating systems. Chem. Eng. Res. Design **2008**, 86, 612–617

zagadnień szczegółowych dotyczących wymienionych akumulatorów. Prezentowany dorobek naukowy pozwoliłem sobie podzielić na trzy podrozdziały, których tematyka obejmuje badania procesu akumulacji w ceglach (podrozdział 4.3.1), akumulację w granicie (podrozdział 4.3.2) oraz akumulację w materiałach zmiennofazowych (podrozdział 4.3.3). Prezentowane poniżej wyniki badań stanowią pewne uzupełnienie prac badawczych prowadzonych zarówno w Polsce jak i na Świecie. Poszerzają one wiedzę w istotnym współcześnie temacie jakim jest magazynowanie ciepła.

4.3.1. Badania procesu akumulacji w ceglach

W pracy [A1] opisałem proces ładowania akumulatora ciepła wypełnionego cegłą szamotową. Były to badania wstępne do poznania procesu akumulacji w materiałach stałofazowych. Do badań został wykorzystany akumulator o wymiarach wewnętrznych 0,3 x 0,3 x 0,5 m, zaizolowany wełną mineralną. Omawiane złożo akumulacyjne zaprojektowano w celu badań nad długoterminową akumulacją ciepła, uzyskanego ze skupiającego liniowo kolektora słonecznego. Na potrzeby eksperymentu stanowisko zmodyfikowano dodając grzałkę o regulowanych nastawach, umożliwiającą osiągnięcie różnych parametrów pracy również w warunkach laboratoryjnych.



Rys.1. Stanowisko pomiarowe z naniesionymi punktami pomiaru temperatury oraz aparaturą pomiarową [A1]

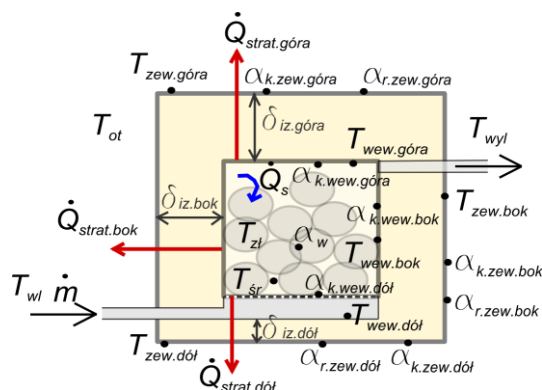
Wewnątrz materiału akumulacyjnego umieszczono termopary, po jednej w każdej warstwie. Wykonane pomiary pozwoliły na wyznaczenie charakterystyki ładowania złoża, rzeczywistej i maksymalnej ilości magazynowanego ciepła oraz efektywności procesu, określonej przez bezwymiarowy strumień ilości ciepła akumulowanego^[25]. Maksymalny strumień ciepła był równy strumieniowi ciepła doprowadzanego przez powietrze, przepływające przez akumulator. Natomiast rzeczywista ilość doprowadzanego ciepła wyznaczana była ze zmiany temperatury cegieł.

Wykonane badania pozwoliły stwierdzić, że dynamika procesu jest złożona. Początkowo powolny wzrost rzeczywistego strumienia akumulowanego ciepła mógł być wynikiem intensywnego przejmowania ciepła przez obudowę akumulatora, jednak ze względu na jego mniejszą pojemność cieplną w stosunku do materiału akumulującego, wartość rzeczywistego strumienia szybko zaczęła rosnąć. Wartość bezwymiarowego strumienia akumulowanego ciepła, prawie przez cały czas trwania procesu miała tendencję wzrostową. Jednak zdefiniowana w ten sposób efektywność procesu nie dostarczała bezpośrednio informacji o wpływie strat ciepła na przebieg procesu, a pomiar temperatury w wybranych punktach akumulatora nie informował o ilości zakumulowanej energii w całej objętości. Dlatego do lepszego poznania dynamiki procesu postanowiłem stworzyć model matematyczny opisujący zjawiska cieplne zachodzące w akumulatorze.

Wykorzystałem wcześniej opisane stanowisko do weryfikacji modelu matematycznego procesu ładowania złoża. W badaniach, opisanych w [A2], zostały użyte cegły ceramiczne jako

²⁵ Domanski, R. Magazynowanie energii cieplnej. PWN. Warszawa, 1990

wypełnienie akumulatora. Stworzyłem model cieplny dla wcześniej przedstawionego stanowiska. Główne równanie bilansowe uwzględniało ilość energii doprowadzonej z gorącym powietrzem, straty ciepła z powierzchni akumulatora oraz ilość ciepła przejętego przez materiał akumulacyjny. Ilość ciepła dostarczanego do złoża była zależna od różnicy temperatury powietrza przed i za złożem oraz natężenia przepływu. Straty ciepła uwzględniały występowanie konwekcji wymuszonej wewnątrz akumulatora, przewodzenie ciepła przez materiał izolacyjny oraz konwekcję swobodną i radiację na zewnątrz akumulatora. Ilość ciepła przejętego przez materiał akumulacyjny wynikał z różnicy pomiędzy temperaturą powietrza i wyznaczaną modelowo temperaturą materiału akumulacyjnego.



Rys.2. Schemat akumulatora z zaznaczonymi parametrami cieplnymi, wykorzystanymi w modelu [A2]

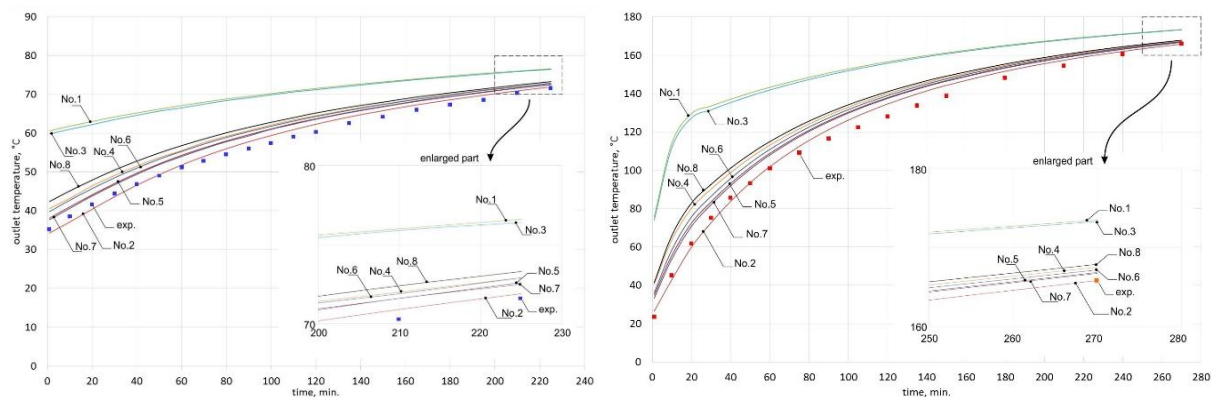
Założyłem występowanie gradientu temperatury wewnątrz akumulatora w kierunku przepływu powietrza. Wykorzystałem parametry cieplne cegły ceramicznej, a powietrze potraktowałem jako gaz półdoskonały. Stworzyłem układ 25 równań, rozwiązywanych wzdłuż kierunku przepływu powietrza. Istotne w tym miejscu było określenie intensywności wnikania ciepła do materiału akumulacyjnego. W literaturze jest dostępnych wiele korelacji na liczbę Nusselta dla wnikania ciepła do materiału złoża. Wybrałem te, które mogły być zastosowane dla cegły opływanej przez powietrze. W tym miejscu warto podkreślić, że zakładając te same warunki brzegowe dla równań otrzymuje się różne wyniki. Porównanie wyników badań eksperymentalnych z modelowymi pozwoliło mi na wybranie równania, które najlepiej charakteryzowało zachodzący proces akumulacji energii cieplnej w ceglach ceramicznych. Do przeprowadzenia doświadczenia zarówno strumień przepływu powietrza jak i wartości temperatur na wlocie czynnika do złoża zostały dobrane pod kątem przyszłej współpracy złoża ze skupiającym kolektorem słonecznym, w systemie grzewczym budynku. Parametry wybrałem na podstawie wcześniejszych analiz solarnej nagrzewnicy, przedstawionych w [26,27].

Ze względu na różne wartości temperatury na wlocie do złoża można było zaobserwować dużą różnicę w dynamice procesu przejmowania ciepła przez złożo w pierwszej godzinie procesu. Miało to znaczenie w tworzeniu modelu procesu, który w pełni odwzorowywałby jego charakter. Przebieg charakterystyki w pierwszej godzinie procesu ładowania był bardzo istotny również ze względu na to, że planowane było wykorzystanie układu w systemie, gdzie czasowa dostępność określonego poziomu bezpośredniego promieniowania słonecznego będzie determinowała temperaturę na wlocie do złoża.

²⁶ Nemš, M.; Kasperski, J. Experimental investigation of concentrated solar air-heater with internal multiple-fin array. *Renew. Energy* **2016**, *97*, 722–730

²⁷ Kasperski, J.; Nemš, M. Investigation of thermo-hydraulic performance of concentrated solar air-heater with internal multiple-fin array. *Appl. Therm. Eng.* **2013**, *58*, 411–419

Wyniki uzyskane z modelu matematycznego porównałem z wynikami badań eksperymentalnych. W modelu przyjąłem warunki brzegowe z badań, a parametrem porównawczym była temperatura wylotowa z akumulatora. Do weryfikacji zgodności wyników wykorzystałem odchyłkę wartości temperatury wylotowej powietrza, otrzymanych z modelu, w odniesieniu do wartości eksperymentalnych.



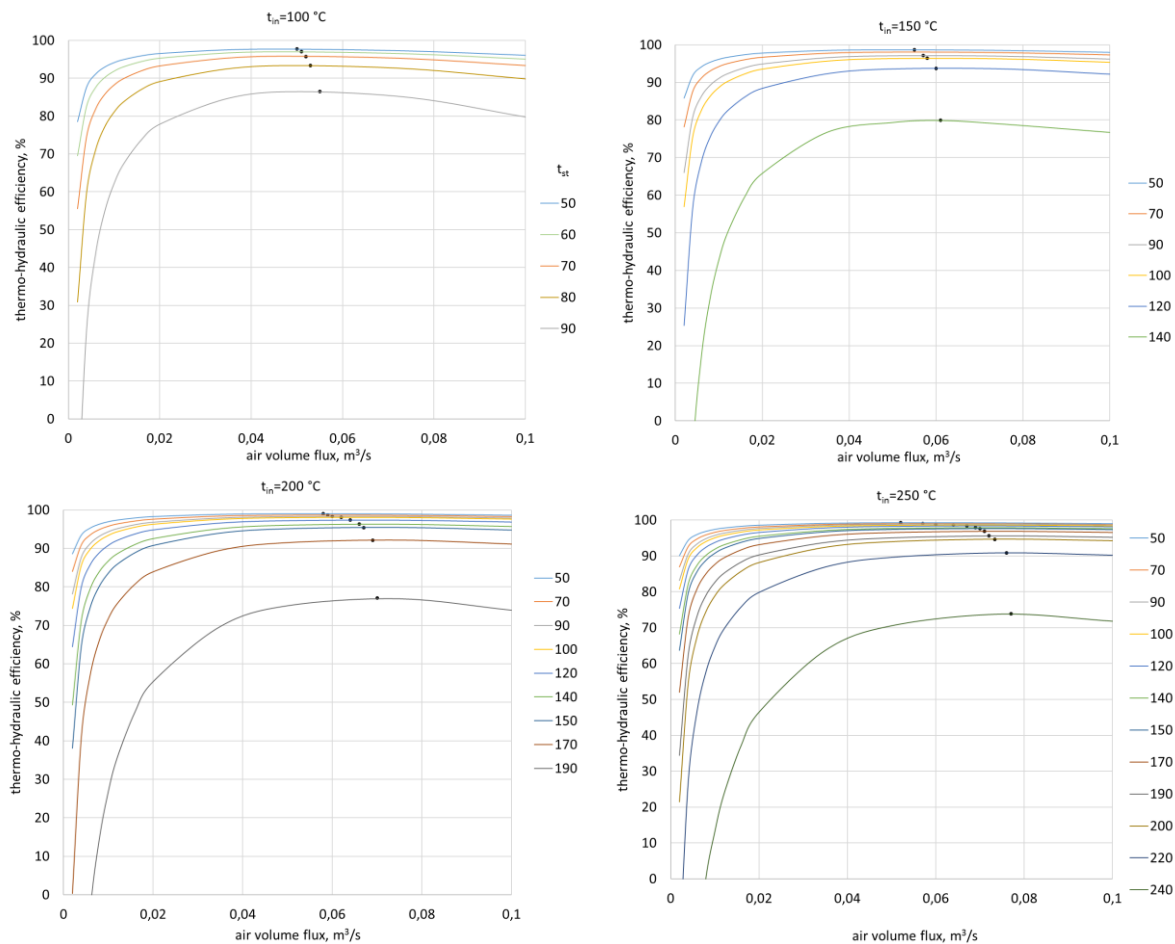
Rys.3. Temperatura powietrza wylotowego zarejestrowana podczas badań i uzyskana z modelu, dla różnych korelacji na liczbę Nu [A2]

Jedno z równań dało wyniki zbliżone do danych eksperymentalnych. Po zastosowaniu tego równania otrzymałem odchyłkę maksymalną 13,2%, minimalną 0% i średnią 2,8%. Uznałem, że równanie to w sposób wystarczający oddaje charakter zmian analizowanego procesu i wykorzystałem je do dalszej analizy.

