

## Reduced order model of the thermal energy storage discharge process with a phase change material

# Model zredukowany procesu rozładowania magazynu energii termicznej z materiałem fazowo zmiennym



A simplified model of the heat transfer process with phase-change front tracking during solidification of phase change material in shell-and-tube thermal energy storage was developed. The research object was reduced to the resistor-capacitor model. The correctness of the proposed model was assessed using the results of the numerical anal. The mean absolute error of the phase change front position was 0.17 mm and the discrepancy between the material temp. after the solidification process was less than 0.5 K. The proposed approach was able to perform the calculations in less than 10 s when the anal. using computational fluid dynamic took more than 3 h.

**Keywords:** thermal energy storage, phase change material, resistor-capacitor model, solidification

Opracowano uproszczony model transportu ciepła wraz ze śledzeniem frontu ciała stałe-ciecz dla procesu krzepnięcia materiału fazowo zmiennego w płaszczowo-rurowym magazynie energii termicznej. Zastosowano redukcję obiektu badań do modelu o skupionej pojemności cieplnej z uwzględnieniem zjawiska przewodzenia. Poprawność zaproponowanego modelu porównano z wynikami analiz numerycznych. Średni błąd bezwzględny pozycji frontu przemiany wynosił 0,17 mm, a różnica średniej temperatury materiału po procesie krzepnięcia była mniejsza niż 0,5 K. Zaproponowane podejście pozwoliło wykonać obliczenia w czasie poniżej 10 s, co w porównaniu z 3 h dla typowych obliczeń z zastosowaniem obliczeniowej mechaniki płynów jest istotnym osiągnięciem.

**Słowa kluczowe:** magazyn energii termicznej, materiał fazowo zmienny, model o skupionych pojemnościach i oporach, krzepnięcie

Występujący w ostatnich latach wzrost zużycia energii oraz pogłębiające się zmiany klimatyczne skłaniają badaczy do poszukiwania nowych metod magazynowania energii. Jednym z rozwiązań są magazyny energii termicznej wykorzystujące materiały fazowo zmiennie PCM (*phase change materials*), które akumulują energię termiczną w procesie przemiany fazowej. Magazyny wykorzystujące materiały fazowo zmiennie pozwalają na osiągnięcie znacznie większych gęstości energii niż tradycyjne rozwiązania<sup>1)</sup>. Zalety magazynów wykorzystujących materiały fazowo zmiennie sprawiają, że znajdują one zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu, takich jak budownictwo (budynki pasyw-

ne<sup>2)</sup>), energetyka (kolektory słoneczne<sup>3)</sup>), przydomowe magazyny energii<sup>4)</sup> i branża motoryzacyjna<sup>5)</sup> oraz lotnicza.

Rozwój magazynów energii termicznej z materiałami fazowo zmiennymi wymusił także opracowanie wiarygodnych metod symulacji dość złożonych zjawisk w trakcie procesów ładowania/rozładowania. Szeroko rozpowszechnione jest wykorzystanie obliczeniowej mechaniki płynów CFD (*computational fluid dynamics*) i modelu entalpii-porowatości do opisu procesu zmiany fazy<sup>6)</sup>. CFD jest uniwersalną metodą pozwalającą na przeprowadzanie analiz dla różnych kształtów magazynu<sup>7)</sup> i żeber wymiennika<sup>8)</sup>. Wielu badaczy wykorzystało CFD do symulacji warunków



Mgr inż. Mikołaj BOBULA (ORCID: 0009-0008-2875-9875) w roku 2023 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Jest doktorantem w Szkole Doktorskiej AGH.



Dr hab. inż. Jerzy WOŁOSZYN, prof. AGH (ORCID: 0000-0001-5608-3202), w roku 2009 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. W 2014 r. uzyskał stopień doktora, a w 2020 r. stopień doktora habilitowanego na tym samym wydziale. Jest profesorem uczelni w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska AGH. Specjalność – mechanika komputerowa, metody numeryczne w problemach cieplno-przepływowch, wymiana ciepła i masy, magazynowanie energii termicznej.

