



Symulacje procesu ładowania zmiennofazowego akumulatora ciepła oraz eksperymentalna weryfikacja modelu numerycznego

Beata Pytlik, Daniel Smykowski, Piotr Szulc

Politechnika Wrocławska,
Katedra Inżynierii Konwersji Energii

e-mail: beata.pytlik@pwr.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono i omówiono wyniki badań numerycznego modelowania wpływu konstrukcji akumulatora ciepła na jego parametry pracy. Badania polegały na opracowaniu numerycznego modelu akumulatora ciepła, wypełnionego materiałem zmiennofazowym. Model numeryczny opracowano w programie Comsol Multiphysics. Geometria zbudowanego modelu akumulatora odwzorowuje geometrię rzeczywistego akumulatora ciepła, znajdującego się w laboratorium badawczym Katedry Mechaniki, Maszyn, Urządzeń i Procesów Energetycznych Politechniki Wrocławskiej. W celu zweryfikowania wyników otrzymanych na podstawie obliczeń numerycznych przeprowadzono badania laboratoryjne na modelu fizycznym. W trakcie badań rejestrowano temperaturę na wlocie i wylocie z akumulatora oraz w sześciu innych (wskazanych w pracy) punktach wewnątrz akumulatora. Badano proces ładowania i rozładowywania akumulatora, wypełnionego następującymi materiałami: sól o składzie NaNO_2 60%, KNO_3 40% oraz parafina A53 50% i RT82 50%. Akumulator był cyklicznie ładowany, a następnie rozładowywany strumieniem odpowiednio gorącego oraz zimnego powietrza z nagrzewnicy.

Wykonano walidację modelu w odniesieniu do dwóch badanych materiałów. Parametrem, który poddano walidacji była temperatura materiału PCM w punktach odpowiadających miejscom pomiaru temperatury w akumulatorze laboratoryjnym. Założono, że o zgodności wyników symulacji z wynikami pomiarów decyduje średnia

różnica temperatur między wartością rzeczywistą i symulowaną w podanych punktach pomiarowych w czasie ładowania akumulatora. Różnica ta wahała się między 1–15% (przy czym największa rozbieżność występowała dla punktu A1), co jest wartością zadowalającą. Na tej podstawie stwierdzono, że opracowany model numeryczny akumulatora w dobrym stopniu odwzorowuje zjawiska i procesy wymiany ciepła między czynnikiem ładującym/rozładowującym a materiałem zmiennofazowym.

W dalszej części pracy przeprowadzono analizę rozkładu temperatury w objętości akumulatora dla każdego z zastosowanych materiałów. W celu optymalizacji parametrów pracy akumulatora i wskazania najkorzystniejszego wariantu, przeprowadzono szereg symulacji przy różnych wartościach strumienia (5, 10, 15, 20 m/s) oraz temperatury powietrza (315, 345, 385, 415°C). Na ich podstawie wyznaczano strumień ciepła przekazywany między rurą ożebrowaną a materiałem PCM. Analiza wyników symulacji wykazała jednak, że zmiany tych parametrów nie wpływają na wartość strumienia ciepła.

Słowa kluczowe: akumulator ciepła, modelowanie numeryczne, materiał zmiennofazowy

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat zapotrzebowanie na energię wykazuje trwałą tendencję wzrostową. Rosnący popyt na urządzenia zużywające energię, mimo rozwoju technologicznego i projektowania coraz bardziej energooszczędnych rozwiązań, stale rośnie [1]. Źródła [2] podają, że w Unii Europejskiej około 40% energii jest zużywane na ogrzewanie, klimatyzowanie i oświetlanie budynków. Po II Wojnie Światowej znacznie wzrosło zapotrzebowanie na kopalne surowce energetyczne, których złoża już w drugiej połowie XX w. zostały w dużym stopniu wyeksploatowane. W Europie Zachodniej złoża tak popularnego niegdyś węgla kamiennego zostały prawie zupełnie wyczerpane [3]. Wydobycie węgla kamiennego wymaga sięgania do pokładów położonych na coraz większych głębokościach, a to stwarza duże zagrożenie i znacząco podnosi jego cenę [4–8]. Podobnie jest z innymi surowcami kopalnymi, jak np. ropa naftowa czy gaz. Kolejnym argumentem do odejścia od wykorzystywania paliw konwencjonalnych jest fakt, że ich spalanie znacząco zwiększa emisję CO₂. Prognozy [9] przewidują, że gdyby tempo spalania utrzymywało się w ciągu kolejnych 40–45 lat, to średni wzrost powierzchniowej temperatury Ziemi wyniesie ok. 1,5–4,5°C.

Aby wyjść temu naprzeciw, coraz częściej wykorzystuje się odnawialne źródła energii. W chwili obecnej największe nakłady finansowe w Europie i Stanach Zjednoczonych zostały przeznaczone na energetykę słoneczną i stanowią one aż 57% wszystkich inwestycji [10]. Jednakże tego typu źródła energii charakteryzują się zmiennością mocy wytwórczej. Źródła fotowoltaiczne umożliwiają wytworzenie energii w zależności od intensywności

ności nasłonecznienia, podczas gdy zapotrzebowanie na energię wzrasta zimą, czyli wtedy, kiedy intensywność nasłonecznienia jest niska. Podobnie sytuacja wygląda w przypadku zastosowania turbin wiatrowych, których efektywność zależna jest od warunków atmosferycznych. Stąd zasadne jest poszukiwanie technologii magazynowania energii w celu jej wykorzystania w późniejszym, bardziej dogodnym czasie. Przykładowym zastosowaniem tego procesu jest pozyskiwanie energii z kolektorów solarnych w słoneczne dni i wykorzystanie jej w dni, w których słońca nie ma. Wzrasta wtedy zapotrzebowanie na [11] dogrzanie pomieszczeń. Technologie magazynowania energii mają zastosowanie zarówno w małej (jak gospodarstwo domowe), jak i dużej (jak obiekt przemysłowy) skali. Najpowszechniejsze technologie magazynowania energii to [12], [13] magazynowanie energii elektrycznej, ciepła lub chłodu.

Wymienione technologie są równie istotne, co przejawia się dużym zapotrzebowaniem na ich rozwój [12]. Na potrzeby tego artykułu skupiono się jedynie na magazynowaniu ciepła, które odbywa się w specjalnie do tego celu projektowanych akumulatorach. Technologie akumulacji ciepła można podzielić na kilka kategorii. Do najważniejszych z nich należą: [13], [14] :

- UTES (*Underground Thermal Energy Storage*) – jako ośrodek magazynujący wykorzystują grunt, wodę oraz żwir,
- TTES – (*Tank Thermal Energy Storage*) – zbiorniki wodne,
- BTES – (*Borehole Thermal Energy Storage*) – akumulatory gruntowe.

Te ostatnie zyskały w Europie największą popularność [24], jednakże wadą tych rozwiązań jest fakt, że w jednostce objętości magazynuje się względnie małą ilość energii. Do wad tej metody należy zaliczyć również problemy z izolacją oraz fakt, że jakość magazynu zależna jest od jakości gruntu, w którym się go montuje.

Wykorzystywanie akumulatorów wodnych, z racji niskiej szkodliwości czynnika akumulującego ciepło, jest również dość szeroko stosowane [22]. Jednak woda używana jako medium znacznie ogranicza zakres temperatury ich pracy, zwykle od 20 do 90°C. O ile w gospodarstwie domowym jest to zakres wystarczający, o tyle do zastosowań przemysłowych jest poważnym ograniczeniem.

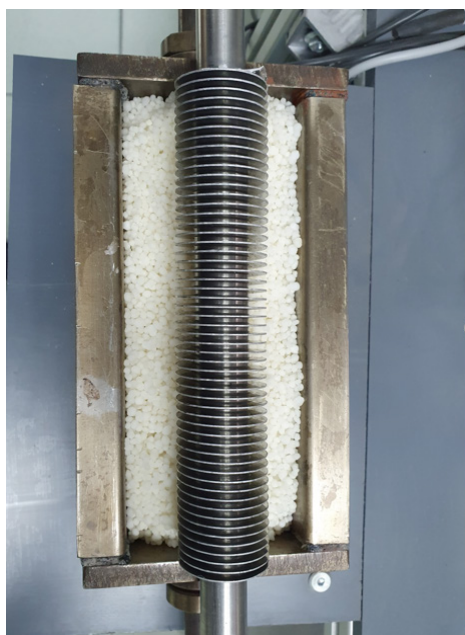
Na podstawie powyższego podziału zauważyć można, że magazynowanie energii jest możliwe dzięki specyficznym właściwościom materiałów. W artykule wykorzystano sposób akumulacji ciepła w materiałach, wykorzystując ich przemianę fazową PCM (*Phase Change Material*). Zastosowanie tych materiałów zwiększa ilość ciepła możliwą do akumulacji w przeliczeniu na jednostkę masy materiału. Jednak akumulatory, wykorzystujące materiały PCM muszą być zaprojektowane do konkretnego zastosowania. Oznacza to, że ostateczne parametry pracy akumulatora (czas ładowania i rozładowywania, pojemność cieplna itp.) i jego konstrukcja będą zależne od specyfiki procesu. Optymalizacja konstrukcji takiego akumulatora wymaga znajomości zjawisk i procesów, zachodzących w trakcie jego pracy.