Po uzyskaniu zadowalającej zgodności modelu z eksperymentem wyznaczyłem efektywność procesu ładowania akumulatora. Wykorzystałem do tego, opisaną w 1990 r. sprawność cieplno-przepływową^[28], która dla akumulatora ciepła definiowana jest jako ilość energii przejętej przez złożę pomniejszoną o energię traconą na skutek oporów przepływu czynnika przez złożę, do ilości energii która mogłaby zostać w całości przejęta przez złożę. Uwzględnienie w analizach spadku ciśnienia jest ważne, gdy czynnikiem roboczym w instalacji jest gaz. Dlatego sprawność cieplno-przepływową jest stosowana do oceny np. parametrów pracy instalacji solarnych z gazowym czynnikiem roboczymi została zastosowana do analizy pracy akumulatora, który miałby z taką instalacją współpracować.

Wykazałem, że sprawność cieplno-przepływową dla złoża wypełnionego cegłami jest silnie zależna od różnicy temperatury powietrza i materiału akumulacyjnego. W badanym zakresie natężenia przepływu człon przepływowy, we wzorze na sprawność cieplno-przepływową, przyjmuje znacznie mniejsze wartości niż człon cieplny. Dlatego wykonałem dodatkową analizę, w celu określenia optymalnego natężenia przepływu.

²⁸ Cortes, A.; Piacentini, R. Improvement of the efficiency of a Bare Solar Collector by means of turbulence promoters. Appl. Energy **1990**, 36, 253–261



Rys.4. Sprawność cieplno-przepływową w funkcji natężenia przepływu powietrza, dla różnych temperatur powietrza wlotowego i różnych temperatur cegły ceramicznej [A2]

W badanym złożu akumulacyjnym, sprawność cieplno-przepływową osiągała wartości przekraczające 90% w szerokim zakresie natężenia przepływu. Na sprawność wpływała różnica temperatury powietrza wlotowego i cegły ceramicznej. Dla temperatury wlotowej nie przekraczającej 150 °C różnica ta musiała być większa niż 20 °C, dla temperatur pomiędzy 150 a 250 °C większa niż 30 °C. W analizowanym zakresie, sprawność cieplno-przepływową osiągała maksymalne wartości dla natężenia przepływu 0,05 – 0,07 m³/s. Dla dużej różnicy temperatury powietrza i cegły sprawność osiągała wysokie wartości w szerokim zakresie natężenia przepływu. Wraz z rosnącą różnicą temperatury punkt maksymalnej sprawności przesunął się w kierunku większego natężenia przepływu. Spadek sprawności cieplno-przepływowej dla większych natężeń przepływu był wynikiem rosnących strat ciśnienia, które zaczynały odgrywać istotną rolę w procesie ładowania.

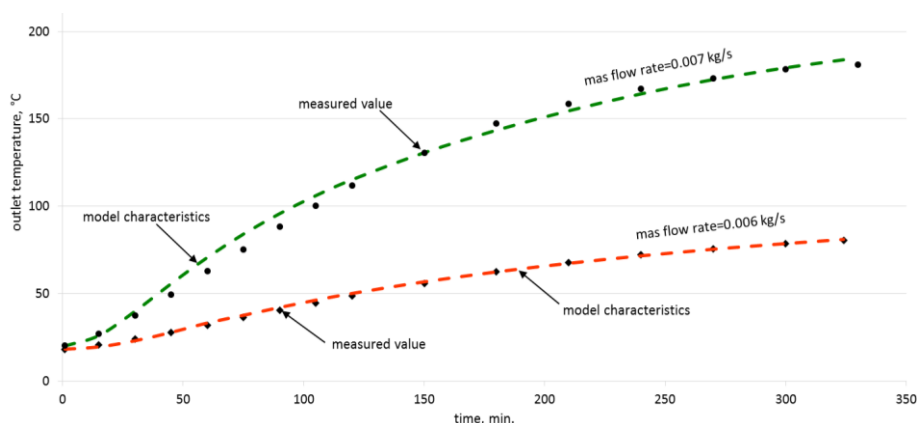
Z przeprowadzonej analizy wynika, że akumulator wypełniony cegłą ceramiczną, może pracować z wysoką efektywnością w szerokim zakresie natężenia przepływu, jednak powinien być wyposażony w aparaturę do sterowania natężeniem przepływu powietrza, które będzie uzależnione również od temperatur występujących w układzie, w celu maksymalizacji efektywności procesu magazynowania ciepła.

4.3.2. Badania procesu akumulacji w granicie

Badania nad wysokotemperaturową akumulacją ciepła były prowadzone w celu sprawdzenia koncepcji samowystarczalnego domu, wyposażonego w solarną instalację grzewczą. Do analizy

wybrano tłuczeń granitowy, jako przede wszystkim rozwiązanie tańsze w porównaniu z cegłą. Badania opisane w [A3] obejmowały analizę pracy akumulatora wypełnionego tłuczniem, badania doświadczalne i modelowe współpracy złoża ze źródłem ciepła, oraz symulacje pracy pełnowymiarowego systemu.

Badanie złoża granitowego rozpocząłem od dopasowania równania liczby Nusselta, we wcześniej opracowanym modelu. Ze względu na fakt, że żadne z dostępnych w literaturze równań nie dawało zadowalających wyników, wyznaczyłem doświadczalnie stałe w równaniu $Nu_w = A \cdot Re^B \cdot Pr^C$, w celu uzyskania wysokiej zgodności modelu z danymi doświadczalnymi.

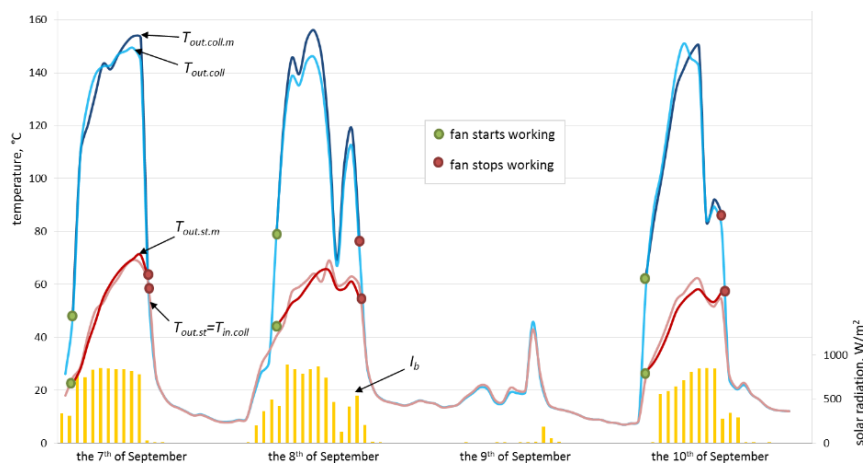


Rys.5. Zależność temperatury wylotowej od czasu ładowania złoża wypełnionego granitem [A3]

Spadek ciśnienia w układzie osiągał bardzo małe wartości. Podczas eksperymentu wyniósł on maksymalnie 1,7 Pa. Spadek ciśnienia wyznaczony analitycznie dla tego przypadku był równy 1,6 Pa. Uzyskane różnice znajdowały się w granicach niepewności pomiarowej użytego czujnika ciśnienia, która wynosiła $\pm 0,5$ Pa.

Następnie, stworzony przeze mnie model połączyłem z modelem powietrznego kolektora wewnątrznie żebrowanego, opisanym w [29]. Takie połączenie pozwoliło na odwzorowanie zjawisk zachodzących na stanowisku badawczym złoża granitowego współpracującego z w/w kolektorem skupiającym liniowo, w układzie zamkniętym. Dlatego dodając model kolektora przyjąłem, że temperatura wylotowa z kolektora była wlotową do złoża, a wylotowa ze złoża była wlotową do kolektora. Wykorzystany w doświadczeniu akumulator był nieznacznie większy od użytego wcześniej, dlatego wprowadziłem odpowiednie modyfikacje w modelu złoża. Zmieniłem również występowanie konwekcji swobodnej, po zewnętrznej stronie obudowy, na konwekcję wymuszoną, ze względu na usytuowanie stanowiska na zewnątrz. Bilans cieplny dla takiego układu uwzględniał energię promieniowania słonecznego doprowadzaną do kolektora, która służyła podniesieniu temperatury złoża, po uwzględnieniu strat ciepła w kolektorze, złożu i elementach łączących. Parametry na stanowisku doświadczalnym były rejestrowane przez 3 miesiące. W tym czasie układ działał w taki sposób, że wentylator włączał się, gdy temperatura w absorberze była wyższa niż w akumulatorze. Kolektor słoneczny był wyposażony w układ nadążny, ustawiający kolektor w kierunku słońca. Akumulator ulegał samorozładowaniu w godzinach nocnych. W celu sprawdzenia poprawności modelu zestawiono go z danymi doświadczalnymi, dla 1-godzinowego kroku czasowego.

²⁹ Kasperski, J.; Nemś, M. Investigation of thermo-hydraulic performance of concentrated solar air-heater with internal multiple-fin array. *Appl. Therm. Eng.* **2013**, *58*, 411–419



Rys.6. Porównanie danych eksperymentalnych i modelowych dla wybranych trzech dni badań [A3]

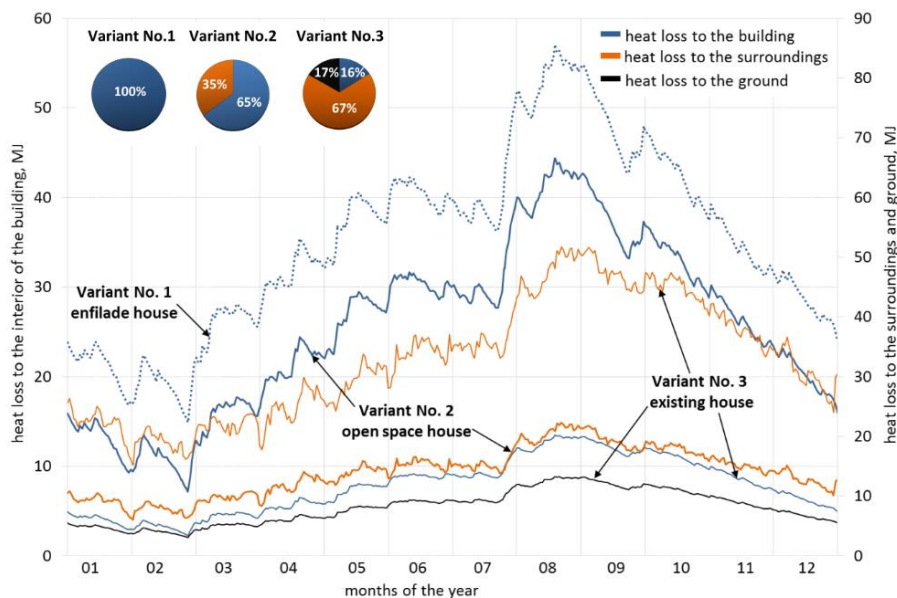
Maksymalne różnice otrzymanych wyników nie przekraczały 10%, więc model uznano za wystarczająco dokładny. Uznano, że rozbieżności mogły być spowodowane zmienną prędkością wiatru, która nie była mierzona w sposób ciągły.

W następnym kroku wykonałem skalowanie akumulatora do pełnowymiarowego, mającego pracować w w/w solarnym układzie grzewczym, zapewniającym pokrycie potrzeb cieplnych budynku o określonej energochłonności, w warunkach klimatycznych Polski. Model dopasowałem do zadanych warunków brzegowych. Ze względu na to, że akumulator miał być umieszczony wewnątrz budynku, straty ciepła z jego powierzchni miały być wykorzystane do ogrzania pomieszczeń. Sprawdzonych zostało kilka wariantów złoża, a wykonana analiza rocznej pracy opisanego systemu, wykorzystująca stworzony przeze mnie model pokazała, że możliwe jest zapewnienie komfortu cieplnego przez cały rok dla akumulatora o wymiarach 3 x 3 x 2 m i izolacji 1 m.

