

Załącznik 2

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Autoreferat

Dr inż. Magdalena 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.....	3
4.3.1. <i>Charakterystyka granitu</i>	7
4.3.2. <i>Akumulacja ciepła w granicie</i>	8
4.3.3. <i>Zastosowanie kamiennych akumulatorów ciepła</i>	23
4.3.4. <i>Podsumowanie i wnioski</i>	27
5. Pozostałe osiągnięcia naukowe.....	29
6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę	31
7. Podsumowanie	32

1. Imię i nazwisko: **Magdalena Nemś**

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

- Mgr inż., Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno – Energetyczny, kierunek: Energetyka, specjalizacja: Energetyka ze źródeł odnawialnych, tytuł pracy dyplomowej: *Projekt stanowiska i eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki roboczej skupiającego kolektora słonecznego jako nagrzewnicy powietrza*, 2009 r. Najlepszy absolwent Wydziału.
- Studia podyplomowe, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Certyfikacja Energetyczna Budynków, 2010 r.
- Dr nauk technicznych, Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczno – Energetyczny, dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn, temat pracy doktorskiej: *Modelowanie mechanizmów przekazywania i akumulacji ciepła w autonomicznym całorocznym systemie solarnego ogrzewania budynku*, 2015 r. Rozprawa obroniona z wyróżnieniem.

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

- 1.03.2015 – obecnie: adiunkt naukowo-dydaktyczny na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Wroclawskiej, obecnie w Katedrze Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii

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

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Granit jako materiał wypełnienia akumulatorów ciepła

4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

[A1] M. Nemś, *Experimental determination of the influence of shape on the heat transfer process in a crushed granite storage bed*. Energies. 2020, vol. 13, nr 24, art. 6725, s. 1-16; doi.org/10.3390/en13246725. Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (po reformie¹): 140, IF: 2,702)

Mój udział wynosi 100%.

[A2] M. Nemś, A. Nemś, K. Gębarowska, *The Influence of the Shape of Granite on the Heat Storage Process in a Rock Bed*, Energies 2020, 13, 5662; doi:10.3390/en13215662. Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (po reformie): 140, IF: 2,702.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, przygotowaniu stanowiska badawczego, nadzorowaniu prowadzenia eksperymentów, analizie i opracowaniu wyników, wykonaniu bilansu cieplnego

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.

układu, wykonaniu przeglądu literatury, redagowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział szacuję na 85%.

- [A3] M. Nemś, A. Nemś, P. Pacyga, *A granite bed storage for a small solar dryer*. Materials. 2018, vol. 11, nr 10, art. 01969, s. 1-16; doi:10.3390/ma11101969. (Lista Filadelfijska, punktacja MNiSW (przed reformą): 35, IF: 2,972.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, przygotowaniu stanowiska badawczego oraz planu eksperymentu, nadzorowaniu prowadzenia eksperymentów, analizie i opracowaniu wyników, analizie pracy akumulatora w suszarni słonecznej, wykonaniu przeglądu literatury, redagowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział szacuję na 90%.

- [A4] M. Nemś, J. Kasperski, A. Nemś, A. 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 obejmował zaplanowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych złoża akumulacyjnego wypełnionego granitem w warunkach laboratoryjnych, oraz złoża współpracującego z kolektorem słonecznym w Centrum Technologii Energetycznych w Świdnicy, analizie i opracowaniu wyników, walidacji modeli, symulacji pracy rocznej układu dla Typowego Roku Meteorologicznego, redagowaniu tekstu manuskryptu. Mój udział szacuję na 40%.

- [A5] A. Bać, M. Nemś, A. Nemś, J. 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 przeglądu literatury, analizie możliwości integracji akumulatora z budynkiem, obliczeniach cieplnych dla budynku z innowacyjnym systemem oraz przeprowadzeniu symulacji pracy układu dla Typowego Roku Meteorologicznego dla trzech różnych wariantów integracji. Mój udział szacuję na 30%.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników

Ze względu na powszechność zastosowania OZE, zdeterminowanego przez politykę proekologiczną, oraz szukanie oszczędności np. poprzez odzysk ciepła odpadowego, ilość badań i instalacji wykorzystujących skały jako materiał akumulacyjny wciąż rośnie². Złoża kamienne są dobrą i tanią alternatywą dla skomplikowanych i drogich akumulatorów ciepła, szczególnie do współpracy z kolektorami słonecznymi³. Ich zaletą, poza ceną, jest również

² Koçak, B.; Fernandez, A.I.; Paksoy, H. Review on sensible thermal energy storage for industrial solar applications and sustainability aspects. Sol. Energy 2020, 209, 135–169

³ Gautam, A.; Saini, R.P. A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system. J. Energy Storage 2020, 27, 101046

możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur. Zastosowanie akumulatorów ciepła wypełnionych kamieniami było przedmiotem wielu prac badawczych już w połowie ubiegłego stulecia ⁴, o czym świadczy ilość nadal cytowanych z tamtego okresu prac, przytaczana w aktualnych przeglądach ⁵. Na uwagę zasługuje fakt, że wg raportu REN21 w Polsce w 2018 roku, wystąpił największy w skali świata przyrost liczby instalacji z kolektorami słonecznymi, który wyniósł 179% w porównaniu do 2017 roku ⁶, mimo iż zapewniają one zmienną i czasową produkcję ciepła.

Złoża kamienne wykorzystywane są w elektrowniach słonecznych ⁷, w systemach grzewczych budynków lub do osuszania pomieszczeń ⁸, jako element słonecznych suszarni ^{9,10}, w szklarniach do zapewnienia odpowiedniej temperatury roślinom ¹¹, jako akumulatory ciepła odpadowego lub do współpracy z Organic Rankine Cycle ¹². Jako czynnik roboczy w tego typu instalacjach dominuje powietrze ¹³, rzadziej wykorzystywane są inne czynniki robocze, jak np. płyn syntetyczny oparty na mieszaninach eutektycznych ¹⁴.

Istotną rolę odgrywa intensywność procesu ładowania złoża, by zakumulować jak najszybciej jak największą ilość energii, szczególnie podczas współpracy ze źródłem ciepła o krótkiej dostępności czasowej. Taka sytuacja występuje gdy np. instalacja słoneczna zasilająca złożo działa poza sezonem letnim lub w lokalizacji geograficznej o umiarkowanym nasłonecznieniu, jak Europa środkowa, która charakteryzuje się klimatem umiarkowanym oraz dużą zmiennością warunków pogodowych. Analogiczna sytuacja może występować podczas akumulacji w złożu ciepła odpadowego z procesu technologicznego, który nie jest prowadzony w sposób ciągły.

Większość badań poświęconych kamiennym akumulatorom ciepła dostępnych w literaturze zakłada długi czas ładowania, przekraczający nawet kilkanaście godzin ¹⁵. Wynika to z faktu, że rozwiązania te są głównie dedykowane do elektrowni słonecznych ¹⁶, które budowane są w miejscach o dużej dostępności promieniowania słonecznego i mają ciągły charakter pracy podczas dnia. Poniższa lista pokazuje badania eksperymentalne prowadzone

⁴ Ergun, S.; Orning, A.A. Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds. *Ind. Eng. Chem.* 1949

⁵ Esence, T.; Bruch, A.; Molina, S.; Stutz, B.; Fourmigué, J.F. A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems. *Sol. Energy* 2017

⁶ REN21, *Renewables 2019 - Global Status Report*; 2019; (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 9783981891140.

⁷ Palacios, A.; Barreneche, C.; Navarro, M.E.; Ding, Y. Thermal energy storage technologies for concentrated solar power – A review from a materials perspective. *Renew. Energy* 2020, 156, 1244–1265

⁸ Kumar, A.; Kim, M. Solar air-heating system with packed-bed energy-storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 72

⁹ Mohana, Y.; Mohanapriya, R.; Anukiruthika, T.; Yoha, K.S.; Moses, J.A.; Anandharamkrishnan, C. Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Sol. Energy* 2020, 208, 321–344.

¹⁰ Atalay, H. Assessment of energy and cost analysis of packed bed and phase change material thermal energy storage systems for the solar energy-assisted drying process. *Sol. Energy* 2020, 198, 124–138

¹¹ Bazgaou, A.; Fatnassi, H.; Bouharrou, R.; Elame, F.; Ezzaeri, K.; Gourdo, L.; Wifaya, A.; Demrati, H.; Tiskatine, R.; Bekkaoui, A.; et al. Performance assessment of combining rock-bed thermal energy storage and water filled passive solar sleeves for heating Canarian greenhouse. *Sol. Energy* 2020, 198, 8–24

¹² König-Haagen, A.; Höhle, S.; Brüggemann, D. Detailed exergetic analysis of a packed bed thermal energy storage unit in combination with an Organic Rankine Cycle. *Appl. Therm. Eng.* 2020, 165, 114583

¹³ Singh, H.; Saini, R.P.; Saini, J.S. A review on packed bed solar energy storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010, 14, 1059–1069

¹⁴ Berrhazi, S.; Ouammi, A.; Benchrifa, R. Thermo-physical effect of solid filler on the performance of a packed-bed thermal storage. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2020, 20, 100716

¹⁵ Soprani, S.; Marongiu, F.; Christensen, L.; Alm, O.; Petersen, K.D.; Ulrich, T.; Engelbrecht, K. Design and testing of a horizontal rock bed for high temperature thermal energy storage. *Appl. Energy* 2019, 251, 113345

¹⁶ Allen, K.G.; Von Backström, T.W.; Kröger, 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

w skali laboratoryjnej, wskazując główne parametry złoż, cel badań oraz czas procesu ładowania:

- 6 godzin ładowania ¹⁷ – stanowisko badawcze z kamieniami. Jako materiał wypełnienia badano szwedzki diabaz i magnetyt, czynnikiem roboczym było powietrze. Temperatura wlotowa wynosiła 600 °C. Zaproponowano model matematyczny 2D, dla którego wykonano walidację;
- 8 godzin czasu ładowania ¹⁸ – stanowisko laboratoryjne do badania pracy złoża dla nastaw dobranych jak dla elektrowni słonecznych (w połączeniu z cyklem Braytona). Jako czynnik roboczy wykorzystano powietrze o temperaturze wlotowej do ok. 500 °C. Głównym celem badań była obserwacja procesu przechowywania ciepła i gotowości do użycia (*standby process*);
- 8 godzin ładowania ¹⁹ – zbadano eksperymentalnie potencjał skał kwarcytowych i krzemienych jako materiału wypełnienia złoża. Badania obejmowały wiele cykli pracy akumulatora. Temperatura powietrza na wlocie do akumulatora dochodziła do 550 °C.

Podobne zestawienie, tym razem dla badań teoretycznych przedstawiono poniżej. W tym przypadku również dominują analizy dotyczące długich czasów ładowania:

- 6 godzin ²⁰ – ładowanie złoża kamiennego. Badania obejmowały zagadnienia związane z rozplywem powietrza podczas ładowania i rozładowywania akumulatora. Temperatura wlotowa powietrza wynosiła 550 °C.
- 8 godzin ²¹ – ładowanie złoża dedykowanego do elektrowni słonecznej. Czynnikiem roboczym było powietrze, temperatura wlotowa wynosiła ok. 500 °C. Autorzy zaproponowali model matematyczny pracy złoża oraz przeprowadzili jego weryfikację dla różnych danych eksperymentalnych dostępnych w literaturze.
- 8 godzin ²² – ładowanie złoża przeznaczonego do elektrowni słonecznej. Autorzy przeprowadzili modelowanie termodynamiczne oraz wykonali analizę egzergetyczną. Jako czynnik roboczy przyjęli powietrze o temperaturze wlotowej ok 500 °C.

W badaniach, w których proces ładowania złoża jest długi trudno zaobserwować przebieg zmiany parametrów dla pierwszych godzin ładowania i przeanalizować współpracę akumulatora ze źródłem ciepła o krótkiej dostępności czasowej. W opisie matematycznym procesu wymiany ciepła pomiędzy przepływającym przez akumulator czynnikiem roboczym, a materiałem akumulacyjnym występują znaczne uproszczenia. Do tworzenia modeli matematycznych dla procesu akumulacji ciepła w złożach kamiennych wykorzystuje się wymiar charakterystyczny, którym dla złoż usypanych jest średnica zastępcza materiału i niezależnie od jego kształtu, traktuje się go jako kulę. W literaturze dostępne są wzory na liczbę Nusselta służącą do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła do materiału,

¹⁷ Marongiu, F.; Soprani, S.; Engelbrecht, K. Modeling of high temperature thermal energy storage in rock beds – Experimental comparison and parametric study. *Appl. Therm. Eng.* 2019, 163, 114355

¹⁸ Yang, B.; Bai, F.; Wang, Y.; Wang, Z. Study on standby process of an air-based solid packed bed for flexible high-temperature heat storage: Experimental results and modelling. *Appl. Energy* 2019, 238, 135–146

¹⁹ Jemmal, Y.; Zari, N.; Maaroufi, M. Experimental characterization of siliceous rocks to be used as filler materials for air-rock packed beds thermal energy storage systems in concentrated solar power plants. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2017, 171, 33

²⁰ Barton, N.G. Simulations of air-blown thermal storage in a rock bed. *Appl. Therm. Eng.* 2013, 55, 43–50

²¹ Heller, L.; Gauché, P. Modeling of the rock bed thermal energy storage system of a combined cycle solar thermal power plant in South Africa. *Sol. Energy* 2013, 93, 345–356

²² Ozturk, M.; Dincer, I.; Javani, N. Thermodynamic modeling of a solar energy based combined cycle with rock bed heat storage system. *Sol. Energy* 2020, 200, 51–60

opracowane m.in. przez Ranz i Marchall ²³, Kacnelson i Timofiejewa ²⁴ lub Ketterning ²⁵, w których dla kul, jako wymiar charakterystyczny przyjmuje się ich średnicę. Natomiast dla innych geometrii elementów jest to średnica zastępcza, obliczana tak jak dla kul z objętości. Również w nowszych badaniach przyjmuje się takie uproszczenia. R. Singh i in. w ²⁶ wykorzystali średnicę zastępczą do obliczeń akumulatora z wypełnieniem dużymi elementami w kształcie m.in. sześciangu i prostopadłościanu. Średnicę zastępczą wykorzystali także H. Singh i in., badając kulę i 4 różne prostopadłościany ²⁷. K.G. Allen i in. w ²⁸ zastosowali średnicę zastępczą elementu dla pokruszonych skał. Analizując spadki ciśnienia dla różnych innych materiałów wypełnia, niezależnie od ich kształtu, wyznaczali średnicę zastępczą wynikającą z objętości pojedynczego elementu²⁹. Podobnie N.G. Barton w ³⁰ założył średnicę kuli dla pojedynczej skały. Jean-Francois P. Pitot de la Beaujardiere i in. w ³⁰ zastosowali średnią równoważną średnicę elementów wypełnienia dla systemu magazynowania ciepła w złożu skalnym dla elektrowni słonecznych.

