DOI: 10.65545/COW.2026.10.06




# Termochemiczne magazyny ciepła w instalacjach budynkowych – materiały, magazyny i możliwości integracji

## Thermochemical heat storage in building systems – materials, reactors and integration options




**Ewelina Skwarczyńska-Kalamon**

ORCID ID: 0009-0008-7277-1329
Szkoła Doktorów
Politechnika Śląska
ewelina.skwarczynska-kalamon@polsl.pl



**Dr hab. inż. Jan Kaczmarczyk, prof. PŚ**

ORCID ID: 0000-0002-8957-8487
Wydział Inżynierii Środowiska
i Energetyki
Politechnika Śląska
jan.kaczmarczyk@polsl.pl



**Dr inż. Paweł Lonkwic**

ORCID ID: 0000-0002-5687-3009
Instytut Nauk Technicznych i Lotnictwa
Państwowa Akademia Nauk Stosowanych
w Chełmie
plonkwic@panschelm.edu.pl


**Słowa kluczowe**: magazynowanie ciepła, TCM, sole hydratacyjne, pompa ciepła, HVAC, elastyczność energetyczna

**Streszczenie**

Magazynowanie energii cieplnej nabiera znaczenia wraz ze wzrostem udziału źródeł odnawialnych i elektryfikacją ogrzewania. Artykuł ma charakter przeglądowy i przedstawia możliwości wykorzystania termochemicznych magazynów ciepła (TCM) w instalacjach budynkowych. Omówiono zasadę magazynowania energii w odwracalnych procesach sorpcji oraz reakcjach gaz–ciało stałe, ze szczególnym uwzględnieniem soli hydratacyjnych. Porównano podstawowe grupy materiałów, wskazując na znaczenie temperatury regeneracji, gęstości energii, kinetyki, stabilności cyklicznej, delikwescencji i przewodnictwa cieplnego. Przedstawiono również wpływ konstrukcji magazynu na transport ciepła i masy oraz konsekwencje różnicy między parametrami materiału a parametrami całego urządzenia. W części aplikacyjnej omówiono integrację TCM z pompami ciepła, wentylacją mechaniczną i instalacjami wykorzystującymi energię słoneczną. Analiza literatury wskazuje, że najbardziej realistycznym kierunkiem wdrożeń w budynkach są obecnie układy hybrydowe, w których TCM pełni funkcję magazynu długookresowego lub narzędzia przesuwania obciążenia, natomiast bufor wodny obsługuje szybkie zmiany zapotrzebowania. Główne bariery komercjalizacji pozostają związane ze stabilnością materiałów, mocą magazynu, kontrolą wilgotności, kosztami i skalowaniem.

**Keywords:** thermal energy storage, thermochemical materials, salt hydrates, heat pump, HVAC, energy flexibility

**Abstract**

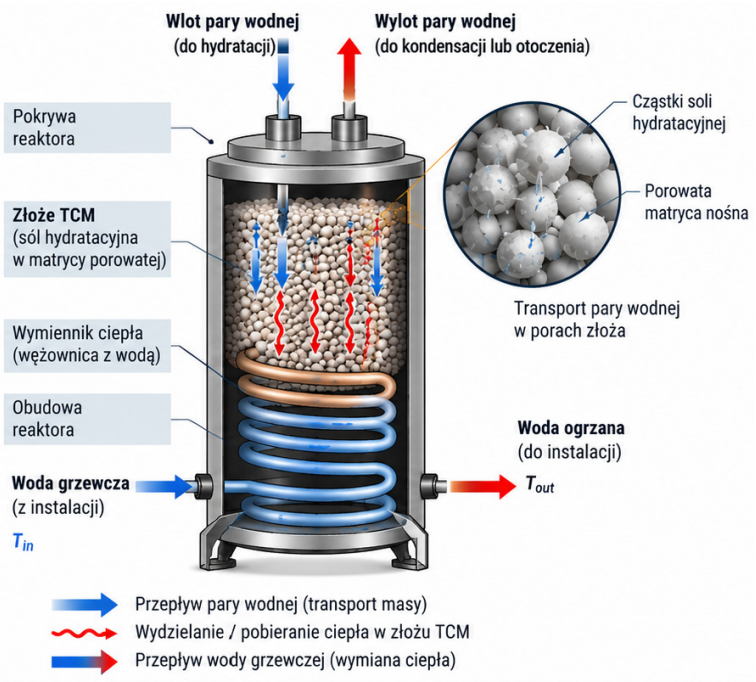
Thermal energy storage is becoming increasingly important with the growing share of renewable energy and the electrification of heating. This review discusses the potential use of thermochemical heat storage (TCM) in building systems. Reversible sorption processes and gas–solid reactions are described, with particular attention to salt hydrates. The main material groups are compared in terms of regeneration temperature, energy density, kinetics, cycling stability, deliquescence and thermal conductivity. Reactor design is discussed as a key factor governing heat and mass transfer and explaining the difference between material-level and system-level performance. Building applications include integration with heat pumps, mechanical ventilation and solar energy systems. The reviewed evidence indicates that hybrid configurations are currently the most realistic pathway for building applications: TCM can provide long-duration storage or load shifting, while water tanks or phase-change materials handle short-term fluctuations. The main barriers to commercialization are material stability, reactor power density, humidity control, cost and scale-up.

