



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Inżynierii Środowiska, Geodezji
i Energetyki Odnawialnej

Kierunek studiów:
Odnawialne Źródła Energii

Katarzyna Stokowiec

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

MAGAZYNOWANIE ENERGII

opracowane w ramach realizacji Projektu
**„Dostosowanie kształcenia
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb
współczesnej gospodarki”**
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2025





Spis treści

1. Metody magazynowania ciepła	2
1.1. Krótkoterminowe magazyny ciepła w budownictwie mieszkaniowym	2
1.2. Magazyny ciepła w MŚP, przemyśle i ciepłownictwie	4
1.3. Pasywne systemy magazynowania energii w budynkach	12
2. Metodyka magazynowania chłodu	13
3. Magazynowanie energii przy współpracy z OZE wraz z przykładami	18
3.1. Instalacje solarne termiczne	18
3.2. Magazynowanie energii elektrycznej oraz instalacje fotowoltaiczne	26
Spis literatury	31



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Metody magazynowania ciepła

1.1. Krótkoterminowe magazyny ciepła w budownictwie mieszkaniowym

Magazynowanie energii termalnej w budownictwie mieszkalnym odbywa się głównie w krótkim okresie czasu (kilka godzin) poprzez zasobniki akumulujące ciepło jawne, a substancją magazynującą jest przede wszystkim woda. Ma ona szereg zalet związanych chociażby z dostępnością, niskimi kosztami, wysokim ciepłem właściwym (4,19 kJ/kgK), jak również możliwością wykorzystania jej zarówno w celu akumulacji jak i w celu rozprowadzenia zgromadzonego ciepła. W takim układzie stosowane są odpowiednie stalowe zbiorniki przechowujące energię termalną w ilości przekraczającej maksymalnie dwukrotnie dzienne zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową (c.w.u.) – zasobniki c.w.u. Posiadają one odpowiedni stopień smukłości, czyli stosunek wysokości do średnicy w przedziale $H/D = 3 - 4$, dzięki czemu wewnątrz występuje stratyfikacja termiczna, czyli posiadają tzw. termoklinę. Poza kształtem zbiornika, na wystąpienie stratyfikacji termicznej wpływ ma również poprawne rozprowadzenie wody do niego dopływającej. Drugim rozwiązaniem są zasobniki z pełnym zmieszaniem wody, co ma miejsce w wyniku pracy wykonanej przez element mechaniczny umiejscowiony wewnątrz zbiornika.

Wykorzystując zależności na ilość zmagazynowanej energii w czasie zarówno dla zbiornika z idealną stratyfikacją termiczną (1) jak i z pełnym zmieszaniem (2), można dokonać porównania ich pracy.

$$Q_{str} = \dot{m} \cdot (Cp_1 \cdot t_1 - Cp_2 \cdot t_2) \cdot \tau, \quad J \quad (1)$$

$$Q_{zm} = \dot{m} \cdot (Cp_1 \cdot t_1 - Cp_2 \cdot t_2) \cdot [1 - \exp(-\tau \frac{\dot{m}}{M})], \quad J \quad (2)$$

gdzie:

$\dot{m}$ – strumień masowy przepływającej wody w przewodzie zasilającym zasobnik, kg/s

