



Paweł JASTRZĘBSKI¹, Piotr W. SAŁUGA²

Innowacyjne metody magazynowania ciepła

Streszczenie: Kończące się zasoby paliw kopalnych, a także niestabilność produkcji energii ze źródeł odnawialnych powodują, że zrównoważone zarządzanie produkcją i zużyciem energii stanowi jedno z naczelných wyzwań XXI wieku. Wiąże się ono również z zagrożeniami stanu środowiska przyrodniczego m. in. wskutek negatywnego wpływu energetyki na klimat. W takiej sytuacji jednym ze sposobów poprawy efektywności gospodarki energetycznej – zarówno w skali mikro (energetyka rozproszona), jak i makro (system elektroenergetyczny), mogą być innowacyjne rozwiązania technologiczne umożliwiające magazynowanie energii. Ich skuteczna implementacja pozwoli na jej gromadzenie w okresach nadprodukcji i wykorzystanie w sytuacjach niedoboru. Wyzwania te są nie do przecenienia – przed współczesną nauką staje konieczność rozwiązywania różnego rodzaju problemów związanych z magazynowaniem między innymi z zastosowaną technologią czy sterowaniem/zarządzaniem magazynami energii. Technologie magazynowania ciepła, nad którymi są prowadzone prace badawcze dotyczące zarówno magazynów opartych na medium takim jak woda, jak i magazynów wykorzystujących przemiany termochemiczne czy też materiały zmienno fazowe. Dają one szerokie możliwości zastosowania i poprawy efektywności systemów energetycznych zarówno w skali makro, jak i mikro. Oczywiście właściwości technologiczne oraz parametry ekonomiczne mają wpływ na zastosowanie wybranej technologii. W artykule przedstawiono porównanie magazynów czy sposobów magazynowania ciepła oparte na różnych materiałach z określeniem ich parametrów pracy czy kosztów eksploatacji.

Słowa kluczowe: produkcja energii, magazynowanie energii

Innovative methods of heat storage

Abstract: Finite fossil fuel resources, as well as the instability of renewable energy production, make the sustainable management of energy production and consumption some of the key challenges of the 21st century. It also involves threats to the state of the natural environment, among others due to the negative impact of energy on the climate. In such a situation, one of the methods of improving the efficiency of energy management – both on the micro (dispersed energy) and macro (power system) scale, may be innovative technological solutions that

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków;
e-mail: p.jastrze@gmail.com

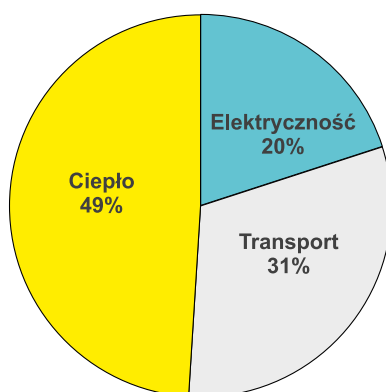
² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Kraków; e-mail: psaluga@zarz.agh.edu.pl

enable energy storage. Their effective implementation will allow it to be collected during periods of overproduction and to be used in situations of scarcity. These challenges cannot be overestimated - modern science has a challenge to solve various types of problems related to storage, including the technology used or the control/management of energy storage. Heat storage technologies, on which research works are carried out regarding both storage based on a medium such as water, as well as storage using thermochemical transformations or phase-change materials. They give a wide range of applications and improve the efficiency of energy systems on both the macro and micro scale. Of course, the technological properties and economic parameters have an impact on the application of the chosen technology. The article presents a comparison of storage parameters or heat storage methods based on different materials with specification of their work parameters or operating costs.