## Wprowadzenie

Rosnący udział fotowoltaiki i energetyki wiatrowej zwiększa znaczenie technologii, które pozwalają rozdzielić w czasie moment pozyskania energii i moment jej wykorzystania. W budynkach szczególnie istotne jest magazynowanie ciepła, ponieważ ogrzewanie pomieszczeń i przygotowanie ciepłej wody użytkowej tworzą duże, sezonowo zmienne obciążenie. Magazyny ciepła TES (*Thermal Energy Storage*) mogą współpracować zarówno z kolektorami słonecznymi, jak i z pompami ciepła zasilanymi energią elektryczną z OZE.

W klasyfikacji TES wyróżnia się magazynowanie ciepła jawnego SHS (*Sensible Heat Storage*), utajonego LHS (*Latent Heat Storage*) oraz termochemicznego TCES/TCS (*Thermochemical Energy Storage*). Pierwsza grupa obejmuje m.in. zbiorniki wodne, druga wykorzystuje przemianę fazową materiałów PCM, natomiast w TCS energia jest związana z odwracalną sorpcją lub reakcją chemiczną. Zaletą podejścia termochemicznego jest możliwość przechowywania rozdzielonych reagentów w temperaturze zbliżonej do otoczenia, co ogranicza straty postojowe i otwiera możliwość magazynowania długookresowego (Balasubramanian i in., 2010).

Celem artykułu jest uporządkowanie najważniejszych zagadnień istotnych z punktu widzenia zastosowań budynkowych: doboru materiału, konstrukcji magazynu, modelowania transportu ciepła i masy, integracji z systemami grzewczo-chłodzącymi HVAC i pompami ciepła oraz ograniczeń skalowania.




Rysunek 1. Uproszczony schemat magazynu TCS z materiałem TCM. Źródło: opracowanie własne przygotowane przy użyciu SI
Figure 1. Simplified schematic of a TCS storage system containing TCM. Source: authors' own work prepared with the assistance of AI.

## Materiały i metody

W pracy przeanalizowano publikacje naukowe dotyczące materiałów termochemicznych TCM (Thermochemical Materials) m.in.: soli hydratacyjnych, materiałów sorpcyjnych, reakcyjnych układów tlenkowych. Przegląd dotyczył również przeanalizowania magazynów TCES/TCS m.in.: modelowanie oraz wpływu geometrii wymiennika i warunków przepływu na parametry magazynu. Szczególną uwagę poświęcono pracom, w których przedstawiono wyniki eksperymentalne, modelowanie zweryfikowane pomiarami lub kryteria doboru materiałów do ogrzewania budynków.

Porównanie ma charakter jakościowo-inżynierski. Wartości gęstości energii podawane w literaturze odnoszą się niekiedy do czystego materiału TCM, a nie do kompletnego magazynu TCES/TCS. Z tego względu wnioski aplikacyjne oparto przede wszystkim na relacjach między temperaturą regeneracji, kinetyką, trwałością, transportem ciepła i masy oraz konstrukcją magazynu, a nie na pojedynczej wartości maksymalnej gęstości energii.

## Zasada działania termochemicznego magazynu ciepła TCES/TCS

Uproszczony zapis odwracalnej reakcji magazynowania można przedstawić jako $AB + \Delta H \rightleftharpoons A + B$. Podczas ładowania doprowadzone ciepło wywołuje reakcję endotermiczną i rozdzielenie produktów. Po ich odseparowaniu energia pozostaje związana chemicznie. Podczas rozładowania doprowadzenie reagenta gazowego, najczęściej pary wodnej, uruchamia reakcję odwrotną i wydzielanie ciepła.

W układach opartych na solach hydratacyjnych proces odpowiada dehydratacji podczas ładowania i hydratacji podczas rozładowania. Badania modelowe pokazują, że przebieg procesu zależy nie tylko od termodynamiki reakcji, lecz także od kinetyki desorpcji i transportu pary wodnej przez złoże (Balasubramanian i in., 2010). Oznacza to, że materiał o wysokiej teoretycznej entalpii reakcji nie musi zapewniać wysokiej mocy w rzeczywistym magazynu.