Przytoczony powyżej przegląd literatury pokazuje pewne braki w prowadzonych dotychczas badaniach poświęconych złożom kamiennym, które są istotne ze względu na coraz ważniejszą rolę procesu akumulacji i przechowywania ciepła. Kula ma najmniejszą powierzchnię ze wszystkich brył, jednak w obliczeniach wymiany ciepła, zakłada się, że powierzchnia np. kamienia łamanego jest taka jak kuli. Takie założenie powoduje, że w obliczeniach modelowych materiał akumulacyjny, w postaci kul i kamienia łamanego, będzie posiadał taką samą powierzchnię, przez którą przekazywane jest ciepło od czynnika roboczego. Dodatkowo w literaturze trudno znaleźć badania w których uzyskano krótki czas ładowania. Do nielicznych należą badania opisane w ³¹. Pomiarzy dla czasu ładowania wynoszącego 170 minut, wykorzystano do stworzenia jednowymiarowego modelu numerycznego, pozwalającego wyznaczyć temperaturę materiału akumulacyjnego. Autorzy również wykorzystywali średnicę zastępczą elementów wypełnienia.

Moim zdaniem założenie, że w opisie matematycznym procesu wymiany ciepła wewnątrz akumulatora, kamień łamany traktowany jest jak kula, jest niepoprawne, szczególnie dla krótkich czasów ładowania, co na podstawie przeprowadzonych badań chcę pokazać. Z tych względów postanowiłam zająć się tematem akumulacji ciepła w granicie, jako materiale powszechnie występującym na terenie Dolnego Śląska. Jako cel naukowy zaprezentowany w niniejszym wniosku postawiłam badania eksperymentalne i analityczne procesu akumulacji ciepła w granicie, zmierzające do pełniejszego zrozumienia i opisu tego zjawiska.

²³ Ranz, W.E.; Marshall, W.R. Evaporation from drops. Parts I & II. Chem. Eng. Progr, 1952

²⁴ Melissari, B.; Argyropoulos, S.A. Development of a heat transfer dimensionless correlation for spheres immersed in a wide range of Prandtl number fluids. Int. J. Heat Mass Transf. 2005, 48, 4333–4341

²⁵ Kunii, D.; Levenspiel, O. Fluidization Engineering; 2nd ed.; Elsevier, 1991; ISBN 0-409-90233-0

²⁶ 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,

²⁷ Singh, H.; Saini, R.P.; Saini, J.S. Performance of a packed bed solar energy storage system having large sized elements with low void fraction. Sol. Energy 2013, 87, 22–34

²⁸ Allen, K.G.; von Backström, T.W.; Kröger, D.G. Rock bed pressure drop and heat transfer: Simple design correlations. Sol. Energy 2015, 115, 525–536

²⁹ 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

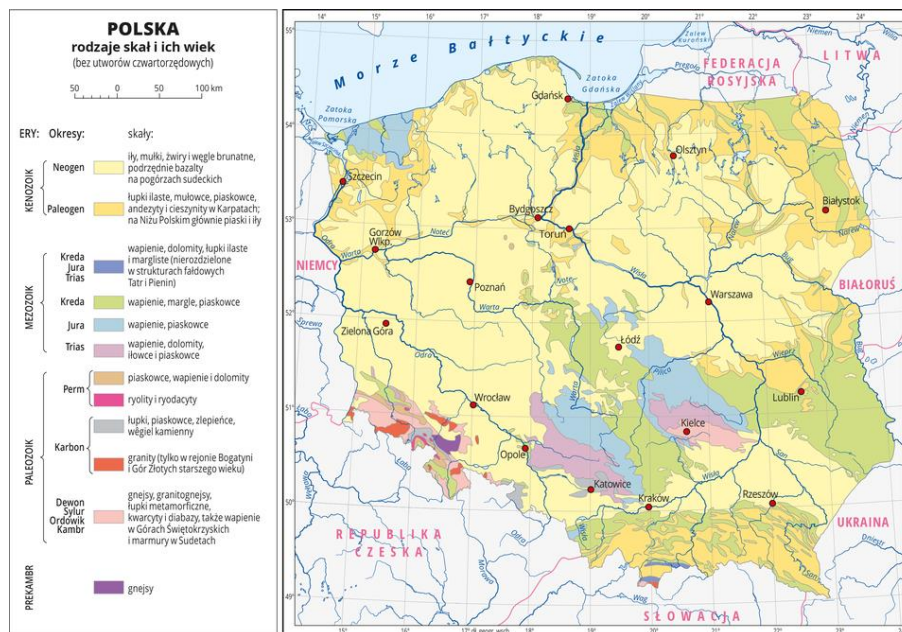
³⁰ Pitot de la Beaujardiere, J.F.P.; von Backström, T.W.; Reuter, H.C.R. Applicability of the local thermal equilibrium assumption in the performance modelling of CSP plant rock bed thermal energy storage systems. J. Energy Storage 2018, 15

³¹ Esence, T.; Bruch, A.; Fourmigué, J.F.; Stutz, B. A versatile one-dimensional numerical model for packed-bed heat storage systems. Renew. Energy 2019, 133, 190–204

W osiągnięciu habilitacyjnym przedstawionym w formie cyklu 5 prac, dokonałam analizy wybranych zagadnień związanych z procesem akumulacji ciepła w granicie. Prezentowany dorobek naukowy przedstawiłam w czterech podrozdziałach, których tematyka obejmuje kolejno: charakterystykę granitu jako materiału wypełniającego akumulator (podrozdział 4.3.1), badania eksperymentalne i analityczne procesu akumulacji ciepła w złożu kamiennym (podrozdział 4.3.2), jak i analizę możliwości zastosowania akumulatora granitowego w słonecznej suszarni żywności oraz w systemie ogrzewania budynku mieszkalnego (podrozdział 4.3.3). Całość opisu osiągnięcia kończy podsumowanie (podrozdział 4.3.4), w którym podkreśliłam najważniejsze wyniki prowadzonych prac, które w znacznym stopniu poszerzają wiedzę na temat magazynowania ciepła w kamiennych akumulatorach ciepła.

4.3.1. Charakterystyka granitu

Materiał, który wybrałam do wypełnienia złoża akumulacyjnego to granit. Jest to skała głębinowa powstała pod powierzchnią Ziemi na dużej głębokości, w wyniku zastygnięcia magmy wulkanicznej, poddanej wcześniej działaniu wysokiego ciśnienia. Skała ta występuje w wielu rejonach świata. Znaczne ilości granitu wydobywane są w USA, Chinach, Afryce, Skandynawii i Indiach. W Polsce natomiast największe złoża zlokalizowane są na obszarze Dolnego Śląska^{32,33} (rys. 1). Najbardziej znane są: granit strzeliński, strzegomski oraz michałowicki. Łącznie zasoby rozpoznanych złóż granitu wynoszą 1331 mln ton³².



Rys. 1. Obszary występowania granitu w Polsce³⁴

Do badań eksperymentalnych wykorzystywałam lokalnie dostępny granit strzegomski. Charakteryzuje go wysoka wytrzymałość na ściskanie 110-170 MPa³² oraz duża trwałość. Ciepło właściwe tego materiału wynosi 780 J/(kg·K).

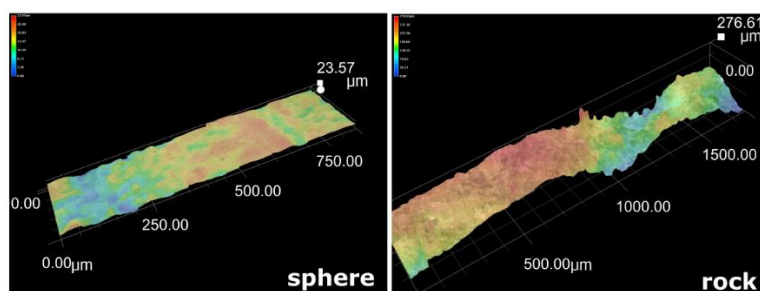
³² Osiecka, E. Materiały budowlane, kamień, ceramika, szkło, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010, ISBN 978-83-7207-865-0

³³ Kozłowski, S. Surowce skalne Polski, Wydawnictwa Geologiczne; 1986

³⁴ <http://geomorawa.ucoz.pl/>, stan na 11.01.2021 r.

Poniżej zestawiałam inne właściwości granitu, wyróżniające go jako odpowiedni materiał wypełnienia do akumulatorów ciepła:

- odporność temperaturowa – wytrzymałość do ponad 1000 °C i możliwość pracy w szerokim zakresie temperatury (magazyny nisko-, średnio- i wysokotemperaturowe),
- twardość kamienia – w zależności od ilości kwarcu, w 10-stopniowej skali twardości Mohsa, kamień ten osiąga poziom 6 bądź 7, co sprawia iż jest twardszy niż stal,
- wysoka gęstość – ok. 2700 kg/m³ ³².
- bezpieczny dla żywności (nie wydziela szkodliwych gazów), używany zarówno w suszarniach jak i kuchenkach słonecznych,
- wytrzymały nawet przy wielu cyklach pracy w wysokiej temperaturze ³⁵.



Rys. 2. Chropowatość granitu, oszlifowana powierzchnia (po lewej), tłuczeń (po prawej) [A1]

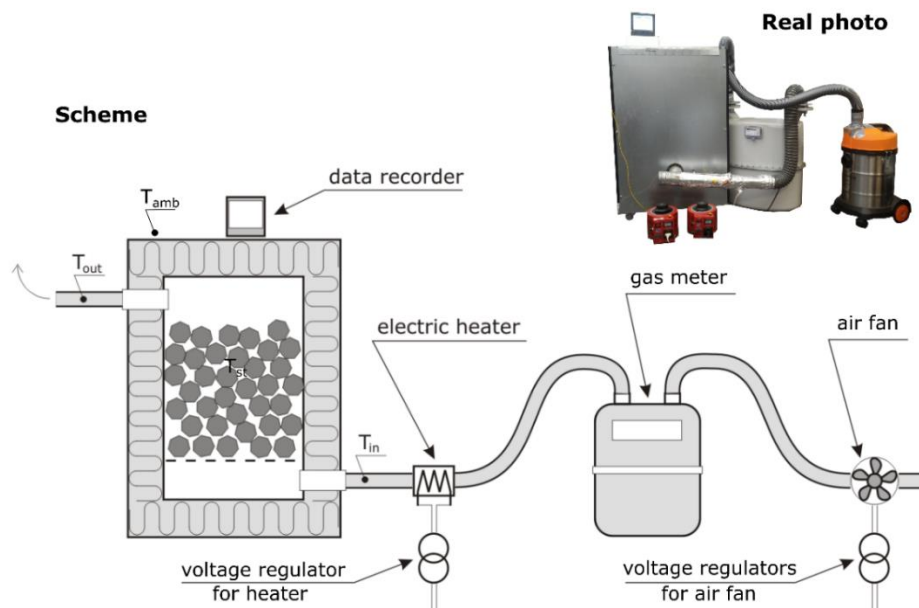
Na rys. 2. zamieściłam zdjęcia mikroskopowe, na których widoczna jest chropowatość powierzchni granitu strzegomskiego, który badałam. Dla oszlifowanej powierzchni wynosi ona do 24 μm, natomiast dla nieoszlifowanych elementów granitowych, jak tłuczeń, chropowatość sięga do 276 μm.

4.3.2. Akumulacja ciepła w granicie

Do badania procesu akumulacji ciepła w granicie wykorzystałam stanowisko eksperymentalne widoczne na rys. 3, w którego budowie uczestniczyłam. Jest ono zbudowane z blaszanej obudowy zaizolowanej wełną mineralną. Wewnątrz zlokalizowana jest komora, którą można wypełnić badanym materiałem. Czynnikiem roboczym ogrzewającym materiał akumulacyjny było powietrze. Szczegóły dotyczące budowy stanowiska badawczego umieściłam w tabeli 1.

Czynnik roboczy, był tłoczony przez wentylator nadmuchowy do gazomierza, a następnie do złoża akumulacyjnego. Przed wlotem do złoża powietrze było nagrzewane grzałką elektryczną do ustalonej temperatury, zgodnie z planem badań. Strumień przepływającego powietrza jak i temperatura czynnika były regulowane za pomocą autotransformatorów połączonych odpowiednio z wentylatorem i grzałką elektryczną. Temperaturę powietrza na wlocie i wylocie oraz temperaturę otoczenia mierzyłam przy pomocy termopar Pt100. Do zapisu danych, z krokiem minutowym, wykorzystałam rejestrator KD7. Ponadto mierzyłam również spadek ciśnienia w złożu.

³⁵ Li, B.; Ju, F. Thermal stability of granite for high temperature thermal energy storage in concentrating solar power plants, Applied Thermal Engineering 2018, 138, 409–416

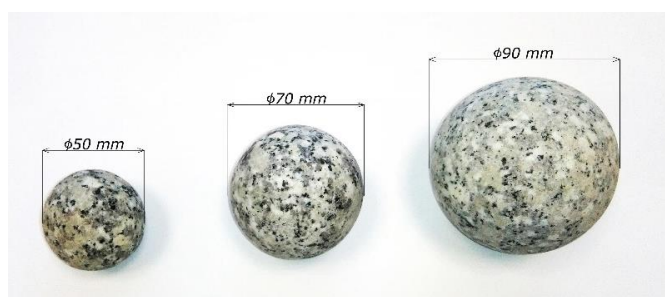


Rys. 3. Stanowisko do badania procesu akumulacji ciepła [A2]

Tab. 1. Parametry stanowiska badawczego

Złoże akumulacyjne	Wysokość wewnętrzną	0,5 m
	Szerokość wewnętrzną	0,3 m
	Długość wewnętrzną	0,3 m
Izolacja	Grubość izolacji górnej	0,20 m
	Grubość izolacji dolnej	0,15 m
	Grubość izolacji bocznej	0,15 m
	Ciepło właściwe	0,039 W/(m·K)

Jak wspomniałam we wstępie (4.3), równania kryterialne do wyznaczania liczby Nusselta zakładają, że materiał usypany w złożu traktowany jest jak kule. Badania eksperymentalne rozpoczęłam więc od badania wpływu średnicy kul granitowych na proces akumulacji ciepła. Oszlifowane elementy o trzech różnych średnicach są widoczne na rys. 4.



Rys. 4. Kule granitowe przygotowane do eksperymentu [A3]

Na kolejnym rysunku (rys. 5) przedstawiłam natomiast ułożenie różnej wielkości kul w złożu akumulacyjnym. Ilość największych kul wynosiła 26 sztuk, średnich - 58 sztuk, małych - 142 sztuki. Liczba kul granitowych w złożu uzależniona była od ich masy i dla każdej z trzech średnic, łączna masa kul wynosiła 25,6 kg.



Rys. 5. Ułożenie w złożu kul o średnicy (od lewej): 50 mm, 70 mm, 90 mm [A3]

Na podstawie wykonanych pomiarów możliwe było obliczenie rzeczywistej (\dot{Q}_{act}) i maksymalnej (\dot{Q}_{max}) ilości akumulowanej energii oraz w konsekwencji wyznaczenie efektywności procesu ładowania (ε), która jest definiowana jako stosunek tych dwóch parametrów.

Na efektywność procesu ładowania złoża akumulacyjnego wpływają następujące czynniki:

- materiał wypełnienia złoża,
- geometria złoża,
- zastosowany rodzaj termoizolacji oraz jej grubość,
- rodzaj materiału wypełniającego złożo,
- kształt i rozmiar materiału wypełniającego złożo (D),
- temperatura wlotowa powietrza (T_{in}),
- strumień objętości powietrza wtlaczanego do złoża (\dot{V}_a),
- temperatura otoczenia,
- czas ładowania złoża.