t_1 – temperatura wody w górnej części zbiornika, °C

t_2 – temperatura wody w dolnej części zbiornika, °C

Cp_1 – ciepło właściwe wody o temperaturze t_1 , J/kgK

Cp_2 – ciepło właściwe wody o temperaturze t_2 , J/kgK

τ – czas, s

M – masa wody w zbiorniku, kg

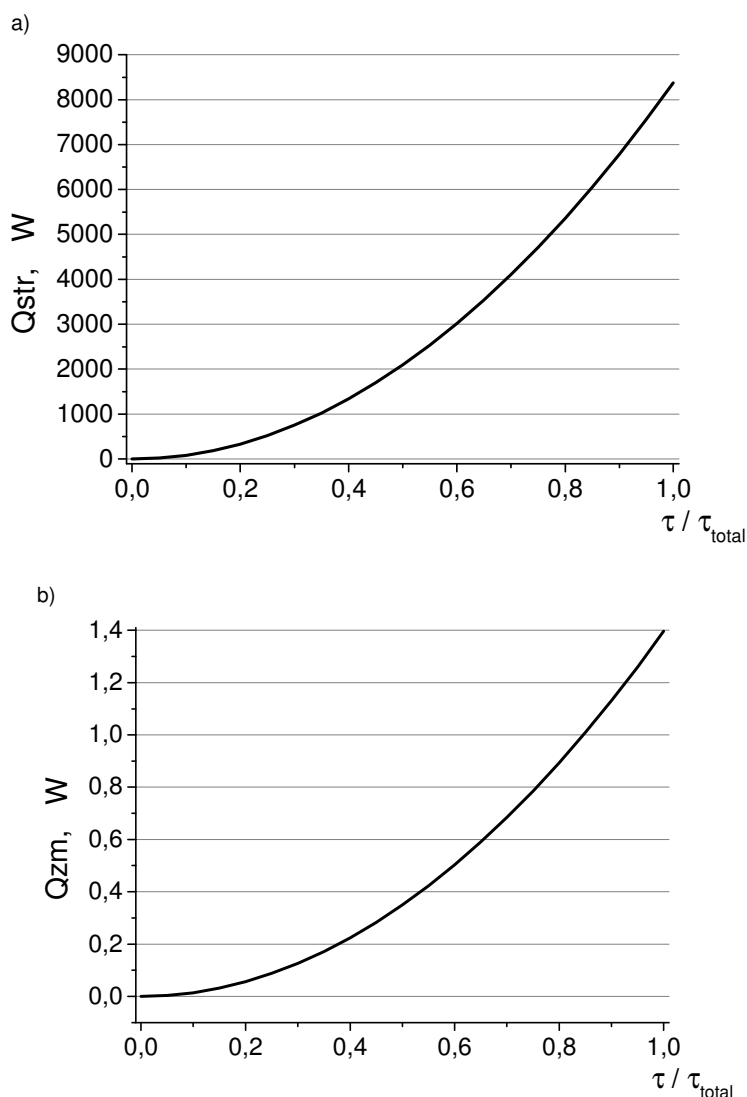
Zakładając objętość zasobnika wynoszącą 300 litrów oraz 4 użytkowników ciepłej wody użytkowej, z czego wynikał przepływ masowy c.w.u., porównano na rysunku 1 pracę zasobnika (a) ze stratyfikacją (Q_{str}) i (b) ze zmieszaniem (Q_{zm}). Masa wody

Strona 2 z 33



wewnątrz zasobnika wynika wprost z jego objętości oraz gęstości wody jako czynnika magazynującego.

[Tekst alternatywny. Wykres dwuwymiarowy. Opis osi X: czas ładowania zasobnika w odniesieniu do czasu niezbędnego do pełnego naładowania, opis osi Y – strumień energii zmagazynowanej w zasobniku. Na wykresach znajdują się krzywe, która pokazują wzrost strumienia energii zmagazynowanej w zasobniku z idealną stratyfikacją i z pełnym zmieszaniem wraz z upływem czasu ich ładowania.]



Rys. 1. Energia zmagazynowania w zasobniku (a) z idealną stratyfikacją i (b) z pełnym zmieszaniem w funkcji czasu.

Powyższy wykres oddaje różnice w trybie pracy obu zasobników oraz pozwala określić magazynowaną przez nie energię cieplną, choć odnosi się do czasu bezwymiarowego (kolejny krok czasowy – τ w odniesieniu do czasu uzyskania



wymaganej temperatury na instalacji ciepłej wody użytkowej, tj. $50^{\circ}\text{C} = \tau_{\text{total}}$). Zasobnik ze stratyfikacją zmagazynuje więcej energii, stąd też to rozwiązanie jest spotykane częściej.

Innym rozwiązaniem zbiorników magazynujących energię termalną przy wykorzystaniu wody jako medium są zasobniki kombi: łączą funkcję zasobnika ciepłej wody użytkowej oraz centralnego ogrzewania. Tego typu układy posiadają główny magazyn energii w postaci zbiornika c.o. gromadzącego wodę grzewczą ogrzewaną metodą pośrednią (poprzez węžownicę wymiennika ciepła) energią solarną i ewentualnie dogrzaną w układzie bezpośrednim.