Z punktu widzenia instalacji budynkowych kluczowe są dwa poziomy oceny: pojemność materiału aktywnego oraz pojemność całego systemu. Obudowa, wymiennik, kanały przepływowe, pustki złoża i niepełna konwersja zmniejszają użyteczną gęstość energii urządzenia względem wartości laboratoryjnej.

## Grupy materiałów TCM

### *Materiały sorpcyjne*

Do materiałów sorpcyjnych zalicza się m.in. zeolity, silikażele i materiały porowate o rozwiniętej powierzchni właściwej. Magazynowanie opiera się na odwracalnej adsorpcji i desorpcji pary wodnej. Ich zaletą jest relatywnie dobra stabilność cykliczna, natomiast ograniczeniem może być niższa gęstość energii oraz zależność mocy od transportu masy. Materiały porowate są również wykorzystywane jako nośniki soli, ponieważ mogą ograniczać aglomerację i poprawiać dostęp pary wodnej do fazy aktywnej.

### *Sole hydratacyjne*

Sole hydratacyjne należą do najczęściej badanych materiałów termochemicznych przeznaczonych do magazynowania ciepła w budynkach. W badaniach przesiewowych obejmujących $SrCl_2$, $MgSO_4$, $Na_3PO_4$, $MgCl_2$ oraz $SrBr_2$ oceniano materiały m.in. pod względem objętościowej gęstości magazynowanej energii, temperatury dehydratacji poniżej 100°C, kosztu, bezpieczeństwa użytkowania oraz braku topnienia podczas procesu dehydratacji. Na podstawie przyjętych kryteriów jako szczególnie perspektywiczny materiał do zastosowań w ogrzewaniu budynków wskazano $SrCl_2$ (Clark i in., 2022).

Innym materiałem analizowanym pod kątem termochemicznego magazynowania ciepła jest $SrBr_2$. Jego właściwości użytkowe zależą nie tylko od parametrów

termodynamicznych, lecz także od kinetyki reakcji oraz stabilności podczas kolejnych cykli hydratacji i dehydratacji (Stengler i in., 2020).

W przypadku $CaCl_2$ istotnymi zaletami są jego dostępność oraz wysoka reaktywność z parą wodną. Materiał ten wykazuje jednak skłonność do delikwescencji, czyli pochłaniania pary wodnej z otoczenia w ilości prowadzącej do rozpuszczania soli we własnej zaabsorbowanej wodzie i powstawania roztworu. Zjawisko to może powodować zmianę struktury złoża i utrudniać jego stabilną, wielokrotną pracę. Badania $CaCl_2$ prowadzone przy wysokich ciśnieniach cząstkowych pary wodnej wykazały wieloetapowy przebieg hydratacji oraz możliwość **odwracalnej pracy cyklicznej, polegającej na wielokrotnym powtarzaniu procesów dehydratacji i hydratacji** (Molenda i in., 2013). W praktyce jednym z kierunków ograniczania niekorzystnych zmian właściwości soli jest stosowanie materiałów kompozytowych, np. soli osadzonej w porowatej matrycy oraz dodatków poprawiających stabilność materiału i warunki transportu ciepła i masy.

### *Materiały reakcyjne wysokotemperaturowe*

Do termochemicznego magazynowania ciepła wykorzystuje się również układy oparte na odwracalnych reakcjach chemicznych, m.in. $CaO/Ca(OH)_2$ oraz $MgO/Mg(OH)_2$ (Tabela 1). Charakteryzują się one wysoką gęstością magazynowania energii, jednak wymagają wyższych temperatur regeneracji niż te dostępne w typowych niskotemperaturowych instalacjach budynkowych. W badaniach układu $MgO/Mg(OH)_2$ zastosowano magazyn fluidlany, w którym przepływający gaz wprawia cząstki materiału w ruch, intensyfikując wymianę ciepła i masy. Wykazano, że przebieg procesu zależy m.in. od warunków pracy magazynu, temperatury złoża oraz powierzchni wymiany ciepła (Yan i in., 2022).

W przypadku układu $Ca(OH)_2/CaO$ istotnym zagadnieniem jest zachowanie właściwości materiału podczas wielokrotnych cykli pracy. Obserwowano m.in. aglomerację, czyli łączenie się drobnych cząstek w większe skupiska oraz spiekanie, prowadzące do trwałych zmian struktury materiału. Zjawiska te mogą pogarszać transport ciepła i masy w złożu oraz powodować nierównomierne oddawanie ciepła podczas kolejnych cykli reakcji (Dai i in., 2018).

## Magazyn TCS jako kluczowy element systemu

Właściwości materiału TCM nie przekładają się bezpośrednio na parametry użytkowe całego magazynu TCES/TCS. Istotną rolę odgrywa konstrukcja magazynu, który musi zapewniać zarówno efektywną wymianę ciepła, jak i odpowiedni transport reagenta gazowego przez złoże. Hawwash i in. (2020), analizując magazyn wykorzystujący $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, wykazali, że jego geometria wpływa m.in. na spadek ciśnienia, czas ładowania oraz ilość zmagazynowanej energii. Odpowiednie ukształtowanie magazynu i warunków przepływu jest zatem jednym z kluczowych elementów decydujących o stopniu wykorzystania właściwości materiału TCM.