Większość wymienionych czynników nie ulega zmianie podczas wykonywania eksperymentu, co wynikało z przyjętej konstrukcji złoża akumulacyjnego, a temperatura otoczenia w laboratorium wynosiła około 19 °C. W związku z tym trzy zmienne uznałam za zmienne niezależne: t_{in} , D , \dot{V}_p . Można zatem uznać, że w swojej ogólnej formie teoretyczna efektywność procesu jest funkcją tych trzech zmiennych niezależnych. Wykonałam te rozważania, aby móc w dalszych pracach zastosować techniki planowania eksperymentu. Spośród planów trójpoziomowych, do badań mających na celu wyznaczenie charakterystyki ładowania złoża akumulacyjnego, wybrałam plan doświadczeń Hartleya³⁶. Plan ten pozwala skrócić czas oraz koszty eksperymentu, ponieważ dla trzech czynników wejściowych na trzech poziomach zmienności, wystarczy wykonać tylko 11 serii pomiarowych, zamiast 3^3 , czyli 27 serii niezbędnych przy innych planach eksperymentu.

Tab. 2. Wybrane zmienne wejściowe eksperymentu na trzech poziomach zmienności [A3]

Zmienne	-1	0	+1
T_{in} , °C	90	120	150
\dot{V}_a , m ³ /s	0,0065	0,0085	0,0105
D , mm	50	70	90

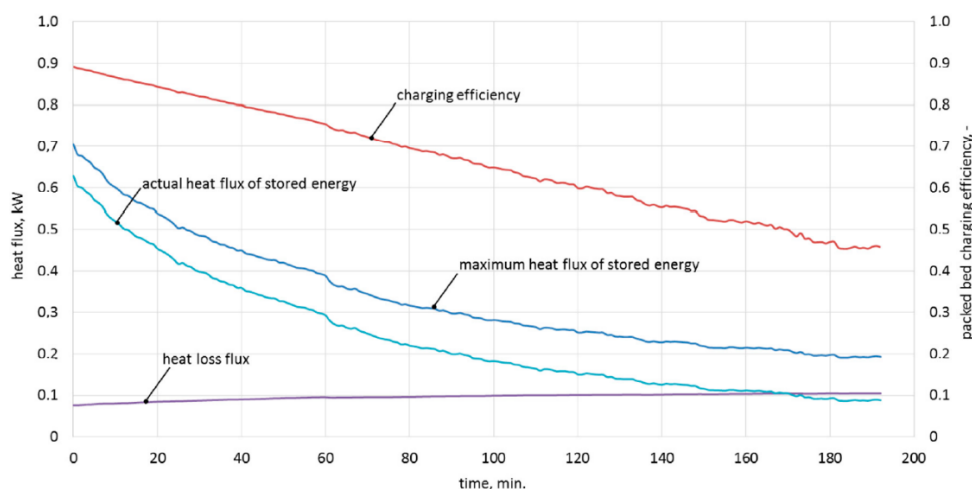
³⁶ Korzyński M., Metodyka eksperymentu: planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych, Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2013

W tab. 2. przedstawiłam zakładane wartości czynników wejściowych (temperatura wtłaczanego powietrza, strumień objętości gazu oraz materiał wypełnienia złoża - granitowe kule o różnej średnicy) na trzech poziomach zmienności, natomiast w tab. 3. - matrycę planu Hartleya dla przeprowadzonego eksperymentu. Pomiar temperatur odbywał się co minutę i był automatycznie zapisywany na rejestratorze KD7. Plan eksperymentu Hartleya posłużył mi do wygenerowania równania kwadratowego opisującego poszukiwany parametr za pomocą trzech wspomnianych zmiennych niezależnych.

Tab. 3. Matryca planu eksperymentu Hartleya dla badanego złoża [A3]

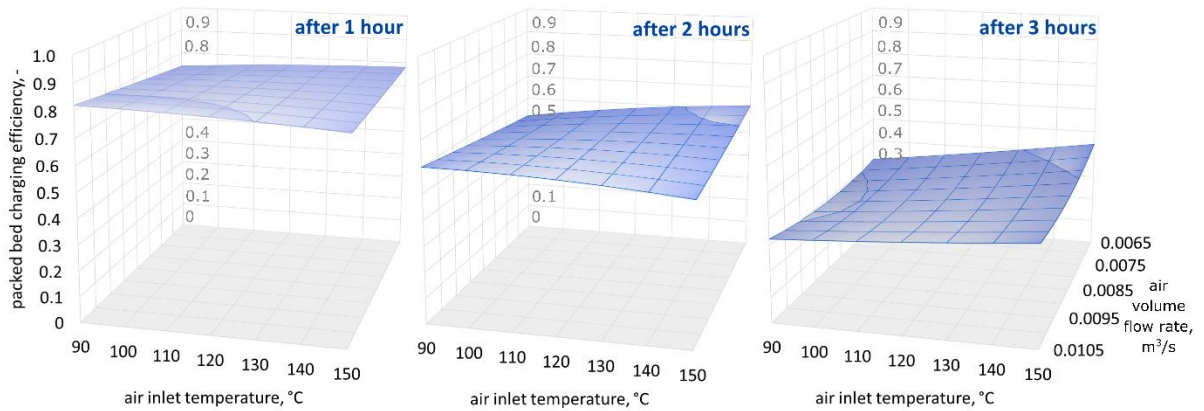
Nr eksperymentu	T_{in} °C	\dot{V}_a m ³ /s	D mm
1	150	0,0105	90
2	150	0,0065	50
3	90	0,0105	50
4	90	0,0065	90
5	150	0,0085	70
6	90	0,0085	70
7	120	0,0105	70
8	120	0,0065	70
9	120	0,0085	90
10	120	0,0085	50
11	120	0,0085	70

Każde z 11 wykonanych doświadczeń trwało ponad 3 h, aż do czasu gdy przyrost temperatury w ciągu 10 min. nie przekraczał 1 °C. Na podstawie otrzymanych wartości temperatur wygenerowałam charakterystyki zmiany temperatury powietrza na wylocie ze złoża od czasu przeprowadzanego eksperymentu. Następnie obliczyłam rzeczywistą i maksymalną ilość zakumulowanej energii oraz w konsekwencji efektywność procesu ładowania, co dla eksperymentu nr 9 według planu eksperymentu przedstawiłam na rys.6.

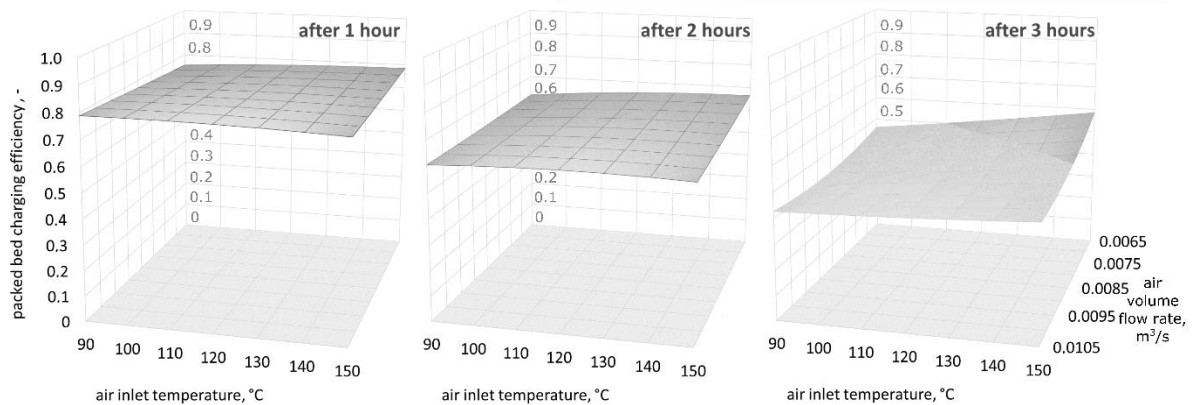


Rys. 6. Charakterystyki zmiany: rzeczywistej i maksymalnej ilości zakumulowanej energii, efektywności procesu ładowania oraz strat ciepła dla eksperymentu nr 9 [A3]

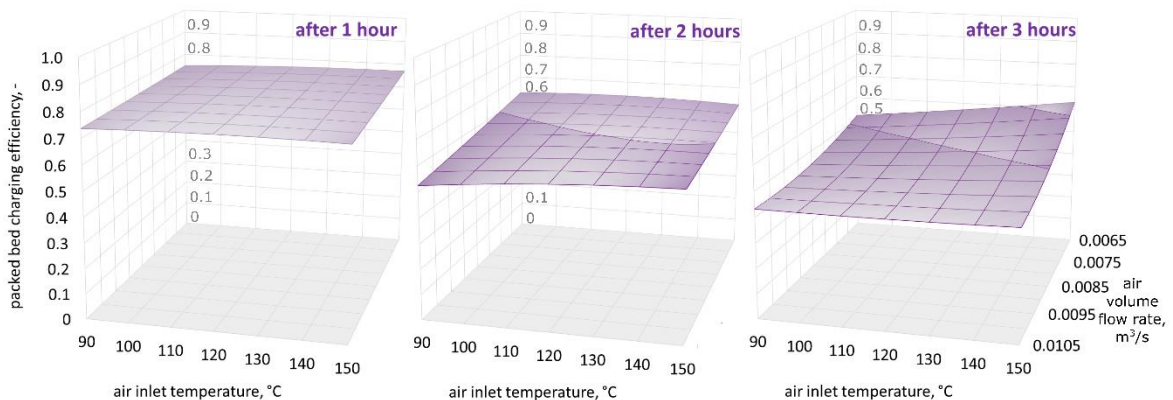
Dzięki wykonanym obliczeniom wyznaczyłam uniwersalne równanie na efektywność procesu ładowania, co pozwoliło mi na przedstawienie wyników eksperymentu w postaci charakterystyk przestrzennych widocznych na rys. 7, 8 i 9.



Rys. 7. Zależność między temperaturą wlotową powietrza, objętościowym natężeniem przepływu oraz sprawnością procesu ładowania dla kuli granitowej o średnicy 50 mm po 1, 2 i 3 godzinach ładowania [A3]



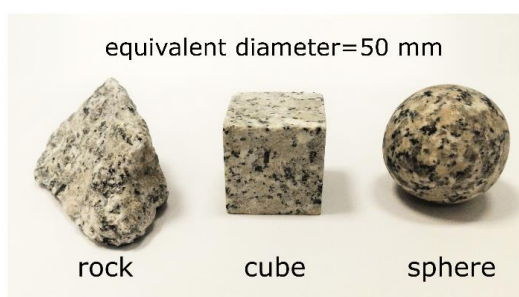
Rys. 8. Zależność między temperaturą wlotową powietrza, objętościowym natężeniem przepływu oraz sprawnością procesu ładowania dla kuli granitowej o średnicy 70 mm po 1, 2 i 3 godzinach ładowania [A3]



Rys. 9. Zależność między temperaturą wlotową powietrza, objętościowym natężeniem przepływu oraz sprawnością procesu ładowania dla kuli granitowej o średnicy 90 mm po 1, 2 i 3 godzinach ładowania [A3]

Analizując rysunki 7–9 zauważyłam, że najwyższe wartości efektywności procesu ładowania złoża występowały na początku procesu i zmniejszały się one wraz z upływem czasu ładowania. Zauważyłam również, że zmiany efektywności w funkcji temperatury powietrza na wlocie i przepływu powietrza wykazały podobny przebieg dla wszystkich średnic kul po jednej, dwóch i trzech godzinach procesu ładowania. Co ważne, po jednej godzinie ładowania najwyższe wartości sprawności występowały dla kulek o najmniejszej średnicy. Po dwóch godzinach ładowania wydajność była najwyższa dla kulek o średnicy 70 mm, a po trzech godzinach dla największych kul. Może to być spowodowane tym, że łączna powierzchnia wymiany ciepła najmniejszych kul użytych w akumulatorze była największa. W rezultacie w początkowej fazie procesu najmniejsze kulki wykazują największy wzrost temperatury, ale później strumień akumulowanego ciepła maleje. Warto wspomnieć o dwóch zależnościach, w których efektywność procesu ładowania była wysoka dla wszystkich trzech średnic: występowało to na początku procesu akumulacji przy najmniejszych przepływach powietrza i niskiej temperaturze wlotowej powietrza, oraz po trzech godzinach procesu dla największych przepływów powietrza i najwyższych wartości temperatury powietrza na wlocie.

W kolejnym etapie badań granitu jako materiału wypełnienia złoża akumulacyjnego zajmowałam się analizą porównawczą trzech różnych kształtów elementów wypełnienia, które miały taką samą średnicę zastępczą (rys. 10) [A2]. Warto zauważyć, że najtańszym z rozpatrywanych materiałów jest tłuczeń granitowy, natomiast najdroższe jest wykonanie kul. Największą stabilnością podczas układania i działania charakteryzuje się kostka granitowa, specjalnej konstrukcji stabilizującej wymaga natomiast tłuczeń granitowy oraz kule. Największą powierzchnią styku w złożu charakteryzuje się kostka, następnie tłuczeń, najmniejszą natomiast kule. Wpływa to na przekazywanie ciepła między elementami wypełnienia. Jako kryterium dalszej oceny wpływu kształtu na proces akumulacji wskazałam konieczność przeprowadzenia analizy procesu ładowania z wykorzystaniem zarówno I jak i II zasady termodynamiki, ze względu na to, że sama sprawność cieplna nie uwzględnia z definicji czasu ładowania akumulatora.

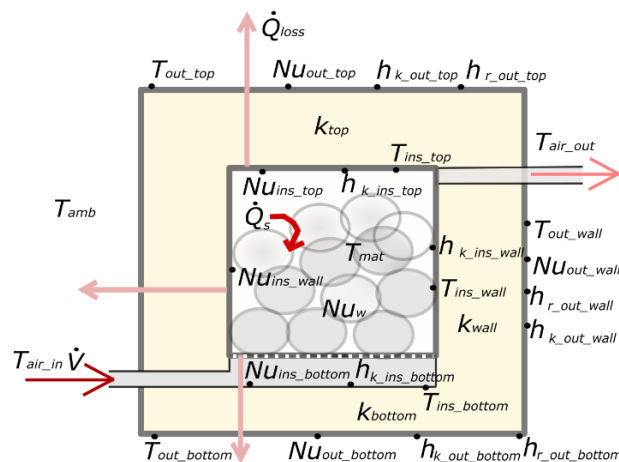


Rys. 10. Zdjęcie kształtów materiałów wykorzystanych do wypełnienia złoża [A2]

Podczas prowadzenia badań eksperymentalnych dla każdego rodzaju wypełnienia złoża akumulacyjnego starałam się zapewnić wysoki stopień podobieństwa ułożenia materiału wewnątrz akumulatora ciepła. Materiał został starannie wyselekcjonowany i dla każdego kształtu wybrano po 230 elementów, o wadze jednostkowej ok. 0,174 kg i wadze całkowitej materiału w złożu wynoszącej 40,02 kg. Sposób ułożenia materiału wewnątrz zapewnił tą samą wysokość stosu jak i ten sam współczynnik wypełnienia złoża wynoszący 0,65. Dla tak przygotowanego materiału ułożyłam plan eksperymentu. W tym przypadku również

skorzystałam z planu Hartleya³⁶. Jako czynniki wejściowe, istotne dla procesu akumulacji ciepła, przyjąłam temperaturę powietrza na wlocie do złoża T_{air_in} oraz jego objętościowe natężenie przepływu \dot{V}_{air} . Jako trzeci czynnik zdefiniowałam kulistość badanych elementów granitowych, oznaczaną jako Ψ , wyznaczoną na podstawie³⁷. Parametr Ψ dla tłucznia wynosi 0,6, dla kostki 0,8, natomiast dla kuli 1,0.