Badania opisane w [A4] były bezpośrednią kontynuacją prac opisanych wcześniej. W artykule została omówiona szeroka analiza pracy solarnego systemu grzewczego, wykorzystującego wielkogabarytowy akumulator ciepła w różnych rozwiązaniach architektonicznych budynku. Zostały w nim sprawdzone różne warianty integracji całorocznego solarnego systemu grzewczego z bryłą budynku. Ze względu na to, że integracja instalacji solarnych z bryłą budynku przeżywa obecnie znaczny rozwój, co jest wynikiem dużego zainteresowania inżynierów, architektów jak i odbiorców indywidualnych odnawialnymi źródłami energii, autorzy chcieli pokazać, że możliwa jest integracja opisanego wcześniej systemu nie tylko dla nowobudowanego domu jednorodzinnego, ale również dla już istniejącego budynku. Oceny integracji złoża akumulacyjnego z budynkiem dokonano w obrębie zagadnień architektonicznych, funkcjonalnych, komfortu użytkowania domu oraz eksploatacji złoża. Do analiz pod kątem energetycznym wybrano trzy różne przypadki integracji i wybrano: dom o układzie amfiladowym (wariant 1), tzw. open space (wariant 2) oraz dom istniejący (wariant 3).

Integracja energetyczna systemu grzewczego z budynkiem wymagała przeanalizowania całorocznej pracy instalacji. W tym celu został wykorzystany stworzony przeze mnie model matematyczny współpracy wielkogabarytowego złoża granitowego z kolektorem słonecznym. Zmodyfikowałem stworzony wcześniej model do opisu pracy systemu dla trzech wcześniej wymienionych form integracji. W każdej z nich założono, że system grzewczy miał pokrywać całoroczne potrzeby grzewcze budynku o zadanej energochłonności. Model złoża, dla każdego z tych przypadków rozpisalem osobno. Uwzględniał on inny strumień strat ciepła z powierzchni akumulatora, przez powierzchnię górną, dolną i boczne, w zależności od umiejscowienia złoża

w bryle budynku. W każdym z wariantów ilość traconego ciepła była różna, a ciepło to miało być wykorzystywane do pokrycia potrzeb grzewczych. Mniejsze wykorzystanie strat powodowało konieczność zastosowania kolektora o większej powierzchni lustra oraz większej objętości złoża. W konsekwencji za pomocą modelu dopasowano wielkość złoża dla każdego wariantu. Roczna analiza współpracy kolektora ze złożem akumulacyjnym pozwoliła określić temperaturę złoża jako efekt doprowadzania energii z kolektora, strat ciepła z akumulatora oraz rozładowywania złoża w celu pokrycia potrzeb grzewczych.



Rys.7. Rozkład strat ciepła z akumulatora ciepła, dla trzech wariantów zabudowy, w ciągu roku [A4]

Z przeprowadzonych symulacji wynikało, że w domu amfiladowym, w którym złoże akumulacyjne umieszczone było całkowicie wewnątrz budynku, straty ze złoża prawie całkowicie pokrywały potrzeby grzewcze budynku w okresie wiosennym i jesiennym. Łącznie, w ciągu roku straty ciepła z akumulatora pokrywały 78,32% wszystkich potrzeb. Oznaczało to również mniejsze rozładowywanie złoża, co skutkowało małymi nakładami energii na pracę wentylatora. Złoże było rozładowywane głównie w okresie zimowym. Podobna sytuacja miała miejsce w tzw. open space house, ponieważ różnice w stratach wynikały tylko ze strumienia ciepła przekazywanego do otoczenia z powierzchni dwóch ścian bocznych. Pokrycie potrzeb grzewczych stratami ciepła z akumulatora wynosiło 61,32%. Najmniejsze wykorzystanie strat ciepła ze złoża do pokrycia potrzeb było dla domu istniejącego i wynosiło tylko 23,84%. Efektem tego była konieczność zastosowania prawie dwukrotnie większego złoża akumulacyjnego w porównaniu do dwóch poprzednich wariantów. Ostatni wariant charakteryzował się tym, że nie było potrzeby usuwania ciepła z pomieszczenia w którym stoi akumulator, do otoczenia.

W wykonanej analizie wykazano, że integracja omówionego systemu z budynkiem wpływa na architekturę i funkcjonalność budynku, a umiejscowienie akumulatora ciepła wpływa na jego gabaryty i wielkość kolektora słonecznego. Oznacza to, że odpowiedzią całorocznego systemu solarnego na integrację z budynkiem jest zwiększenie lub zmniejszenie gabarytów systemu grzewczego.

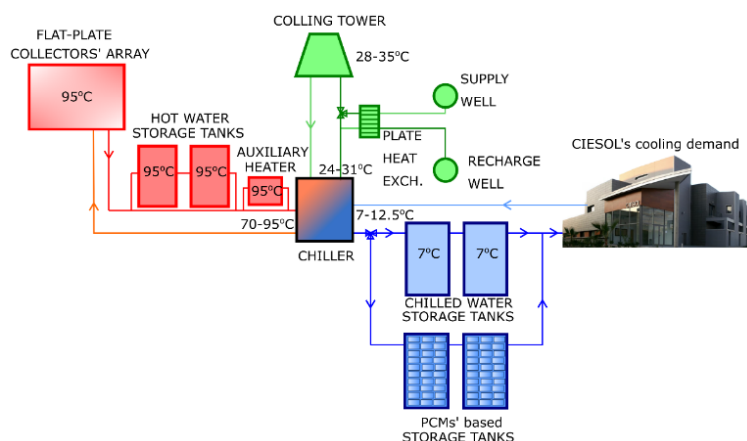
Analizy wykonane dla różnych wariantów architektonicznych zakończyła szereg moich prac nad akumulatorami stałofazowymi, a wykonana szeroka analiza pracy akumulatorów w różnych warunkach dostarczyła istotnych informacji dotyczących efektywności pracy akumulatora, jak i jego współpracy ze źródłem ciepła oraz odbiornikiem, w postaci budynku mieszkalnego. Procesy

wymiany ciepła zostały dostatecznie dobrze odwzorowane, aby stworzone modele matematyczne mogły zostać wykorzystane do przeprowadzania rocznych symulacji pracy.

4.3.3. Badania procesu akumulacji w materiałach zmiennofazowych

Prace wykonywane w ramach międzynarodowego projektu [F2] opisałem m.in. w publikacjach [A5] i [A6]. Były one poświęcone badaniom modelowym zbiorników wypełnionych dwoma rodzajami materiału zmiennofazowego, do akumulacji ciepła i chłodu. Cały projekt zakładał kompleksową analizę pracy takich zbiorników, począwszy od badań materiałowych nad PCM, badań na pojedynczym pojemniku, prac projektowych 2 zbiorników i symulacji pracy. Efektem końcowym miało być włączenie omawianych zbiorników w solarny układ grzewczo-chłodniczy, pokrywający potrzeby budynku oraz wykonanie końcowej analizy ekonomicznej.

Projektowane zbiorniki z PCM miały zastąpić zbiorniki wodne, pracujące na potrzeby budynku CIESOL, zlokalizowanego na Universidad de Almeria, w Hiszpanii. Instalacja wykorzystuje kolektory słoneczne jako źródło ciepła dla chłodziarki absorpcyjnej. Zbiorniki w instalacji miały za zadanie zmniejszać cykliczność pracy urządzenia chłodniczego w okresie letnim oraz akumulować ciepło w okresie grzewczym. Wynikiem tego miała być również bardziej wydajna praca całego systemu [B2].



Rys.8. Instalacja grzewczo-chłodnicza budynku CIESOL (Almeria), wykorzystująca zbiorniki akumulacyjne z PCM [A5]

Moim zadaniem było stworzenie modelu matematycznego opisującego procesy cieplne zachodzące wewnątrz akumulatora oraz wykonanie symulacji pracy dwóch takich zbiorników pracujących w układzie szeregowym lub kaskadowym, na które pozwalał rzeczywisty system grzewczo-chłodniczy, zainstalowany w budynku CIESOL.

Prace nad modelem rozpocząłem od przeglądu dostępnych w literaturze modeli. Można w niej znaleźć wiele prac poświęconych modelowaniu matematycznemu zbiorników wypełnionych materiałem zmiennofazowym. Są to przeważnie modele 0, 1 lub 2D. Modele 0D nie są skomplikowane, ale dostarczają wiele informacji o współpracy akumulatora ciepła z instalacją. Zawierają szereg uproszczeń, a uzyskiwane wyniki nie dają wysokiej zgodności z eksperymentem^[30]. Modele 2D i 3D, wykorzystujące techniki CFD, pozwalają uzyskać wysoką

³⁰ Belmonte, J.F.; Eguía, P.; Molina, A.E.; Almendros-Ibáñez, J.A.; Salgado, R. A simplified method for modeling the thermal performance of storage tanks containing PCMs. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, *95*, 394–410

zgodność z doświadczeniem^[31,32], ale ze względu na długi czas obliczeń nie są przydatne, gdy konieczne jest sprawdzenie pracy akumulatora w różnych warunkach. Kompromisowym rozwiązaniem jest model 1D, ponieważ umożliwia wykonanie szeregu obliczeń w krótkim czasie, bez wprowadzania nadmiaru uproszczeń.

Podczas szczegółowej analizy literaturowej nie znalazłem dobrze zwalidowanego modelu 1D zbiornika zawierającego dwa różne materiały zmiennofazowe. Dlatego postanowiłem stworzyć własny model dla projektowanych zbiorników.

Analiza kilkuletnich badań doświadczalnych pracy instalacji ze zbiornikami wodnymi pokazała, że dwa zbiorniki o pojemności 2 m³ każdy, wypełnione PCM powinny zastąpić istniejące zbiorniki wodne o łącznej pojemności 5 m³. Temperatura pracy zbiorników w okresie letnim wynosiła 7-15 °C, a w okresie zimowym około 45 °C. Wykonany bilans cieplny budynku, opisany w [B4], wykazał, że potrzeby chłodnicze są blisko 3-krotnie wyższe niż grzewcze. Dlatego jednym z głównych zadań moich prac projektowych było określenie proporcji PCM do akumulacji ciepła i chłodu. W tym celu stworzyłem model pracy zbiorników. Jednak jego walidacja nastąpiła po zakończeniu etapu projektowania i wykonania zbiorników z PCM. Ze względu na rozwiązanie konstrukcyjne, ułatwiające dostęp do wnętrza zbiornika, zostały dobrane dwa zbiorniki o wysokości wewnętrznej l_{tank} 2,065 m, średnicy wewnętrznej d_{tank} 1,100 m i grubości izolacji δ_{ins} wynoszącej 0,100 m. Ze względu na temperaturę pracy instalacji zdecydowano, że temperatura przemiany fazowej PCM do akumulacji chłodu powinna wynosić około 10 °C, a do magazynowania ciepła powinna być nieznacznie wyższa niż 45 °C. Dobrano komercyjne PCM firmy PCMProducts oznaczone jako S10 i S46, charakteryzujące się temperaturą zmiany fazy odpowiednio 10 i 46 °C. Dobrano również pojemniki do przechowywania PCM, oferowane przez dostawcę materiałów S10 i S46. Wybrano pojemniki ICEFlat o wymiarach zewnętrznych 0,500 x 0,250 x 0,032 i grubości około 3 mm.

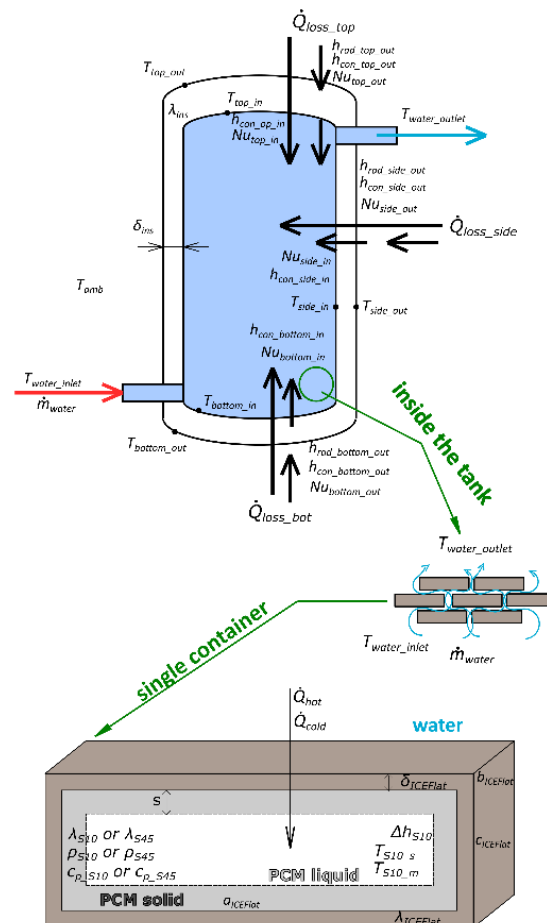
Pojemniki zawierające materiał S10 i S46 miały znajdować się wewnątrz każdego ze zbiorników. Następnie określiłem wstępne proporcje pojemników zawierających materiał do akumulacji ciepła i chłodu, ponieważ potrzeby grzewcze znacznie różniły się od potrzeb chłodniczych, przyjąłem ilość pojemników z S46 do S10 jako: 50-50 %, 40-60 %, 30-70 %, 20-80% i 10-90 % (symulacje opisałem w [A6]), a finalnie dodałem jeszcze: 15-85 % i 12-88 %. Jak się później okazało, ostatnia proporcja została wybrana jako końcowa.