Znaczenie konstrukcji magazynu potwierdzają również badania innych układów wykorzystujących sole hydratacyjne. Rui i in. (2022) wykazali, że odpowiednia modyfikacja geometrii magazynu może ograniczać nierównomierny przebieg magazynu oraz niepożądane przechodzenie soli w fazę ciekłą. Zastosowane rozwiązanie pozwoliło skrócić czas reakcji i poprawić sprawność cieplną układu, przy czym jego działanie pozostawało silnie zależne od temperatury powietrza doprowadzanego do magazynu. Z kolei badania wymiennika ciepła o strukturze plastra miodu, wykorzystującego $K_2CO_3$, wykazało istotny wpływ geometrii kanałów na przebieg reakcji oraz transport ciepła w złożu (Kant i in., 2021).

W zastosowaniach HVAC szczególnie interesującym rozwiązaniem są magazyny otwarte, w których powietrze przepływa bezpośrednio przez złoże materiału TCM. Zawarta w nim para wodna uczestniczy w procesie hydratacji, co eliminuje konieczność stosowania oddzielnego układu jej doprowadzania. Rozwiązanie to upraszcza konstrukcję systemu, jednak uzależnia przebieg reakcji i uzyskiwaną moc cieplną od temperatury, wilgotności oraz strumienia przepływającego powietrza. Integracja magazynu TCS z instalacją HVAC wymaga zatem skoordynowanego sterowania pracą magazynu.

## Modelowanie procesu

Model matematyczny magazynu TCM powinien uwzględniać wzajemnie powiązane procesy wymiany ciepła i masy, kinetykę reakcji oraz warunki równowagi termodynamicznej.

Tabela 1. Porównanie podstawowych grup materiałów stosowanych w termochemicznym magazynowaniu ciepła. Źródło: opracowanie własne
Table 1. Comparison of major material groups used for thermochemical heat storage. Source: authors' own work

| Grupa | Przykłady | Zalety | Ograniczenia | Potencjalne zastosowanie * |
|---|---|---|---|---|
| **Materiały sorpcyjne** | zeolity, silikażel | stabilność cykliczna, możliwość pracy w niskich i umiarkowanych temperaturach | mniejsza gęstość magazynowania energii, ograniczenia transportu ciepła i masy | magazynowanie ciepła w budynkach, systemy HVAC, odzysk ciepła |
| **Sole hydratacyjne** | $CaCl_2$, $SrCl_2$, $SrBr_2$, $MgSO_4$, $K_2CO_3$ | wysoka gęstość magazynowania energii, możliwość regeneracji w umiarkowanych temperaturach | delikwescencja, aglomeracja, korozja, pogorszenie właściwości podczas pracy cyklicznej | ogrzewanie budynków, magazynowanie energii słonecznej, odzysk ciepła |
| **Układy oparte na odwracalnych reakcjach chemicznych** | $CaO/Ca(OH)_2$, $MgO/Mg(OH)_2$ | wysoka gęstość magazynowania energii, możliwość pracy w wysokich temperaturach | wysoka temperatura regeneracji, aglomeracja i spiekanie, bardziej złożona konstrukcja magazynu | magazynowanie ciepła przemysłowego i odpadowego, wysokotemperaturowe TES |

* Właściwości i warunki pracy poszczególnych materiałów zależą m.in. od temperatury, ciśnienia pary wodnej, stopnia hydratacji oraz konstrukcji magazynu.

Bilans energii złoża obejmuje zmianę jego energii wewnętrznej, wymianę ciepła z instalacją, efekt cieplny reakcji termochemicznej oraz straty ciepła do otoczenia. Bilans masy opisuje natomiast transport czynnika reakcyjnego, najczęściej pary wodnej, oraz jego zużycie lub uwalnianie w wyniku zachodzącej reakcji.

W uproszczonym modelu skupionym bilans energii złoża można przedstawić w postaci Równania 1.

$$mc_p \frac{dT}{dt} = Q_{we} - Q_{str} + Q_r \quad (1)$$

gdzie:
$m$ – masa materiału reakcyjnego, kg,
$c_p$ – jego ciepło właściwe, J/kg K,
$T$ – temperatura złoża, K,
$Q_{we}$ – strumień ciepła wymieniany pomiędzy złożem a instalacją, W,
$Q_{str}$ – straty ciepła do otoczenia, W,
$Q_r$ – strumień ciepła związany z zachodzącą reakcją, W.