Narzędziem pozwalającym lepiej i szybciej zaprojektować akumulator są symulacje, które odwzorowują zjawiska zachodzące w akumulatorze, dzięki czemu można analizować wpływ różnych czynników na jego pracę [15]. O tym, na ile dokładnie odwzorowane są te zjawiska decyduje wykorzystany w trakcie symulacji model. Z przeglądu literatury wynika, że do modelowania procesu przemiany fazowej wykorzystuje się model „*enthalpy-porosity*” [16], [17]. Jednak w tym przypadku wykorzystano metodę efektywnej pojemności cieplnej, z uwagi na fakt, że użyte materiały PCM nie są materiałami porowatymi. Otrzymane wyniki symulacji komputerowej porównano z wynikami pomiarów otrzymanymi z rzeczywistego laboratoryjnego akumulatora ciepła. Przeprowadzona walidacja modelu polegała na porównaniu parametrów ładowania akumulatora o tej samej konstrukcji, uwzględniając różne warunki pracy oraz dwa rodzaje materiału PCM. Analizowano rozkład temperatury materiału akumulującego ciepło wewnątrz akumulatora. Na tej podstawie obserwowano dynamikę przemiany fazowej oraz postęp ładowania akumulatora.

2. Metodyka badań

2.1. Stanowisko laboratoryjne z akumulatorem ciepła

Stanowisko laboratoryjne składało się z akumulatora ciepła, nagrzewnicy powietrza oraz systemu kontrolno-pomiarowego. Najważniejszą częścią stanowiska był akumulator, którego budowę pokazano na rys. 1. Przedstawio-



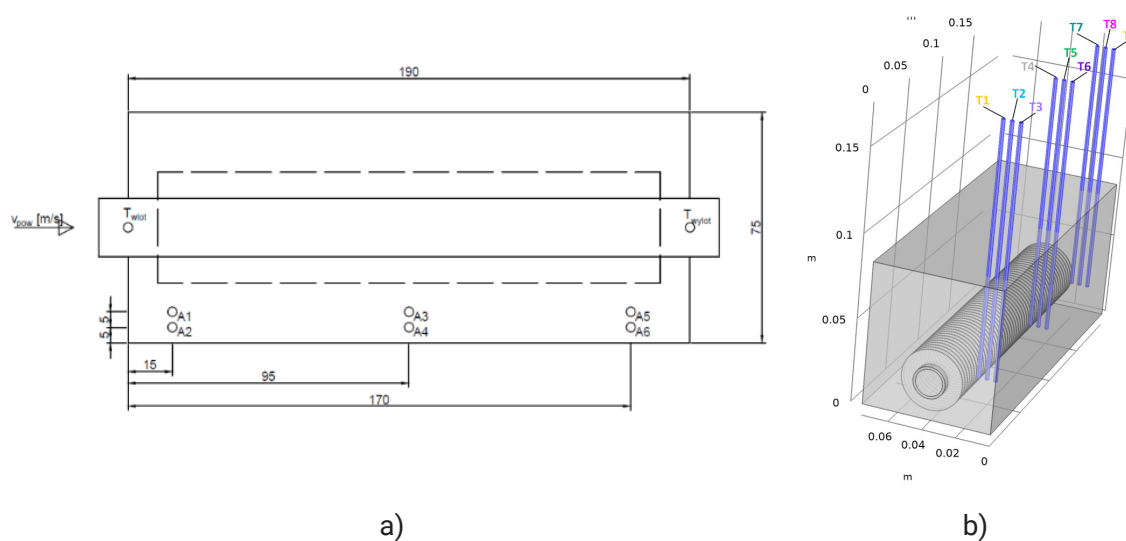
Rys. 1. Rzeczywisty akumulator ciepła wykorzystany w badaniach

ny akumulator ładowany jest przez gorące powietrze, kierowane do niego z nagrzewnicy, przepływające przez rurę ożebrowaną. Pomiar temperatury wewnątrz akumulatora odbywa się za pomocą termopar, zanurzonych od góry w materiale PCM i podłączonych do rejestratora danych. Ponadto dokonywane są pomiary temperatury powietrza na wlocie i na wylocie z akumulatora oraz jego strumienia objętości.

Akumulator ciepła zbudowany jest z prostopadłościennego zbiornika, w którym zainstalowana jest rura ożebrowana. Króćce rury stanowią wlot oraz wylot powietrza z niego. Zbiornik wypełniony jest materiałem zmiennofazowym. Wymiary akumulatora laboratoryjnego zamieszczono w tab. 1, natomiast rozkład punktów pomiarowych i umiejscowienie termopar pokazano na rys. 2.

Tabela 1. Wymiary laboratoryjnego akumulatora ciepła

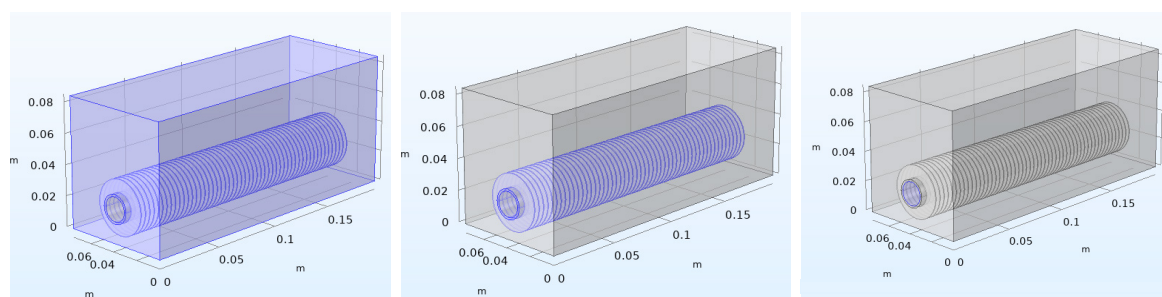
| Parametr | Wartość | Jednostka |
|--------------------------|---------|-----------|
| Szerokość | 76 | mm |
| Wysokość | 85 | mm |
| Wysokość osadzenia rury | 63 | mm |
| Szerokość osadzenia rury | 38 | mm |
| Wewnętrzna średnica rury | 16 | mm |
| Zewnętrzna średnica rury | 19 | mm |
| Średnica żeber | 36 | mm |
| Grubość żebra | 0,6 | mm |
| Liczba żeber | 56 | – |
| Odstęp między żebrami | 3 | mm |
| Szerokość | 76 | mm |



Rys. 2. a) Schemat akumulatora ciepła wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi (A1...A5) [14], b) model akumulatora ciepła z zaznaczonym rozmieszczeniem termopar

2.2. Numeryczny model akumulatora ciepła

Numeryczny model akumulatora ciepła przedstawiono na rys. 3. Odwzorowuje on geometrię akumulatora laboratoryjnego i składa się z trzech domen – domeny odwzorowującej materiał PCM (1), domeny reprezentującej rurę ożebrowaną (2) oraz domeny odwzorowującej przepływ powietrza wewnątrz rury (3). W domenie (1) symulowany jest proces przewodzenia ciepła oraz przemiany fazowej, w domenie (2) przewodzenie ciepła przez ściankę rury oraz żebra, natomiast w domenie (3) nieizotermiczny przepływ powietrza.



a) Domena 1

b) Domena 2

c) Domena 3

Rys. 3. Model geometrii akumulatora ciepła z wyróżnionymi domenami: domena 1 (a), domena 2 (b), domena 3 (c)

Do obliczeń założono, że mechanizmem transportu ciepła w domenie (1) jest przewodzenie, stąd zastosowano numeryczną metodę efektywnej pojemności cieplnej. Dodatkowo założono, że ciepło właściwe materiału PCM w pewnych zakresach temperatur jest stałe, zarówno w stanie ciekłym jak i stałym. Założono również, że przemiana fazowa materiału zachodzi w określonym zakresie temperatur, zgodnie z tab. 3.

Metodę efektywnej pojemności cieplnej reprezentuje równanie (1) [16].

$$Q = mC_{p,c.s.}(T_{m,i} - T_0) + m \left(\frac{\Delta H_m}{T_{m,k} - T_{m,i}} + C_p \right) (T_{m,k} - T_{m,i}) + mC_{p,ciecz}(T_k - T_{m,k}) \quad (1)$$

gdzie:

- Q – jednostkowy strumień ciepła [W/m^2],
- m – masa materiału zmiennofazowego [kg],
- $T_{m,i}$ – temperatura początku przemiany fazowej [K],
- T_0 – temperatura początkowa materiału zmiennofazowego [K],
- $T_{m,k}$ – temperatura końca przemiany fazowej [K],
- T_k – temperatura końcowa materiału PCM [K],
- $C_{p,c.s.}$ – ciepło właściwe materiału zmiennofazowego w stanie stałym [J/kgK],
- ΔH_m – entalpia przemiany fazowej materiału [J/kg].

$C_{p,cięż}$ – ciepło właściwe materiału zmiennofazowego w stanie ciekłym [J/kgK].

Dla domeny (2) zakłada się przewodzenie ciepła reprezentowane równaniem 2:

$$Q = h(T_{amb} - T)$$

gdzie:

- Q – strumień ciepła, [W/m²],
- h – współczynnik przenikania ciepła, [W/m²K],
- T_{amb} – temperatura otoczenia, [K],
- T – temperatura źródła ciepła, [K].