**\* Adres do korespondencji:**

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-31-06, e-mail: jerzy.woloszyn@agh.edu.pl

w magazynach o konfiguracji płaszczowo-rurowej pracujących zarówno w pozycji poziomej<sup>9)</sup>, jak i pionowej<sup>10)</sup>. CFD jest także skuteczna w przypadku skomplikowanych kształtów magazynu<sup>11, 12)</sup> i modelowania procesu zmiany fazy w obszarach zamkniętych<sup>13-15)</sup>. Wyniki analiz CFD cechują się zwykle dużą zgodnością z danymi eksperymentalnymi<sup>16)</sup>, a zaproponowany model entalpii-porowatości<sup>17)</sup> był wielokrotnie walidowany. Pomimo swojej uniwersalności i wysokiej dokładności, analizy CFD wymagają znacznych zasobów obliczeniowych, przez co ich przeprowadzenie jest czasochłonne i w wielu przypadkach inżynierskich niepraktyczne.

Problem, jakim jest długi czas obliczeń, może być rozwiązany przez zastosowanie modeli zredukowanych, które znacznie upraszczają opis matematyczny procesów zmiany fazy. Jednym z rodzajów modeli uproszczonych są modele wykorzystujące sieć oporów cieplnych i pojemności RC (*resistor-capacitor*). Najczęściej są to modele o parametrach skupionych (0D) lub jednowymiarowe (1D), które pozwalają na przeprowadzenie symulacji układu przy wykorzystaniu mniejszych zasobów obliczeniowych<sup>18)</sup>. Wan i współpr.<sup>19)</sup> zaproponowali model zredukowany dla magazynu energii termicznej z materiałem fazowo zmiennym umieszczonym w pionowych rurach. Opracowane przez nich podejście pozwalało na uwzględnienie częściowego ładowania i rozładowania magazynu oraz charakteryzowało się dobrą zgodnością z wynikami eksperymentu i analiz CFD. Gao i współpr.<sup>20)</sup> opracowali jednowymiarowy model RC magazynu, w którym materiał fazowo zmienny umieszczony jest w prostopadłościennych pojemnikach. Proces przemiany fazowej uzależniono od zmian przewodności i pojemności cieplnej względem temperatury w węzłach. Zmienną przewodność cieplną materiału uzależnioną od temperatury wykorzystali także Neumann i współpr.<sup>21)</sup> w modelu pionowego magazynu energii termicznej, w którym uwzględniona została konwekcja w ciekłym materiale. Ich podejście cechowało się dobrą zgodnością z wynikami analiz CFD, jednak tylko w przypadku topnienia. Modele RC są także szeroko wykorzystywane do symulowania zachowania budynków wykorzystujących materiał fazowo zmienny umieszczony w ścianach. Takie modele opracowali Bontemps i współpr.<sup>22)</sup> oraz Zhu i współpr.<sup>23)</sup>.

Przedstawione podejścia pozwalają na symulowanie zachowania magazynu energii termicznej z materiałem fazowo zmiennym, jednak nie są w stanie przewidzieć pozycji frontu przemiany fazowej. Z tego powodu możliwość względnie szybkich obliczeń projektowych jest ograniczona. Souayfane i współpr.<sup>24)</sup> opracowali model 2D zachowania materiału fazowo zmiennego umieszczonego w prostopadłościennym naczyniu. Poprzez zastosowanie zmiennego współczynnika przewodzenia ciepła, model był w stanie przewidzieć położenie frontu przemiany fazowej podczas topnienia materiału. Pan i współpr.<sup>25)</sup> opracowali model transportu ciepła dla magazynu energii termicznej, w którym materiał fazowo zmienny umieszczony jest w ply-

Table. Properties of the phase change material<sup>26)</sup>

Tabela. Właściwości materiału fazowo zmiennego<sup>26)</sup>

$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\lambda$ , W/(m·K)	$c_p$ , J/(kg·K)	$L$ , J/kg	$T_s$ , °C
1600	1	2000	170 000	29

tach ogrzewanych z dwóch stron. We wcześniejszej pracy<sup>26)</sup> opracowali model magazynu o konfiguracji płaszczowo-rurowej, w którym wykorzystali opory cieplne do opisu wymiany ciepła w materiale i wyznaczenia położenia frontu przemiany fazowej. Zaproponowany model nie uwzględniał jednak właściwej pojemności cieplnej materiału.