Procesy cieplne zachodzące w akumulatorach postanowiłem opisać w sposób klasyczny, pozwalający na rozwiązanie równań w dowolnym programie obliczeniowym. Korzystając z wiedzy zdobytej podczas badań akumulatorów stałofazowych, przyjąłem, że model zbiornika będzie modelem 1D, a zmianie będą ulegały parametry procesowe wzdłuż przepływu wody w zbiornikach. Model będzie uwzględniał wymianę ciepła pomiędzy przepływającą przez zbiorniki wodą a pojemnikami z PCM oraz straty ciepła. Ponadto w opisie procesu zmiany fazy zachodzącego w pojemnikach z PCM postanowiłem również wykorzystać model 1D. Założyłem, że proces wymiany ciepła będzie zachodził tylko przez dwie największe powierzchnie dobranych pojemników. Oznaczało to, że zmiana fazy w procesie rozładowywania zbiorników zachodzi od ścianki pojemnika do jego środka. Model cieplny dla zbiorników został opisany dla jednego z nich, ponieważ drugi był identyczny. Należy zaznaczyć, że w modelu uwzględniłem straty ciepła do otoczenia, będące ciepłem pobranym przez zbiornik w trybie chłodzenia. Dlatego ogólne równanie

³¹ Mohammadnejad, F.; Hossainpour, S. A CFD modeling and investigation of a packed bed of high temperature phase change materials (PCMs) with different layer configurations. *J. Energy Storage* **2020**, *28*

³² Wang, Z.; Zhang, H.; Dou, B.; Zhang, G.; Wu, W. Influence of inlet structure on thermal stratification in a heat storage tank with PCMs: CFD and experimental study. *Appl. Therm. Eng.* **2019**, *162*

bilansowe przyrównywało strumień doprowadzanego ciepła wraz z przepływającą przez zbiornik wodą oraz straty ciepła, z ciepłem przejmowanym przez materiał S10 oraz S46. Strumień ciepła przenikający przez każdą z powierzchni zbiornika uwzględniał występowanie konwekcji swobodnej oraz radiacji po stronie otoczenia, przewodnictwo cieplne izolacji oraz konwekcję wymuszoną po stronie wewnętrznej. Pomiąłem opór cieplny stawiany przez materiał z którego wykonane były ścianki zbiornika, ze względu na niewielką grubość i wysoki współczynnik przewodzenia ciepła. Powietrze na zewnątrz zbiornika potraktowałem jako gaz półdoskonały, a parametry wody uzależniłem od jej temperatury.



Rys.9. Schemat zasobnika PCM z zaznaczonymi parametrami fizycznymi, uwzględnionymi w bilansie cieplnym [A5]

Część modelu zbiornika odpowiedzialna za opis procesu wymiany ciepła pomiędzy przepływającą wodą a PCM miała dwie składowe: opisujące przekazywanie ciepła pomiędzy wodą i S10 oraz wodą i S46. Różnice wynikały z różnych temperatur, w których materiały te zmieniają fazy. Rozpatrywałem dwa tryby pracy: grzania i chłodzenia. Praca zbiorników na potrzeby chłodnicze oznaczała przesuwanie się frontu zmiany fazy materiału S10 do środka pojemnika. Z tej linii frontu zmiany fazy ciepło (chłód) było przekazywane do wody. W tym trybie pracy akumulatorów, w materiale S46 nie zachodziła zmiana fazy. Ciepło oddawane przez materiał pochodziło z ciepła zmagazynowanego w postaci ciepła właściwego. Ze względu na to, że S46 podczas całego procesu był w fazie stałej przyjąłem, że transport ciepła odbywa się na drodze przewodnictwa z całej objętości materiału znajdującego się w pojemniku i przyjąłem, że opór cieplny z całej objętości jest obliczany dla połowy odległości licząc od ścianki pojemnika do połowy jego wysokości. Parametry procesowe zmieniały się w czasie rozładowywania zbiorników.

Do sterowania procesem przekazywania ciepła, gdy materiał nie przechodzi przemiany fazowej odpowiednim parametrem była temperatura PCM. Gdy przemiana zachodziła w określonej temperaturze konieczne było wprowadzenie entalpii, jako parametru sterującego procesem. W proponowanym modelu zastąpiłem entalpię przemiany fazowej ciepłem właściwym, zmieniającym się w wąskim zakresie temperatury. Dla S10 ustaliłem, że ciepło to zmienia się liniowo pomiędzy 10, a 11 °C. Pozwoliło to na wyeliminowanie entalpii z parametrów sterujących. Dlatego w proponowanym modelu tylko temperatura PCM stała się parametrem sterującym procesem wymiany ciepła. Model pozwalał na założenie, że zmiana fazy zachodzi np. pomiędzy 10 a 10.001 °C, dla której model wciąż działał poprawnie, jednak przyjąłem większy przedział ponieważ badania laboratoryjne przeprowadzone na pojedynczym pojemniku wypełnionym S10 pokazały, że zmiana fazy materiału S10 nie zachodzi w punkcie, ale właśnie w przedziale około 10-11 °C. Sprawilo to, że przyjęte założenie było bliższe stanu faktycznego. Gdy w S10 nie zachodziła przemiana opór cieplny stawiany przez ten PCM liczyłem w taki sam sposób jak dla S46.

Strumień ciepła \dot{Q}_{cold} , przekazywany pomiędzy wodą a S10, uwzględniał zmienny opór cieplny podczas zmiany fazy, określony przy pomocy tzw. frontu zmiany fazy S :

$$\dot{Q}_{cold} = \begin{cases} \frac{n_{S10} \cdot S_{ICEFlat} (T_{water_avg} - T_{S10_f})}{\frac{1}{h_{water_S10}} + \frac{\delta_{ICEFlat}}{\lambda_{ICEFlat}} + \frac{4}{\lambda_{S10}}}, T_{S10_f} \geq T_{S10_s} \\ \frac{n_{S10} \cdot S_{ICEFlat} (T_{water_avg} - T_{S10_f})}{\frac{1}{h_{water_S10}} + \frac{\delta_{ICEFlat}}{\lambda_{ICEFlat}} + \frac{c_{ICEFlat} \cdot S}{2 \lambda_{S10}}}, T_{S10_s} > T_{S10_f} > T_{S10_m} \\ \frac{n_{S10} \cdot S_{ICEFlat} (T_{water_avg} - T_{S10_f})}{\frac{1}{h_{water_S10}} + \frac{\delta_{ICEFlat}}{\lambda_{ICEFlat}} + \frac{4}{\lambda_{S10}}}, T_{S10_m} \geq T_{S10_f} \end{cases}$$

gdzie istotne parametry to: $S_{ICEFlat}$ – powierzchnia pojemników z PCM, $c_{ICEFlat}$ – wysokość pojemników z PCM, $\delta_{ICEFlat}$ – grubość pojemników z PCM.

Parametr S zdefiniowałem jako odległość, z której uwalniane jest ciepło w materiale S10, od ścianki pojemnika i po przekształceniach otrzymałem:

$$S = \frac{T_{S10_f} - T_{S10_m}}{T_{S10_s} - T_{S10_m}}$$

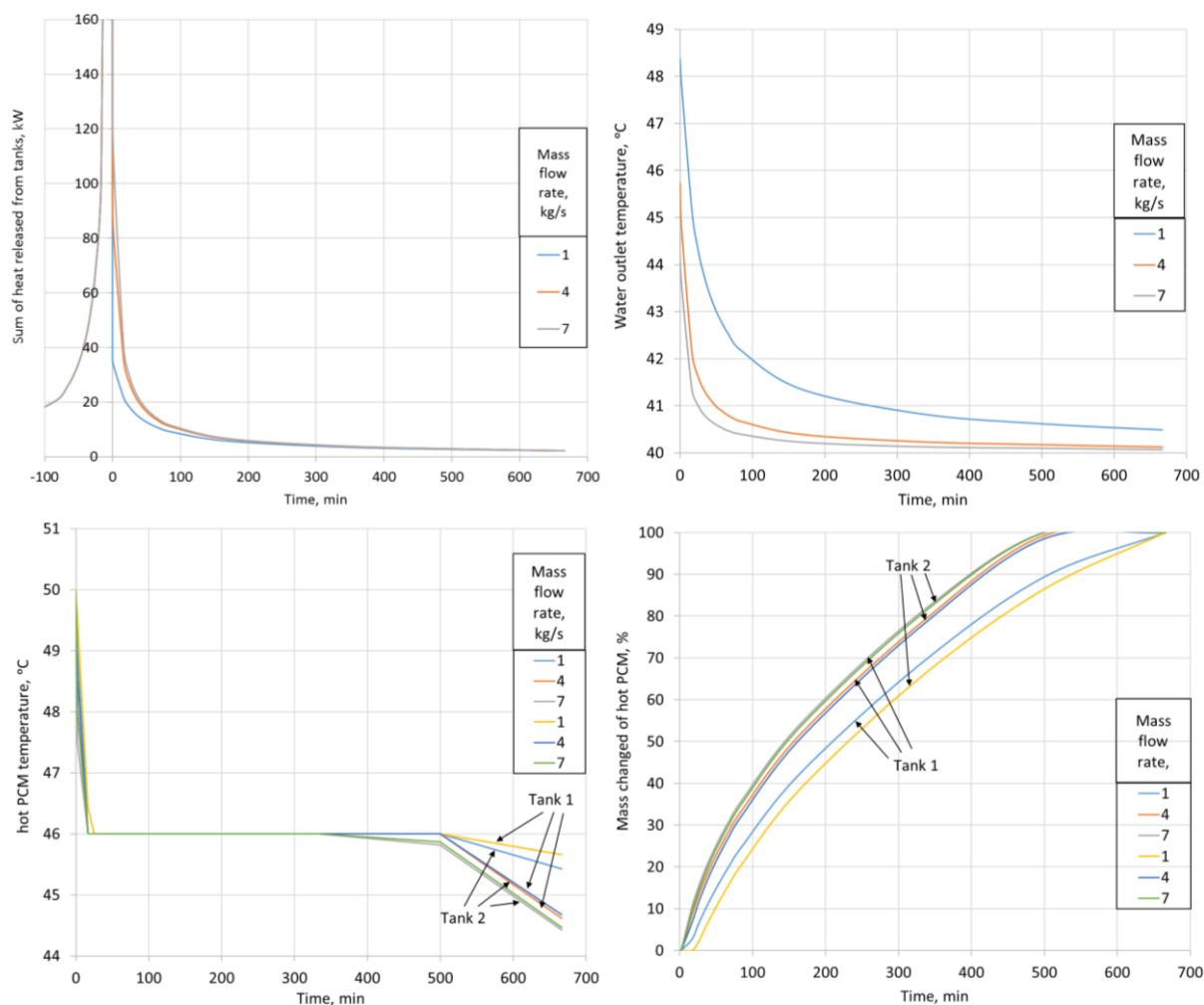
gdzie: T_{S10_f} - temperatura materiału S10, T_{S10_m} - temperatura topnienia materiału S10, T_{S10_s} - temperatura krzepnięcia materiału S10.