Keywords: energy production, energy storage

Wprowadzenie

Rozwój technologiczny i światowy wzrost gospodarczy spowodowały zwiększone zapotrzebowanie na energię – zarówno elektryczną, jak ciepło. Zwiększanie produkcji energii ograniczane jest poprzez kurczące się zasoby paliw kopalnych, jednocześnie bazująca na nich produkcja powoduje nieodwracalne negatywne skutki dla środowiska naturalnego. Konsekwencją podejmowanych działań systemowych jest przyjęcie rozwiązań mających na celu rozsądne, zrównoważone gospodarowanie zasobami paliw kopalnych, ograniczenie negatywnego wpływu energetyki na środowisko, a także racjonalizację gospodarowania energią – również poprzez ograniczenie jej zużycia. Znaczący wpływ na sytuację na rynku energetycznym ma również rozwój nowoczesnych technologii produkcji, w tym m.in. odnawialnych źródeł energii, które mają jednak istotną wadę – źródła te, pomimo zwiększania efektywności instalacji, charakteryzują się niestabilnością pracy w dużej mierze związaną z warunkami atmosferycznymi. Wyczerpujące się zasoby paliw kopalnych, niestabilność odnawialnych źródeł energii, w tym także zmieniający się popyt na energię w zależności od warunków atmosferycznych czy zapotrzebowania przemysłu, spowodowały podjęcie na szeroką skalę badań nad możliwościami magazynowania nadmiaru wyprodukowanej energii i wykorzystania jej w okresach zwiększonego zapotrzebowania (Graus i in. 2011).



Rys. 1. Struktura zużycia energii końcowej w Unii Europejskiej (Danielak 2014)

Fig. 1. Structure of final energy consumption in the European Union

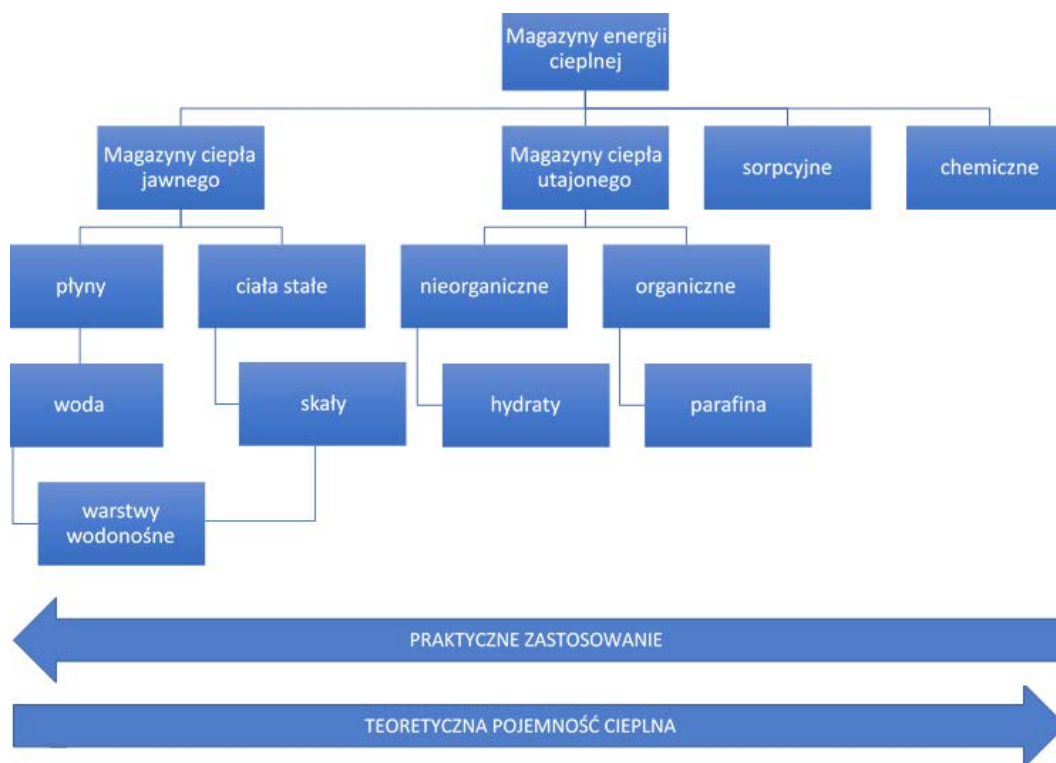
Skale problemu obrazuje między innymi zużycie energii w Unii Europejskiej, gdzie prawie połowa energii jest zużywana na potrzeby grzewcze, z czego ponad 80% to ciepło o temperaturze poniżej 25°C (Danielak 2014).