Jego wartość można powiązać ze stopniem przemiany materiału α i efektem cieplnym reakcji. Znak tego członu zależy od przyjętej konwencji oraz kierunku procesu – hydratacji lub dehydratacji.

Kinetykę procesów hydratacji i dehydratacji można opisać zależnością typu Arrheniusa, określającą wpływ temperatury na szybkość reakcji. W ogólnej postaci szybkość przemiany materiału można zapisać jak przedstawiono w Równaniu 2.

$$\frac{d\alpha}{dt} = Aexp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha) g\left(\frac{p_v}{p_{eq}}\right) \quad (2)$$

gdzie:
$A$ – współczynnik przedeksponencjalny, 1/s,
$E_a$ – energia aktywacji, J/mol,
$R$ – uniwersalna stała gazowa, 8,314 J/(mol·K),
$f(\alpha)$ – funkcja opisująca wpływ stopnia przemiany na szybkość reakcji, –,
$p_v$ – aktualne ciśnienie cząstkowe pary wodnej, Pa,
$p_{eq}$ – ciśnienie równowagowe, Pa.

Warunki równowagi termodynamicznej pomiędzy stanem uwodnionym i odwodnionym można natomiast opisać za pomocą zależności van't Hoffa, której ogólną postać można przedstawić jako Równanie 3.

$$\ln\left(\frac{p_{eq}}{p_0}\right) = \frac{\Delta H_r}{RT} + \frac{\Delta S_r}{R} \quad (3)$$

gdzie:
$p_0$ – ciśnienie odniesienia, Pa
$\Delta H_r$ – zmiana entalpii reakcji, J/mol,
$\Delta S_r$ – zmiana entropii reakcji, J/(mol·K).

Zależność ta umożliwia określenie równowagowego ciśnienia pary wodnej w funkcji temperatury, a tym samym wyznaczenie warunków sprzyjających hydratacji lub dehydratacji materiału.

Równania 1–3 pokazują wzajemne sprzężenie procesów cieplnych, kinetycznych i termodynamicznych. Temperatura złoża wpływa zarówno na szybkość reakcji, jak i na warunki równowagi, natomiast zachodząca reakcja powoduje wydzielanie lub pochłanianie ciepła. Jednocześnie dostępność pary wodnej oraz jej ciśnienie cząstkowe wpływają na kierunek i intensywność przemiany.

W modelu rzeczywistego magazynu konieczne jest ponadto uwzględnienie transportu ciepła i masy w złożu. Na szybkość przemiany wpływają m.in. przewodzenie ciepła w materiale, wymiana ciepła pomiędzy złożem a czynnikiem roboczym oraz transport pary wodnej do obszaru reakcji. Ograniczenia tych procesów mogą prowadzić do powstawania gradientów temperatury i wilgotności, a w konsekwencji do nierównomiernego stopnia przemiany materiału w objętości magazynu.

Znaczenie tych zjawisk potwierdzają badania Balasubramaniana i in. (2010), w których wykazano, że czas desorpcji soli hydratacyjnych zależy w istotnym stopniu od kinetyki procesu oraz warunków wymiany ciepła. Z punktu widzenia projektowania systemu magazynowania ciepła oznacza to konieczność rozróżnienia pojemności energetycznej magazynu, wyrażanej w kWh, od jego mocy cieplnej, wyrażanej w kW. Wysoka pojemność energetyczna materiału nie oznacza bowiem, że zgromadzona energia może zostać przekazana do instalacji z mocą wymaganą przez system grzewczy.