Strumień ciepła, który był przekazywany pomiędzy wodą a S10 był równy strumieniowi ciepła akumulowanego w materiale S10:

$$\dot{Q}_{cold} = \begin{cases} \frac{n_{S10} \cdot m_{S10} \cdot c_{pS10} \cdot (T_{S10_m} - T_{S10_0}) + n_{S10} \cdot m_{S10} \cdot \Delta h_{S10} + n_{S10} \cdot m_{S10} \cdot c_{pS10} \cdot (T_{S10_f} - T_{S10_s})}{\tau}, T_{S10_f} \geq T_{S10_s} \\ \frac{n_{S10} \cdot m_{S10} \cdot c_{pS10} \cdot (T_{S10_m} - T_{S10_0}) + n_{S10} \cdot 2 \left(a_{ICEFlat} \cdot b_{ICEFlat} \cdot \frac{c_{ICEFlat} \cdot S}{2} \right) \cdot \rho_{S10} \cdot \Delta h_{S10}}{\tau}, T_{S10_s} > T_{S10_f} > T_{S10_m} \\ \frac{n_{S10} \cdot m_{S10} \cdot c_{pS10} \cdot (T_{S10_f} - T_{S10_0})}{\tau}, T_{S10_m} \geq T_{S10_f} \end{cases}$$

Analogicznie wykonałem opis ciepła wymienianego pomiędzy wodą i materiałem S46, jednak temperatury zmiany fazy dla S46 były inne niż dla S10, podobnie jak właściwości fizyczne samego materiału akumulacyjnego. Stworzony model, rozwiązywany numerycznie, dostarczał informacji o parametrach cieplnych PCM oraz wyznaczał temperaturę wody wpływającej ze zbiornika. Temperatura ta posłużyła jako główny parametr podczas późniejszej weryfikacji poprawności modelu, omówiony w dalszej części.

Wyniki wykonanych symulacji pracy zbiorników na potrzeby grzewcze opisałem w [A6]. Dla szeregowego układu połączeń przyjąłem temperaturę wody dopływającej do pierwszego zbiornika równą 40 °C, a temperaturę materiału akumulacyjnego wewnątrz zbiorników równą 50 °C. Symulacje pracy zbiorników wykonałem dla różnych proporcji S46 / S10 oraz dla różnych wartości natężenia przepływu wody, w funkcji czasu rozładowania. W obliczeniach przyjąłem, że ze względu na stan ustalony wewnątrz każdego ze zbiorników, dla czasu $\tau_0 = 0$, w pierwszej kolejności moc cieplna będzie wynikiem wypływu ciepłej wody znajdującej się pomiędzy pojemnikami z PCM. W artykule pokazałem zmianę najważniejszych parametrów pracy zbiorników, takich jak: moc cieplna zbiorników, temperatura wypływającej wody, temperatury materiałów S10 i S46 oraz udział masowy S46, który zmienił stan skupienia, dla różnych udziałów masowych S46 do S10.



Rys.10. Strumień uzyskiwanego ciepła z dwóch zbiorników o pojemności 2 m³ każdy, temperatura wody wypływającej z drugiego zbiornika, temperatura materiału S46, udział masowy S46 zmieniający fazę, dla proporcji S46 i S10 wynoszącej 10-90% [A6]

Wyniki symulacji pokazały, że moc cieplna zbiorników zmieniała się znacząco w czasie. Wzrastała wraz ze zwiększeniem natężenia przepływu wody. Szybko malejący strumień uwalnianego ciepła był również zależny od różnicy temperatury wody i PCM, co było widoczne w pierwszych i ostatnich minutach procesu. Malejący strumień ciepła w czasie, gdy S46 zmieniał stan skupienia, spowodowany był głównie oddalającym się frontem zmiany fazy od ścianki pojemnika. Powodowało to wzrost oporu cieplnego po stronie materiału zmienno fazowego. Ponadto temperatura PCM w pierwszym zbiorniku zmieniała się szybciej niż w drugim, za sprawą

wyższej temperatury przepływającej wody. Powodowało to uzyskanie większej mocy cieplnej zbiornika pierwszego i jego szybsze rozładowywanie. Warto zauważyć, że dla małych natężeń przepływu wody proces zmiany fazy mógłby trwać nawet ponad 10 godzin, a strumień uwalnianego ciepła byłby wtedy niewielki i nie pozwalał na długą pracę systemu grzewczego, ponieważ potrzeby cieplne budynku byłyby znacznie większe. Zwiększenie ilości materiału S10 kosztem S46 skutkowało uzyskiwaniem niższej temperatury wody wypływającej ze zbiorników. Było to spowodowane mniejszą ilością ciepła zakumulowanego w zadanej temperaturze i mniejszą ilością materiału, który przechodził przemianę fazową. Zmiana proporcji S46 do S10 powodowała zmianę czasu pracy zbiorników. Dlatego efektem końcowym wykonanych przeze mnie analiz było określenie finalnych udziałów S46 do S10 na 12-88 %, pomimo, że potrzeby grzewcze były 3-krotnie mniejsze od chłodniczych.

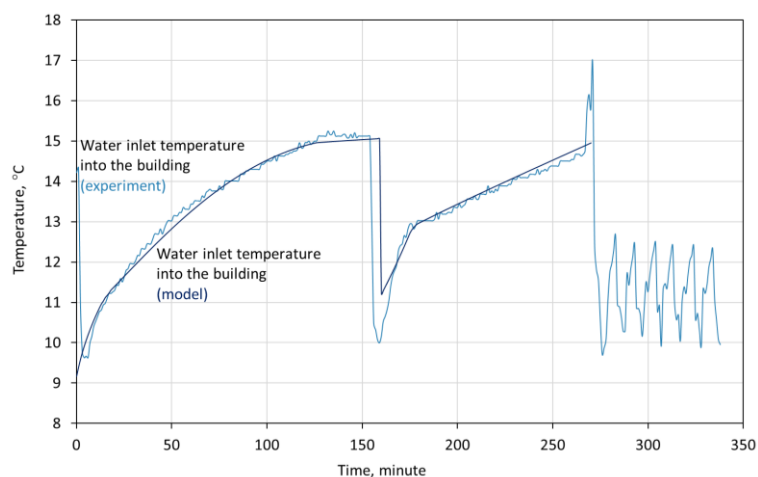
Po wykonaniu zbiorników wypełnionych PCM i włączeniu ich w obieg grzewczo-chłodniczy możliwe było zweryfikowanie poprawności wykonanego modelu, opisane w [A5]. Założenia przyjęte w modelu zostały ustalone na podstawie danych eksperymentalnych. Do najważniejszych należy zaliczyć:

- pracę zbiorników w konfiguracji kaskadowej, która oznaczała, że w pierwszej kolejności rozładowywany był pierwszy zbiornik. Gdy temperatura wody wypływającej osiągnęła 15 °C następowała zmiana nastaw i woda wypływająca z pierwszego zbiornika była kierowana do drugiego,
- temperatura PCM w obu zbiornikach wynosiła około 6,5 °C, jako rezultat długotrwałego ładowania ich przez urządzenie chłodnicze,
- masowe natężenie przepływu wody wynosiło 7 m³/h.

Gdy temperatura wody kierowanej do budynku przekraczała 15 °C następowała zmiana nastaw zaworów, w celu odłączenia zbiorników z PCM i uruchomienia chłodziarki.

Badania eksperymentalne na instalacji zostały wykonane we wrześniu 2020 roku. Zbiorniki zostały naładowane w ciągu dnia i pozostawione o czasu wykonania doświadczenia w godzinach wieczornych. W badaniach zarejestrowano pracę układu chłodzenia, podczas której nastąpiło wyłączenie urządzenia chłodniczego i przełączenie pracy układu w celu rozładowania zbiorników. W trakcie włączania pierwszego zbiornika zarejestrowany został charakterystyczny skok temperatury. Temperatura wody przepływającej przez zbiornik wzrastała, a gdy osiągnęła temperaturę 15 °C system sterowania włączył drugi zbiornik w obieg chłodniczy i następnie zbiorniki zaczęły pracować jak w układzie szeregowym. Badania zakończyły się, gdy temperatura wody wypływającej z drugiego zbiornika osiągnęła maksymalną dopuszczalną temperaturę. Po tym czasie nastąpiło odłączenie zbiorników i uruchomienie chłodziarki, która pracowała cyklicznie.

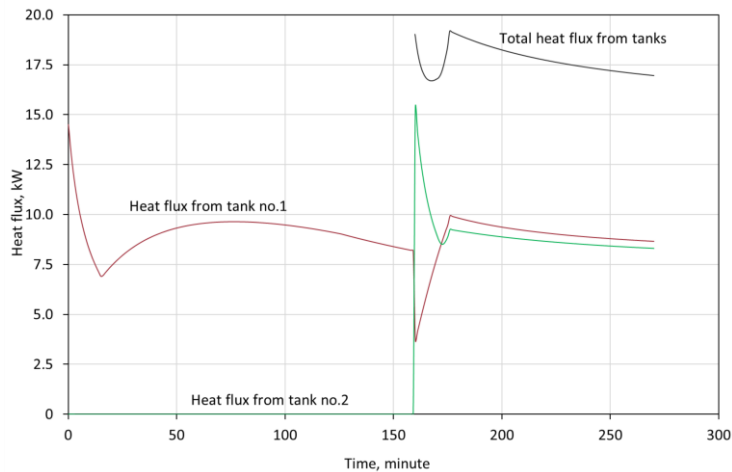
Walidację modelu wykonałem na podstawie temperatury wody wypływającej ze zbiorników, ponieważ parametr ten był kontrolowany przez system sterujący instalacją chłodniczą oraz był wielkością wyznaczaną w modelu matematycznym.



Rys.11. Porównanie danych modelowych i doświadczalnych temperatury wody wypływającej ze zbiorników, w procesie chłodzenia budynku [A5]

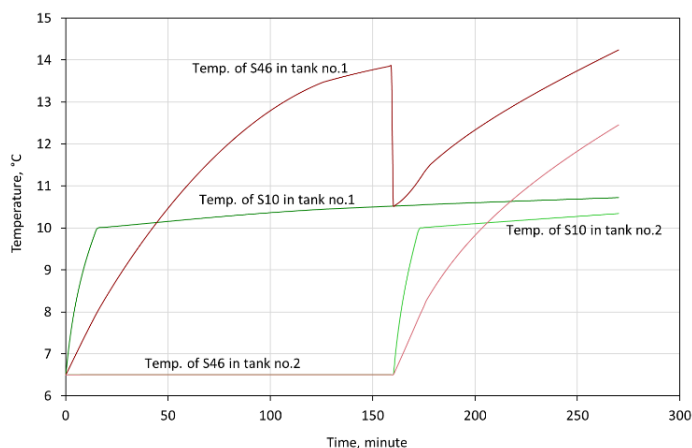
Wyniki pokazały dużą zgodność temperatury wody w czasie, ponieważ krzywa modelowa odpowiada wynikom pomiarów. Ponadto różnice w wartościach temperatur były niewielkie. Były one zauważalne w czasie dołączania drugiego zbiornika do układu. Jednak mogły mieć na to wpływ dwa czynniki. Pierwszym było dostarczanie przez model natychmiastowej odpowiedzi na zmieniającą się temperaturę wlotową. W badaniach doświadczalnych zastosowane zbiorniki miały pojemność 2 m³ każdy. Oznaczało to, że występowała bezwładność spowodowana czasem przepływu wody przez zbiorniki. Drugim powodem mogła być zmieniająca się, wraz z potrzebami chłodniczymi budynku, temperatura wody wlotowej i różnica wynikająca z miejsca odczytu tej temperatury, a faktyczną temperaturą wody wpływającej do zbiornika. Zmiana ta była widoczna w czasie poprzedzającym dołączenie drugiego zbiornika. Nie zmienia to faktu, że model odwzorowywał zmiany temperatury wody i finalnie poprawnie reagował na impuls wejściowy.

Uznając, że model był zgodny z danymi doświadczalnymi możliwe było otrzymanie dodatkowych informacji dotyczących rzeczywistego procesu, których uzyskanie na stanowisku badawczym jest utrudnione. Stworzony przeze mnie model dostarczał takich danych jak: udział każdej fazy materiału zmieniającego stan skupienia, temperatura PCM, strumień wymienianego ciepła, straty ciepła, współczynniki wnikania ciepła i inne. Do oceny pracy systemu ważne były dwa parametry: temperatura wody wypływającej ze zbiorników i strumień wymienianego ciepła pomiędzy wodą i PCM. Pierwszy determinował konfigurację pracy instalacji chłodniczej, ponieważ był parametrem kontrolnym. Drugi pozwalał określić czy moc cieplna zbiorników była wystarczająca do zapewnienia komfortu cieplnego w budynku. Wyniki badań pokazały, że temperatura wody dopływającej do zbiorników rośnie. Oznaczało to, że potrzeby chłodnicze były wyższe niż aktualna moc cieplna zbiorników, która malała w czasie badań.