Do symulacji nieizotemicznego przepływu powietrza w rurze zastosowano w domenie (3) równanie Naviera-Stokesa (3) [23]:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} + \mathbf{F}$$

gdzie:

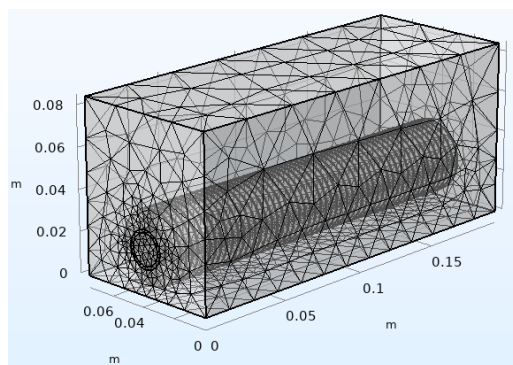
- \mathbf{v} – prędkość powietrza [m/s],
- p – ciśnienie powietrza [Pa],
- ρ – gęstość powietrza [kg/s],
- μ – lepkość dynamiczna powietrza [kg/ms],
- \mathbf{I} – macierz jednostkowa,
- \mathbf{F} – siły zewnętrzne przyłożone do płynu [N].

Do obliczeń przyjęto, że źródło ciepła ma stałą wartość temperatury równą temperaturze powietrza na wlocie do akumulatora. Wartości temperatury i prędkości powietrza na wlocie przyjęto takie, jak podczas badań laboratoryjnych. Przedstawiono je w tab. 4. Zastosowano warunek brzegowy dla ścianki zewnętrznej akumulatora, zakładający, że strumień ciepła jest wprost proporcjonalny do współczynnika przewodzenia ciepła, który jest z kolei zależny od temperatury otoczenia (odpowiadającej warunkom zewnętrznym) równej 25°C.

Do zbudowania i rozwiązania modelu numerycznego akumulatora ciepła wykorzystano metodę elementów skończonych, zaimplementowaną w programie Comsol Multiphysics. W celu dobrania odpowiedniej geometrii siatki przeprowadzono analizę wielkości jej elementów w odniesieniu do rzeczywistych wartości parametrów geometrii. Zastosowano siatkę numeryczną o parametrach przedstawionych w tab. 2 [18] i pokazanych na rys. 4. Właściwości materiału PCM przedstawiono w tab. 3.

Tabela 2. Parametry siatki numerycznej

| Parametr | Wartość |
|--------------------------------------|---------------|
| Kształt | tetraedryczne |
| Wielkość maksymalna, mm ² | 0,0296 |
| Wielkość minimalna, mm ² | 0,00552 |



Rys. 4. Siatka modelu

2.3. Warunki i parametry symulacji

Przeprowadzone symulacje obejmowały proces ładowania akumulatora ciepła przez okres 180 min, rozpoczynając od stanu całkowitego wychłodzenia akumulatora, analogicznie do badań laboratoryjnych. Uwzględnione zostały dwa rodzaje materiału zmiennofazowego – PCM 1 oraz PCM 2, których skład oraz właściwości zostały zamieszczone w tab. 3 [14], [19], [20], [21]–[23], [27]. Natomiast w tab. 4 przedstawiono warunki przeprowadzonych symulacji.

Tabela 3. Właściwości wykorzystanych materiałów PCM

| Parametr | Wartość | |
|----------------------------------|--|------------------------------------|
| | Materiał PCM 1 NaNO ₂ 60% KNO ₃ 40% | Materiał PCM 2 A53 50% RT82 50% |
| q , kg/m ³ | 2142 | 814 |
| λ_{liquid} , W/mK | 0,22 | 0,21 |
| λ_{solid} , W/mK | 0,22 | 0,21 |
| cp_{liquid} , J/kgK | 1588 | 1900 |
| cp_{solid} , J/kgK | 1563 | 2200 |
| ΔH , kJ/kg | 120 | 214 |
| T_{init} , K | 458,15 | 330,45 |
| T_{peak} , K | 465,15 | 318,55 |
| T_{final} , K | 473,15 | 342,25 |

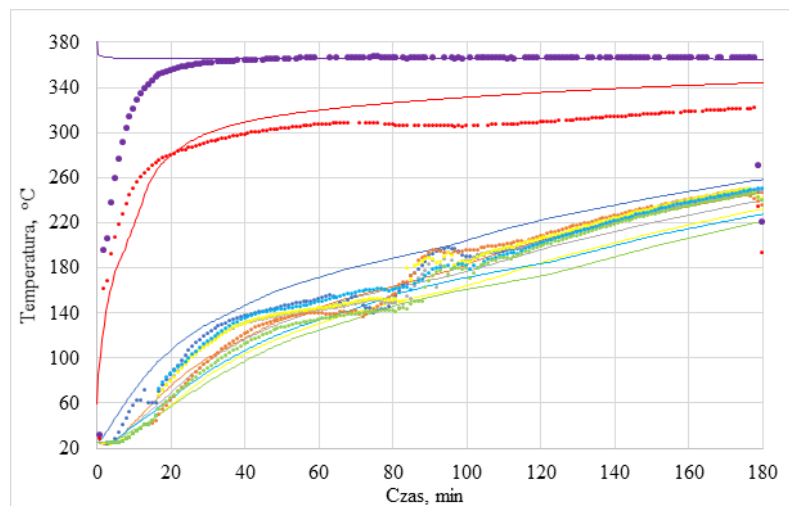
Tabela 4. Warunki przeprowadzonych symulacji dla PCM 1 i PCM 2

| Warunki | PCM 1 | PCM 2 |
|--|-------|-------|
| Czas symulacji, min | 0–180 | 0–120 |
| Krok czasowy, s | 30 | 30 |
| Prędkość powietrza na wlocie do akumulatora, m/s | 12,44 | 10,00 |
| Temperatura powietrza na wlocie do akumulatora, °C | 365 | 125 |

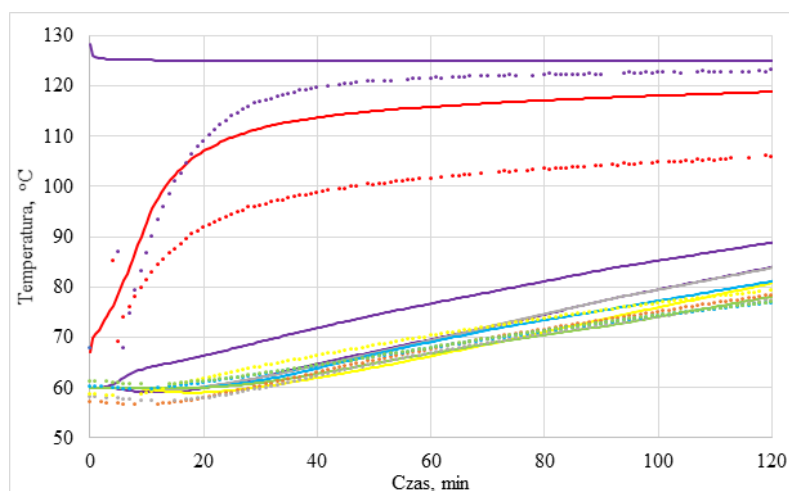
3. Wyniki symulacji i ich analiza

3.1. Weryfikacja numerycznego modelu akumulatora ciepła

Weryfikacja opracowanego modelu akumulatora ciepła została dokonana przez porównanie charakterystyk rozkładu temperatury wewnątrz akumulatora, w punktach zaprezentowanych na rys. 2. Charakterystyki temperatury na wlocie oraz wylocie z akumulatora, a także wewnątrz materiału PCM uzyskane z pomiarów laboratoryjnych (punkty) oraz z symulacji (linie ciągłe), przedstawiono na rys. 5 (PCM 1) i rys. 6 (PCM 2). Aby ułatwić rozróżnienie, poszczególne punkty oznaczono następującymi kolorami: A1 – niebieski, A2 – pomarańczowy, A3 – szary, A4 – żółty, A5 – błękitny, A6 – zielony, Twlot – fiolet, Twlot – czerwony.