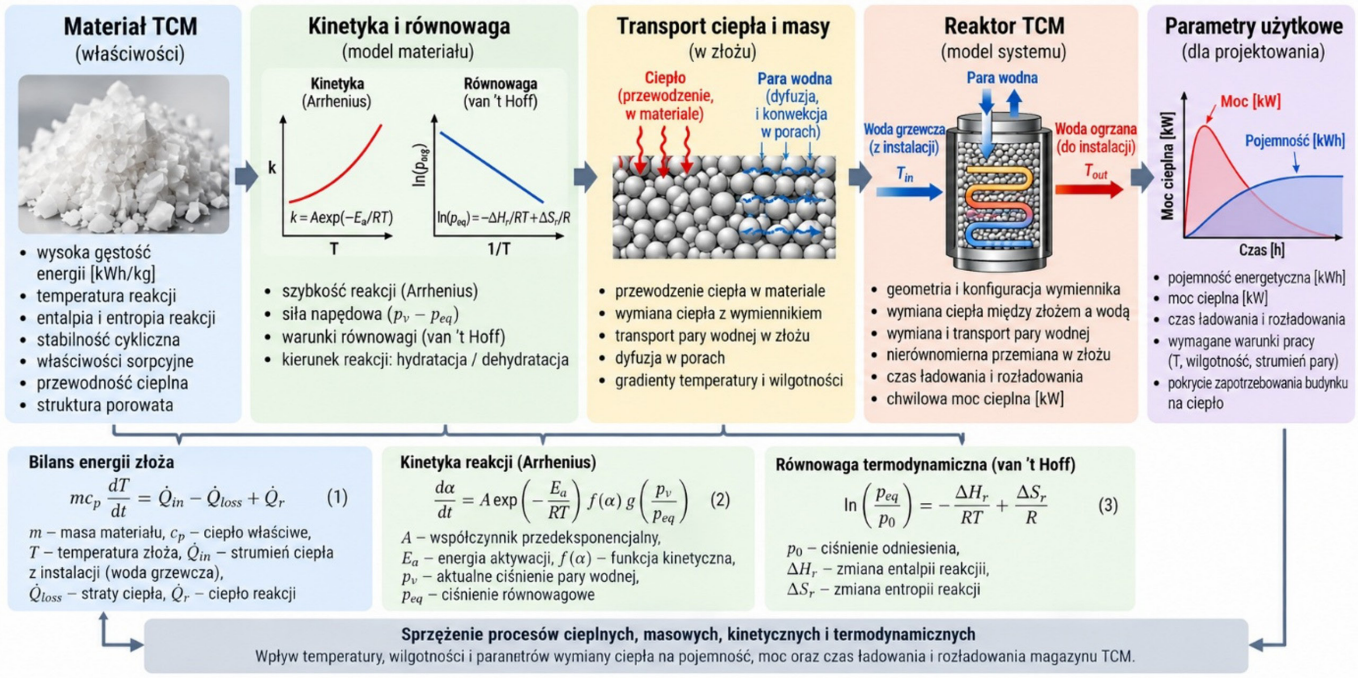
Modelowanie magazynu TCM powinno zatem umożliwiać nie tylko określenie ilości możliwej do zmagazynowania energii, lecz również przewidywanie chwilowej mocy cieplnej, czasu ładowania i rozładowania oraz warunków pracy niezbędnych do osiągnięcia wymaganego stopnia przemiany materiału. Z punktu widzenia zastosowań w budynkach szczególne znaczenie ma możliwość określenia czy magazyn o zadanej pojemności będzie w stanie dostarczyć wymaganą moc w okresach zwiększonego zapotrzebowania na ciepło.

## Integracja z instalacjami budynkowymi

Integracja magazynu termochemicznego z instalacjami budynkowymi wymaga uwzględnienia zależności między właściwościami materiału TCM, kinetyką i równowagą reakcji oraz transportem ciepła i masy. Zależności te wpływają na moc cieplną, pojemność użytkową oraz czas ładowania i rozładowania magazynu. Ich wzajemne powiązania w układzie z wodnym obiegiem wymiany ciepła przedstawiono na Rysunku 2.

### *Pompy ciepła i przesuwanie obciążenia*

Magazyn TCES/TCS może współpracować z pompą ciepła i instalacją fotowoltaiczną, umożliwiając przesunięcie w czasie wytwarzania i wykorzystania ciepła. Ładowanie magazynu może odbywać się w okresach korzystniejszych warunków pracy pompy ciepła lub zwiększonej dostępności energii elektrycznej z instalacji PV, natomiast zgromadzone ciepło może być wykorzystywane w okresach zwiększonego zapotrzebowania budynku. W takim układzie magazyn nie musi być projektowany do pokrycia całego sezonowego zapotrzebowania na ciepło, lecz może pełnić funkcję elementu zwiększającego elastyczność pracy systemu energetycznego budynku. Jego zastosowanie może umożliwiać ograniczenie szczytowego zapotrzebowania na moc cieplną, przesunięcie pracy pompy ciepła na okresy korzystniejszych warunków oraz zwiększenie wykorzystania energii elektrycznej wytwarzanej lokalnie z OZE. Z punktu widzenia projektowania takiego systemu istotna jest zatem nie tylko pojemność energetyczna magazynu (w kWh), lecz również jego dostępna moc cieplna (w kW), czas ładowania i rozładowania oraz możliwość




Rysunek 2. Schemat zależności pomiędzy właściwościami materiału TCM, procesami transportu ciepła i masy oraz parametrami użytkowymi magazynu z wodnym obiegiem wymiany ciepła. Źródło: opracowanie własne przygotowane przy użyciu SI
Figure 2. Schematic of the relationships between TCM properties, heat and mass transfer processes, and the performance parameters of a storage system with a water-based heat exchange loop. Source: authors' own work prepared with the assistance of AI

dostosowania tych parametrów do profilu zapotrzebowania budynku. TCES/TCS może być więc rozpatrywany nie tylko jako rozwiązanie do długotrwałego magazynowania ciepła, ale również jako element wspomagający zarządzanie energią oraz integrację pompy ciepła z lokalnymi źródłami OZE.