Dla każdego zasobnika magazynującego wyróżniamy 3 typy pojemności:

- pojemność robocza – pojemność wody w strefie działania dodatkowego systemu ogrzewania ciepłej wody użytkowej (np. węžownica c.o. / grzałka elektryczna) o wymaganej temperaturze roboczej; dogrzewana przy braku wystarczającego uzysku solarnego lub nagłego zwiększenia zużycia energii,
- pojemność rezerwowa – pojemność, jaką posiada zasobnik poniżej strefy pojemności roboczej; utrzymanie dużej pojemności rezerwowej pozwala na osiągnięcie maksymalnego stopnia sprawności instalacji oraz dużych uzysków ciepła,
- pojemność martwa – obszar poniżej dolnej krawędzi najniższego wymiennika ciepła, w którym znajduje się niepodgrzewana warstwa wody; nie wykorzystywana przy podgrzewie ciepłej wody użytkowej.

1.2. Magazyny ciepła w MŚP, przemyśle i ciepłownictwie

W budownictwie usługowym, hotelarskim czy kubaturowym (traktowanym jako MŚP – małe i średnie przedsiębiorstwa) magazyny ciepła opierają się głównie na procesach jawnych, przede wszystkim wykorzystaniu wody jako czynnika. Takie zasobniki są wykonywane ze stali lub kompozytów. Mogą być one łączone w baterie. Akumulatory zmiennofazowe nie stanowią popularnego rozwiązania ze względu na swoją cenę. Natomiast magazyny gruntowe charakteryzują się trudnościami w wykonawstwie ze względu na wymaganą dostępną powierzchnię działki niezabudowanej i niezagospodarowanej oraz ze względu na istniejące uzbrojenie podziemne terenu.

Rozwiązanie problemu mogą stanowić zasobniki mobilne energii termalnej bazujące na przemianach fazowych. W tym celu opracowywane są rozwiązania chociażby przez Instytut Technologii Paliw i Energii w Zabrze, które zostały przedstawione podczas wizyty studyjnej w tym ośrodku realizowanej w ramach Projektu „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki” FERS.01.05-IP.08-0234/23 w dniu 25.02.2025. Uczestnikami spotkania ze strony Wydziału Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki Odnawialnej



Politechniki Świętokrzyskiej byli dr hab. inż. Łukasz Orman, prof. PŚk, dr inż. Katarzyna Stokowiec oraz dr inż. Sylwia Wciślik. Realizowane przez Instytut Technologii Paliw i Energii w Zabrzu badania mają na celu wprowadzenie rozwiązań magazynujących energię ciepłą w mikrokapsułkach organicznych substancji zmienno fazowych (parafiny) znajdujących się w zbiorniku, który można transportować pomiędzy różnymi regionami, zachowując przy okazji uzyskaną ilość zmagazynowanej energii, czyli bez strat termicznych. Dodatkowo prowadzone są prace nad szybkim i efektywnym opróżnianiem zasobnika z mikrokapsulek PCM (Phase Change Material).

Inne rozwiązanie stanowią zewnętrzne magazyny ciepła w wariancie naziemnym i podziemnym o potencjale magazynowania zarówno ciepła jak i chłodu. Oferowane są one pod nazwą ThermOS – Thermal Optimal System przez firmę ConnectPoint jako produkt seryjny i prefabrykowany (<https://connectpoint.eu/products/>). Akumulatory współpracują z powietrzną pompą ciepła do celów grzewczych i chłodniczych oraz podgrzewaczem ciepłej wody użytkowej.

Przemysł w znacznej mierze opiera się na całodobowym wykorzystaniu energii cieplnej, często w postaci pary technologicznej. Magazyny ciepła wykorzystywane są do przechowywania niskotemperaturowego ciepła z pomp ciepła czy też kolektorów słonecznych, ale również wielokrotnie ciepła odpadowego, które może być ciepłem wysokotemperaturowym. Istotne zagadnienie dla przemysłu stanowią również wysokie wymagania co do niezawodności dostaw czynnika grzejącego. Akumulację energii termalnej z punktu widzenia parametru jakim jest temperatura magazynowania możemy podzielić na:

- niska < 500°C
- średnia > 500°C
- wysoka > 900°C
- wysoka + > 1600°C
- wysoka ++ > 2400°C.