Rys.12. Strumień przekazywanego ciepła pomiędzy wodą a materiałami zmienno fazowymi, znajdującymi się w zbiornikach akumulacyjnych, podczas procesu rozładowywania zbiorników [A5]

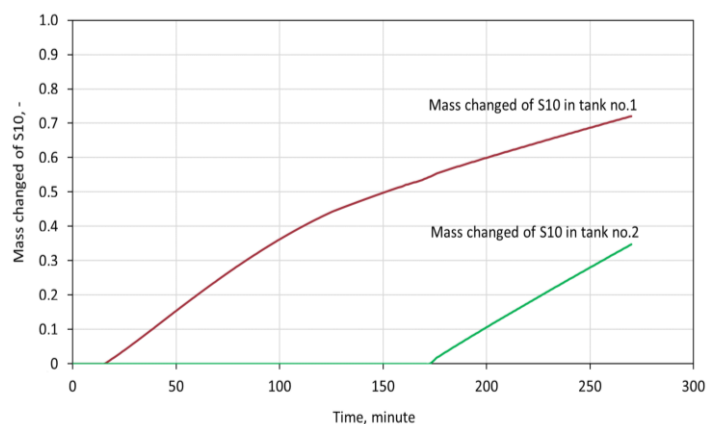
Szczegółowa analiza parametrów pracy pokazała wyraźny spadek mocy cieplnej w pierwszych minutach procesu. Następnie moc nieznacznie wzrastała, co mogło być spowodowane wzrastającą temperaturą wody wpływającej do zbiorników. Powodowało to większą różnicę temperatur pomiędzy wodą i materiałem akumulacyjnym. Następnie strumień ten malał, co mogło wynikać ze zmniejszającej się różnicy temperatury pomiędzy wodą i PCM, jak i wzrastającym oporem cieplnym. Po dołączeniu drugiego zbiornika strumień ciepła w tym zbiorniku zmieniał się w podobny sposób. Analizując proces należało skontrolować temperaturę materiałów zmienno fazowych. Z analizy średniej temperatury PCM wynikało, że temperatura materiału S46 podążała za zmianą temperatury wody przepływającej przez zbiorniki. Jednak dla S10 widoczne było wyhamowanie dla temperatury w której następuje topnienie materiału. Odpowiada to zmieniającemu się strumieniowi przekazywanego ciepła. Gdy S10 osiągnął temperaturę topnienia przestała maleć różnica temperatury wody i PCM. Skutkiem tego był nieznaczny wzrost strumienia wymienianego ciepła. Jednak strumień ten zaczął ponownie maleć, co wynikało z szybko wzrastającego oporu cieplnego, powodowanego przesuwaniem się frontu zmiany fazy, przy nieznacznie zmieniającej się temperaturze S10.



Rys.13. Średnia temperatura materiałów zmienno fazowych w zbiornikach akumulacyjnych, podczas procesu rozładowywania zbiorników [A5]

Parametrem wyznaczanym przez model, który dostarcza informacji o procesie był udział masowy fazy ciekłej materiału S10. Zarówno w pierwszym jak i drugim zbiorniku materiał S10 nie ulegał stopieniu w całości. Wzrastająca ilość fazy ciekłej S10 była wynikiem oddalania się frontu zmiany fazy od ścianki pojemnika. Oznaczało to, że opór cieplny rósł, spowalniając wymianę

ciepła. Wyniki uzyskane z modelu pokazały, że nastawy podczas prowadzonych badań zostały dobrane niepoprawnie, ponieważ nie wykorzystywały całego potencjału cieplnego PCM i powinny zostać zmienione. Parametrem mającym wpływ na szybkość wymiany ciepła jest m.in. masowe natężenie przepływu wody, które mogłoby zostać zwiększone, w celu poprawy wymiany ciepła.



Rys.14. Udział masowy fazy ciekłej materiału S10 w zbiornikach akumulacyjnych, podczas procesu rozładowywania zbiorników

Szczegółowa analiza rozładowywania zbiorników wypełnionych materiałami zmiennofazowymi wykazała problem ze zmniejszającym się strumieniem ciepła w trakcie trwania procesu. Czynnikiem mającym duży wpływ na taki stan rzeczy jest szybko wzrastający opór cieplny podczas przekazywania ciepła pomiędzy wodą a materiałem zmiennofazowym. Wynika to z faktu niskiej wartości współczynnika przewodzenia ciepła tych materiałów i stanowi problem w szerszym zastosowaniu ich w akumulatorach ciepła. Dlatego w pracy [A7] podjąłem próbę modyfikacji tego współczynnika poprzez zastosowanie domieszki. Badaniom poddałem parafinę techniczną, jaka jest używana do produkcji świec i zniczy. Jest to mieszanina alkanów o różnej liczbie atomów węgla w cząsteczce. Jako materiał modyfikujący zastosowałem stal nierdzewną oraz aluminium w formie wiórów, będących materiałem odpadowym z obróbki skrawaniem. Taki komponent ma wiele zalet. Do najważniejszych można zaliczyć: bardzo niski koszt, wysoki współczynnik przewodzenia ciepła (17,2 W/(m·K) dla stali nierdzewnej i do 229 W/(m·K) dla aluminium)^[33], forma spirali uniemożliwiająca opadanie dodatku na dno zbiornika, znacznie rozbudowaną powierzchnię w stosunku do zajmowanej objętości, dużą ilość miejsc styku pojedynczych elementów materiału modyfikującego.



Rys.15. Zastosowany dodatek do parafin: wióry stalowe (po lewej), wióry aluminiowe (po prawej) [A7]

Kompozyt przygotowaliśmy w trzech różnych składach, dla obu metali. Do ustalenia proporcji wyznaczyłem udziały masowe.

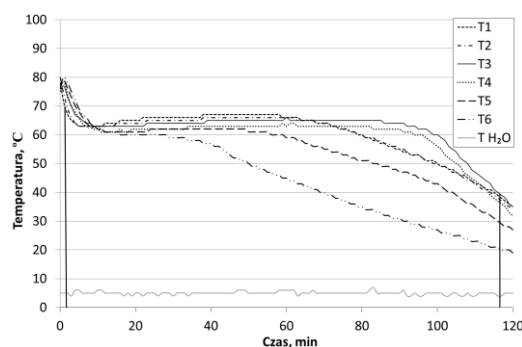
³³ Ettouney H.; Alatiqi I.; Al-Sahali M.; Al-Hajirie K., Heat transfer enhancement in energy storage in spherical capsules filled with paraffin wax and metal beads. *Energy Conver. Manage.* **2006**, 47, 211–228

Tab.1. Udziały masowe składników kompozytu [A7]

Kompozyt		Udział masowy, %	
		Metal	Parafina
Parafina		0	100
Parafina + stal	S1	3,5	96,5
	S2	6,5	93,5
	S3	10,2	89,8
Parafina + aluminium	A1	3,2	96,8
	A2	6,2	93,8
	A3	8,2	91,8

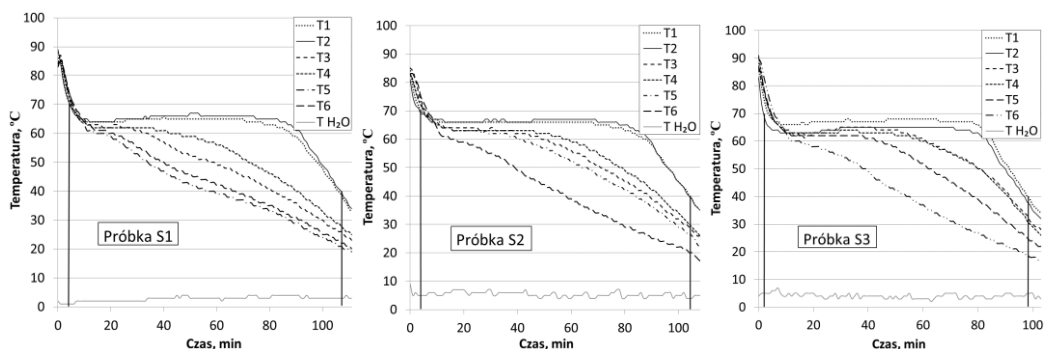
Do przeprowadzenia badań wykorzystano kulę o średnicy wewnętrznej 100 mm, w której zamontowano 6 równo rozmieszczonych w pionie termopar. Badania doświadczalne zaczynały się od przygotowania próbki. Pierwszy etap polegał na zbadaniu czasu krzepnięcia niemodyfikowanej parafiny. Przed następnymi pomiarami ważono metal oraz kulę z metalem przed i po zalaniu woskiem, w celu wyznaczenia udziałów masowych. Proces chłodzenia zaczynał się od zanurzenia kuli z materiałem, o temperaturze powyżej 70 °C, w wodzie z lodem. Odczyt temperatur prowadzony był do momentu wskazania przez wszystkie termopary temperatury 40 °C. W tym zakresie następowało krzepnięcie materiału. Temperatura wody była utrzymywana na stałym poziomie poprzez dodawanie lodu i intensywne mieszanie.

Przebieg zmian temperatury w czasie pozwolił mi na sporządzenie charakterystyk temperaturowych procesu krzepnięcia siedmiu badanych wkładów. Czas chłodzenia mierzony był dla zmiany temperatury pomiędzy 70 °C, a 40 °C. Przy czym początek procesu zaczynał się, gdy jedna z termopar wskazała 70 °C, a koniec następował, gdy maksymalna temperatura w którymkolwiek miejscu pomiarowym wynosiła 40 °C. Zmiana temperatury w czasie dla chłodzenia parafiny niezawierającej domieszki pokazała wyraźny początek w którym zaczęła zachodzić przemiana fazowa. Różnica wskazań temperatury materiału przez kolejno rozmieszczone termopary była wyraźnie widoczna dla fazy stałej i sięgała nawet 34 °C. Było to wynikiem niskiej przewodności cieplnej badanego materiału. Czas pomiędzy początkiem procesu, w temperaturze 70 °C, a końcem (w 40 °C) wyniósł 114 minut.



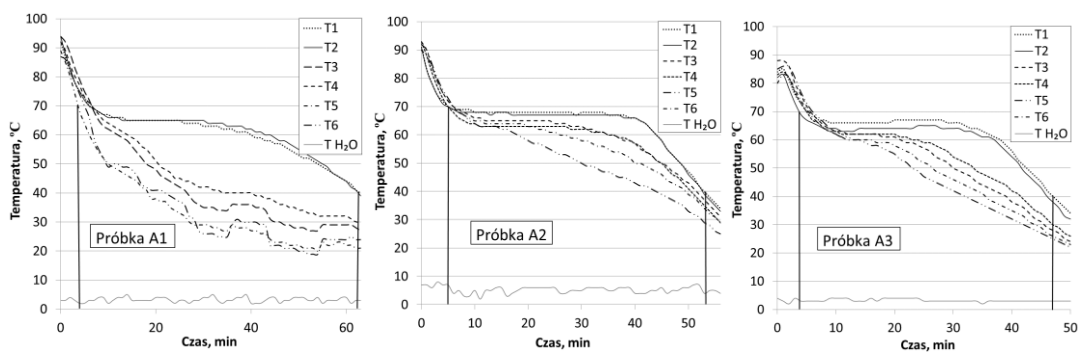
Rys.16. Rozkład temperatury w czasie dla chłodzenia czystej parafiny [A7]

Krzywe temperatury dla próbki zawierającej stal w ilości 3,5%, były zbliżone do krzywych dla czystej parafiny. Jednak czas procesu uległ skróceniu i wyniósł 103 minuty. Dla kompozytu S2, o blisko dwukrotnym większym udziale stali, czas chłodzenia był tylko 3 minuty krótszy. Dodatek stali w próbce S3, w ilości 10,2%, spowodował skrócenie czasu chłodzenia do 96 minut.



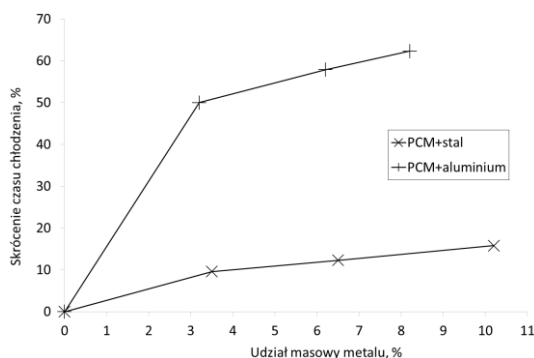
Rys.17. Rozkład temperatury w czasie dla chłodzenia kompozytu zawierającego stal [A7]

Badania zostały powtórzone dla kompozytu zawierającego dodatek aluminium. Ponownie zostały przygotowane 3 próbki o różnych udziałach masowych parafiny i aluminium. Dodatek aluminium w próbce A1 w ilości 3,2% spowodował skrócenie czasu chłodzenia do 57 minut. Widoczne, w szczególności dla termopar T3, T5 i T6, zmiany temperatury mogły być spowodowane bliskością lub stykaniem się termopar z materiałem modyfikującym. Blisko dwukrotne zwiększenie zawartości aluminium w kompozycie A2, w stosunku do próbki A1, spowodowało dodatkowe skrócenie czasu o 9 minut. Wyniósł on 48 minut. Największą zawartość aluminium, w ilości 8,2%, zawierała próbka A3. Zastosowanie takiej ilości aluminium spowodowało skrócenie czasu chłodzenia do 43 minut. Udział masowy wynoszący 8,2% aluminium był maksymalnym, jaki był możliwy do uzyskania w kuli, ze względu na twardą i trudną do formowania strukturę metalu.