Mając na uwadze ograniczenia przedstawionych modeli, celem tej pracy było opracowanie uproszczonego modelu procesu krzepnięcia w magazynie energii termicznej o konfiguracji płaszczowo-rurowej, który będzie zdolny do śledzenia położenia frontu przemiany fazowej. Cechą wyróżniającą opracowany model jest możliwość uwzględnienia wpływu temperatury fazy ciekłej i stałej oraz możliwość uwzględnienia przypadku częściowej przemiany fazowej. Do zrealizowania przedstawionego celu zaproponowany został algorytm obliczeń oraz model RC procesu transportu ciepła w materiale podlegającym przemianie fazowej. Wyniki uzyskane za pomocą modelu zredukowanego zostały następnie porównane z wynikami analiz numerycznych z wykorzystaniem oprogramowania komercyjnego.

## Część obliczeniowa

### Obiekt badań i model matematyczny

Magazyny o konfiguracji płaszczowo rurowej mogą pracować zarówno w pozycji poziomej, jak i pionowej<sup>27)</sup>. Zaproponowany model obliczeniowy będzie wykorzystywany do analizy procesu krzepnięcia w magazynach energii termicznej o układzie poziomym (rys. 1). Typowa konfiguracja składa się z rury wewnętrznej transportującej czynnik roboczy (źródło ciepła) oraz rury zewnętrznej stanowiącej obudowę magazynu. Pomiędzy rurami znajduje się materiał

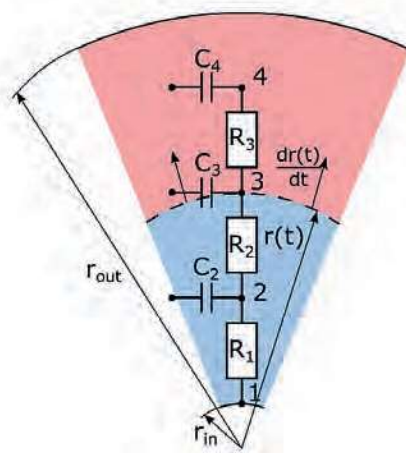


Fig. 1. RC model of the shell-and-tube latent heat thermal energy storage

Rys. 1. Model RC magazynu energii termicznej o konfiguracji płaszczowo-rurowej

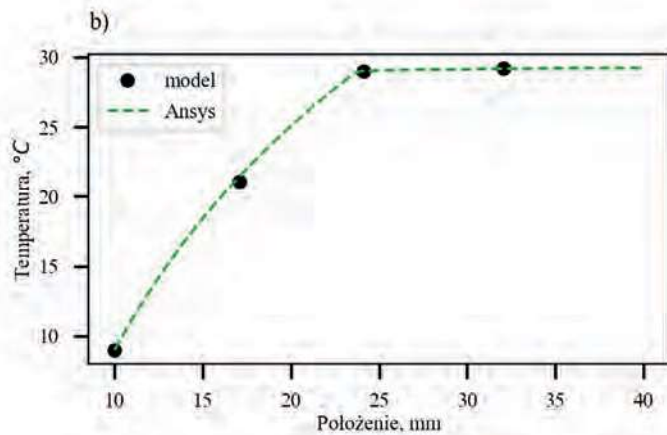
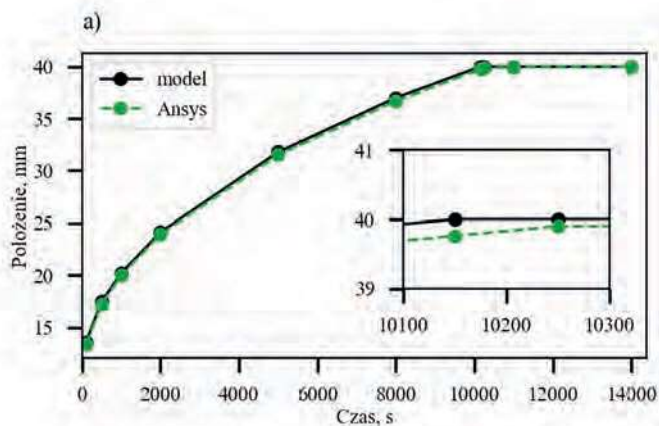