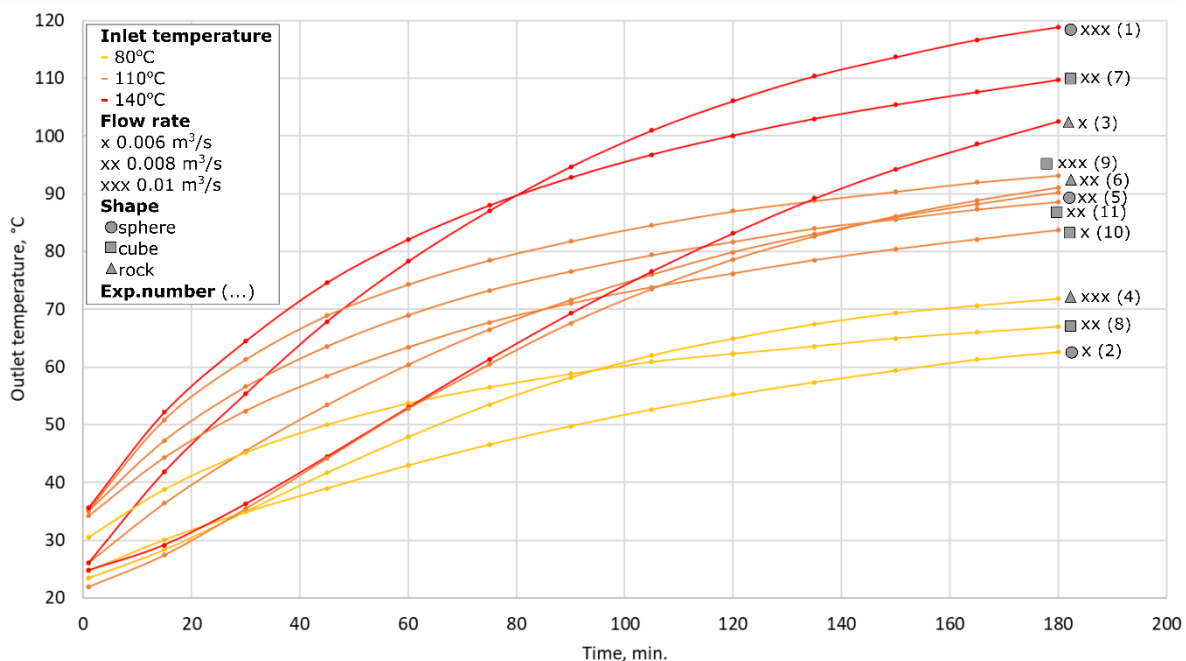
W celu przeprowadzenia założonych analiz porównawczych dla wskazanych trzech geometrii granitu, konieczne było w pierwszej kolejności obliczenie średniej temperatury materiału wewnątrz złoża. Pomiar tej temperatury nie jest możliwy w sposób dokładny, ze względu na gradient temperatury występujący wewnątrz złoża, który jest wynikiem ciepła wymienianego wzdłuż akumulatora, od wlotu do wylotu oraz z faktu, że powietrze przepływa nierównomiernie przez złoże. Znając parametry powietrza na wlocie i wylocie ze złoża oraz parametry materiałowe obudowy sporządziłam w programie MathCad algorytm opisujący bilans cieplny określający strumień ciepła doprowadzonego \dot{Q}_{in} wraz z gorącym powietrzem i strumień strat ciepła z powierzchni akumulatora \dot{Q}_{loss} . Strumień strat ciepła z powierzchni akumulatora do otoczenia \dot{Q}_{loss} wyznaczyłam jako sumę strumieni ciepła przenikających przez każdą z powierzchni akumulatora. Pozwoliło mi to w konsekwencji na określenie ilości akumulowanej energii \dot{Q}_{accu} i wyznaczenie średniej temperatury materiału wypełniającego akumulator T_{mat} . Powietrze w obliczeniach traktowałam jako gaz półdoskonały. Na rys. 11. przedstawiłam wszystkie parametry przyjęte do obliczeń wspomnianych strat ciepła. Zaproponowany przeze mnie algorytm obliczeniowy rozwiązywał łącznie 26 równań. Został on szczegółowo opisany przeze mnie w [A2 i A3].



Rys. 11. Schemat akumulatora cieplnego z zaznaczonymi parametrami cieplnymi i materiałowymi [A1]

Na rys. 12 przedstawiłam wyniki pomiarów temperatury powietrza wypływającego ze złoża zaznaczając dla lepszej orientacji punkty pomiarowe co 15 min. Różne temperatury wlotowe oznaczyłam kolorami, natomiast kształt materiału wypełnienia oraz objętościowe natężenie przepływu powietrza – symbolami.

³⁷ 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, doi:10.1016/j.solener.2005.07.001



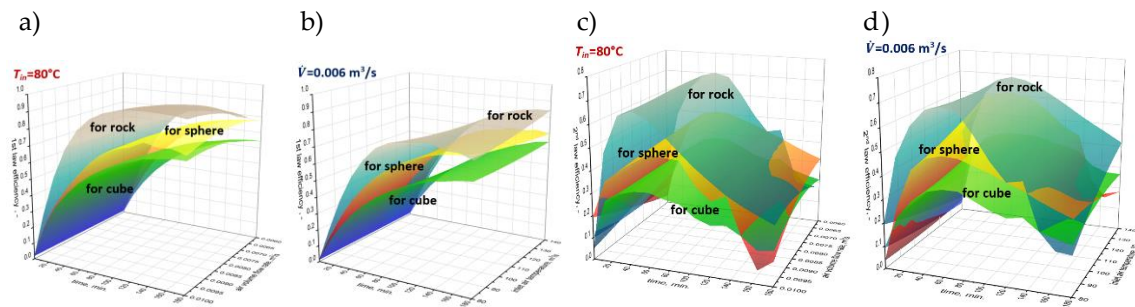
Rys. 12. Zmiana temperatury wylotowej powietrza podczas procesu ładowania złoża [A2]

Widoczne na wykresie charakterystyki temperaturowe dążą do wypłaszczenia, które nastąpiło prawie całkowicie w kolejnych godzinach ładowania. Ze względu na cel prowadzonych badań porównawczych, analizie poddałam jedynie trzy pierwsze godziny procesu, które są bardzo istotne w perspektywie współpracy złoża kamiennego ze źródłem ciepła o krótkiej dostępności czasowej i nie zostały dokładnie opisane w literaturze. W pierwszych minutach ładowania krzywe dla tłucznia granitowego były prawie liniowe, we wszystkich badanych przypadkach. Uzyskiwana najniższa temperatura wylotowa wynikała wg mnie z intensywnej wymiany ciepła w tym czasie.

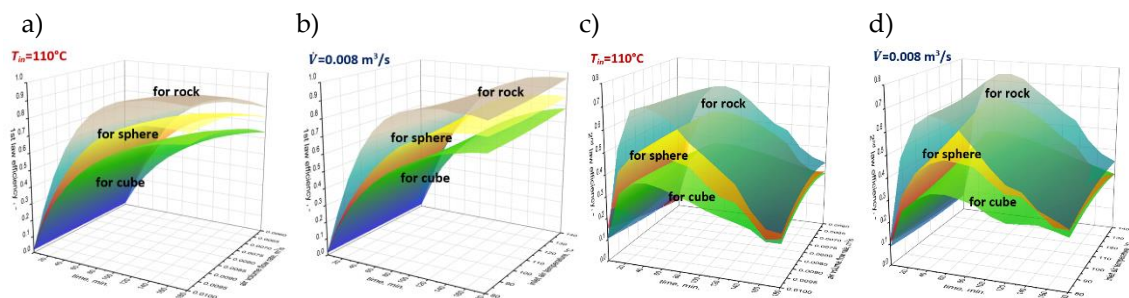
Podczas badań zmierzono również spadki ciśnienia w złożu, które jak zauważyłam, w badanym zakresie nie były zależne od kształtu materiału, a jedynie od objętościowego natężenia przepływu. Dla najmniejszego przepływu, $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$, spadek ciśnienia w złożu wyniósł 3 Pa, dla $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$ spadek ciśnienia w złożu wyniósł 5 Pa, natomiast dla $0,010 \text{ m}^3/\text{s}$ spadek ciśnienia wyniósł 7 Pa. Oznacza to, że ilość energii tracona na pokonanie oporów hydraulicznych była wielokrotnie mniejsza od przekazywanej energii cieplnej. Dlatego w dalszych analizach pominęłam wpływ spadków hydraulicznych w analizie wykorzystującej II zasadę termodynamiki.

Na rys. 13-15 przedstawiłam w formie wykresów charakterystyki uzyskane na podstawie I i II zasady termodynamiki dla trzech badanych kształtów, dla trzech różnych temperatur wlotowych oraz trzech natężeń przepływu. Wyniki uzyskane według I zasady termodynamiki wskazały, że we wszystkich analizowanych przypadkach najwyższa sprawność cieplna osiągana była dla tłucznia. Niższe wartości otrzymano dla kuli, a najniższe dla granitu w kształcie kostki. Największe różnice wystąpiły pomiędzy 60 a 100 minutą ładowania. Były one widoczne szczególnie dla największego natężenia przepływu i najniższej temperatury wlotowej. Jednak wpływ temperatury i natężenia przepływu na sprawność cieplną dla każdej z analizowanych geometrii nie był duży. Znacznie większy wpływ miał czas ładowania, czyli zmieniająca się temperatura powietrza i granitu. Poprzez wykonanie obliczeń generacji

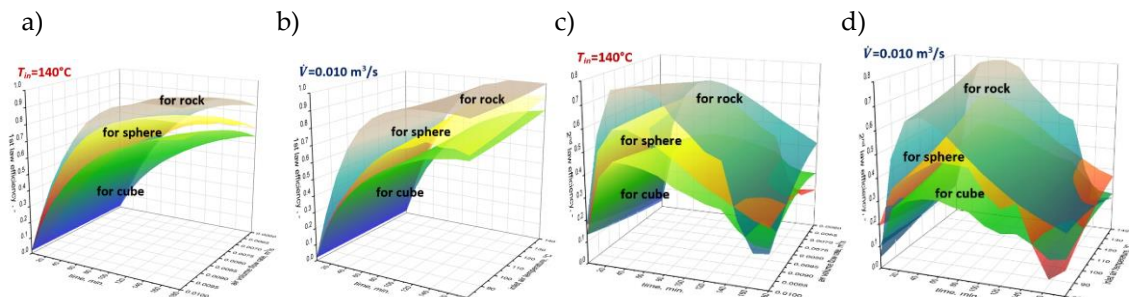
entropii, egzergii i zastosowanie planu eksperymentu możliwe było również przedstawienie tej analizy w czasie, co zwizualizowałam przy wykorzystaniu programu Origin.



Rys. 13. Zmiana sprawności cieplnej, wynikającej z I zasady termodynamiki (a, b) i sprawności egzergetycznej, wynikającej z II zasady termodynamiki (c, d) w czasie dla temperatury wlotowej powietrza 80°C i natężenia przepływu $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$ [A2]



Rys. 14. Zmiana sprawności cieplnej (a, b) i sprawności egzergetycznej (c, d) w czasie dla temperatury wlotowej powietrza 110°C i natężenia przepływu $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$ [A2]



Rys. 15. Zmiana sprawności cieplnej (a, b) i sprawności egzergetycznej (c, d) w czasie dla temperatury wlotowej powietrza 140°C i natężenia przepływu $0,010 \text{ m}^3/\text{s}$ [A2]

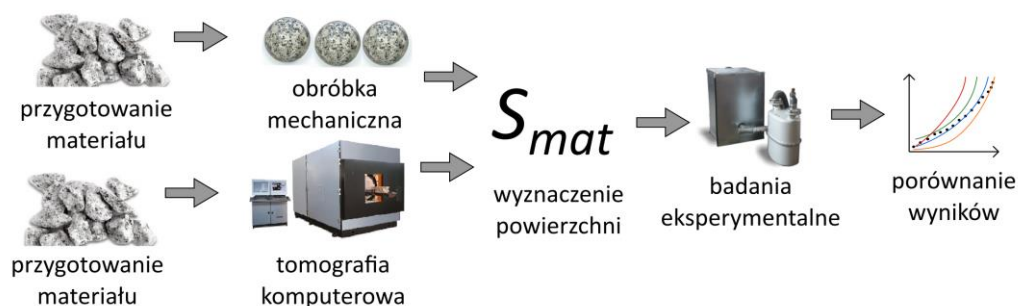
Analizując wykresy można zauważyć, że sprawność egzergetyczna wyznaczona w oparciu o II zasadę termodynamiki osiągała najwyższe wartości dla tłucznia prawie w całym badanym zakresie. Najniższe zaś wartości uzyskiwane były dla kostki. Jak wynikało z powyższych wykresów efektywność procesu ładowania dla tłucznia osiągała najwyższe wartości dla najwyższej temperatury powietrza wlotowego, po czasie 60 min. Również dla kulki i kostki efektywność według II zasady termodynamiki przyjmowała najwyższe wartości po czasie 1 h. Jednak po tym czasie efektywność dla tłucznia bardzo szybko spadała, osiągając najniższe wartości pod koniec pomiarów, dla całego badanego zakresu natężenia przepływu. Dla czasu ładowania krótszego niż 2 h wykorzystanie potencjału energetycznego dla kostki i kulki było mniejsze niż dla tłucznia. Dla tych geometrii efektywność wolniej malała wraz z upływem czasu. Wyznaczenie efektywności w oparciu o II zasadę termodynamiki pozwoliło mi na

określenie stopnia wykorzystania energii dostarczanej wraz z gorącym powietrzem. Zmiana tej sprawności w czasie pokazała, że najlepsze wykorzystanie doprowadzanej energii uzyskuje się po czasie 1 h. Wtedy sprawność osiągała najwyższe wartości dla wszystkich badanych geometrii. Jednak sam proces ładowania przebiegał najintensywniej dla tłucznia, a najslabiej dla kostki. Powoduje to, że poza walorami cenowymi, tłuczeń, ze względu na swoją nieregularną strukturę jest również najlepszą, spośród analizowanych, geometrią pod względem cieplnym.

Realizując powyższe badania wykazałam, że kształt elementów wypełnienia akumulatora wpływa na sprawność cieplną procesu ładowania. W całym badanym zakresie najwyższą sprawność uzyskano dla tłucznia granitowego, charakteryzującego się najmniejszym współczynnikiem kulistości. Niższą sprawnością charakteryzował się proces ładowania akumulatora wypełnionego kulkami, a najniższą kostkami. Na tej podstawie stwierdziłam, że współczynnik kulistości nie jest parametrem determinującym efektywność ładowania.