Nie inaczej sytuacja wygląda w Polsce, gdzie według Głównego Urzędu Statystycznego prawie 50% zużywanej energii stanowi ciepło (Główny Urząd Statystyczny 2017). Jest ono jednocześnie głównym rodzajem energii zużywanym przez gospodarstwa domowe – na cele ogrzewania i uzyskania ciepłej wody użytkowej gospodarstwa te konsumują ponad 80% energii.

1. Sposoby magazynowania ciepła

Magazyny energii znalazły swoje zastosowanie w układach termodynamicznych między innymi dlatego, że nie tylko zmniejszają rozbieżność pomiędzy podażą i popytem, pozwalają zaoszczędzić energię, ale także poprawiają wydajność i niezawodność systemu energetycznego.

Z tego też względu magazyny ciepła (ich klasyfikację przedstawia rysunek 2), są w chwili obecnej szeroko stosowane w skali mikro w instalacjach rozproszonych (Basecq i in. 2013),



Rys. 2. Klasyfikacja magazynów ciepła w zależności od parametrów fizycznych (Fisch i in. 1992)

Fig. 2. Classification of energy reservoirs in terms of physical parameters

w zbiorczych systemach ogrzewania, a także w sektorze komunalnym (Parra i in. 2017). Do zainteresowania zasobnikami ciepła skłoniło energetykę również rosnące zużycie energii i zmienność sytuacji rynkowej (Droste-Franke i in. 2012).

Magazyny energii można scharakteryzować następującymi parametrami:

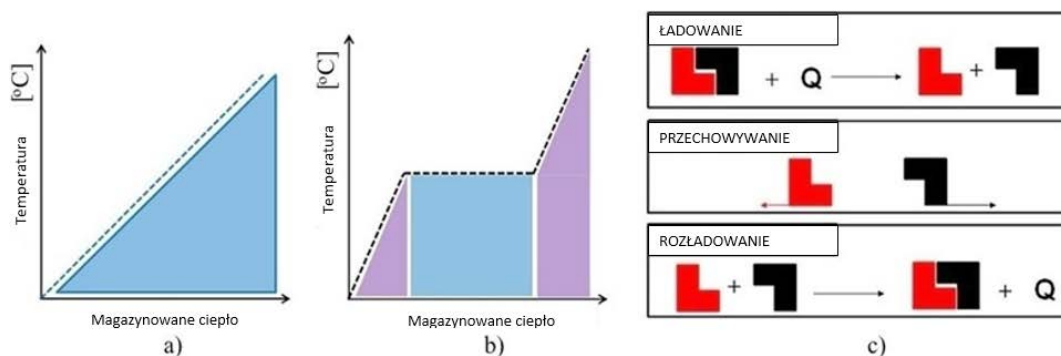
- pojemność, która określa wielkość energii, jaką możemy zmagazynować – zależy ona od sposobu przechowywania (technologii), zastosowanego medium i wielkości systemu,
- moc magazynu, czyli wielkość określająca jak szybko magazyn może zostać załadowany bądź rozładowany,
- efektywność systemu, tj. stosunek energii, jaka zostaje dostarczona użytkownikowi do energii, jaka jest potrzebna do załadowania magazynu – wielkość ta uwzględnia straty energii w okresie przechowywania, jak i straty podczas ładowania i rozładowywania akumulatora,
- okres przechowywania,
- czas ładowania i rozładowywania,
- koszt odnoszący się do wydajności – wartość ta zależy od nakładów kapitałowych i operacyjnych systemu okresu użytkowania.