Rys.18. Rozkład temperatury w czasie dla chłodzenia kompozytu zawierającego aluminium [A7]

Przeprowadzone badania wykazały skrócenie czasu chłodzenia, widoczne dla obu zastosowanych metali. Dodatek stali do parafiny spowodował znacznie mniejszy efekt niż dodatek aluminium. Skrócenie czasu chłodzenia o ponad połowę było możliwe poprzez zastosowanie aluminium, które jest dobrym przewodnikiem ciepła. Udział masowy aluminium wynoszący 3,5% spowodował skrócenie czasu chłodzenia o połowę. Większy udział tego metalu powodował dalsze przyspieszenie procesu wychładzania, a zależność, podobnie jak dla stali, była prawie liniowa i zależała od udziału dodatku modyfikującego parafinę.



Rys.19. Skrócenie czasu chłodzenia w zależności od udziału masowego metalu [A7]

Badania te zamykają cykl prac poświęconych akumulacji ciepła, opisanych w osiągnięciu habilitacyjnym, ale nie są jedynymi moimi pracami o tej tematyce. Inne badania dotyczące akumulacji ciepła opisałem w rozdziale poświęconemu moim pozostałym osiągnięciom naukowym.

4.3.4. Podsumowanie osiągnięcia naukowego

Podsumowując, chciałbym zestawić ogólne wnioski z badań wykonanych w ramach prezentowanego osiągnięcia naukowego:

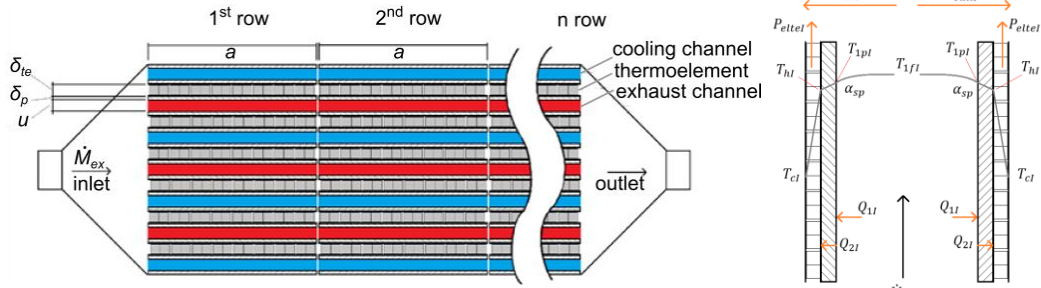
- wykonane badania pokazały, że proces ładowania złoża stałofazowego ma złożoną dynamikę, która charakteryzuje się dużą zmianą parametrów w pierwszych minutach trwania procesu, co często jest pomijane w pracach o tej tematyce,
- sprawność cieplno-przepływowa akumulatora stałofazowego jest silnie zależna od różnicy temperatury powietrza i materiału akumulacyjnego w szerokim zakresie natężenia przepływu powietrza,
- w badanym zakresie przepływu powietrza człon przepływowy ma znacznie mniejszy wpływ niż człon cieplny na sprawność cieplno-przepływową,
- w analizowanym zakresie, sprawność cieplno-przepływowa osiągała wartości maksymalne dla natężenia przepływu $0,05 - 0,07 \text{ m}^3/\text{s}$,
- wraz z rosnącą różnicą temperatury powietrza i materiału akumulacyjnego punkt maksymalnej sprawności przesunął się w kierunku większego natężenia przepływu,
- akumulator wypełniony cegłą ceramiczną, może pracować z wysoką efektywnością w szerokim zakresie natężenia przepływu, jednak powinien być wyposażony w aparaturę do sterowania natężeniem przepływu powietrza, które będzie uzależnione również od wybranych temperatur w układzie,
- stworzony model akumulatora stałofazowego wymagał doświadczalnego wyznaczenia stałych w równaniu na liczbę Nusselta, ze względu na brak zgodności modelu dla równań kryterialnych dostępnych w literaturze,
- otrzymana wysoka zgodność wyników dla modelu akumulatora wypełnionego tłuczniem z danymi doświadczalnymi dostarczyła szeregu parametrów cieplnych do opisu procesu ładowania,
- zweryfikowany model akumulatora z wypełnieniem granitowym współpracującego z solarnym źródłem ciepła stał się dobrym narzędziem do wykonania symulacji rocznej pracy systemu w celu pokrycia potrzeb grzewczych budynku,
- wykonane modyfikacje modelu złoża granitowego pozwoliły przeprowadzić analizę integracji pod względem energetycznym dla kilku wariantów architektonicznych budynków mieszkalnych,
- przedstawione wyniki modelowe, pomimo przyjętych założeń, dostarczają informacji o problemach związanych z akumulacją ciepła w zasobnikach wypełnionych materiałem zmiennofazowym,
- pomimo, że materiały zmiennofazowe pozwalają na akumulację większej ilości energii w wąskim zakresie temperatury niż materiały stałofazowe, to jednak proces przekazywania ciepła jest utrudniony, ze względu na niską przewodność cieplną tych materiałów,

- stworzony model matematyczny opisujący procesy cieplne w zbiorniku zawierającym PCM, pomimo przyjętych założeń, pozwala na uzyskiwanie rzetelnych wyników, co potwierdziła walidacja doświadczalna,
- wysokie wartości mocy cieplnej zbiorników wypełnionych materiałami zmiennofazowymi uzyskuje się tylko na początku procesu, gdy odległość frontu zmiany fazy od powierzchni pojemnika jest niewielka. Wraz z jej zwiększaniem opór cieplny wzrasta i determinuje szybkość procesu. Sugeruje to, że pojemniki powinny być jak najcieńsze,
- stworzony model zbiornika zawierającego PCM był przydatny na etapie projektowania, jak również został wykorzystywany podczas pracy instalacji grzewczo-chłodniczej, do uzyskania szczegółowych danych, które w omawianym przypadku przyczyniły się do zidentyfikowania problemu powodującego krótszą pracę zbiorników niż przewidywano,
- przedstawiony model akumulatora zawierającego materiały zmiennofazowe, nie wykorzystuje danych eksperymentalnych. Powoduje to, że nie jest dedykowany tylko do omówionej w pracy instalacji, ale może być łatwo zaadoptowany do modelowania podobnych zbiorników. Parametry materiałowe i geometrie można w łatwy sposób zmieniać sprawiając, że model staje się bardziej uniwersalny,
- zastosowanie metali w formie wiórów pochodzących z obróbki skrawaniem, jako składnika kompozytu, spowodowało skrócenie czasu chłodzenia badanych próbek. Dla zastosowanej stali zmiany te były kilkunastoprocentowe. Dużo lepszy efekt spowodowało dodanie aluminium, dla którego było możliwe skrócenie procesu o ponad połowę,
- struktura wiórowa nie powoduje opadania materiału modyfikującego PCM na dno naczynia, co wpływa korzystnie na długotrwałe stosowanie zaproponowanego kompozytu jako nośnika energii cieplnej.

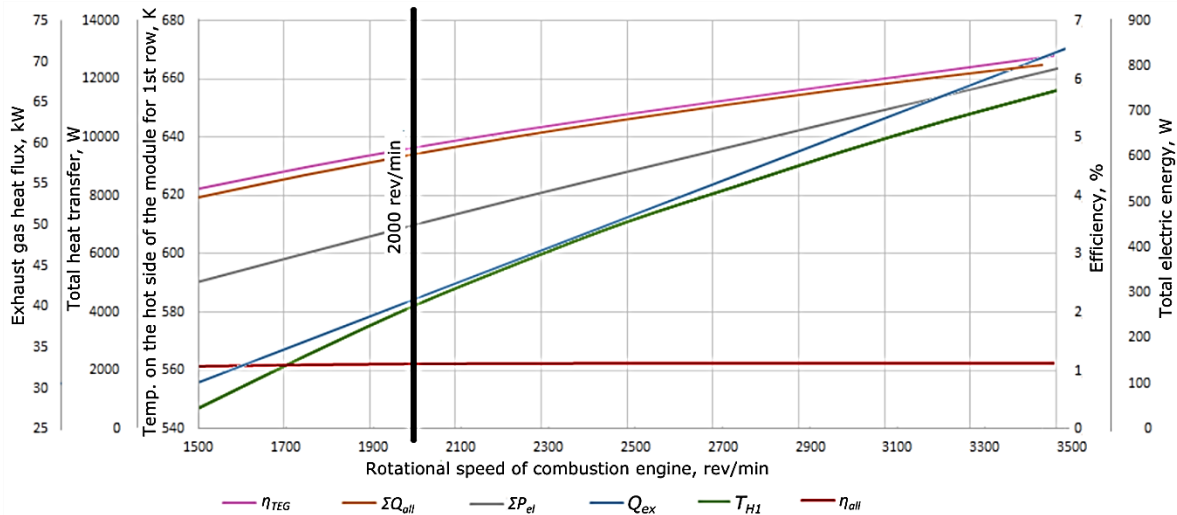
5. Pozostałe osiągnięcia naukowe

Po uzyskaniu stopnia doktora moja działalność naukowa była związana z trzema obszarami badań, które udokumentowałem publikacjami naukowymi, wyjazdami zagranicznymi, wystąpieniami i patentami.

Pierwszy obszar badań obejmował zagadnienia z tematyki silników cieplnych, będących kontynuacją prac, które wykonywałem w ramach doktoratu. Zajmowałem się określaniem obszaru pracy silnika zasilanego mieszanką paliwowo-powietrzną wzbogaconą w tlen. Wyniki tych prac opublikowałem w [B14], [B16] i [B17], prezentując algorytm obliczeniowy stechiometrii spalania mieszanek wzbogaconych w tlen w silnikach o zapłonie iskrowym, analizę stopnia sprężania i zużycia paliwa w takich silnikach. Uzyskałem również patent na sposób i układ membranowy do rozdziału powietrza, zasilany energią odpadową z silnika spalinowego [M2], służący do zasilania takiego silnika. W zagadnieniach związanych z silnikami cieplnymi poruszałem również aspekt poprawy ich sprawności poprzez modyfikację układu dolotowego i wylotowego [B15] oraz układy odzyskujące energię odpadową z takich silników [B7] i [B12]. W [B12] przedstawiłem pełen algorytm obliczeniowy dla termoelektrycznego generatora zasilanego energią odpadową z silnika spalinowego oraz wyniki, w których pokazałem, że możliwe jest pokrycie potrzeb własnych pojazdu poprzez zastosowanie takiego urządzenia.



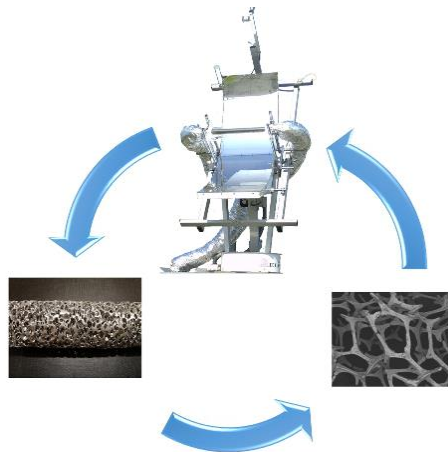
Rys.20. Schemat termoelektrycznego generatora oraz wybrane parametry cieplne w jednym jego rzędzie [B12]



Rys.21. Charakterystyki termoelektrycznego generatora zasilanego energią odpadową silnika o zapłonie iskrowym [B12]; η_{TEG} – sprawność generatora termoelektrycznego, \dot{Q}_{all} – strumień ciepła przenikający przez ściankę, P_{el} – energia elektryczna uzyskiwana przez jeden rząd termoelementów, \dot{Q}_{ex} – strumień ciepła usuwany ze spalinami w n-tym rzędzie pierwszego kanału, T_H – temperatura cieplej strony modułu, η_{all} – całkowita sprawność układu

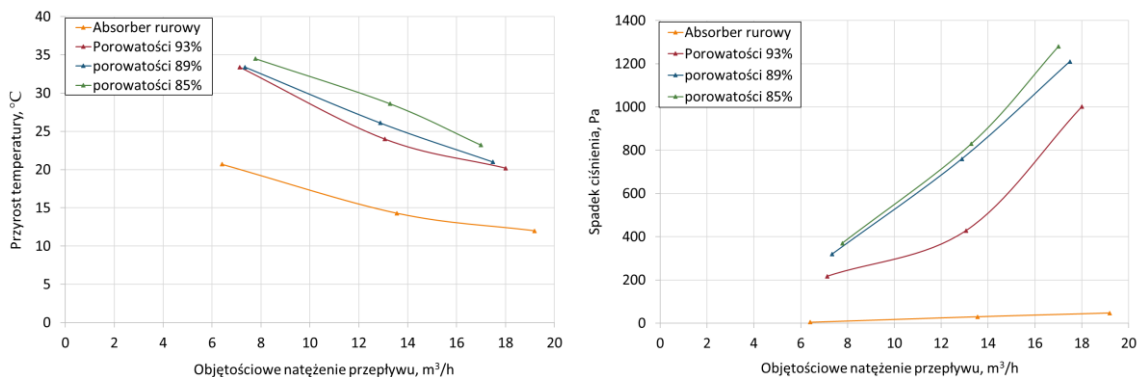
W ostatnich pracach, z obszaru silników cieplnych, pomagałem polsko – niemieckiemu zespołowi, w opisie trzech metod regulacji pola akustycznego termo-akustycznego silnika Stirlinga [B3].