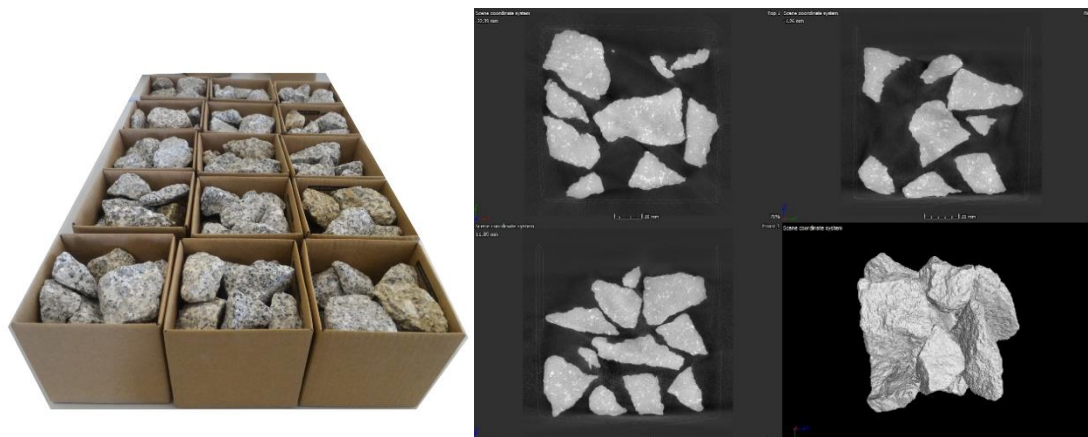
Warto również zauważyć, że podczas obliczeń modelowych strumień przekazywanego ciepła pomiędzy gorącym powietrzem, a materiałem wypełniającym akumulator (\dot{Q}_{accu}) dla takich samych temperatur początkowych powietrza i materiału jest zależny tylko od współczynnika wnikania ciepła h i powierzchni wymiany ciepła A_g . Wykonany przeze mnie przegląd literatury wykazał znikomą liczbę prac dotyczących wpływu geometrii elementów wypełnienia akumulatorów ciepła na efektywność procesu akumulacji, szczególnie materiałem o niekulistej geometrii. Jak wykazałam we wstępie, w literaturze dostępne są liczne korelacje na liczbę Nusselta do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła. Jako wymiar charakterystyczny przyjmuje się jednak w nich średnicę materiału lub średnicę zastępczą, obliczaną z objętości kuli. Oznacza to, że podczas modelowania akumulatora wypełnionego elementami o badanej przeze mnie geometrii strumień wnikającego ciepła \dot{Q}_{accu} powinien przyjmować te same wartości. Jednak jak wykazałam, różnice pomiędzy różnymi geometriami są widoczne, dlatego postanowiłam kontynuować badania akumulacji ciepła w materiałach o złożonej geometrii i poddać je głębszej analizie.

Praca [A1] jest kontynuacją wcześniejszych badań tłucznia granitowego. Miała na celu określenie wpływu kształtu kamienia łamanego na proces wymiany ciepła poprzez wyznaczenie liczb kryterialnych: Nu i Re . Jak wspomniałam wcześniej, równania kryterialne do wyznaczania liczby Nusselta zakładają, że materiał usypany w złożu traktowany jest jak kule, dlatego w tych badaniach poza tłuczniem granitowym wykorzystałam kule, jako geometrię wzorcową. Proces przygotowania materiału i dalszej realizacji zadania przedstawiłam na rys. 16.



Rys. 16. Etapy realizacji badań kamiennego akumulatora ciepła

Kamień został poddany obróbce mechanicznej, w celu uzyskania gładkiej kuli, o średnicy 50 mm. Następnie wyselekcjonowałam tyle samo sztuk tłucznia o takiej samej masie i średnicy zastępczej. Oczyszczałam go i wysłałam do badań tomograficznych (rys. 17), w celu dokładnego wyznaczenia powierzchni. Badania te zostały wykonane metodą X-ray Computed Tomography, przez firmę zewnętrzną przy wykorzystaniu tomografu Model: Nikon XT H 225, Lampa: Rotating Target 225 kV, Detektor: Varex 4343 w ramach środków przyznanych z Narodowego Centrum Nauki [G1].



Rys. 17. Materiał przygotowany do badań (po lewej) i przykładowe badania tomograficzne (po prawej) [A1]

Średnicę materiału D_{mat} wyznacza się z objętości. Dla kuli jest to jej rzeczywista średnica, ndla kamienia łamanego jest to średnica zastępcza. Znając średnicę pojedynczego materiału wypełnienia D_{mat} , można obliczyć jego powierzchnię S_{sphere} , ze wzoru na pole powierzchni kuli. Wyniki obliczeń powierzchni oraz badań tomograficznych zestawiałam w tabeli 4. Dla elementów w postaci tłucznia zamieściłam dwie wartości powierzchni. Pierwsza teoretyczna obliczona przy założeniu jego kulistości. Druga to powierzchnia rzeczywista otrzymana z badań tomograficznych. Warto zwrócić uwagę, że różnica między powierzchnią teoretyczną (obliczaną jak dla kuli), a rzeczywistą tłucznia wynosiła aż 28,6%.

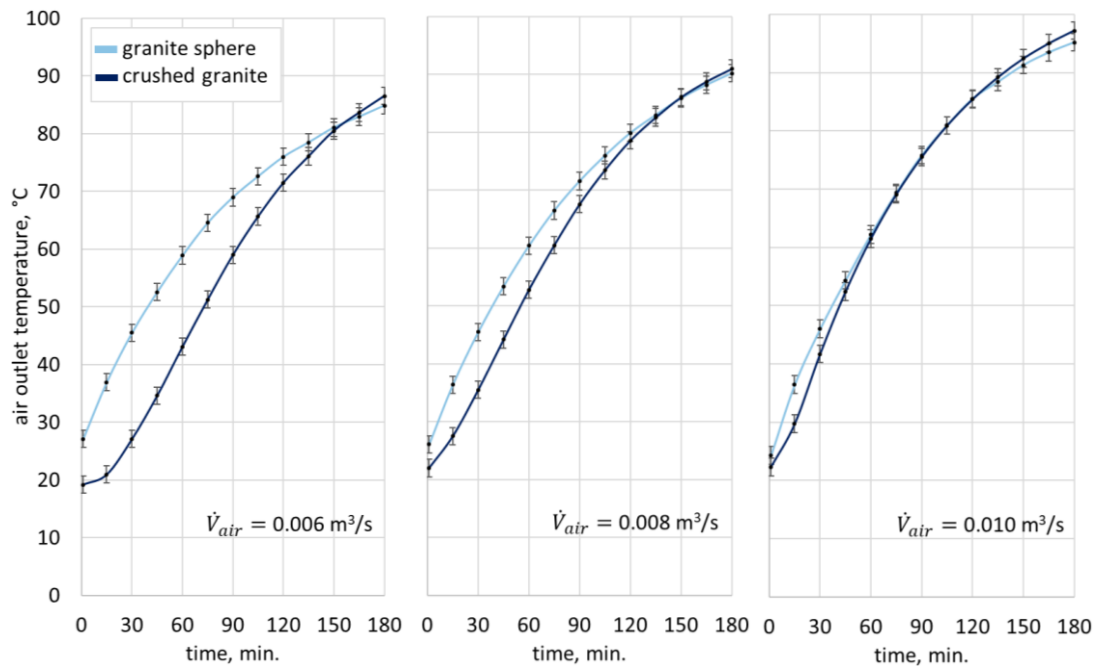
Tab.4 Zestawienie danych charakterystycznych materiału wypełnienia [A1]

Kształt materiału	Średnica zastępcza	Powierzchnia elementu
kula	0,05m	0,00785 m ²
tłuczeń (traktowany jak kula)	0,05m	0,00785 m ²
tłuczeń	0,05m	0,01098 m ²

W dalszych analizach uwzględniłam przypadek, w którym wyznaczona dla tłucznia liczba Nusselta uwzględniała jego rzeczywistą powierzchnię, jak również przypadek w którym powierzchnia ta była obliczana jak powierzchnia dla kuli.

Do badań eksperymentalnych wykorzystałam stanowisko badacze poprzednio opisane i widoczne na rys. 3. Materiał akumulacyjny w kształcie kamienia łamanego i kul został ułożony luźno wewnątrz akumulatora. Ze względu na tę samą masę wypełnienia, uzyskałam taki sam współczynnik wypełnienia. Wykonałam trzy serie pomiarowe dla każdej z dwóch geometrii, regulując natężenie przepływu powietrza przez akumulator. Wartości nastaw dla kolejnych serii pomiarów wynosiły odpowiednio 0,006 m³/s, 0,008 oraz 0,010 m³/s. Ustaliłam

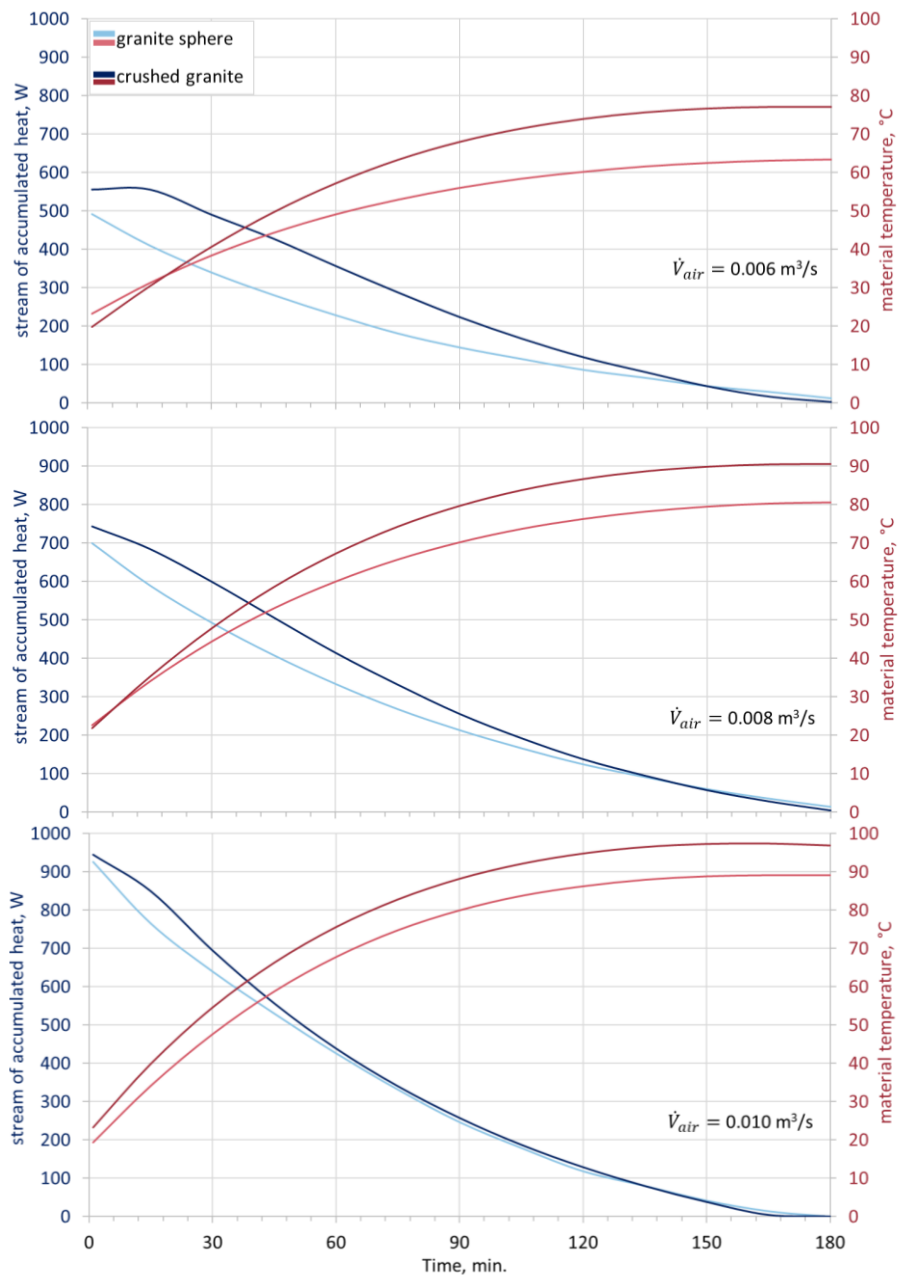
czas ładowania na 3 godziny. Jest to czas w którym temperatura powietrza wylotowego T_{air_out} zmienia się dynamicznie. Na rys.18 przedstawiłam uzyskaną zmianę temperatury powietrza wylotowego w czasie dla kul i tłucznia granitowego.



Rys. 18. Temperatura powietrza wylotowego w czasie procesu ładowania akumulatora, dla różnych wartości natężenia przepływu powietrza [A1]

Różnice w zmianie wartości temperatury wylotowej powietrza dla kuli i tłucznia były bardzo widoczne. Oznacza to, że proces wymiany ciepła pomiędzy powietrzem, a granitem miał inny charakter. Istotne stało się dla mnie zatem określenie strumienia ciepła przekazywanego pomiędzy przepływającym przez akumulator powietrzem, a granitem. Przyjęłam, że następnie należy określić współczynnik wnikania ciepła, a w celu dokładnego opisu procesu należy scharakteryzować proces wymiany ciepła w funkcji natężenia przepływu. Szczegółowy algorytm obliczeniowy zawarłam w [A1]. Umożliwił mi on wyznaczenie parametrów przepływowych: prędkości powietrza w akumulatorze w_{air} i liczby Reynoldsa Re oraz parametrów cieplnych, jak: strumień wymienianego ciepła pomiędzy przepływającym powietrzem, a materiałem akumulacyjnym \dot{Q}_{accu} , współczynnik wnikania ciepła do materiału h_{mat} (uwzględniającego jego powierzchnię) i liczby Nusselta Nu .

Na rys. 19. przedstawiłam strumień przekazywanego ciepła oraz średnią temperaturę materiału wypełniającego akumulator, wyznaczoną z bilansu cieplnego (rys. 11).