Wydajność, moc oraz czas ładowania/rozładowania są zmiennymi współzależnymi, a w niektórych systemach mogą również zależeć od siebie moc i pojemność magazynu. Duża pojemność magazynowania wraz z dużą mocą rozładowania i ładowania są wartościami pożądanymi.

Obecnie w magazynach ciepła wykorzystuje się trzy metody:

- ciepło jawne,
- ciepło utajone – magazyny oparte na materiałach zmiennofazowych,
- termochemiczne przechowywanie ciepła wykorzystujące reakcje chemiczne.

Na rysunku 3 przedstawiano schematycznie metody magazynowania ciepła.



Rys. 3. Metody magazynowania ciepła
a) magazyny ciepła jawnego, b) magazyny ciepła utajonego – materiały zmiennofazowe,
c) reakcje termochemiczne (De Garcia i Cabeza 2015)

Fig. 3. Methods of thermal energy storage
a) sensible heat, b) latent heat, c) thermo-chemical reactions

1.1. Magazyny ciepła jawnego w oparciu o ciepło właściwe ciał

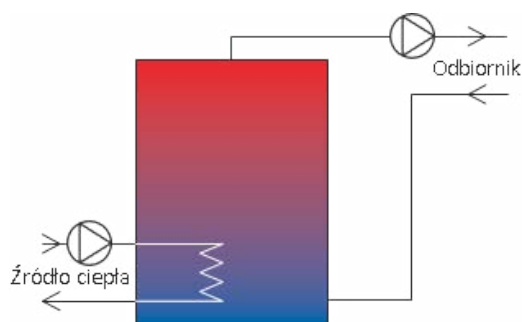
Magazyny ciepła jawnego przechowują energię cieplną poprzez ogrzewanie lub chłodzenie materiału magazynowanego. Magazyny te wykorzystują pojemność cieplną i zmianę temperatury materiału podczas procesów ładowania i rozładowywania. Ilość zmagazynowanego ciepła zależy od masy i ciepła właściwego medium, jakie zostało wykorzystane do magazynowania oraz od różnicy temperatur pomiędzy stanem początkowym i końcowym (Avghad i in. 2016).

Najbardziej popularnym medium wykorzystywanym w magazynach ciepła jawnego jest woda, ze względu na wysoką pojemność cieplną i niski koszt. Wodę stosuje się w magazynach pracujących w zakresie temperatur od 20 do 70°C

Niestety woda jako medium ma też wady:

- niską gęstość magazynowania energii (~100 kJ/kg),
- konieczność stosowania dobrej izolacji w celu ograniczenia (minimalizacji) strat ciepła,
- nieizotermiczne zachowanie medium podczas ładowania i rozładowywania akumulatora.

Poniżej przedstawiono schemat typowego magazynu ciepła pracującego w oparciu o wodę jako medium (rys. 4).



Rys. 4. Wodny zasobnik ciepła jawnego

Fig. 4. Water reservoir of sensible heat

1.2. Termochemiczne magazyny ciepła

Termochemiczne magazyny ciepła pracują w oparciu o odwracalną reakcję chemiczną wykorzystywaną dla przechowywania i uwalniania zawartej w określonych substancjach energii. Zasada chemicznej akumulacji ciepła wykorzystuje ciepło endotermicznych reakcji. Oznacza to, że związki chemiczne przechodzą w wyższy stan energetyczny (Danielak 2014). W wyniku reakcji powstające substancje są od siebie fizycznie oddzielone. Z tego powodu czas uwalniania zakumulowanej energii w reakcji egzotermicznej może być dowolnie wybrany. Zaletą magazynów termochemicznych jest brak konieczności ich izolowania.