Przykłady substancji możliwych do wykorzystania w celu magazynowania ciepła wysokotemperaturowego wraz z przypisanym potencjalnym czasem magazynowania zestawiono w Tabeli 1. Zostały one podzielone na substancje akumulujące energię poprzez procesy podwyższania jedynie temperatury (czyli odbierające i przechowujące ciepło jawne) oraz na takie, które pochłaniają energię w wyniku przemiany fazowej ze stanu stałego na ciekły (czyli przy wykorzystaniu wielkości ich ciepła utajonego). Osobną grupę stanowią też procesy magazynowania energii termalnej poprzez wykorzystanie odpowiednich reakcji chemicznych, które charakteryzują się brakiem strat termicznych (ich sprawność sięga nawet 100%) oraz długoterminowym przechowywaniem energii, co związane jest z separacją produktów procesu.



Jak widać w tabeli większość spośród przytoczonych substancji posiada średni zakres temperaturowy magazynowanie energii (500-900°C) i posiada zdolność przechowywania zakumulowanego ciepła w krótkim okresie czasu (godziny). Tylko niektóre materiały pozwalają na akumulację ciepła w przedziałach kilkutygodniowych.

Tabela 1. Parametry substancji wykorzystywanych
do wysokotemperaturowego magazynowania energii.

(źródło: opracowanie własne na podstawie

<https://ieo.pl/dokumenty/aktualnosci/06092024/raport%20mapa%20drogowa%20dla%20rynku%20magazynu%C3%B3w%20ciep%C5%82a%20w%20polsce.pdf>)

Nazwa substancji	Temperatura magazynowania energii	Czas magazynowania
Ciepło jawne		
Grafit	Wysoka ++	Godziny, dni
Ceramika*, krzemionka, piasek	Średnia, wysoka, wysoka +	Godziny, dni
Stopione sole*	Średnia, wysoka	Godziny, dni
Beton*	Średnia, wysoka	Godziny, dni, tygodnie
Skała*	Średnia, wysoka	Godziny, dni
Stal	Średnia	Godziny, dni, tygodnie
Ciepło utajone		
Mikrokapsułki metali**	Średnia, wysoka, wysoka	Godziny, dni
Sole nieorganiczne i mieszaniny eutektyczne**	Wysoka	Godziny, dni
Sód**	Średnia, wysoka	Godziny, dni
Inne ciekłe metale**	Średnia	Godziny, dni
Stopiony stop aluminium**	Średnia	Godziny, dni
Mieszanki słonowodne**	Średnia	Godziny, dni
Ciepło termochemiczne		
Reakcje termochemiczne***	Średnia, wysoka	Dni, tygodnie

* Zastosowanie przemysłowe w zakresie sprawności 50-90%

** Zastosowanie przemysłowe i mieszkaniowe w zakresie sprawności 50-90%

*** Zastosowanie przemysłowe i mieszkaniowe w zakresie sprawności 50-100%

Spośród zaprezentowanych rozwiązań stopione sole znalazły swoje zastosowanie w ciepłowniach opartych na skoncentrowanej energii słonecznej (realizowanych poprzez skupianie promieniowania słonecznego za pomocą zwierciadeł w wybranym punkcie). Jednakże magazyny zmiennofazowe są zazwyczaj bardziej kompaktowe niż magazyny soli stopionej, ale ich koszty są większe. Głównymi wyzwaniem dla przedstawionych technologii jest:

- ograniczenie strat ciepła (poprawienie izolacji w warunkach wysokiej temperatury),
- zwiększenie niezawodności i ciągłości pracy,



- zwiększenie szybkości wymiany oraz zmniejszenie kosztów produkcji.

Mimo tych niezaprzeczalnych ograniczeń, technologie magazynowania energii wysokotemperaturowej znajdują swoje zastosowanie w:

- wykorzystaniu skoncentrowanej energii słonecznej,
- odzysku ciepła odpadowego z przemysłu,
- zwiększeniu elastyczności hybrydowych konwencjonalnych ciepłowni i elektrociepłowni,
- uzyskaniu wysokich temperatur dla systemów sprężonego powietrza,
- uzyskaniu elastyczności procesów przemysłowych i efektywności energetycznej w przemyśle szklarskim, cementowym i stalowym.