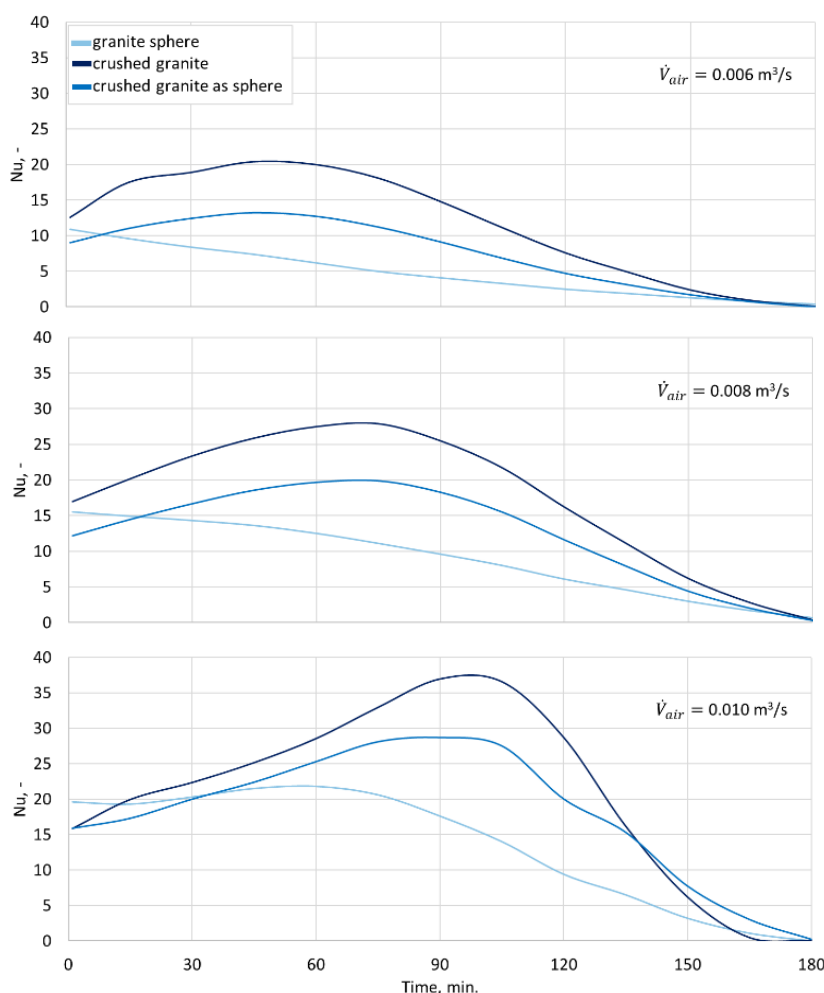
Rys. 19. Strumień akumulowanego ciepła oraz temperatura granitu w czasie [A1]

Zmiany strumieni ciepła, widoczne na rys. 19 pokazują dynamikę procesu w czasie 3 godzin ładowania akumulatora. Największe różnice strumienia wymienianego ciepła dla kuli i tłucznia wystąpiły dla najmniejszego natężenie przepływu. Efektem tego była różna temperatura granitu. Różnice te były największe w pierwszej godzinie ładowania. Warto zauważyć, że wraz ze wzrostem natężenia przepływu powietrza różnice te były coraz mniejsze. Jednak dla największego natężenia przepływu wartości strumieni również były największe. Dlatego w celu lepszej oceny intensywności wymiany ciepła przeanalizowałam liczby kryterialne opisujące proces wymiany ciepła.

Wpływ na efektywność procesu akumulacji ciepła mają straty ciepła z powierzchni akumulatora oraz strumień ciepła przejmowany przez materiał akumulacyjny. Pierwszy z tych strumieni można w znacznym stopniu ograniczyć. Jednym z podstawowych kryteriów poprawy

efektywności jest tu aspekt ekonomiczny, wynikający ze zwiększania ilości materiału izolacyjnego. Drugi strumień ciepła jest związany z parametrami procesowymi, jak np. z natężeniem przepływu czy różnicą temperatur, jak również z parametrami materiałowymi, jak np. średnicą pojedynczego elementu materiału akumulacyjnego czy jego powierzchnią. W celu analizy procesu wymiany ciepła warto zwrócić uwagę na liczbę Nusselta, jako liczbę podobieństwa odpowiednią dla scharakteryzowania wnikania ciepła do materiału akumulacyjnego. Uwzględnia ona powyższe parametry i pozwala na porównanie procesu wymiany ciepła dla różnych warunków procesowych.

Wykonane pomiary pozwoliły mi wyznaczyć liczbę Nu zarówno dla procesu ładowania akumulatora wypełnionego kulami jak i tłuczniem granitowym. Do wyznaczenia liczby Nu dla tłucznia przyjąłem powierzchnię obliczoną ze średnicy zastępczej, traktując tłuczeń jako kulę. Dodatkowo, znając rzeczywistą powierzchnię tłucznia postanowiłam wykonać obliczenia liczby Nu dla tłucznia, wstawiając do równania rzeczywistą powierzchnię, wyznaczoną z tomografii. Otrzymane wyniki liczny Nu w czasie ładowania akumulatora przedstawiłam na rys. 20.

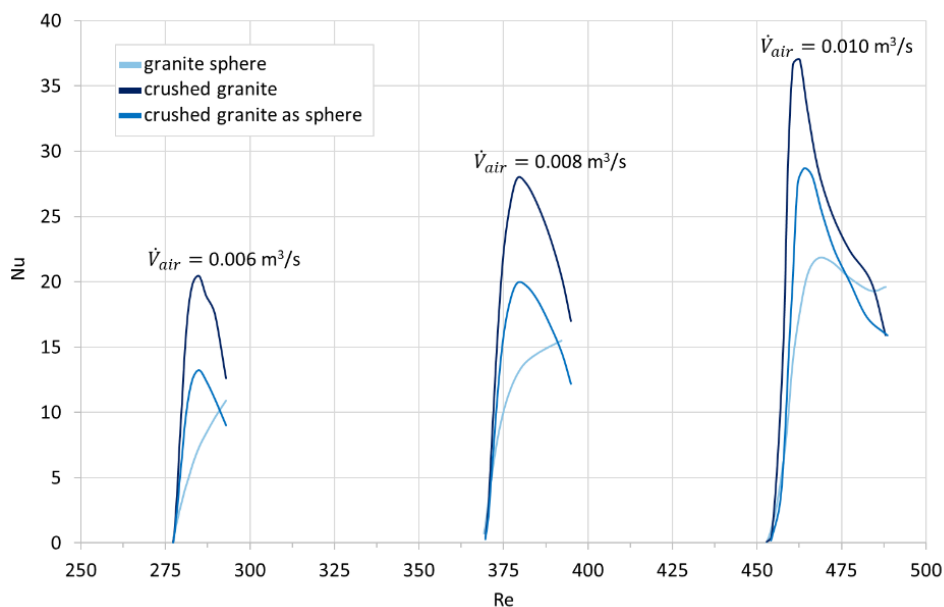


Rys. 20. Zmiana liczby Nusselta w czasie procesu ładowania akumulatora wypełnionego granitem [A1]

Z powyższego porównania charakterystyk liczby Nu dla procesu ładowania akumulatora wypełnionego kulami oraz tłuczniem granitowym wynika, że charakter wymiany ciepła był

różny dla tych geometrii. W trakcie całego czasu trwania pomiarów liczba Nu dla kuli zawsze przyjmowała wartości niższe niż dla tłucznia, dla wszystkich analizowanych natężeń przepływu powietrza przez akumulator. Warto zwrócić uwagę, że liczba Nu dla tłucznia przyjmowała najwyższe wartości pomiędzy 50, a 100 minutą badań. Maksymalna wartość pojawiła się później wraz ze wzrostem natężenia przepływu powietrza. Dla granitowych kul maksymalna wartość wystąpiła na początku procesu. Wraz ze wzrostem natężenia przepływu powietrza zmieniał się charakter krzywej i tylko dla największego przepływu zmieniał się czas wystąpienia najwyższej wartości liczby Nu . Wprowadzenie do obliczeń rzeczywistej powierzchni tłucznia tylko częściowo zbliżyło krzywą liczby Nu dla tłucznia do krzywej dla kuli. Nie zmieniło jednak jej charakteru. Liczba Nu dla tłucznia, dla którego wprowadzono rzeczywistą powierzchnię przyjmowała wartości niższe niż dla kuli w pierwszych minutach pomiarów, a następnie wartość Nu wzrastała, podążając za zmianą liczby Nu dla tłucznia dla którego powierzchnia była wyznaczona tak samo jak dla kuli.

W celu sformułowania bardziej ogólnych wniosków dla różnych serii pomiarowych postanowiłam skorzystać z parametrów bezwymiarowych. Jedną z najczęściej analizowanych zależności jest $Nu = f(Re)$, przedstawiająca wpływ ruchu płynu na szybkość wymiany ciepła. Zależność tę zamieściłam na rys. 21. Na wykresie zestawiałam wyniki badań kuli, tłucznia oraz tłucznia, z uwzględnieniem jego rzeczywistej powierzchni.



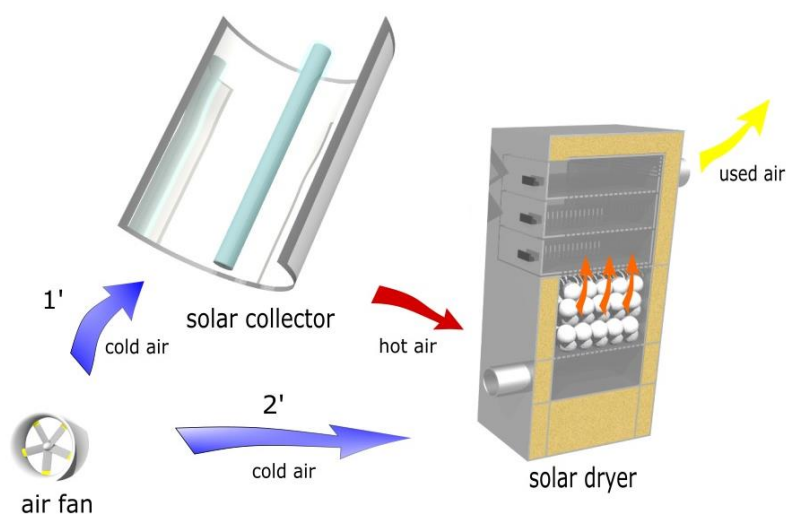
Rys. 21. Zależność liczby Nusselta od liczby Reynoldsa podczas procesu ładowania akumulatora wypełnionego granitem [A1]

W obliczeniach przyjąłam, że powietrze jest traktowane jak gaz półdoskonały i jego właściwości fizyczne są funkcją temperatury. Dlatego otrzymałam zmienną w trakcie trwania pomiarów wartość liczby Re dla każdego z natężeń przepływu. Wyższe wartości liczby Re występowały na początku pomiarów. Wartość ta malała w czasie wykonywania pomiarów. Duże rozbieżności w liczbie Nu widoczne na rys. 20 można znaleźć również na wykresie $Nu = f(Re)$. Jednak w końcowej fazie badań liczba Re dla kuli i tłucznia przyjmuje prawie takie same wartości, dla każdej z nastaw. Jest to wynikiem zbliżonych wartości temperatury czynnika roboczego wewnątrz akumulatora. Zarówno dla badań kuli jak i tłucznia maksymalna wartość

liczny Nu rosła wraz ze wzrostem liczby Re , jednak najwyższe wartości liczby Nu dla kuli były znacznie niższe niż dla tłucznia. Nawet wprowadzenie do obliczeń rzeczywistej powierzchni tłucznia nie spowodowało obniżenia wartości liczby Nu do poziomu wartości uzyskanych dla kuli. Ponadto warto zwrócić uwagę, że sam charakter zmiany liczby Nu był inny dla tych geometrii.

4.3.3. Zastosowanie kamiennych akumulatorów ciepła

W pracach [A3], [A4] i [A5] zajmowałam się również możliwościami aplikacyjnymi zastosowania granitowych akumulatorów ciepła, nagrzewanych gorącym powietrzem pochodzącym z instalacji słonecznych.

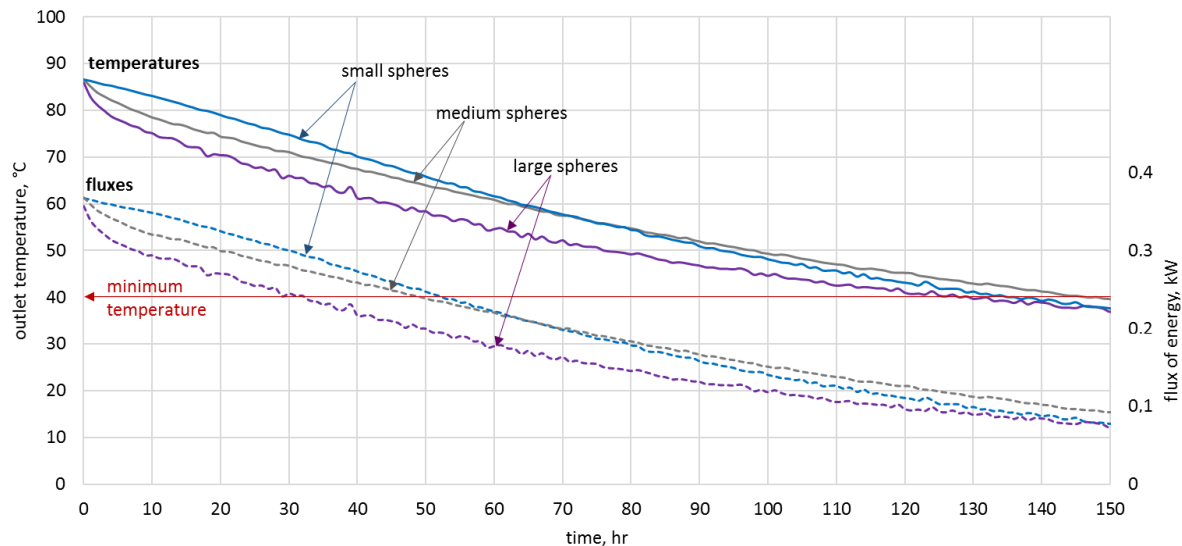


Rys. 22. Schemat ideowy suszarni słonecznej z granitowym złożem akumulacyjnym [A3]

Proponowane rozwiązanie technologiczne suszarni słonecznej, którego jestem autorem, zostało przedstawione na rys. 22. Głównymi elementami systemu był kolektor skupiający współpracujący z suszarnią z wewnętrznym złożem akumulacyjnym. Powietrze ogrzewane w kolektorze było kierowane przez materiał wypełnienia złoża do suszonego materiału. Rozpatrywana suszarnia może służyć zarówno do nisko- jak i wysokotemperaturowego procesu suszarniczego ze względu na wykorzystanie słonecznego kolektora skupiającego. Wysoka temperatura medium roboczego, do 150 °C³⁸, jest niezbędna m.in. w procesie dwuetapowego suszenia, np. zbóż, w tym kukurydzy. Proponowane rozwiązanie techniczne pozwala na zmieszanie gorącego medium z kolektora ze świeżym powietrzem zaczerpniętym z otoczenia. Wewnętrzne złożo akumulacyjne wypełnione granitem umożliwiało zachowanie ciągłości prowadzonego procesu suszenia mimo chwilowego zachmurzenia lub po zachodzie Słońca. Na rys. 23 zobrazowałam proces rozładowywania złoża dla różnej wielkości wypełnienia. Złożo było naładowane do 90 °C. We wszystkich przypadkach proces suszarniczy mógłby odbywać się jeszcze przez dwie godziny mimo braku promieniowania słonecznego. Jako graniczną temperaturę, poniżej której kontynuowanie procesu suszenia nie ma technologicznego i ekonomicznego uzasadnienia przyjął 40 °C. Temperatura ta stanowi minimalną wymaganą

³⁸ Agrawal, A.; Sarviya, R.M. A review of research and development, work on solar dryers with heat storage, International Journal of Sustainable Energy 2016, 35(6), 583-605, DOI: 10.1080/14786451.2014.930464

wartość dla wielu rodzajów produktów suszarniczych. Poza temperaturą analizie poddałam strumień ciepła podczas rozładowywania akumulatora. Wartości strumieni są zbliżone, jednak największy strumień ciepła podczas dwóch godzin rozładowywania był osiągany dla kul o najmniejszej średnicy. Najmniejszy strumień ciepła natomiast uzyskałam z kul największych. Oznacza to, że dla tego wypełnienia proces jest wolniejszy, a dzięki temu można dłużej podtrzymać proces suszenia, bez konieczności regulowania natężenia przepływu.