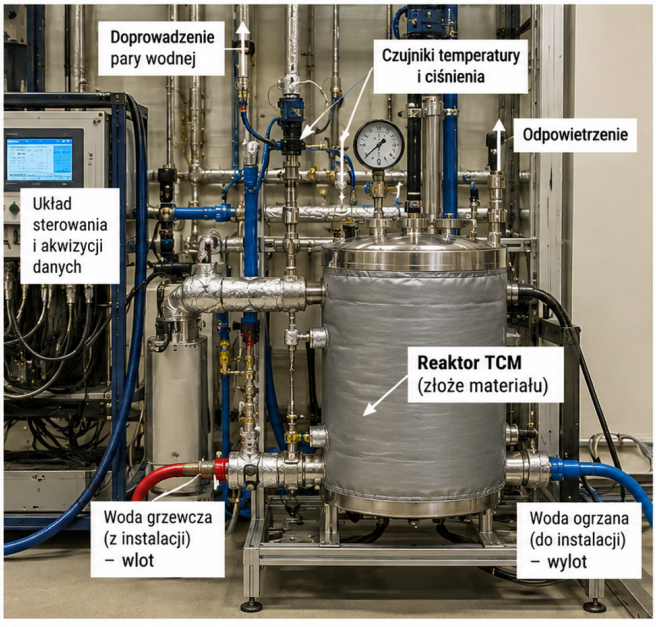
### *Systemy hybrydowe*

W zastosowaniach budynkowych szczególnie interesujące są układy hybrydowe, łączące różne technologie magazynowania ciepła. Magazyn ciepła jawnego lub utajonego może pełnić funkcję bufora krótkoterminowego, reagującego na zmiany zapotrzebowania na moc cieplną, natomiast magazyn TCES/TCS może być wykorzystywany do przechowywania energii w dłuższym okresie. Takie rozdzielenie funkcji pozwala ograniczyć wymagania dotyczące mocy magazynu termochemicznego i jednocześnie wykorzystać główną zaletę TCES/TCS, jaką jest możliwość długotrwałego magazynowania energii przy niewielkich stratach w okresie przechowywania. W układzie hybrydowym SHS/LHS odpowiada zatem przede wszystkim za krótkotrwałe bilansowanie mocy, podczas gdy TCES/TCS zwiększa dostępną pojemność magazynową w dłuższym horyzoncie czasowym.

## Dyskusja

Przeprowadzony przegląd wskazuje, że ocena przydatności materiałów TCM wyłącznie na podstawie maksymalnej gęstości magazynowania energii jest niewystarczająca. W zastosowaniach budynkowych istotne są również temperatura regeneracji, warunki dostarczania pary wodnej, możliwa do uzyskania moc cieplna, opory przepływu przez złoże, stabilność podczas wielokrotnych cykli pracy oraz koszty rozwiązania. Parametry materiałowe powinny być zatem analizowane łącznie z właściwościami złoża i charakterystyką magazynu, ponieważ dopiero na tym poziomie można ocenić rzeczywistą przydatność magazynu do współpracy z instalacją budynkową.

Przykład laboratoryjnego stanowiska badawczego umożliwiającego ocenę współpracy złoża TCM z wodnym obiegiem wymiany ciepła przedstawiono na Rysunku 3. Zaznaczono na nim główne elementy układu, w tym reaktor, doprowadzenie pary wodnej, przyłącza obiegu wodnego oraz aparaturę pomiarową i sterującą.




Rysunek 3. Przykład laboratoryjnego stanowiska badawczego magazynu termochemicznego z obiegiem wodnym wymiany ciepła. Źródło: opracowanie własne
Figure 3. Example of a laboratory test setup for a thermochemical thermal storage with a water-based heat transfer loop. Source: authors' own work

W przypadku soli hydratacyjnych szczególne znaczenie ma pogodzenie wysokiej zdolności do wiązania pary wodnej ze stabilnością materiału podczas cyklicznej pracy. Wysoka entalpia reakcji i intensywna hydratacja sprzyjają uzyskaniu dużej gęstości magazynowania energii, jednak nadmierna higroskopijność może prowadzić do delikwescencji, przemieszczania się soli w obrębie złoża oraz pogorszenia warunków transportu ciepła i masy. Jednym z kierunków ograniczania tych zjawisk jest stosowanie materiałów kompozytowych, w których sól zostaje osadzona w porowatej matrycy. Rozwijane są również rozwiązania łączące różne mechanizmy magazynowania, w tym fizysorpcję, chemisorpcję i absorpcję, których celem jest poprawa wykorzystania materiału oraz zwiększenie efektywnej gęstości magazynowania energii (Xu i in., 2019).