W zastosowaniach przemysłowych możemy się spotkać z technologią Power to Heat, w której wykorzystuje się współpracę kotłów elektrodowych zasilanych energią elektryczną oraz magazynów ciepła. Rozwiązania takie mogą też być wykorzystywane we współpracy z pompami ciepła. W Polsce występują jednostkowe przykłady wielkoskalowego zastosowania technologii Power to Heat (Potencjał wykorzystania technologii Power to Heat w transformacji sektora ciepłownictwa systemowego w Polsce):

- kotły elektrodowe zainstalowane przez Grupę PGE w Elektrociepłowni Gdańsk (dwa kotły elektrodowe o mocy 35 MWt każdy)
- projekt Szlachęcin zrealizowany przez Grupę Veolia (układ pompy ciepła o mocy 1,7MW).

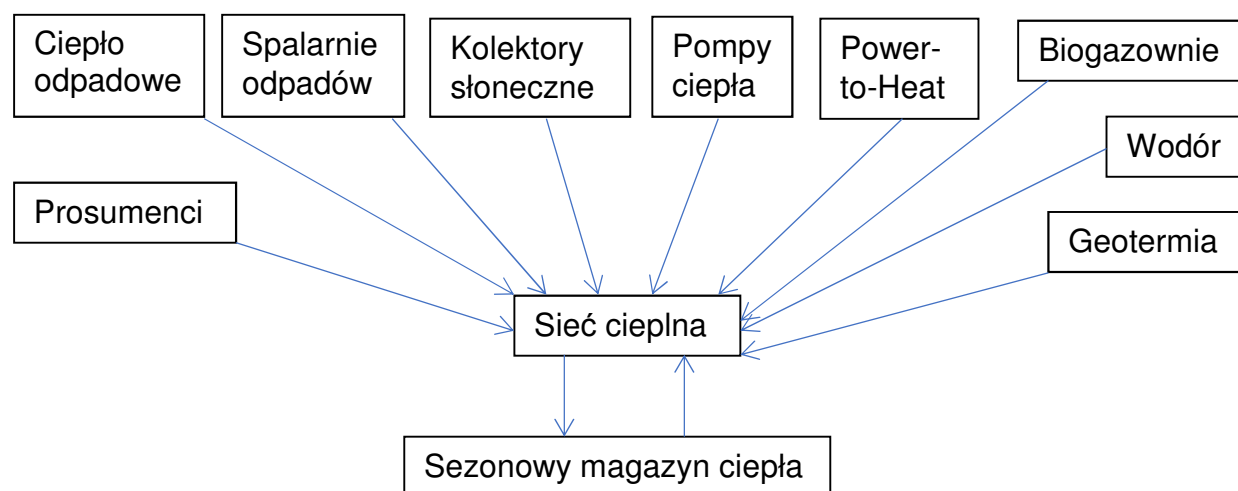
Technologie Power to Heat, zarówno z uwzględnieniem pracy pompy ciepła, jak i kotłów elektrodowych, w układzie z magazynami ciepła, stanowią jedno z kluczowych rozwiązań pozwalających na dekarbonizację systemów ciepłowniczych w sposób efektywny ekonomicznie. W związku z tym powinny być rozwijane i wykorzystywane na szeroką skalę. Tym bardziej, że dodatkowo umożliwiają transformację sieci ciepłowniczych w kierunku zgodnym z kryteriami efektywnego systemu ciepłowniczego. Ustawa Prawo energetyczne (Obwieszczenie, 2024) uznaje za system ciepłowniczy efektywny energetycznie taki, w którym do produkcji ciepła lub chłodu wykorzystuje się co najmniej w 50% odnawialne źródła energii lub w 50% ciepło odpadowe lub w 75% ciepło pochodzące z kogeneracji lub w 50% wykorzystuje się połączenie ww. energii i ciepła.