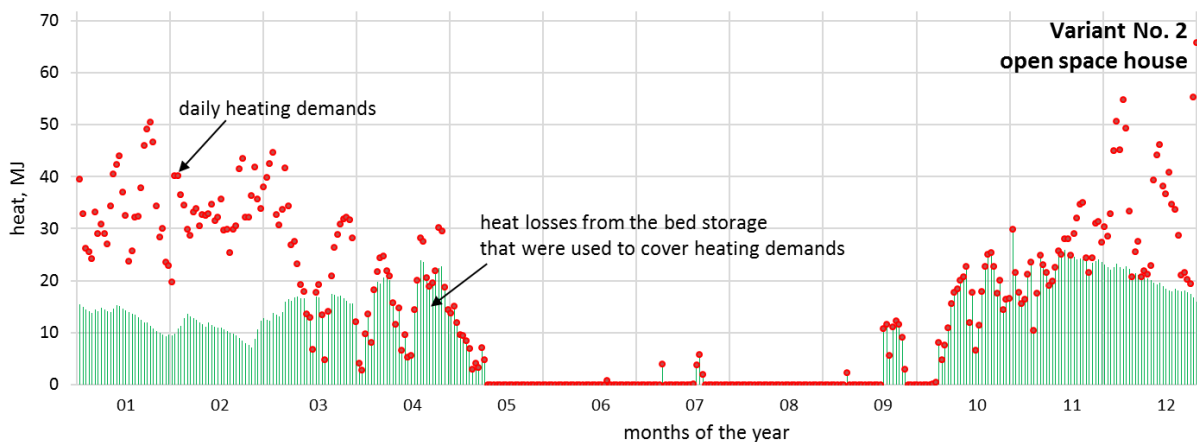
Rys. 23. Proces rozładowywania złóż wypełnionych kulami o różnej średnicy z zaznaczeniem temperatury minimalnej pracy suszarni słonecznej [A3]

Kolejne moje badania były związane z możliwością wykorzystania złoża granitowego jako sezonowego akumulatora ciepła w systemie powietrznego ogrzewania budynku [A4], w warunkach klimatycznych Wrocławia. Wykonałam badania eksperymentalne procesu akumulacji ciepła w granicie w warunkach laboratoryjnych, które posłużyły do stworzenia modelu. Docelowo nagrzewnicę powietrza w tym układzie miał stanowić kolektor skupiający liniowo z wewnętrznym ożebrowanym absorberem. Stanowisko do badania współpracy kolektora słonecznego ze złożem (rys.24) zostało zbudowane w Centrum Technologii Energetycznych w Świdnicy [O1]. W ramach prac nad artykułem [A4] byłam odpowiedzialna za wykonanie i opracowanie kilkumiesięcznych badań eksperymentalnych na wspomnianym stanowisku jak również opracowanie algorytmu i przeprowadzenie symulacji rocznej pracy pełnowymiarowego systemu dla Typowego Roku Meteorologicznego, które pozwoliły na określenie wielkości i zmian temperatury złoża akumulacyjnego, tak aby pokrywało ono potrzeby grzewcze rozpatrywanego budynku.

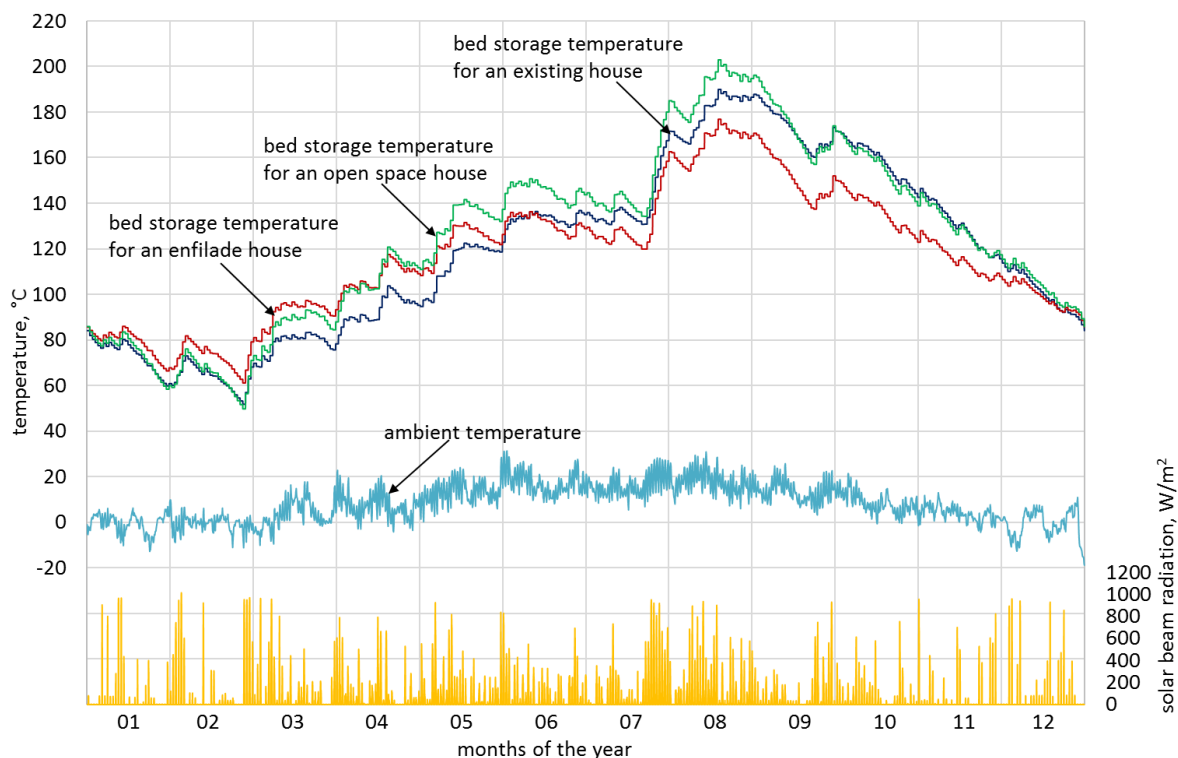


Rys. 24. Stanowisko do badania akumulacji ciepła z instalacji słonecznej [A4]

Sporządzony przeze mnie algorytm obliczeniowy wykonany w [A4] został następnie przeze mnie rozbudowany na potrzeby dalszych etapów badań wykonywanych we współpracy z architektem [A5]. W publikacji tej zostały zawarte rozważania związane z możliwością integracji sezonowego akumulatora ciepła, ogrzewanego skupiającym kolektorem słonecznym z budynkiem. System ten, ze względu na polskie warunki klimatyczne należało określić jako wielkogabarytowy, dlatego tak istotne jest rozmieszczenie jego głównych elementów, czyli złoża i kolektora, w sposób, który dla danego budynku będzie najbardziej korzystny. Rozważaniom i ocenie poddane były trzy warianty integracji. Pierwszy zakładał, że sezonowy akumulator ciepła zostanie umieszczony w centralnej części budynku, natomiast kolektor jako element elewacji. Drugi zakładał umieszczenie zarówno złoża jak i kolektora wewnątrz budynku, z tym, że złoża dwoma ścianami jest na zewnątrz budynku. Trzeci wariant to rozwiązanie w przypadku integracji z istniejącym już budynkiem. Zarówno akumulator jak i złoża były w formie dobudówki do bryły budynku.



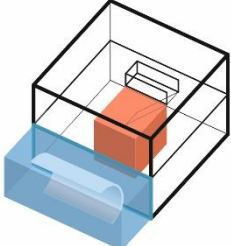
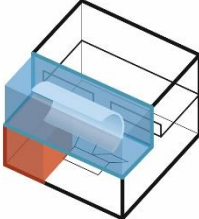
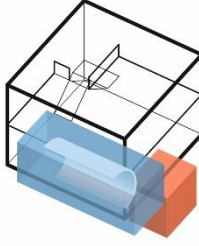
Rys. 25. Pokrycie zapotrzebowania na ciepło stratami ciepła ze złoża w przypadku drugiego wariantu integracji słonecznego systemu akumulacji z budynkiem [A5]

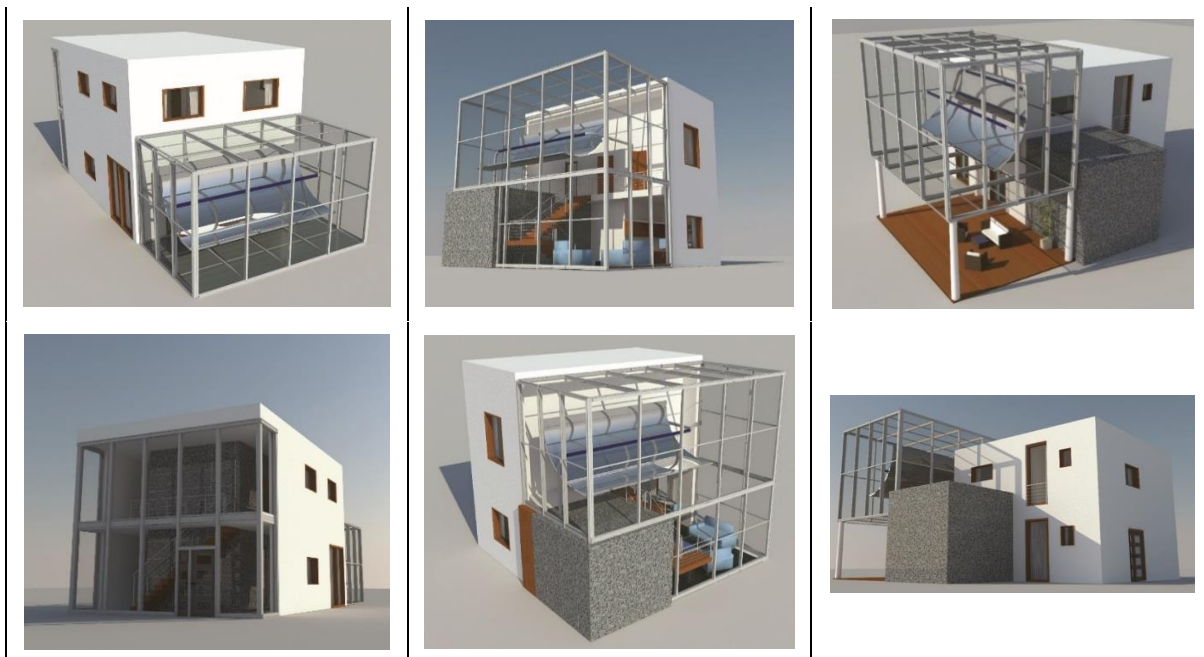


Rys. 26. Wykresy zmian parametrów meteorologicznych i temperatury złoża dla trzech wariantów systemu w ciągu roku [A5]

Dzięki znajomości potrzeb energetycznych rozpatrywanego budynku, zdefiniowanego jako pasywny, obliczyłam dzienne zapotrzebowanie na ogrzewanie obiektu dla jego trzech wariantów (przykład na rys. 25). Korzystając z algorytmu obliczeniowego sprawdzałam zmianę temperatury złoża w ciągu roku (rys. 26) w celu dobrania odpowiednich gabarytów systemu ogrzewania. Wynikiem moich prac było określenie wielkości granitowego złoża akumulacyjnego oraz kolektora słonecznego dla każdego z wariantów. Dla pierwszego wariantu, gdzie złożo było obudowane klatką schodową, jego wymiary (bez izolacji) wyniosły 1x3,5x4,5 m. Dla drugiego wariantu, gdzie złożo umieszczone było w narożu budynku: 2,5x2,5x2,5 m. Natomiast złożo dobudowane do istniejącego budynku: 3,0x3,0x3,0 m. Na podstawie moich obliczeń gabarytów elementów systemu powstały wizualizacje architektoniczne rzeczywistych obiektów widoczne w tab. 5.

Tab. 5. Wizualizacje budynków z sezonowym akumulatorem ciepła [A5]

Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
		



4.3.4. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując powyżej opisane badania podstawowe, wchodzące w skład mojego osiągnięcia naukowego, można stwierdzić, że:

- dzięki sporządzeniu planu eksperymentu skrócono ilość potrzebnych serii pomiarowych oraz pokazano, że efektywność procesu ładowania akumulatora ciepła wypełnionego granitem jest podobna dla wszystkich wielkości wypełnień, po pierwszej godzinie ładowania. Różnice w efektywności widoczne są po kilku godzinach od rozpoczęcia procesu, dlatego ważny jest czas prowadzenia badań;
- badania trzech różnych kształtów granitu o tej samej średnicy zastępczej wykazały duże rozbieżności temperatury wylotowej powietrza ze złoża, co sugeruje, że nie tylko wielkość, ale i kształt elementów wypełnienia akumulatora wpływają na sprawność cieplną procesu ładowania. W całym badanym zakresie najwyższą sprawność uzyskano dla tłucznia granitowego, charakteryzującego się najmniejszym współczynnikiem kulistości. Niższą sprawnością charakteryzuje się proces ładowania akumulatora wypełnionego kulkami, a najniższą kostkami;
- badania porównawcze tłucznia granitowego z kulami wykazały, że po czasie ładowania wynoszącym około 3 godziny temperatura powietrza wylotowego dla kuli jest zbliżona do temperatury dla tłucznia. Jednak, gdy źródło ciepła współpracujące z akumulatorem dostarcza ciepło w krótkich okresach czasu lub z przerwami to istotna jest również znajomość procesu w pierwszych godzinach ładowania, gdzie rozbieżności w wynikach są duże;
- przegląd literatury wskazuje, że powszechną praktyką jest wyznaczanie parametrów akumulatorów przy pomocy obliczeń modelowych. Jednak dostępne w literaturze równania kryterialne na liczbę Nu dla złoża usypanego, zawierają parametry takie jak średnica zastępcza i powierzchnia kamienia, które są wyznaczane jak dla kuli. Oznacza to,

że wykonane obliczenia modelowe przy wykorzystaniu tych równań dają takie same wyniki dla tłucznia jak dla kuli, co wg autorki pracy nie jest prawidłową praktyką;

- przeprowadzone badania pokazały, że istnieją wyraźne różnice we wnikaniu ciepła do materiału akumulacyjnego o różnych geometriach. Ponadto, wprowadzenie poprawki w postaci uwzględnienia rzeczywistej powierzchni tłucznia tylko częściowo zbliżają wyniki otrzymane dla tłucznia do wyników dla kuli. Świadczy to o tym, że większa rzeczywista powierzchnia dla tłucznia ma wpływ na wynik obliczeń i wyznaczanie jej traktując kamień łamany jak kulę powoduje otrzymywanie błędnych wyników;
- jak wynika z przeprowadzonej analizy, rzeczywista powierzchnia kamienia łamanego to nie jedyny czynnik określający intensywność procesu ładowania akumulatora. Kula ma opływowy kształt, w odróżnieniu od kamienia łamanego. Fakt ten powoduje mniej turbulentny przepływ dla kuli, zmniejszając wnikanie ciepła;
- wykonane badania skłaniają do wniosku, że matematyczny opis wnikania ciepła do materiału akumulacyjnego powinien zawierać więcej parametrów determinujących proces, aby tworzone modele lepiej odzwierciedlały ten proces już od samego początku, ze względu na obecnie rosnącą rolę akumulacji ciepła.