Rys. 5. Charakterystyki czasowe temperatury wewnątrz materiału PCM oraz temperatury powietrza na wlocie i wylocie z akumulatora z materiałem PCM 1. Linie ciągłe reprezentują wartości symulowane, a za pomocą punktów przedstawiono wartości mierzone



Rys. 6. Charakterystyki czasowe temperatury wewnątrz materiału PCM oraz temperatury powietrza na wlocie i wylocie z akumulatora z materiałem PCM 2. Linie ciągłe reprezentują wartości symulowane, a za pomocą punktów przedstawiono wartości mierzone

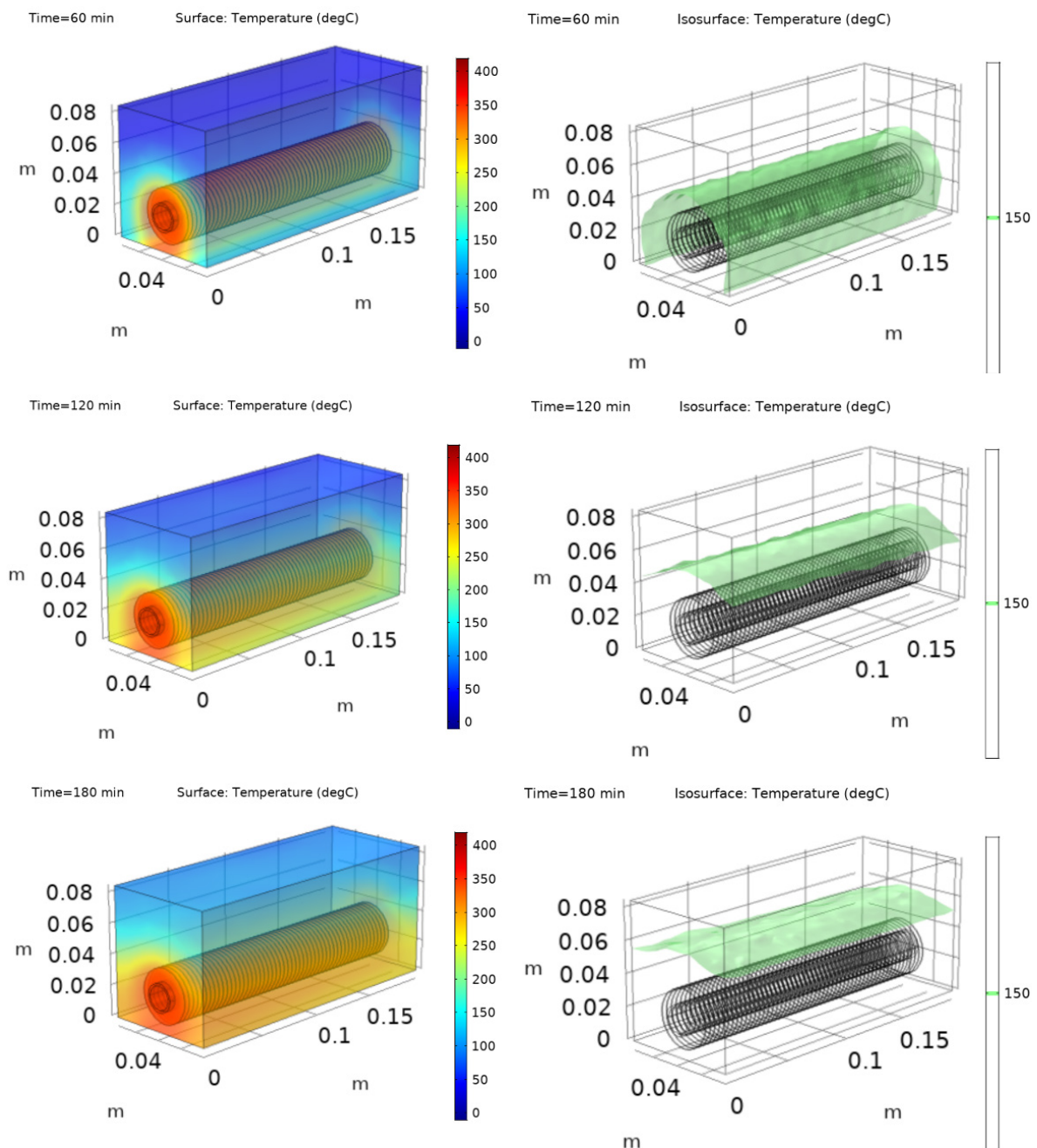
Charakterystyki temperatury uzyskane z symulacji (linie ciągłe), zamieszczone na rys. 5 oraz 6, wykazują dużą zbieżność względem charakterystyk rzeczywistych, czyli uzyskanych z pomiarów laboratoryjnych (linie przerywane). Największą zbieżnością charakteryzują się temperatury wewnątrz materiału PCM, natomiast pewne różnice obserwowane są w przypadku wartości temperatury powietrza ładującego, szczególnie na wlocie do akumulatora. Efekt ten wynika z faktu, że w symulacji temperatura powietrza ma stałą wartość od samego początku symulacji, natomiast w warunkach rzeczywistych osiąga wartość zadaną dopiero po 20 min. Jest to spowodowane bezwładnością nagrzewania się samej nagrzewnicy, która nie może w bardzo krótkim czasie osiągnąć wysokiej temperatury. Przekłada się to na rozbieżność między symulowaną i rzeczywistą temperaturą na wylocie z akumulatora. W tym przypadku należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że model nie uwzględnia, trudnych do określenia, strat ciepła na krótkach akumulatora, a właśnie tam dokonywany jest pomiar temperatury na stanowisku laboratoryjnym. Przedstawione obserwacje dotyczą obu symulacji, zarówno dla materiału PCM 1 (średnotemperaturowego), jak i PCM 2 (niskotemperaturowego). Można na tej podstawie stwierdzić, że symulacje, wykorzystujące opracowany model akumulatora, odwzorowują pracę rzeczywistego urządzenia z dostateczną dokładnością. Oczekiwanym zastosowaniem opracowanego modelu jest badanie wpływu parametrów konstrukcji oraz warunków zasilania na jego parametry pracy, a w rezultacie projektowanie optymalnej konstrukcji akumulatora. Należy stwierdzić, że jakość wyników generowanych przez opracowany model jest w tym przypadku zadowalająca. O zgodności wyników symulacji z wynikami pomiarów decyduje średnia różnica temperatury między wartością rzeczywistą i symulowaną w podanych punktach pomiarowych, w czasie ładowania akumulatora. Różnica ta wahała się między 1–15%, a największa rozbieżność występowała dla punktu A1, co jest wartością zadowalającą.

3.2. Analiza rozkładu temperatury materiału PCM podczas ładowania akumulatora

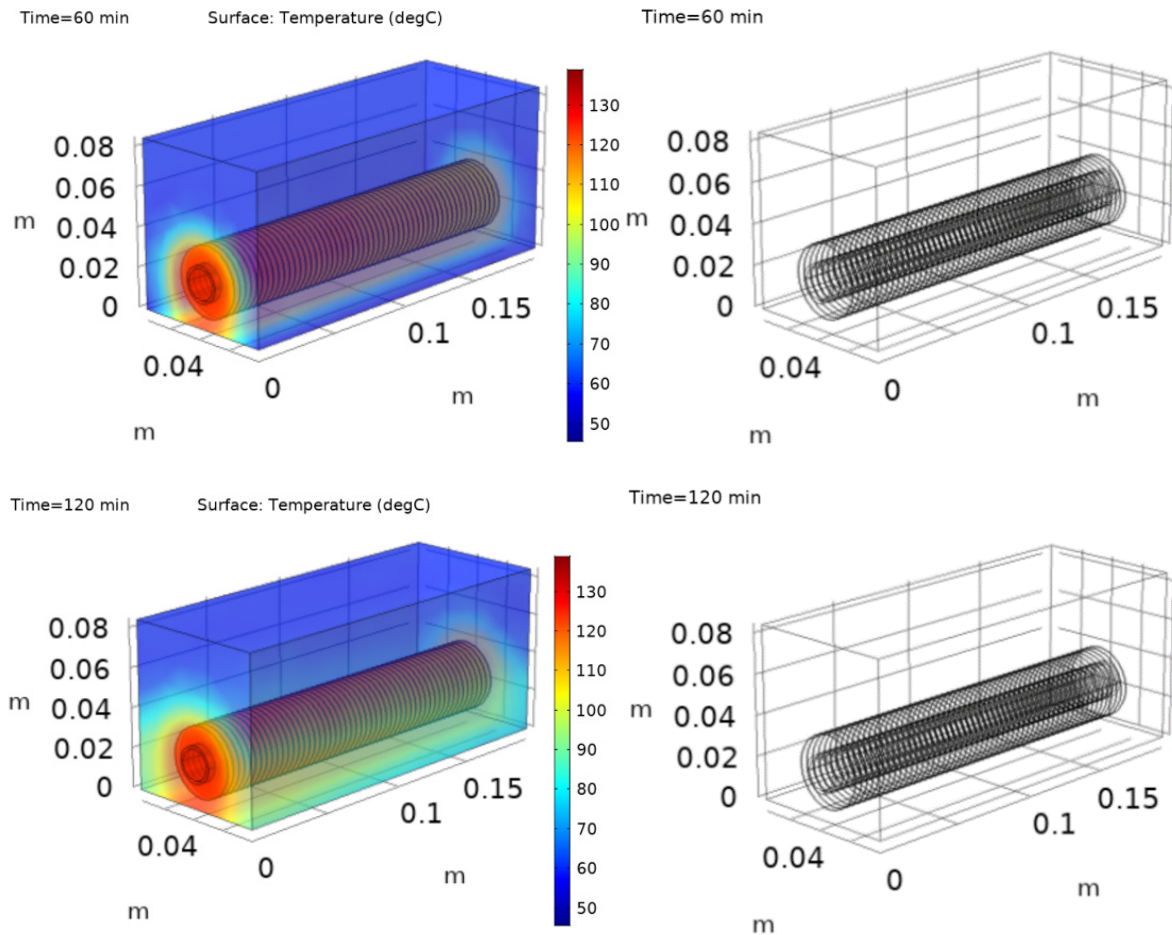
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono trójwymiarowy rozkład temperatury materiału PCM wewnątrz akumulatora oraz wizualizację granicy fazy ciekłej i stałej materiału PCM. Pozwala to na zaobserwowanie stref akumulatora, które rozgrzewają się najszybciej i tych rozgrzewających się najwolniej. Dzięki temu możliwe jest wskazanie stref, w których przemiana fazowa nie zachodzi, lub zachodzi w określonym czasie w sposób całkowity, lub jedynie częściowy.