Fig. 2. Comparison of the phase change front position (a) and temperature after 2000 s (b)

Rys. 2. Porównanie położenia granicy faz (a) i temperatury po 2000 s (b)

fazowo zmienny. Przyjęto następujące wymiary magazynu:  $r_{in} = 10$  mm,  $r_{out} = 40$  mm.

Uproszczony model transportu ciepła dla płaszczowo-rurowego magazynu energii termicznej opracowano na podstawie następujących założeń: (i) transport ciepła w materiale fazowo zmiennym odbywa się tylko przez przewodzenie i tylko w kierunku radialnym, (ii) właściwości termofizyczne materiału są stałe, (iii) pomija się straty ciepła i (iv) pomija się wpływ elementów zbiornika.

W zaproponowanym podejściu pominięto wpływ konwekcyjnej wymiany ciepła w ciekłym materiale. Mimo że konwekcja jest obecna, jej rola w procesie krzepnięcia jest znikoma, natomiast dominująca jest rola przewodzenia<sup>28</sup>. Potwierdzają to badania przeprowadzone przez Liu i współpr.<sup>27</sup>, które pokazują, że konwekcja naturalna ma zauważalny wpływ tylko w początkowej fazie krzepnięcia, gdy występują duże różnice temperatury w materiale. Gdy ciekły materiał osiągnie jednorodną temperaturę, wpływ konwekcji ustępuje, a dominującym sposobem wymiany ciepła staje się przewodzenie.

Uproszczony model transportu ciepła w magazynie energii zbudowano, dzieląc obszar obliczeniowy na podobszary (faza stała, ciekła oraz granica faz) reprezentowane przez węzły połączone oporami cieplnymi (rys. 1). Dodatkowy węzeł oznaczony na rys. 1 numerem 1 reprezentuje powierzchnię wewnętrzną rury magazynu, gdzie zdefiniowany jest warunek brzegowy. Dla tak określonych węzłów zaproponowano równania różniczkowe zwyczajne opisujące zmiany temperatury (1a) oraz położenia granicy faz (1b) w czasie:

dla materiału w stanie ciekłym lub stałym:

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_{i-1}} (T_{i-1} - T_i) + \frac{1}{R_i} (T_{i+1} - T_i) \quad (1a)$$

dla granicy faz:

$$-C_i \frac{dr_i}{dt} = \frac{1}{R_{i-1}} (T_{i-1} - T_i) + \frac{1}{R_i} (T_{i+1} - T_i) \quad (1b)$$

w których  $C_i$  oznacza zastępczą pojemność cieplną w węźle  $i$ ,  $T_i$  temperaturę w węźle  $i$ , °C,  $R_{i-1}$  opór cieplny między węzłem  $i$  a węzłem poprzednim, (m·K)/W,  $R_i$  opór cieplny między węzłem  $i$  a węzłem następnym (m·K)/W, a  $r_i$  pozycję węzła  $i$ , m.

Opór cieplny między węzłem  $i$  a węzłem  $i+1$  ma postać zależności (2):

$$R_i = \frac{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}{\lambda} \quad (2)$$

w której  $\lambda$  oznacza współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m·K).