Istotnym kierunkiem rozwoju jest również przejście od oceny właściwości samego materiału do weryfikacji parametrów całego magazynu. Z punktu widzenia zastosowań w budynkach TCES/TCS należy rozpatrywać jako element zintegrowanego systemu energetycznego, a nie wyłącznie jako samodzielny magazyn ciepła. Jego współpraca z pompą ciepła, instalacją PV lub PVT, systemem HVAC, automatyką budynkową oraz krótkoterminowym buforem SHS/LHS może umożliwiać wykorzystanie różnych technologii magazynowania zgodnie z ich właściwościami. TCES/TCS może w takim układzie odpowiadać przede wszystkim za długotrwałe przechowywanie energii, natomiast magazyn krótkoterminowy – za szybkie bilansowanie zmian zapotrzebowania na moc. O przydatności rozwiązania decyduje więc nie pojedynczy parametr materiału, lecz dopasowanie materiału, konstrukcji magazynu i sposobu sterowania do charakterystyki źródła ciepła oraz profilu zapotrzebowania budynku.

## Wnioski

1. Termochemiczne magazynowanie ciepła umożliwia długookresowe przechowywanie energii przy bardzo małych stratach postojowych, lecz parametry materiału nie mogą być bezpośrednio utożsamiane z parametrami całego urządzenia.
2. Dla zastosowań budynkowych szczególnie interesujące są sole hydratacyjne i ich kompozyty, pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej temperatury regeneracji, kontroli wilgotności oraz stabilności w wielokrotnych cyklach.
3. Konstrukcja magazynu, transport pary wodnej i wymiana ciepła decydują o mocy magazynu. Projektowanie TCM powinno zatem obejmować równocześnie materiał, złoże, wymiennik i układ przepływowy.
4. Najbardziej realistycznym kierunkiem zastosowań w HVAC są układy hybrydowe z pompą ciepła, wentylacją mechaniczną, PV/PV-T oraz buforem wodnym lub PCM. TCM może w nich służyć do przesuwania obciążenia i magazynowania długookresowego.
5. Dalsze prace powinny koncentrować się na trwałości cyklicznej, ograniczeniu delikwescencji i aglomeracji, poprawie przewodnictwa cieplnego, standaryzacji testów oraz demonstracjach w skali rzeczywistych instalacji.

## Bibliografia

Balasubramanian, G., Ghommem, M., Hajj, M. R., Wong, W. P., Tomlin, J. A., & Puri, I. K. (2010). Modeling of thermochemical energy storage by salt hydrates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(25–26), 5700–5706. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.012

Clark, R.-J., Gholamibozanjani, G., Woods, J., Kaur, S., Odukomaiya, A., Al-Hallaj, S., & Farid, M. (2022). Experimental screening of salt hydrates for thermochemical energy storage for building heating application. *Journal of Energy Storage*, 51, 104415. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104415

Dai, L., Long, X.-F., Lou, B., & Wu, J. (2018). Thermal cycling stability of thermochemical energy storage system $Ca(OH)_2/CaO$. *Applied Thermal Engineering*, 133, 261–268. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.059

Hawwash, A. A., Hassan, H., & El Feky, K. (2020). Impact of reactor design on the thermal energy storage of thermochemical materials. *Applied Thermal Engineering*, 168, 114776. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114776

Kant, K., Shukla, A., Smeulders, D. M. J., & Rindt, C. C. M. (2021). Performance analysis of a $K_2CO_3$-based thermochemical energy storage system using a honeycomb structured heat exchanger. *Journal of Energy Storage*, 38, 102563. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102563

Molenda, M., Stengler, J., Linder, M., & Wörner, A. (2013). Reversible hydration behavior of $CaCl_2$ at high $H_2O$ partial pressures for thermochemical energy storage. *Thermochimica Acta*, 560, 76–81. https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.03.020

Rui, J., Luo, Y., Wang, M., Peng, J., & She, X. (2022). Design and performance evaluation of an innovative salt hydrates-based reactor for thermochemical energy storage. *Journal of Energy Storage*, 55, 105799. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105799

Stengler, J., Bürger, I., & Linder, M. (2020). Thermodynamic and kinetic investigations of the $SrBr_2$ hydration and dehydration reactions for thermochemical energy storage and heat transformation. *Applied Energy*, 277, 115432. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115432

Xu, J. X., Li, T. X., Chao, J. W., Yan, T. S., & Wang, R. Z. (2019). High energy-density multi-form thermochemical energy storage based on multi-step sorption processes. *Energy*, 185, 1131–1142. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.076

Yan, J., Yang, B. W., & Zhao, C. Y. (2022). Investigation of hydration/dehydration processes in a fluidized bed reactor using $MgO/Mg(OH)_2$ thermochemical energy storage system. *Solar Energy*, 231, 630–645. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.013

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiekolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. *Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.*

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja.* The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. *The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.*