Z analizy danych przedstawionych na rys. 7 i 8 można stwierdzić, że dla każdego użytego materiału już po ok. 30 min pracy akumulatora materiał najbliższej rury ożebrowanej uległ przemianie fazowej. Przez pozostały czas ładowania akumulatora, ilość ciekłego materiału PCM jedynie nieznacznie

wzrosła. Nie zaobserwowano sytuacji, w której materiał w całej objętości akumulatora uległ stopieniu. Na tak niekorzystne zjawisko ma wpływ kilka faktów. Pierwszym z nich jest to, że analizowane materiały cechują się niewielkim przewodnictwem ciepła, co przy analizowanej konstrukcji nie pozwoliło na osiągnięcie dostatecznie wysokiej temperatury w całej objętości materiału PCM. Ponadto stwierdzono, że rura ożebrowana umiejscowiona w dolnej części akumulatora nie jest optymalnym rozwiązaniem konstrukcyjnym. Następstwem tego jest powstawanie martwej strefy w górnych warstwach materiału PCM.

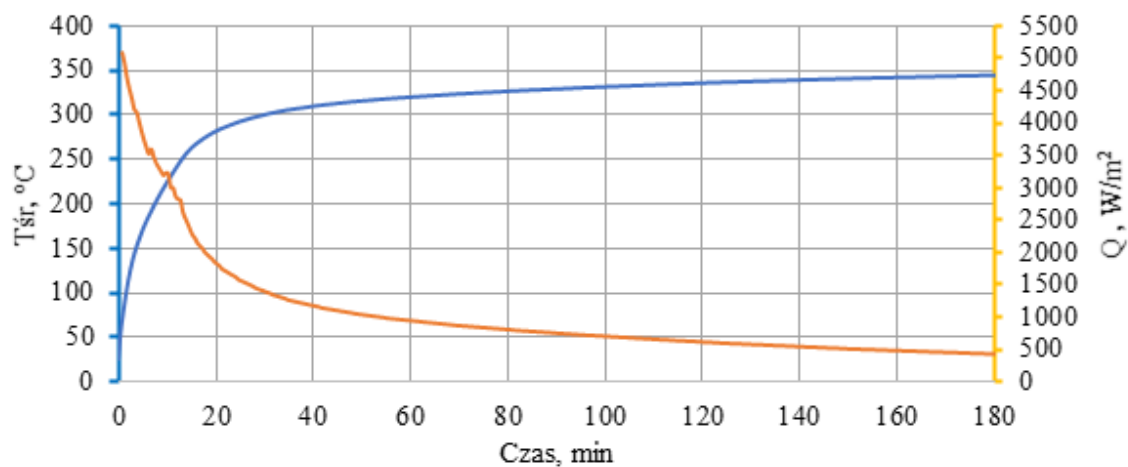


Rys. 7. Rozkład temperatury oraz powierzchnia przemiany fazowej materiału PCM 1 po 60, 120 oraz 180 min ładowania



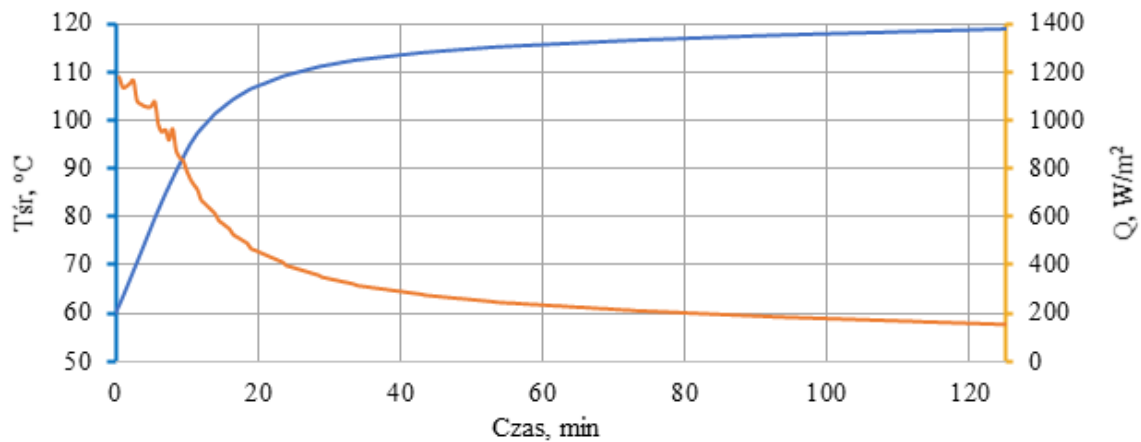
Rys. 8. Rozkład temperatury oraz powierzchnia przemiany fazowej materiału PCM 2 po 60 oraz 120 min ładowania

Przeanalizowano również rozkład jednostkowego strumienia ciepła i średniej temperatury powierzchni rury ożebrowanej dla materiału PCM 1 i PCM 2. Zależności te przedstawiono na rys. 9 i 10.



Rys. 9. Wartość średnia temperatury na powierzchni rury ożebrowanej oraz jednostkowy strumień ciepła (Q) w trakcie ładowania akumulatora dla akumulatora wypełnionego materiałem PCM 1

Na podstawie charakterystyk zamieszczonych na rys. 9 i 10 można stwierdzić, że w czasie 0–20 min pracy akumulatora spadek wartości jednostkowego strumienia ciepła jest bardzo intensywny, podobnie jak wzrost średniej temperatury na powierzchni rury ożebrowanej. Analogicznie do obserwacji z rys. 7 i 8, po około 20–30 min pracy wartości te się stabilizują i zmiany są już niewielkie. Parametr, jakim jest jednostkowy strumień ciepła, reprezentuje strumień ciepła przekazywany do materiału PCM, w przeliczeniu na jednostkę powierzchni wymiany ciepła.



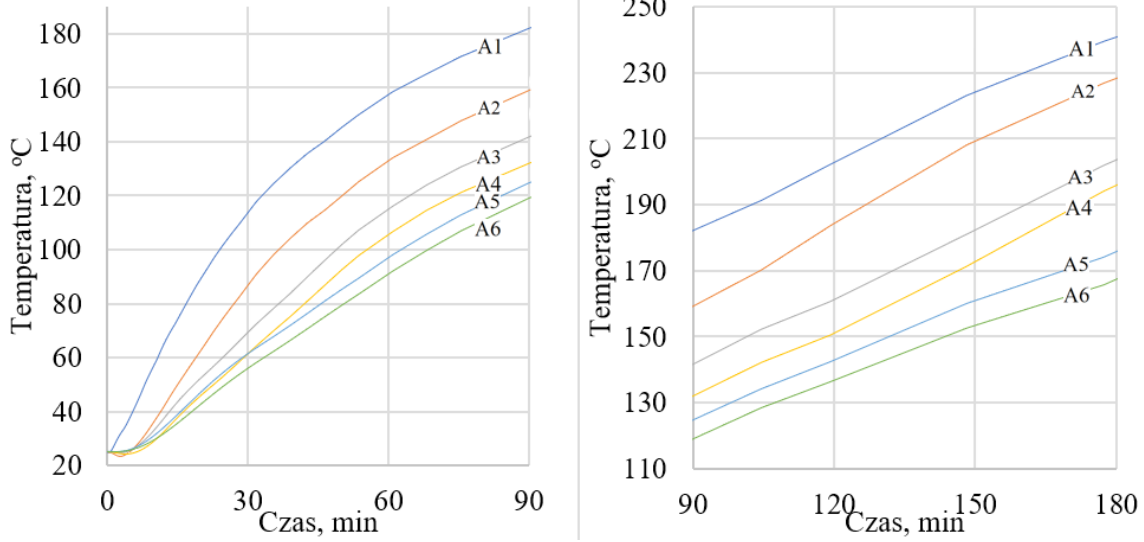
Rys. 10. Wartość średnia temperatury na powierzchni rury ożebrowanej oraz jednostkowy strumień ciepła (Q) w trakcie ładowania akumulatora dla akumulatora wypełnionego materiałem PCM 2