Pojemności cieplne węzłów opisują równania (3a) i (3b): dla materiału w stanie ciekłym lub stałym:

$$C_i = \frac{1}{2} c_p \cdot \rho \cdot (r_{i+1}^2 - r_{i-1}^2) \quad (3a)$$

dla granicy faz:

$$C_i = L \cdot \rho \cdot r_i \quad (3b)$$

w których  $L$  oznacza ciepło przemiany fazowej, J/kg,  $\rho$  gęstość, kg/m<sup>3</sup>, a  $c_p$  ciepło właściwe, J/(kg·K).

Przyjęto, że położenie węzłów (poza pierwszym węzłem reprezentującym ścianę rury wewnętrznej) jest obliczane na podstawie pozycji frontu przemiany fazowej (1b). Dzięki takiemu podejściu położenie frontu przemiany fazowej może być śledzone w każdym kroku obliczeń. Położenie węzłów reprezentujących fazę ciekłą i stałą jest średnią arytmetyczną pozycji sąsiednich węzłów (4):

$$r_i = \frac{r_{i+1} + r_{i-1}}{2} \quad (4)$$

Dla ostatniego węzła w równaniu (4) pozycją węzła następnego ( $r_{i+1}$ ) jest promień zewnętrznej rury magazynu  $r_{out}$ . Do obliczenia temperatur w węzłach reprezentujących fazę ciekłą i stałą wykorzystywane jest równanie (1a), temperatura dla frontu przemiany jest równa temperaturze krzepnięcia  $T_s$ . Dodatkowo, gdy cały materiał jest w stanie



ciekłym lub stałym, model redukuje się do przypadku, gdzie występuje tylko węzeł reprezentujący ścianę rury i materiał w jednej fazie.

### Algorytm i warunki obliczeń

Do przeprowadzenia symulacji procesu krzepnięcia w magazynie energii termicznej z materiałem fazowo zmiennym przygotowano program w języku Python. Program realizuje algorytm obliczeniowy, w którym równania różniczkowe (1) rozwiązano z wykorzystaniem niejawniej metody Eulera. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z algorytmem: (i) sprawdzenie, czy węzły powinny zostać dodane lub usunięte, (ii) wyznaczenie pojemności i oporów cieplnych z równań (2) oraz (3), (iii) wyznaczenie temperatury i pozycji węzłów wg równań (1), (iv) obliczenie błędów iteracji i (v) zapisanie wyników. Kroki 2–4 wykonywane są do momentu, gdy maksymalna różnica temperatur w poprzedniej i obecnej iteracji jest mniejsza niż maksymalny dopuszczalny błąd zgodnie z zapisem (5):

$$|\max(T_i - T_i')| < \varepsilon_{\max} \quad (5)$$

w którym  $T_i'$  oznacza temperaturę węzła  $i$  w poprzedniej iteracji, °C, a  $\varepsilon_{\max}$  maksymalny dopuszczalny błąd iteracji, °C.

Decyzja o redukcji modelu obliczeniowego do jednego węzła lub dodaniu granicy faz odbywa się na początku każdego kroku czasowego na podstawie temperatury w materiale. Jeżeli w drugim węźle (rys. 1) materiał jest w fazie ciekłej i spełniony jest warunek (6):

$$T_W < T_s \leq T_2 \quad (6)$$

w którym  $T_W$  oznacza temperaturę ściany magazynu (pierwszy węzeł), pomiędzy węzłami 1 i 2 dodane zostają węzły reprezentujące granicę faz oraz fazę ciekłą. Jeżeli materiał jest w fazie stałej, warunek (6) nie jest sprawdzany i węzły nie są dodawane.

Przy usuwaniu węzłów sprawdzany jest warunek, czy odległość między granicą faz a ścianą obudowy jest mniejsza od minimalnej dopuszczalnej odległości ( $d_{\min}$ ):

$$r_{\text{out}} - r_{\text{granica faz}} < d_{\min} \quad (7)$$

Gdy warunek (7) jest spełniony, usunięty zostaje węzeł reprezentujący granicę faz oraz węzeł następny (faza obecna między granicą a rurą zewnętrzną).