Współpraca pomp ciepła oraz kotłów elektrodowych z magazynami ciepła w technologii Power to Heat stanowi jako pełny system formę komplementarną dla systemu ciepłowniczego. Pompy ciepła posiadają potencjał do zastąpienia stosowanych jednostek wytwórczych pracujących w oparciu o paliwa węglowe, będących już wyeksploatowanymi źródłami ciepła. Jednakże ich zastosowanie jest ograniczone: pompy ciepła stanowią źródła ciepła niskotemperaturowego (do ok. 80°C). Natomiast sieci ciepłownicze w sezonie grzewczym pracują na wysokich

temperaturach czynnika (ponad 100°C). Proces wymiany sieci ciepłowniczych na niskotemperaturowe związany jest z ponoszeniem znacznych nakładów finansowych oraz utrudnieniami w ich pracy (system ciepłowniczy pracuje także poza sezonem grzewczym, dostarczając energię ciepłą na potrzeby ciepłej wody użytkowej), dlatego też należałoby dodatkowo podgrzewać czynnik grzewczy. Stąd też jako uzupełnienie można zastosować kotły elektrodowe, które mogą ogrzać wodę sieciową nawet do 160°C. W związku z tym obie technologie Power to Heat powinny być traktowane w takim układzie jako komplementarne i równorzędne.

W przypadku systemu ciepłowniczego najbardziej pożądane są sezonowe magazyny energii, szczególnie przy wykorzystaniu energii solarnej. Jednakże każdy system ciepłowniczy powinien w sposób racjonalny wykorzystać wszystkie potencjalne źródła ciepła występujące w otoczeniu, w tym dostępne ciepło odpadowe. Biorąc pod uwagę, że każde z tych źródeł pracuje w odmienny sposób, sezonowy magazyn energii pozwala na ich agregację i redystrybucję energii w okresach zapotrzebowania na nią, co przedstawia Rysunek 2.

[Tekst alternatywny. Schemat współpracy sieci ciepłowniczej z sezonowymi magazynami ciepła z jednej strony i ze źródłami ciepła z drugiej (ciepło odpadowe, instalacje OZE, spalarnie odpadów).]



Rys. 2. Magazyny sezonowe w systemie ciepłowniczym.

Jak widać współpraca sezonowego magazynu ciepła z siecią ciepłą nie musi się opierać jedynie na odnawialnych źródłach energii. Może również dotyczyć szeroko pojętego ciepła odpadowego, dla którego również w niektórych przypadkach możemy się spodziewać sezonowości dostaw.

Wykorzystywanie w systemie ciepłowniczym produkcji ciepła przez kotły na paliwa stałe także może być związane z koniecznością magazynowania energii cieplnej. W związku z podwyższanymi standardami energetycznymi dla kotłów na paliwa stałe



(Obwieszczenie, 2022) dotyczącymi z jednej strony obniżenia emisji zanieczyszczeń a z drugiej minimalnej sprawności cieplnej, wprowadzona została ich klasyfikacja. Producenci kotłów zalecają w związku z tym pracę kotłów z mocą nominalną (a nie sterowalną) i współpracę z magazynem ciepła (buforem). Pozwala to na obniżenie kosztów eksploatacyjnych (kosztów paliwa), uzyskując dodatkowo większą elastyczność źródła na zmiany zapotrzebowania na ciepło.

Dlatego też w ciepłownictwie systemowym mogą być wykorzystywane różne rozwiązania pozwalające na magazynowanie energii. Ich porównanie przedstawiono w tabelach poniżej. W Tabeli 2 możemy zapoznać się z ich charakterystyką opisową a w Tabeli 3 z parametrami energetycznymi.

Tabela 2. Charakterystyka możliwości magazynowania energii w ciepłownictwie.