3.3. Analiza wpływu zmiany prędkości powietrza na proces ładowania akumulatora

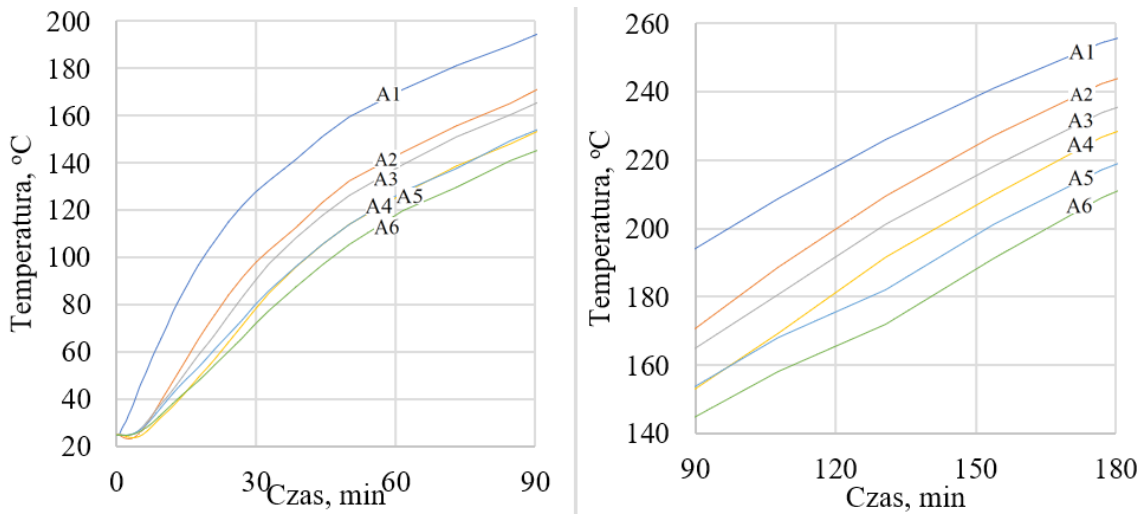
W celu określenia wpływu prędkości powietrza na rozkład temperatury wewnątrz akumulatora przeprowadzono symulacje, przyjmując różne wartości prędkości przepływu powietrza, wynoszące odpowiednio 5, 10, 15 i 20 m/s dla materiału PCM 1. Pozostałe parametry symulacji były takie same, jak w tab. 4.

Zależność rozkładu temperatur w czasie 0–180 min materiału zmiennofazowego w punktach A1...A6 przedstawiono na wykresach na rys. 11–14. Porównano też wartość temperatury średniej i wartości strumienia ciepła przy wszystkich wartości prędkościach. Zestawienie to przedstawia rys. 15.

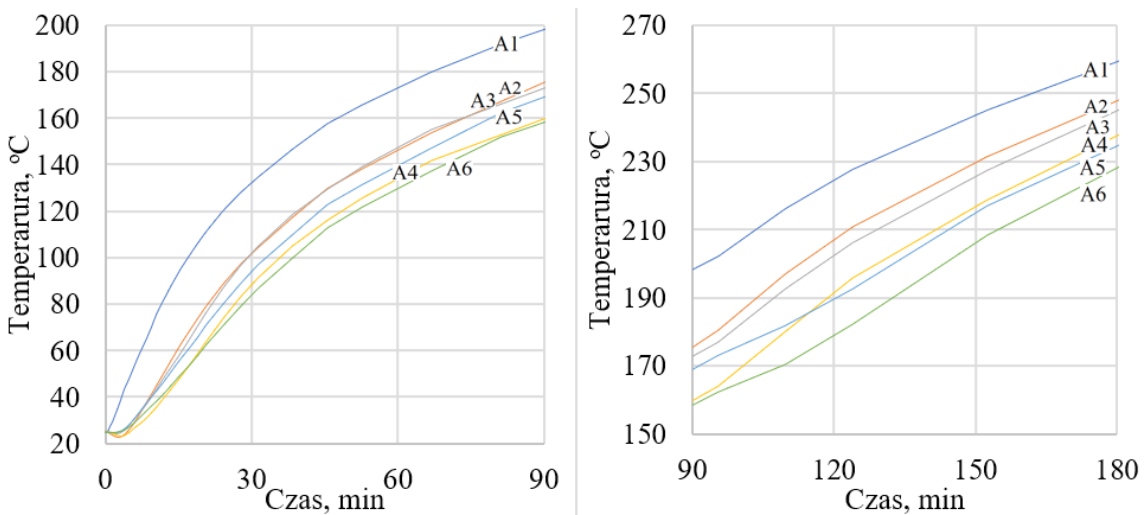
Największa różnica w średniej temperaturze materiału PCM występuje dla wartości prędkości powietrza równej 5 m/s. W przypadku 10, 12,44, 15 oraz 20 m/s różnice są nieznaczne. Na rysunku 15 można zauważyć, że przy czterokrotnie większej prędkości strumienia powietrza, temperatura średnia nie zmienia się znacznie (zaledwie o około 30 stopni), podobnie dzieje się z końcową wartością jednostkowego strumienia ciepła. Tu, mimo początkowych znacznych różnic, finalnie wynik jest ten sam. Zmiana prędkości przepływu powietrza ładującego wpływa jedynie na wzrost temperatury średniej w akumulatorze. Modyfikacja ta nie wpływa jednak na finalną zmianę w jednostkowym strumieniu ciepła.



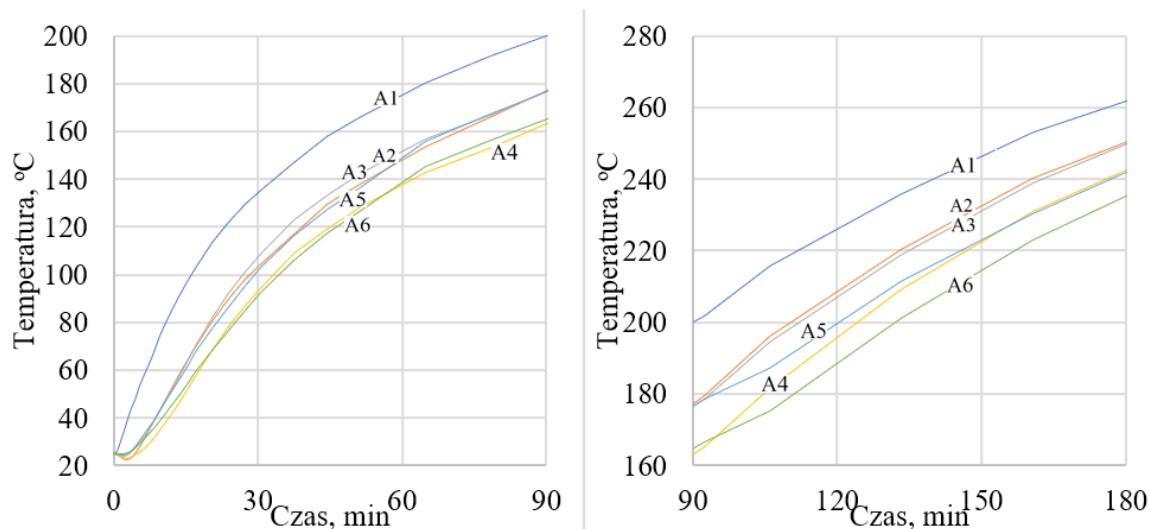
Rys. 11. Zależność zmian temperatury w czasie dla prędkości przepływu powietrza $v = 5$ m/s



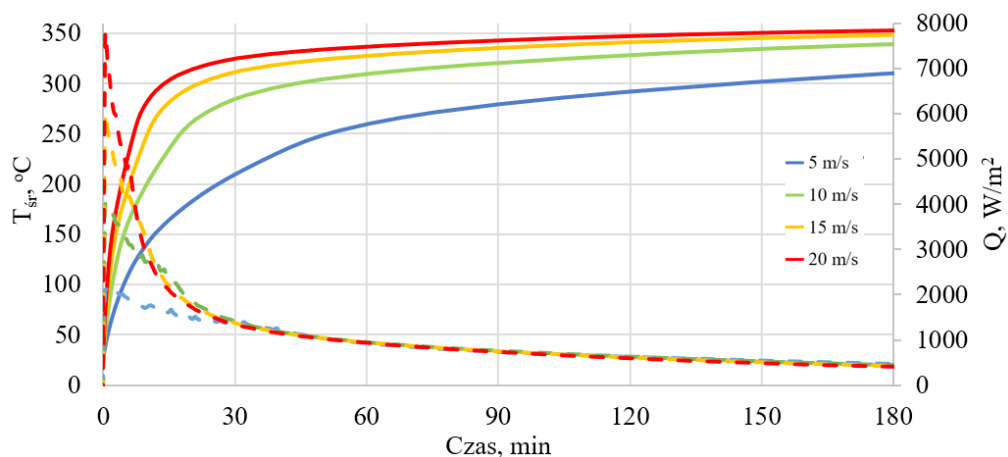
Rys. 12. Zależność zmian temperatury w czasie dla prędkości przepływu powietrza $v = 10$ m/s



Rys. 13. Zależność zmian temperatury w czasie dla prędkości przepływu powietrza $v = 15$ m/s



Rys. 14. Zależność zmian temperatury w czasie dla prędkości przepływu powietrza $v = 20 \text{ m/s}$