Do sprawdzenia poprawności obliczeń przeprowadzono analizę CFD (Ansys Fluent) procesu krzepnięcia w materiale fazowo zmiennym. Opracowano dwuwymiarowy model wycinka magazynu, w którym pominięto wpływ konwekcji. Właściwości termofizyczne materiału zostały przedstawione w tabeli. Temperatura wewnętrznej rury magazynu wynosi  $T_W = 9^\circ\text{C}$ , początkowo materiał znajduje się w fazie ciekłej o temp.  $32^\circ\text{C}$ .

### Wyniki obliczeń

Po wykonaniu analizy zbieżności rozwiązania przyjęto krok czasowy równy 0,5 s oraz maksymalny błąd iteracji równy  $\varepsilon_{\max} = 10^{-6}$  °C. Porównanie położenia granicy faz dla dziesięciu punktów przedstawiono na rys. 2a. Jak można zauważyć, model zredukowany cechuje zadowalające dopasowanie do wyników analizy CFD. Największa rozbieżność między wynikami występowała w 8000. s i wynosiła 0,31 mm. Średnia różnica dla wszystkich punktów była równa 0,17 mm, co odpowiadało wartości względnej 0,70%. Dla punktów 1–8 wartość położenia granicy faz wyznaczona za pomocą CFD była mniejsza niż w przypadku modelu uproszczonego, co oznacza, że wg analizy CFD całkowita zmiana fazy w materiale nastąpiła później, niż wskazywałby model uproszczony.

Na rys. 2b przedstawiono porównanie zmian temperatury materiału fazowo zmiennego po 2000 s, obliczone za pomocą zaproponowanego modelu RC i analizy CFD. W tym przypadku model zredukowany również wykazywał dobrą zgodność z wynikami obliczeń z oprogramowania komercyjnego. Największa rozbieżność wynosiła 0,25 K i występowała w fazie stałej. W przypadku gdy proces krzepnięcia się zakończył, rozbieżność wartości temperatury między wynikami modelu uproszczonego i analizy CFD nie przekroczyła  $0,5^\circ\text{C}$ . Należy podkreślić, że model uproszczony charakteryzuje się znacznie krótszym czasem obliczeń. Na komputerze osobistym wyposażonym w procesor Intel Core i5 przeprowadzenie symulacji zjawiska trwającego 4 h (14 400 s) zajęło mniej niż 10 s, podczas gdy przeprowadzenie analizy CFD trwało w przybliżeniu 3,5 h.

### Podsumowanie

W pracy zaproponowano uproszczony model procesu krzepnięcia materiału fazowo zmiennego w poziomym płaszczowo-rurowym magazynie energii termicznej. Opracowany model zredukowany opisuje transport ciepła przez zastosowanie oporów i pojemności cieplnych oraz przy pominięciu zjawiska konwekcji umożliwia śledzenie frontu przemiany fazowej ciec-ciało stałe. Na podstawie porównania wyników obliczeń modelu zredukowanego z wynikami analizy CFD sformułowano wnioski: (i) model uproszczony pozwala na śledzenie położenia frontu przemiany fazowej oraz zmian temperatury w materiale fazowo zmiennym, a także pozwala analizować przypadki, gdy materiał znajduje się w jednej fazie; (ii) średnia bezwzględna różnica położenia granicy faz wynosi 0,17 mm (0,70%), a maksymalna 0,31 mm; (iii) maksymalna rozbieżność względem CFD dla obliczonej wartości temperatury materiału fazowo zmiennego występuje, gdy cały materiał znajduje się w fazie stałej, a jej wartość nie przekracza  $0,5^\circ\text{C}$ ; oraz (iv) czas obliczeń dla modelu uproszczonego wynosi mniej niż 10 s i jest znacznie krótszy niż w przypadku analizy CFD (3,5 h).

W dalszych krokach proponuje się rozwój modelu uproszczonego o uwzględnienie konwekcyjnej wymiany ciepła w ciekłym materiale, aby zaproponowane podejście można było zastosować do symulowania procesu topnienia.