Drugi obszar zainteresowań naukowych obejmował prace zarówno teoretyczne jak i doświadczalne systemów grzewczych i chłodniczych, wykorzystujących odnawialne źródła energii. Wśród nich należy wymienić określenie kryteriów doboru i roczne analizy pracy turbin wiatrowych na potrzeby grzewcze [B6] oraz pokrycia potrzeb grzewczych przez panele fotowoltaiczne [B10]. W pracy [B8] przedstawiłem model numeryczny dla sezonowej pracy pompy ciepła, pokrywającej potrzeby grzewcze szklarni. Natomiast, w [B13] opisałem wyniki symulacji rocznej pracy powietrznego kolektora skupiającego liniowo, pracującego na pokrycie potrzeb grzewczych budynku. Inna moja aktywność związana z kolektorami skupiającymi obejmuje badania wykonane podczas pobytu w ośrodku badawczym Plataforma Solar de Almería, Tabernas-Almería, w Hiszpanii [J1], realizowane w ramach grantu wyjazdowego w programie: *Solar Facilities for the European Research Area (SFERA) project*. W roku 2018 uzyskałem finansowanie badań wpływu wypełnienia pianą aluminiową na intensyfikację wymiany ciepła w kolektorach skupiających liniowo [F1].



Rys.22. Piana aluminiowa, stanowiąca wypełnienie absorbera powietrznego kolektora słonecznego skupiającego liniowo

W badaniach tych wykazałem, że możliwe jest znaczne zwiększenie strumienia przejmowanego ciepła przez powietrze, przepływające wewnątrz absorbera, poprzez zastosowanie materiału porowatego, przy nieznacznym zwiększeniu nakładu na przetłoczenie czynnika.



Rys.23. Przyrost temperatury powietrza przepływającego przez absorber rurowy i wypełniony pianą aluminiową oraz spadek ciśnienia

Ostatnim osiągnięciem z obszaru kolektorów słonecznych było uzyskanie patentu na kolektor z wypełnieniem pianą aluminiową [M1].

Trzeci obszar moich badań był bezpośrednio powiązany z drugim. Obejmował on szereg prac modelowych i eksperymentalnych związanych z akumulatorami ciepła, zasilanymi z instalacji wykorzystujących OZE. Część z nich została ujęta i opisana w cyklu publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe. Wśród pozostałych należy wymienić badania doświadczalne złoża granitowego, w których opisałem wpływ geometrii kamieni na strumień przekazywanego ciepła i sprawność cieplną całego procesu ładowania akumulatora [B9]. Jak również analizę wpływu kształtu tłuczni na efektywność cieplną i cieplno-przepływową procesu magazynowania ciepła [B1]. Analizowałem również różne materiały służące do akumulacji ciepła [B18] i [B19], szczególną uwagę zwracając na te, które mogą zostać zastosowane w mobilnych akumulatorach ciepła [B11]. Na uwagę zasługują również dwuletnie badania, które prowadziłem przy współpracy z firmą Fortum Heat and Power Poland, w ich Laboratorium Ciepła i Chłodu, przy projekcie *Research on solid sorption refrigeration for tri-generation systems* [L1]. W ramach tej współpracy zajmowałem się badaniami doświadczalnym akumulatora zawierającego materiał zmiennofazowy. Akumulator ten był zasilany z instalacji solarnej lub wężła ciepłowniczego, a odbiór zmagazynowanego ciepła następował w chłodzience absorpcyjnej, pracującej na potrzeby budynku biurowego.

Chcę również zwrócić uwagę, że w latach 2016-2020 byłem wykonawcą w granicie *Thermal Energy Storage with Phase Change Materials for Solar Cooling and Heating Applications (PCMSOL)*, z programu ERANet-LAC: Latin America [F2], realizowanego przy współpracy z zespołami z Hiszpanii, Boliwii i Chile. W ramach prac m.in. stworzyłem model zbiornika wypełnionego dwoma różnymi materiałami PCM, które opisałem w cyklu publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowe. Ponadto w ramach projektu uczestniczyłem w badaniach doświadczalnych, na solarnej instalacji grzewczo-chłodniczej wykorzystującej w/w zbiorniki z PCM, realizowanych podczas miesięcznego pobytu w The Solar Energy Research Center (CIESOL) na Universidad de Almeria, w Hiszpanii [H1]. Odbyłem tygodniowy pobyt badawczy w Center for Advanced Research of Lithium and Industrial Minerals na Universidad de Antofagasta, w Chile [H2], zajmującym się wytwarzaniem materiałów zmiennofazowych. Podczas innego wyjazdu do Chile przedstawiłem temat *Results of analysis of the heat transfer process in storage tanks filled with PCM* na Workshop on Energy, Storage Systems and Materials and Bilateral workshop Chile/Spain w University of Antofagasta [D1]. W okresie trwania projektu powstały publikacje [B2], [B3] i [B5] mojego współautorstwa, dotyczących potrzeb grzewczych i chłodniczych budynku, które pokrywane były przez w/w instalację solarną współpracującą z modelowanymi przeze mnie zbiornikami z PCM.

Za moje osiągnięcia, w 2016 roku przyznano mi środki finansowe na prowadzenie badań naukowych, w ramach środków statutowych przyznawanych na rozwój młodych naukowców.

6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę.

6.1. Działalność dydaktyczna

Swoją działalność dydaktyczną rozpocząłem w 2007 roku, wraz z rozpoczęciem studiów doktoranckich na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. W trakcie studiów doktoranckich odbyłem semestralny kurs dydaktyczny, przygotowujący do prowadzenia zajęć jako pracownik dydaktyczny. W czasie studiów doktoranckich prowadziłem i współprowadziłem zajęcia, na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym, z kursów: Podstawy termodynamiki (C), Termodynamika techniczna (W, C, L), Teoria maszyn cieplnych (W, C), Termodynamiczna analiza procesów cieplnych (W), Termodynamiczna analiza procesów energetycznych (L), Pakiety użytkowe (L), Silniki cieplne (W, S), Modelowanie matematyczne instalacji energetycznych (L) i Maszyny wyporowe (P). Od czasu ukończenia studiów doktoranckich prowadziłem również nowe kursy takie jak: Maszynoznawstwo (W), Podstawy termodynamiki (W), Przenoszenie ciepła (C) i Wymiana ciepła i wymienniki (C). Ponadto, od 3 lat prowadzę zajęcia z kursu Gospodarka energią (W, C), dla kierunku Inżynieria Odnawialnych Źródeł Energii, w filii Politechniki Wrocławskiej w Legnicy. W 2018 roku sprawowałem opiekę nad studentem z Francji, realizującym projekt *Energy analysis of renewable energy heating systems for modern buildings in French and Polish climate working conditions*, w ramach wymiany studenckiej z programu Erasmus. W trakcie pracy na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego byłem promotorem 42 prac inżynierskich i 30 magisterskich, pisanych w języku polskim jak i angielskim, wykonywanych przez studentów studiów stacjonarnych i niestacjonarnych. Prace realizowane pod moją opieką uzyskiwały wyróżnienia w konkursach, a 3 z nich wygrały nagrody: na Najlepszą Pracę Dyplomową z Tematyki Energooszczędności, Efektywności i Odnawialnych Źródeł Energii (2014), w Konkursie Prac Dyplomowych z Dziedziny Mechaniki i Budowy Maszyn im. Prof. Romana Sobolskiego (2015), w X Edycji Konkursu TT-Hi Tech. na Najlepszą Magisterską Pracę Dyplomową z Dziedziny Nowoczesnych Technologii (2017). Moja współpraca

ze studentami widoczna jest również w obszarze naukowym. Napisałem z Nimi 6 publikacji, opublikowanych w czasopiśmie, w tym z tzw. listy filadelfijskiej (2), w czasopiśmie z listy B wykazu Ministra (2) oraz w czasopiśmie z serii Web of Science (2). W latach 2018-2020 opracowywałem również autorskie materiały do dwóch nowych kursów, w ramach *Zintegrowanego Programu Rozwoju Politechniki Wrocławskiej*, realizowanego z Europejskiego Funduszu Społecznego: Silniki spalinowe (W) dla I-ego stopnia kierunku Mechanika i Budowa Maszyn oraz Thermoeconomic analysis of energy processes (W, L) dla 2-ego stopnia kierunku Energetyka. Przygotowuję również materiały do kursu Systemy magazynowania energii w budownictwie (W, L, S, P) dla 1-ego stopnia kierunku Odnawialne Źródła Energii. Jestem również promotorem pomocniczym w przewodzie mgr inż. Andrzeja Nowaka pt. *Identyfikacja struktur przepływowych w pulsacyjnych rurkach ciepła w warunkach mikrogravitacji*, realizowanego w Katedrze Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii.

6.2. Działalność organizacyjna oraz popularyzująca naukę

Po uzyskaniu stopnia doktora moja działalność organizacyjna związana była zarówno z działalnością Zakładu, a później Katedry której byłem członkiem, jak również pracami na rzecz Wydziału Mechaniczno-Energetycznego oraz Politechniki Wrocławskiej. Do roku 2014 brałem czynny udział w pracach statutowych Zakładu Termodynamiki. Po zmianach strukturalnych w 2014 roku, gdy zespół z Zakładu Termodynamiki wszedł w skład Katedry Termodynamiki, Teorii Maszyn i Urządzeń Ciepłych, otrzymałem funkcję administratora strony internetowej tej Katedry. Funkcję tę pełniłem również w latach 2019-2020, po reorganizacji na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym, w Katedrze Techniki Ciepłej oraz pełnię obecnie w Katedrze Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii.

Od 2014 roku jestem członkiem Wydziałowej Komisji ds. Nauczania Fizyki, na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym, a od 2015 członkiem Wydziałowego Zespołu zajmującego się obsługą zintegrowanego systemu informacji o szkolnictwie wyższym „POL-on” i pracami związanymi z kategoryzacją Wydziału i Uczelni. W latach 2016-2019 byłem członkiem Komitetu Naukowego I Ogólnopolskiego Konkursu Wiedzy o Energetyce Odnawialnej dla szkół średnich, współorganizowanego przez Politechnikę Wrocławską. W latach 2016-2020 pełniłem funkcję pełnomocnika Dziekana ds. patentów i ochrony wynalazków na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym. Od 2018 roku jestem członkiem Komisji Programowej Kierunku Energetyka, dla II-ego stopnia studiów.

W uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność Uczelni, w 2014 i 2019 roku otrzymałem Nagrodę Rektora Politechniki Wrocławskiej.

7. Podsumowanie


Na całokształt mojego dorobku naukowego, po uzyskaniu stopnia doktora, składa się 26 publikacji, z czego 7 wchodzi w skład osiągnięcia naukowego. Sumaryczna liczba punktów według kryteriów MNiSzW za publikacje wynosi 986, z czego 281 punktów jest wg punktacji przed reformą oraz 705 po reformie. Publikacje wymienione w osiągnięciu naukowym stanowią łącznie 315 punktów, w tym 110 punktów wg punktacji przed reformą oraz 215 po reformie.

W dorobku posiadam jeszcze 3 raporty oraz 2 patenty, w tym jeden jedno autorski. Wykonałem łącznie 47 recenzji artykułów naukowych oraz jednej monografii. Odbyłem 2 wyjazdy badawcze do Hiszpanii oraz jeden do Chile.

Sumaryczny Impact Factor moich publikacji wynosi 35,732, z czego publikacje wymienione w osiągnięciu naukowym mają łączny IF = 16,556.

Liczba moich cytowań wynosi odpowiednio: wg bazy Web of Science 25 cytowań w tym 7 autocytowań, wg bazy Scopus 32 cytowań w tym 11 autocytowań, wg bazy Google Scholar 64 cytowań w tym 11 autocytowań.

Indeks Hirscha to odpowiednio: 3 wg bazy Web of Science, 4 wg bazy Scopus, 5 wg bazy Google Scholar.


.....
(podpis wnioskodawcy)