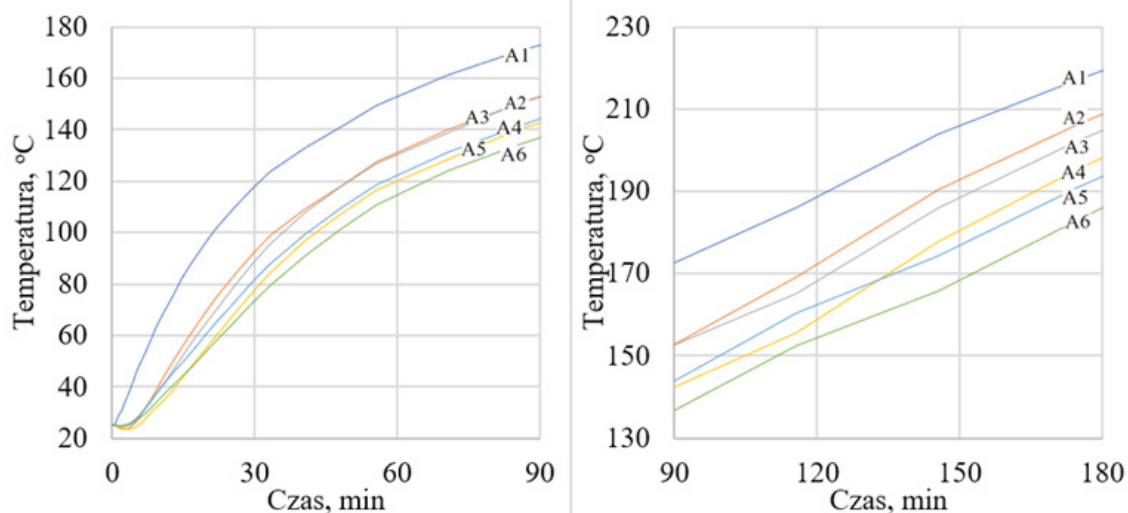


Rys. 15. Wykres zależności zmian temperatury średniej (linia ciągła) i strumienia ciepła (linia przerywana) w trakcie ładowania akumulatora, dla różnych prędkości przepływu powietrza

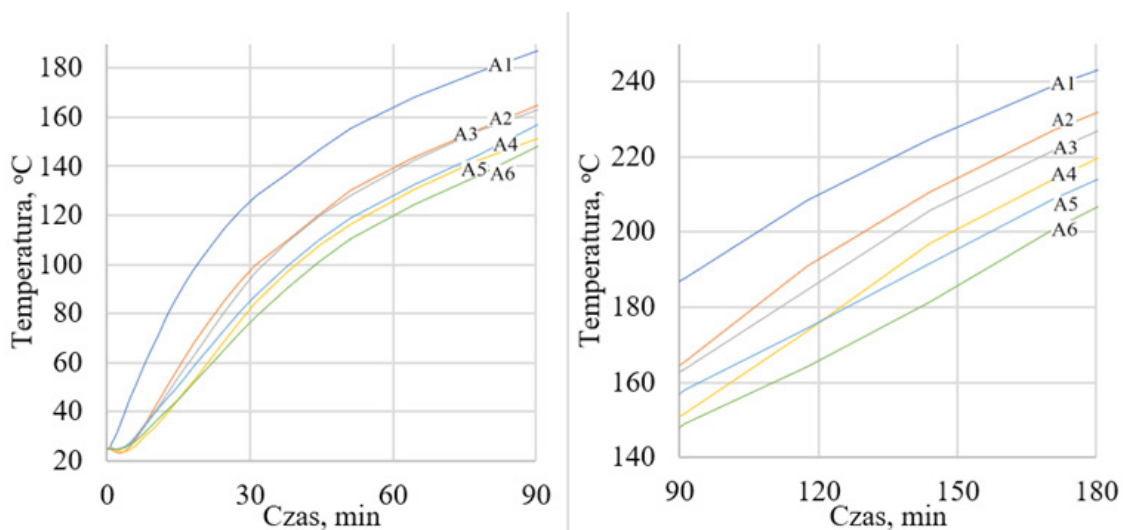
3.4. Analiza wpływu zmiany temperatury powietrza na proces ładowania akumulatora

W celu określenia wpływu temperatury powietrza na wlocie na rozkład temperatury wewnątrz akumulatora przeprowadzono symulacje dla materiału PCM 1 dla kolejnych temperatur wynoszących odpowiednio: 315, 345, 385 i 415°C. Przy symulacji zakładano zarówno jej czas, jak i prędkość powietrza na wlocie, zgodnie z danymi przedstawionymi w tab. 4.

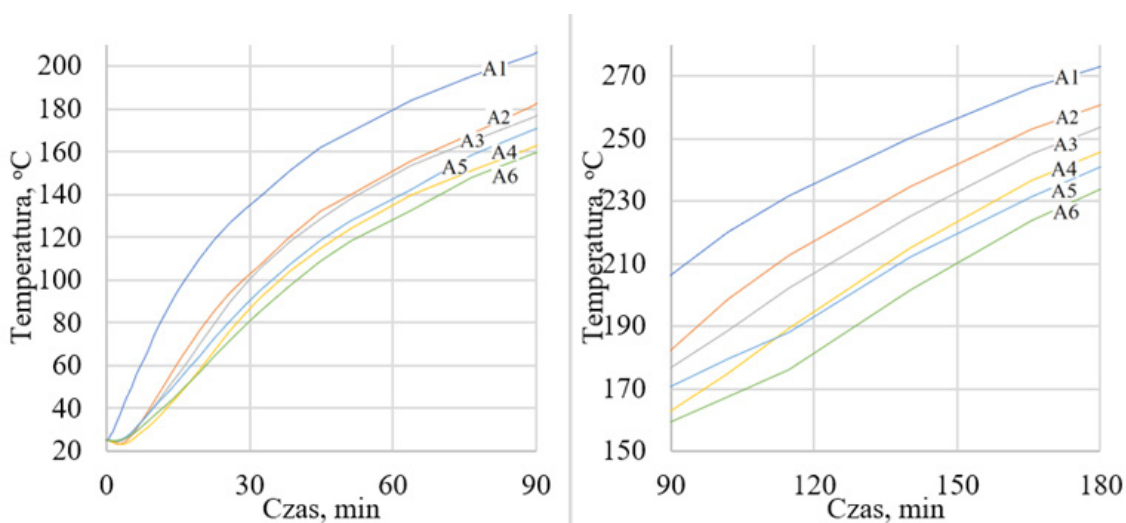
Zależność rozkładu temperatur materiału zmiennofazowego w czasie 0–180 min w punktach A1...A6 oraz zmiany temperatury na wlocie i wylocie z akumulatora przedstawiono na wykresach na rys. 16–19. Porównano też wartość temperatury średniej i wartości strumienia ciepła przy wszystkich wartościach prędkości. Zestawienie to przedstawia rys. 20.



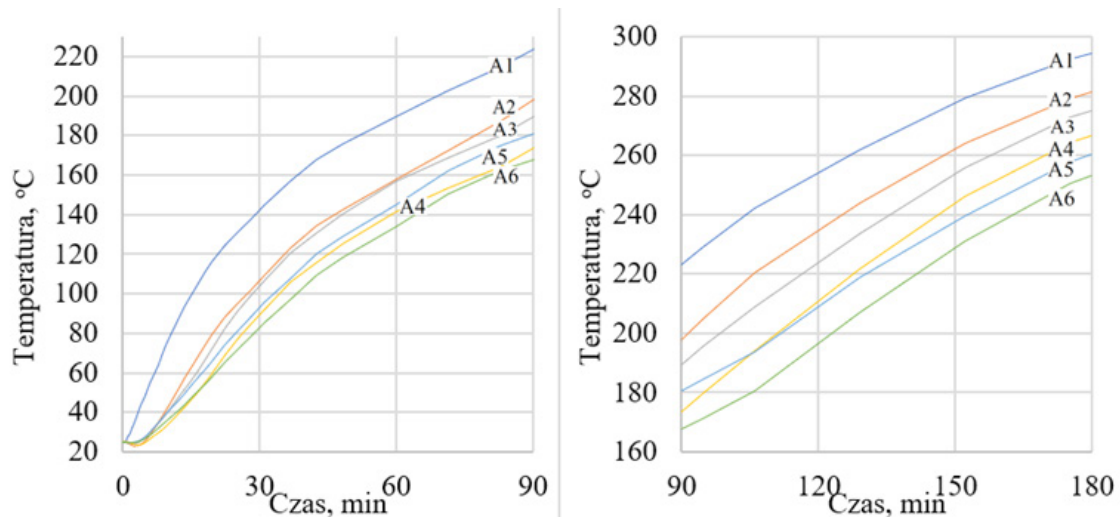
Rys. 16. Zależność zmian temperatury w czasie dla temperatury powietrza na wlocie wynoszącej 315°C



Rys. 17. Zależność zmian temperatury w czasie dla temperatury powietrza na wlocie wynoszącej 345°C