*Praca została wykonana w ramach badań statutowych nr 16.16.130.942.*

Otrzymano: 23-09-2024

Zrecenzowano: 11-10-2024

Zaakceptowano: 18-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

#### LITERATURA

- [1] A. Melcer, E. Kulgmann-Radziemska, W. Lewandowski, *Przem. Chem.* 2012, **91**, nr 7, 1335.
- [2] M. Sun i in., *J. Energy Storage* 2023, **68**, 107713.
- [3] L. Yang, X. Jin, Y. Zhang, K. Du, *J. Cleaner Prod.* 2020, **287**, 124432.
- [4] S. Ben Romdhane, A. Amamou, R. Ben Khalifa, N.M. Saïd, Z. Younsi, A. Jemni, *J. Building Eng.* 2020, **32**, 101563.
- [5] J. Jaguemont, N. Omar, P. Van Den Bossche, J. Mierlo, *Appl. Therm. Eng.* 2018, **132**, 308.
- [6] T. Zhang, D. Huo, C. Wang, Z. Shi, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2023, **187**, 113724.
- [7] J. Wołoszyn, K. Szopa, *Energies* 2023, **16**, nr 23, 7822.
- [8] G. Czerwiński, J. Wołoszyn, *Energies* 2023, **16**, nr 1, 268.
- [9] J. Panisilvam, P.C. Wang, N.H.S. Tay, *J. Energy Storage* 2023, **72**, 2352.
- [10] L.S. Raj, S. Sreenivasulu, B.D. Prasad, *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Effects* 2023, **45**, nr 1, 331.
- [11] H. Li, N. Wang, S. He, M. Gao, *Appl. Therm. Eng.* 2022, **216**, 119112.
- [12] J. Wołoszyn, K. Szopa, *Renew. Energy* 2023, **202**, 1342.
- [13] C. Yu, J. Qian, D. Cao, D. Chen, L. Wu, C. Zhang, *J. Energy Storage* 2023, **71**, 108157.
- [14] G. Czerwiński, J. Wołoszyn, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 2024, **159**, 108047.
- [15] J. Wołoszyn, G. Czerwiński, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 11, 1246.
- [16] W. Youssef, Y. Ge, S. Tassou, *Energy Convers. Manag.* 2018, **157**, 498.
- [17] V.R. Voller, C. Prakash, *Int. J. Heat Mass Transfer* 1987, **30**, 1709.
- [18] M. Moreira, T. Silva, J. Dias-de-Oliveira, F. Neto, C. Amaral, *Appl. Therm. Eng.* 2023, **234**, 121342.
- [19] H. Wan, X. Xu, T. Xu, K. Kit, R. Yuen, G. Huang, *Appl. Therm. Eng.* 2022, **214**, 118868.
- [20] J. Gao, T. Yan, T. Xu, Z. Ling, G. Wei, X. Xu, *Appl. Therm. Eng.* 2018, **146**, 364.
- [21] H. Neumann, S. Gamisch, S. Gschwander, *Appl. Therm. Eng.* 2021, **196**, 117232.
- [22] A. Bontemps, M. Ahmad, K. Johannès, H. Sallée, *Energy Build.* 2011, **43**, 2456.
- [23] N. Zhu, S. Wang, X. Xu, Z. Ma, *Int. J. Therm. Sci.* 2010, **49**, 1772.
- [24] F. Souayfane, P.H. Biwole, F. Fardoun, *Appl. Therm. Eng.* 2018, **130**, 660.
- [25] C. Pan i in., *J. Energy Storage* 2022, **51**, 104489.
- [26] C. Pan, N. Vermaak, X. Wang, C. Romero, S. Neti, *Int. J. Heat Mass Transfer* 2021, **176**, 121479.
- [27] F. Liu, G. Zhang, Y. Zhang, Z. Zhang, *J. Energy Storage* 2023, **71**, 108163.
- [28] K.Y. Leong, S. Hasbi, B.A. Gurunathan, *J. Energy Storage* 2021, **41**, 102932.



**Zapraszamy na nasz profil  
na portalu **

<https://www.linkedin.com/company/przemysl-chemiczny/>