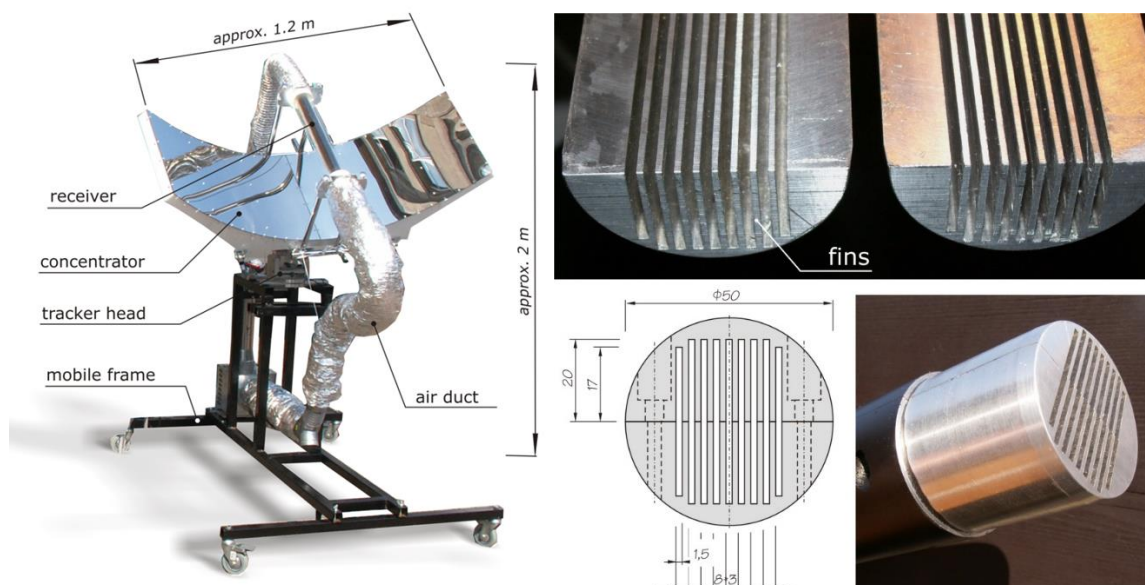
Podsumowując natomiast analizy związane z możliwością aplikacyjnego zastosowania granitowego akumulatora ciepła, na podstawie przeprowadzonych prac można stwierdzić, że:

- przeprowadzenie badań procesu rozładowywania złoża akumulacyjnego pokazało, że możliwe jest uzyskanie podobnych strumieni ciepła jak w procesie ładowania, przy tych samych warunkach procesu. Tym samym, można stwierdzić, że granit ze względu na swoje parametry ciepłe i mechaniczne może służyć jako wypełnienie złóż akumulacyjnych wykorzystywanych w suszarniach słonecznych z czynnikiem roboczym w postaci powietrza, przy czym wielkość elementów złoża powinna zostać dobrana w zależności od warunków pracy i przeznaczenia suszarni;
- tłuczeń granitowy może zostać wykorzystany jako wypełnienie sezonowego akumulatora ciepła współpracującego w słonecznym systemie grzewczym budynku działającym w polskich warunkach klimatycznych, po wykonaniu szczegółowych analiz wymiany ciepła, co pozwoli na odpowiednie dobranie jego gabarytów;
- integracja całorocznych systemów grzewczych z kamiennym akumulatorem wpływa jednocześnie na architekturę, funkcjonalność oraz bilans energetyczny budynku. Źle przeprowadzona może wpłynąć negatywnie na architekturę obiektu oraz ograniczyć jego funkcjonalność. Ze względu na powierzchnię instalacji solarnej i akumulatora ciepła nie istnieje idealny wariant integracji systemu z budynkiem. W każdym przypadku konieczna jest wieloetapowa analiza możliwości integracji z budynkiem wykonana przy udziale architekta, projektanta oraz użytkownika końcowego aby wybrać najbardziej zrównoważone rozwiązanie;
- kluczowa dla systemów solarnych jest integracja z budynkiem pod kątem energetycznym. Największy jej stopień można uzyskać dla obiektów będących w fazie projektu. Możliwym jest wtedy pełne wykorzystanie i ograniczenie strat ciepła przy jednocześnie najmniejszych rozmiarach systemu akumulacji ciepła.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowe

Tematyka prowadzonych przeze mnie badań naukowych po uzyskaniu stopnia doktora, przedstawionych w 24 pracach ([B1], od [C1] do [C18] oraz od [P1] do [P5]), skupia się w następujących obszarach tematycznych: kolektory słoneczne, akumulacja ciepła i chłodu uzyskiwanych z instalacji OZE przy wykorzystaniu materiałów stało- i zmiennofazowych, oraz zagadnienia dotyczące odzysku ciepła odpadowego.

Większość moich badań z energetyki słonecznej dotyczy powietrznych kolektorów słonecznych, w których koncentruję się na intensyfikacji wymiany ciepła poprzez rozwijanie wewnętrznych powierzchni absorberów. Badania podstawowe, które prowadziłam w tym zakresie obejmowały różne geometrie absorberów [C18], jak również prace eksperymentalne i projektowe związane z tworzeniem stanowisk badawczych (rys.27) [C14].



Rys. 27. Stanowisko ze słonecznym kolektorem skupiającym oraz absorber szczelinowy [C14]

Proponowane zmiany konstrukcyjne kolektorów skupiających pozwalają na uzyskiwanie wysokich temperatur medium, co umożliwi zastosowanie tak zmodyfikowanych kolektorów nie tylko w małych instalacjach grzewczych, ale również przemysłowych, w warunkach klimatycznych Polski. Stąd część moich prac dotyczyła zastosowania kolektorów skupiających w systemach ogrzewania [C17], [B1]. Byłam również wykonawcą w granie DRYLING [G3], gdzie odpowiadałam m.in. za badania kolektora skupiającego wykorzystywanego do suszenia paliw stałych.

W ramach pracy naukowej poświęconej płaskim kolektorom słonecznym zajmowałam się głównie urządzeniami wykorzystującymi wodę jako czynnik roboczy. Korzystając z programu TRNSYS wykonałam symulacje pracy płaskiego powietrznego kolektora słonecznego, który miał pracować na potrzeby suszarni żywności [C3].

W ramach współpracy międzynarodowej w temacie płaskich kolektorów słonecznych biorę udział w pracach zespołu z National Institute of Technology z Jalandhar w Indiach, którym kieruje dr Satyender Singh. Owocem współpracy jest wspólna publikacja naukowa [C1] w czasopiśmie z tzw. Listy Filadelfijskiej.

Rezultatem wyżej opisanych prac w tematyce energetyki słonecznej, prowadzonych po uzyskaniu stopnia doktora, są 4 przyznane patenty, których jestem autorką lub współautorką.

Dotyczą one konstrukcji płaskich kolektorów słonecznych: [P1], [P5] oraz kolektorów skupiających: [P2], [P4].

Inne moje prace naukowe związane z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii dotyczyły analizy wykorzystania paneli fotowoltaicznych [C11] oraz turbin wiatrowych [C8] do celów grzewczych budynków, oraz pomp ciepła [C10], jako źródła pozwalającego zapewnić wymaganą temperaturę w obiektach szklarniowych. Pracowałam również nad tematem ścian Tromba i ich wpływem na komfort cieplny pomieszczeń [C5]. Byłam również wykonawcą w granicie europejskim związanym z energetyką rozproszoną i analizą wykorzystania źródeł odnawialnych w różnych regionach [G4].

Osobny obszar moich zainteresowań stanowią krótko- i długoterminowe magazyny ciepła, głównie wysokotemperaturowego. Jako analizowany materiał wykorzystuję opisany w cyklu granit jak i inne materiały budowlane jak cegły ceramiczne [C12] i szamotowe [C16]. Byłam również kierownikiem grantu (zadania badawczego), dotyczącego określenia wpływu kształtu i powierzchni tłuczni granitowego na proces przejmowania ciepła podczas konwekcji wymuszonej [G1] w ramach programu MINIATURA (Narodowe Centrum Nauki).

Od 2011 r. współpracuję nieprzerwanie z Centrum Technologii Energetycznych w Świdnicy, m.in. w zakresie projektu i budowy stanowiska eksperymentalnego do badania procesu wysokotemperaturowej akumulacji ciepła z instalacji solarnej [O1].

Część moich prac związana jest również z badaniem akumulacji ciepła i chłodu w materiałach zmiennofazowych PCM. Powstały one w ramach międzynarodowego projektu PCMSOL [G2] (konkurs Era Net LAC). Analizowany system współpracuje z instalacją solarną oraz chłodziarką absorpcyjną i ma na celu zapewnienie komfortu cieplnego w istniejącym budynku. Uczestniczyłam w pracach zespołu polegających na opisie matematycznym działania wspomnianej instalacji. W ramach współpracy międzynarodowej w tym obszarze badawczym powstały następujące publikacje: [C2], [C4], [C6], [C7]. Odbyłam miesięczny staż badawczy w ramach Programu Erasmus w Hiszpanii w The Solar Energy Research Center (CIESOL) na Universidad de Almeria, gdzie zajmowałam się badaniami systemu akumulacji ciepła w materiałach zmiennofazowych [I1]. Uczestniczyłam również w tygodniowym pobycie badawczym w Center for Advanced Research of Lithium and Industrial Minerals, Universidad de Antofagasta w Chile [I2], w grupie zajmującej się tworzeniem nowych materiałów zmiennofazowych z wykorzystaniem odpadów z procesu wydobywczego w tamtym regionie.

Ostatnia część moich prac naukowych jest związana z zagadnieniami dotyczącymi odzysku ciepła odpadowego. Takim źródłem może być np. pojazd samochodowy [C9], [C15] lub lokalna huta szkła, z której ciepło można transportować przy wykorzystaniu mobilnego akumulatora ciepła [C13]. Moje prace związane z odzyskiem ciepła odpadowego zostały również udokumentowane patentem dotyczącym wymiennika ciepła o specjalnej konstrukcji [P3].

Wśród innych moich osiągnięć związanych z działalnością naukową chciałam również wymienić otrzymanie przeze mnie w 2020 roku Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców na okres 36 miesięcy, jako najwyżej oceniony w rankingu wniosek wśród nagrodzonych stypendystów z Politechniki Wrocławskiej.

6. Osiągnięcia dydaktyczne, organizacyjne oraz popularyzujące naukę

Od roku 2015, kiedy to rozpoczęłam pracę w Uczelni na stanowisku adiunkta angażuję się również w działalność związaną zarówno ze sprawami organizacyjnymi jak i dydaktycznymi. Jako pracownik byłam przedstawicielem adiunktów w Radzie Wydziału Mechaniczno-Energetycznego w latach 2018-2019 oraz sekretarzem Wydziałowej Komisji ds. Oceny i Zapewniania Jakości Kształcenia. W tym czasie zostałam również powołana do Komisji zajmującej się modyfikacją programów studiów na kierunku Energetyka oraz Mechanika i Budowa Maszyn. Następnie zostałam zaangażowana do prac Zespołu zajmującego się utworzeniem nowej specjalności anglojęzycznej na drugim stopniu studiów na kierunku Energetyka: Computer aided mechanical and power engineering oraz nowego kierunku studiów pierwszego stopnia: Odnawialne Źródła Energii. Obecnie jestem członkiem Komisji Programowej dla specjalności drugiego stopnia Renewable Sources of Energy i Odnawialne źródła energii, wcześniej byłam również członkiem Komisji Programowej na specjalności Energetyka rozproszona.

W ramach dodatkowej działalności dydaktycznej w roku 2017 prowadziłam zajęcia laboratoryjne z energetyki słonecznej podczas Międzynarodowej Szkoły Letniej 3E+ dla studentów zagranicznych. W latach 2018-2019 byłam zaangażowana w opracowanie materiałów do nowych autorskich kursów Magazynowanie energii oraz Modeling of HVAC systems w ramach grantu edukacyjnego „ZPR PWr – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Wrocławskiej” realizowanego w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Opracowałam również autorski program kursu dla przedmiotu Podstawy energetyki słonecznej, planowanego do uruchomienia na nowym kierunku studiów: Odnawialne źródła energii. Obecnie, od roku 2020, jestem zaangażowana jako Tutor w projekt MNiSW realizowany na Politechnice Wrocławskiej pt. „Mistrzowie Dydaktyki” w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.

Jako nauczyciel akademicki prowadziłam dotychczas zajęcia dydaktyczne zarówno na pierwszym jak i drugim stopniu studiów: Systemy akumulacji ciepła (wykład i laboratorium), Modeling of HVAC systems (laboratorium w języku angielskim), Instalacje cieplne i klimatyzacyjne (laboratorium), Termodynamika (laboratorium), Nośniki i akumulatory ciepła (wykład), Geometria wykreślna (ćwiczenia), Systemy klimatyzacyjne (projekt). Byłam promotorem 37 prac dyplomowych inżynierskich oraz 30 prac magisterskich. Na podstawie czterech z ich, napisałam wraz z dyplomantami artykuły, z których jeden został zaprezentowany na konferencji międzynarodowej [C17], jeden został opublikowany jako rozdział w monografii [B1], a dwa zostały przyjęte do czasopism z Listy Filadelfijskiej [C5, A2].

Jestem również promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim pt. *Mathematical modelling of HVAC system cooperating with PV and a seasonal thermal storage*, który realizuje Pani mgr Oluwafunmilola Oladipo u Pana dr hab inż. Jacka Kasperskiego, prof. uczelni w dyscyplinie Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka w Politechnice Wrocławskiej.

Jako moje największe dokonanie dydaktyczne uważam zaangażowanie się w prace zmierzające do projektu i uruchomienia Laboratorium Energetyki Odnawialnej, którego jestem kierownikiem, a które formalnie zostało powołane decyzją Rektora Politechniki Wrocławskiej w czerwcu 2019 roku.

Z osiągnięć organizacyjnych chciałam wspomnieć swój udział, coroczny od roku 2016 r. w Komitecie Naukowym Ogólnopolskiego Konkursu Wiedzy o Energetyce Odnawialnej dla szkół średnich, organizowanego przez Politechnikę Wrocławską. Konkurs miał już 5 edycji i pretenduje do miana Olimpiady.

Moja wyżej wymieniona działalność została uhonorowana nagrodami Rektora Politechniki Wrocławskiej „za wkład w działalność uczelni” w roku 2016, 2018 oraz 2019.

7. Podsumowanie

Na całokształt mojego dorobku naukowego, po uzyskaniu stopnia doktora, składa się 24 publikacje, z czego 5 wchodzi w skład osiągnięcia naukowego. Sumaryczna liczba punktów według kryteriów MNiSzW za publikacje wynosi 1005, z czego 265 punktów jest według punktacji przed reformą oraz 740 po reformie. Publikacje wymienione w osiągnięciu naukowym stanowią 430, w tym 80 pkt. według listy przed 2019 r. i 350 pkt. według aktualnej listy punktów za czasopisma.

W dorobku posiadam jeszcze 3 raporty oraz 4 patenty, w tym jeden jedno autorski. Wykonałam łącznie 55 recenzji artykułów naukowych w czasopismach międzynarodowych i 10 artykułów konferencyjnych. Odbyłam 2 wyjazdy badawcze (jeden na uczelnię w Hiszpanii i jeden na uczelnię w Chile).

Sumaryczny Impact Factor moich publikacji, po uzyskaniu stopnia doktora, wynosi 40,167, z czego publikacje wymienione w osiągnięciu naukowym mają łączny IF = 19,378.

Liczba moich cytowań (bez autocytowań) wynosi odpowiednio: wg bazy Web of Science 63, wg bazy Scopus 71, wg bazy Google Scholar 104.

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

Magdalena Neun'
.....
(podpis wnioskodawcy)