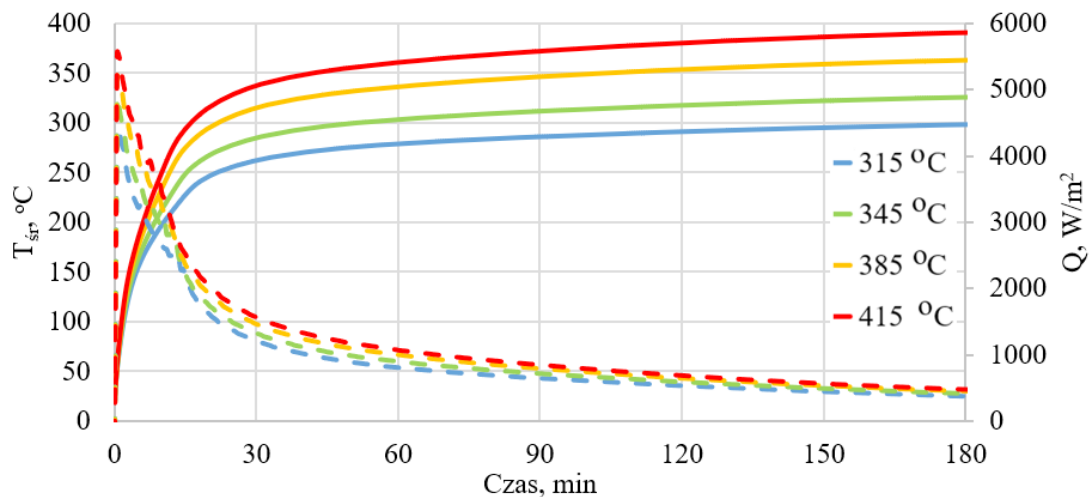


Rys. 18. Zależność zmian temperatury w czasie dla temperatury powietrza na wlocie wynoszącej 385°C



Rys. 19. Zależność zmian temperatury w czasie dla temperatury powietrza na wlocie wynoszącej 415°C

Na rysunkach 16–19 zaobserwować można, że im wyższa temperatura powietrza na wlocie, tym szybciej w różnych punktach osiągnąć można wyższe temperatury. W sytuacji zmiany temperatury powietrza na wlocie, obserwowana jest zmiana rozkładu jednostkowego strumienia ciepła i średniej temperatury na powierzchni rury ożebrowanej w czasie, co pokazano na rys. 20.



Rys. 20. Wykres zależności zmian temperatury średniej i strumienia ciepła dla różnych wartości temperatury

Mimo wyraźniej i oczywistej zależności między temperaturą powietrza na wlocie a temperaturą średnią (T_{sr}) (w momencie zmiany temperatury powietrza na wlocie o 100 stopni, zmiana temperatury średniej wynosi ok. 80 stopni), nie zaobserwowano podobnej zależności między temperaturą powietrza na wlocie a finalnym strumieniem ciepła (Q). Mimo początkowo znacznych różnic finalnie wynik nie uległ zmianie. Modyfikacja ta nie wpływa również na zmianę jednostkowego strumienia ciepła.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji procesu ładowania zmiennofazowego akumulatora ciepła. W tym celu opracowano model numeryczny, wykorzystujący metodę efektywnej pojemności cieplnej. Do walidacji zaproponowanego modelu wykonano badania eksperymentalne na stanowisku z rzeczywistym laboratoryjnym akumulatorem ciepła. Walidację modelu wykonano w odniesieniu do dwóch badanych materiałów, których specyfikację przedstawiono w tab. 3. Parametrem, który poddano walidacji, była temperatura materiału PCM w punktach odpowiadających miejscom pomiaru temperatury w akumulatorze laboratoryjnym. Na tej podstawie stwierdzono, że opracowany model numeryczny akumulatora w dobrym stopniu odwzorowuje zjawiska i procesy wymiany ciepła między czynnikiem ładującym/rozładowującym a materiałem zmiennofazowym. O zgodności wyników symulacji z wynikami pomiarów decyduje średnia różnica temperatur między wartością rzeczywistą i symulowaną, w podanych punktach pomiarowych w czasie ładowania akumulatora. Różnica ta wahała się między 1–15%, przy czym największa rozbieżność występowała dla punktu A1, co jest wartością zadowalającą.

Analiza wyników symulacji zmian prędkości oraz temperatury powietrza na wlocie do akumulatora wykazała, że nie wpływają one na wartość strumienia ciepła, przekazywanego do akumulatora. Zatem jeśli nie wprowadzamy zmiany powierzchni wymiany ciepła, a tym samym konstrukcji akumulatora, to jedynym czynnikiem modyfikującym przekazywany strumień ciepła jest przewodnictwo cieplne materiału PCM. Wynika z tego, jak istotny jest odpowiedni dobór materiału zmiennofazowego do procesu akumulowania.

Z przeprowadzonych badań modelowych oraz laboratoryjnych wynika, że wykorzystanie symulacji numerycznych pozwala na skrócenie czasu projektowania akumulatora ciepła, przeprowadzenie bezkosztowej optymalizacji jego geometrii i właściwego doboru parametrów pracy akumulatora ciepła. Symulacje pozwalają również zaobserwować, w jaki sposób zmiany jednego z parametrów pracy wpływają na pracę całego układu.

Literatura

- [1] *Global energy statistica yearbook*, Enerdata, 2019, <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html> (dostępny: 08.04.2020).
- [2] Monitor E.S., *Latest trends in energy storage*, Word Energy Council, 2019.
- [3] Mokrzycki E., Ney R., Siemek J., *Światowe zasoby surowców energetycznych – wnioski dla Polski*, Rynek Energii 2008, 6, 2–13.
- [4] Brendow K., *Global and regional coal demand perspectives to 2030 and beyond sustainable global energy development: The case of coal. Part I: Global analysis*, Chapter 6, WEC, Londyn 2004.

- [5] Chmielniak T.J., *Energetyka oparta na węglu – konieczność czy strategia?*, Karbo 2007, 2, 77–80.
- [6] Gawlik L., Mokrzycki E., Ney R., *Możliwości poprawy akceptowalności węgla jako nośnika energii*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi 2007, 23(3s), 105–118.
- [7] Mokrzycki E., *Perspektywy wykorzystania węgla kamiennego*, Górnictwo i Geoinżynieria 2006, 30(3/1).
- [8] Vasyuchkov Yu.F., *Unconventional technologies of coal seams extraction and processing*, Archives of Mining Sciences 2008, 53(2), 215–220.
- [9] Kochańska E., *Determinanty rozwoju odnawialnych źródeł energii*, Acta Innovations, Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia, Konstantynów Łódzki 2014.
- [10] Instrukcja rozliczania kosztów zadania dofinansowywanego ze środków WFOŚiGW w Łodzi dla umów zawartych od stycznia 2013.
- [11] *Buildings Energy Datebook*, 2006.
- [12] *Technology roadmap*, International Energy Agency, Energy Storage, 2014.
- [13] Fernandes D., Pitie F., Caceres G., Baeyens J., *Thermal energy storage: “How previous findings determine current research priorities”*, Energy 2012, 39(1), 246–257. DOI: 10.1016/j.energy.2012.01.024.
- [14] Cieślukowska B., *Badanie wpływu konstrukcji zmiennofazowego akumulatora ciepła na jego parametry pracy z wykorzystaniem modelowania numerycznego*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2020.
- [15] Smykowski D., *Projektowanie katalizatora do redukcji CO₂: Modelowanie Molekularne*, Praca magisterska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2010.
- [16] Niezgoda-Żelazko B., *The enthalpy-porosity method applied to the modelling of the ice slurry melting process during tube flow*, Procedia Engineering 2016, 157, 114–121. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.346.
- [17] Zeneli M., Nikolopoulos A., Karellas S., Nikolopoulos N., *Ultra-high temperature thermal energy storage, transfer and conversion, Chapter 7 – Numerical methods for solid-liquid phase-change problems*, Woodhead Publishing Series in Energy 2021, 165–199. DOI: 10.1016/B978-0-12-819955-8.00007-7.
- [18] Dmitruk A., Naplocha K., Kaczmar J.W., Smykowski D., *Pin-fin alloy structures enhancing heat transfer in PCM-based heat storage units*, Heat and Mass Transfer 2020, 56, 2265–2271. DOI: 10.1007/s00231-020-02861-6.
- [19] D’Aguanno B., Karthik M., Grace A.N., Floris A., *Thermostatic properties of nitrate molten salts and their solar and eutectic mixtures*, Scientific Reports 2018, 8, 10485. DOI: 10.1038/s41598-018-28641-1.
- [20] Kawakami M., Suzuki K., Yokoyama S., Takenaka T., *Heat capacity measurement of molten NaNO₃-NaNO₂-KNO₃ by drop calorimetry*. VII International Conference on Molten Slats, Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
- [21] Lide D., *CRC handbook of chemistry and physics*, CRC Press Inc., Boca Raton 2005.
- [22] Zhao Q.G., Hu C.X., Liu S.J., Guo H., Wu Y.T., *The thermal conductivity of molten NaNO₃, KNO₃ and their mixtures*, Energy Procedia 2017, 143, 774–779. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.761.

- [23] Guard U.C., *Chemical Hazard Response Information*, Department of Transportation, Washington, DC 1999.
- [24] Hasain S.M., *Review on sustainable thermal energy storage technologies Part 1: Heat storage materials and techniques*, *Energy Conversion and Management* 1998, 39(11), 1127–1138. DOI: 10.1016/S0196-8904(98)00025-9.
- [25] *Navier-Stokes Equations*, <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations?parent=modeling-conservation-mass-energy-momentum-0402-432-302> (dostępny: 03.12.2020).
- [26] *Magazynowanie ciepła – rodzaje magazynów*; <https://www.cire.pl/artykuly/materialy-problemowe/119630-magazynowanie-ciepla-rodzaje-magazynow> (dostępny: 14.11.2021).
- [27] Smykowski D., Lichota J., *Thermal analysis of RT-82 paraffin, hydrated sodium sulphide and 4A zeolite*, *Rynek Energii* 2017, 4, 84–90.