Ze względu na wysoką gęstość magazynowania ciepła (~2 MJ/kg), która może być teoretycznie do 10 razy wyższa niż wody, brak lub małe straty ciepła, a także długoterminowy okres przechowywania (magazynowania) energii akumulatory takie są przedmiotem badań, natomiast nie zostały jeszcze wdrożone w pełni komercyjnie, głównie ze względu na wysokie koszty zastosowania oraz złożoność metody.

TABELA 1. Fizyczne właściwości wybranych związków chemicznych stosowanych w zasobnikach ciepła utajonego (Wojciechowski 2017)

TABLE 1. Physical properties of selected chemical compounds used in latent heat storage

Nazwa związku	Wzór chemiczny	Gęstość [kg/m ³]	Temperatura topnienia [°C]	Ciepło topnienia [kJ/kg]
Sól glauberska	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	1 460	32	250
Soda krystaliczna	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	1 440	34	250
Węglan sodowy	Na ₂ CO ₃ · 7H ₂ O	1 510	32	265
Chlorek żelazowy	FeCl ₃ · 6H ₂ O	1 620	37	220
Tiosiarczan sodowy	Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O	1 650	48,5	100
Octan sodowy	Na ₂ C ₂ H ₃ O ₂ · 3H ₂ O	1 450	58	265
Ortofosforan trójsodowy	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	1 620	75	190
Wosk parafinowy	C _n H _(2n+2)	785	50	210
Kwas stearynowy	C ₁₇ H ₃₅ · COOH	1 430	71	200

TABELA 2. Porównanie organicznych i nieorganicznych materiałów zmiennofazowych (Belka 2014)

TABLE 2. Comparison of organic and inorganic phase change materials

Organiczne	Nieorganiczne
Zalety	Zalety
Brak korozji	Większa energia przemiany fazowej
Brak lub niskie przechładzanie	Wyższa przewodność cieplna
Chemiczna i termiczna stabilność	Niepalność
Wady	Wady
Niższa energia przemiany fazowej	Przechładzanie
Palność	Korozja
Niska przewodność cieplna	Separacja składników
Duże zmiany objętości	Brak stabilności termicznej, segregacja

1.3. Magazynowanie ciepła utajonego

Magazyny ciepła wykorzystujące ciepło utajone są jednymi z najbardziej obiecujących metod magazynowania energii. Jest ona magazynowana w materiałach zmieniających fazę (PCM) poprzez zmianę stanu skupienia medium i przechodzenie z fazy jednej w drugą.

Wykorzystywanie materiałów zmieniających fazę jako medium w akumulatorach ciepła jest atrakcyjne ze względu na wysoką pojemność magazynowania przy niewielkich wahaniami temperatury. W celu gromadzenia ciepła można wykorzystać przemiany faz ciała stałe–ciecz, ciecz–gaz, ciało stałe–gaz i ciało stałe–ciało stałe (Avghad i in. 2016).

Jako medium może wykorzystywać substancje organiczne, jak i nieorganiczne.

1.4. Zestawienie parametrów magazynów ciepła

Omówione powyżej metody (technologie) magazynowania pod kątem ich charakterystycznych parametrów przedstawiono w tabeli 3.

TABELA 3. Typowe parametry magazynów ciepła (Hauer 2013)

TABLE 3. Typical parameters of thermal energy storage

Technologia magazynowania	Pojemność [kWh/t]	Moc [MW]	Wydajność [%]	Okres przechowywania	Koszt [euro/kWh]
Magazyny ciepła jawnego (np. woda)	10–50	0,001–10,0	50–90	dni/miesiące	0,1–10
Magazyny oparte na materiałach zmiennofazowych	50–150	0,001–1,0	75–90	godziny/miesiące	10–50
Magazyny wykorzystujące reakcje termochemiczne	120–250	0,01–1,0	75–100	godziny/dni	8–100

Magazyny ciepła jawnego, np. pracujące na podstawie wody jako medium, są najtańszym rozwiązaniem, jeżeli chodzi o nakłady inwestycyjne, jednakże charakteryzują się niską pojemnością cieplną. Z kolei przy wykorzystaniu reakcji termochemicznych otrzymujemy magazyny ciepła o największej pojemności, ale przy stosunkowo wysokich kosztach i ograniczonym okresie przechowywania energii.

Podsumowanie

Dostępne metody magazynowania ciepła pozwalają na szereg zastosowań akumulatorów ciepła. Możliwości magazynowania ciepła odpadowego czy też energii słonecznej, której

często nie jesteśmy w stanie wykorzystać w momencie jej największej produkcji, pozwalają na minimalizowanie strat energii, a także na wykorzystanie zgromadzonej energii w okresach jej deficytu czy też braku możliwości produkcji. Zastosowanie akumulatorów ciepła w domowych instalacjach (systemach) energetycznych nie jest niczym nowym. Systemy oparte na kolektorach słonecznych już teraz wykorzystują zasobniki gorącej wody tak, aby użytkownik miał natychmiastowy dostęp do ciepłej wody użytkowej. Dużo mniej popularne są systemy wykorzystujące energię słoneczną gromadzoną w okresie letnim i wykorzystywaną w okresie zimowym. Istnieją instalacje wykorzystujące podziemne zasobniki ciepła pozwalające na ogrzanie (z wykorzystaniem pomp ciepła) całych zespołów urbanistycznych jak np. Drake Landing Solar Community w Kanadzie. Wykorzystanie różnych technologii, szczególnie na podstawie materiałów zmiennofazowych pozwoli na poprawę efektywności/wydajności magazynów energii, a przez to systemów energetycznych. Istotną kwestią, poza samym zastosowaniem wybranej technologii magazynowania, jest system sterowania, metody prognozowania zapotrzebowania czy produkcji energii tak, aby wydajność systemu była jak największa przy zapewnieniu optymalnych nakładów inwestycyjnych i operacyjnych w okresie eksploatacji. Nie bez znaczenia jest fakt, że wykorzystanie magazynów energii pozwala na efektywniejsze wykorzystanie źródeł energii i to zarówno kopalnych, jak i odnawialnych, a to z kolei zmniejsza uciążliwość energetyki dla środowiska.

Literatura

- Avghad i in. 2016 – Avghad, S.N., Keche, A.J. i Kousal, A. 2016. Thermal Energy Storage: A Review. *IOSR- Journal of Mechanical and civil engineering* 13(3), s. 72–77.
- Basecq, V. i in. 2013. Short-term storage systems of thermal energy for buildings: a review. *Advances in Building Energy Research (ABER)* 7(1), s. 66–119.
- Belka, W. 2014. *Wykorzystanie betonu jako masy termicznej w budynkach efektywnych energetycznie*. Warszawa. Danielak, M. 2014. Nowe możliwości akumulacji ciepła i chłodu. *Polski Instalator* s. 38–40.
- De Garcia, A. i Cabeza, C.F. 2015. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy Build* 103, s. 414–419.
- Droste-Franke i in. 2012 – Droste-Franke, B., Paal, B.P. i Rehtanz, C. 2012. *Balancing Renewable Electricity: Energy Storage, Demand Side Management, and Network Extension from an Interdisciplinary Perspective*. Główny Urząd Statystyczny 2017. *Energia 2017*, s. 28.
- Graus i in. 2011 – Graus, W., Blomen, E. i Worrell, E. 2011. Global energy efficiency improvement in the long term: A demand- and supply-side perspective. *Energy Efficiency* 4(3), s. 435–463.
- Hauer, A. 2013. International Renewable Energy Agency, Technology Brief 4 (E17). Thermal Energy Storage, A-ETSAP and IRENA, January.
- Nuytten, T. i in. 2013. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating. *Applied Energy* 104, s. 583–591.
- Parra, D. i in. 2017. An interdisciplinary review of energy storage for communities: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 79 (May), s. 730–749.
- Wojciechowski, H. 2017. *Technologie magazynowania energii*. Cz. I, s. 20–27.