Typ	TTES Tank Thermal Energy Storage	PTES Pit Thermal Energy Storage	BTES Borehole Thermal Energy Storage	ATES Aquifer Thermal Energy Storage
Oznaczenie w języku polskim	Magazynowanie energii termalnej w zbiornikach	Magazynowanie energii termalnej zasobniku zagłębionym w gruncie	Magazynowanie energii termalnej w gruncie	Magazynowanie energii termalnej w warstwach wodonośnych
Czynnik	Woda	Woda lub woda + żwir	Gleba otaczająca odwierty	Wody podziemne
Wymagania geologiczne	Stabilne warunki gruntowe, brak wód gruntowych, głębokość 5-15 m		Wysoka pojemność cieplna gruntu, naturalny przepływ wód gruntowych < 1 m/s, głębokość 30-100 m	Wysoka wydajność warstwy wodonośnej
Przeznaczenie	Magazynowanie krótkoterminowe	Magazynowanie sezonowe dla produkcji powyżej 20 000 MWh		Magazynowanie sezonowe: ciepło + chłód
Zalety	Wysoka pojemność ładowania/ rozładowania		Szeroka możliwość stosowania	Zapewnienie ciepła i chłodu
Wady	Wysokie koszty inwestycji	Wymagana duża powierzchnia	Niska pojemność ładowania / rozładowania	Niskie temperatury



Tabela 3. Parametry charakterystyczne magazynów energii w ciepłownictwie.

Typ	TTES Tank Thermal Energy Storage	PTES Pit Thermal Energy Storage	BTES Borehole Thermal Energy Storage	ATES Aquifer Thermal Energy Storage
Pojemność, kWh/m ³	60-80	60-80 / 30-50 (woda / woda- żwir)	15-30	30-40
Temperatura czynnika, °C	5-95	5-95	5-90	7-18
Sprawność, %	90	90	40-60	70-100 (chłód) 50-90 (ciepło)

Jak widać stosowane rozwiązania różnią się od siebie nie tylko czynnikiem magazynującym energię, czy też wymaganiami geologicznymi, ale także pojemnością cieplną odniesioną do jednostkowej objętości magazynu.

Powyższe parametry można wykorzystać do oszacowania potencjału magazynowania energii termalnej przez Elektrociepłownię Kielce (EC Kielce). Stanowi ona oddział PGE Energia Ciepła i jest największym producentem energii cieplnej w Kielcach (jej udział w rynku wynosi 60%). Poza wytwarzaniem energii, produkuje ona także energię elektryczną w układzie skojarzonym. Moc cieplna zainstalowana w EC Kielce na koniec 2024 r. wynosiła 279,90 MWt, a produkcja energii cieplnej brutto to 1,535 PJ (netto: 1,490 PJ). Do produkcji energii wykorzystywane są następujące rozwiązania o średniorocznej sprawności ogólnej:

- blok węglowy: 81,67%,
- blok biomasowy: 50,19%,
- kotły Wr-25: 80,8%,
- blok gazowy: 89,11%,
- kotły gazowe: 96,07%.

Produkcja energii w EC Kielce charakteryzuje się emisyjnością na poziomie:

- SO₂ - 310,559 Mg
- NO_x - 198,789 Mg
- pył - 0,729 Mg
- CO - 217,710 Mg
- Emisja roczna CO₂ w 2024 r.: 143 010 Mg.

Stosując metody magazynowania energii, możliwe stałoby się ograniczenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery. Zakładając średnią pojemność cieplną poszczególnych metod akumulacji energii termalnej (spośród podanych w tabeli 3), można oszacować wymaganą pojemność magazynu dla dwu-, cztero- lub



sześciodniowego zapotrzebowania na energię, wykorzystując dane dla EC Kielce, co zaprezentowano w tabeli poniżej.

Tabela 4. Pojemność i koszt wykonania magazynów ciepła na potrzeby EC Kielce

	Typ	TTES	PTES		BTES	ATES
			woda	woda + żwir		
pojemność, m ³ dla czasu magazynowania:	2 dni	64 975	64 975	113 706	165 390	129 949
	4 dni	129 949	129 949	227 412	330 780	259 899
	6 dni	194 924	194 924	341 117	496 171	389 848
koszt inwestycyjny, tys. zł. dla czasu magazynowania:	2 dni	45 320	10 234	17 909	37 213	40 934
	4 dni	90 640	20 467	35 817	74 426	81 868
	6 dni	135 960	30 701	53 726	111 638	122 802

Wymagane pojemności magazynów wodnych są najmniejsze, co udowadnia, że woda stanowi czynnik akumulujący energię termalną o najwyższym potencjale energetycznym. Jednakże koszty realizacji takiego magazynu w formie zasobnika stalowego zewnętrznego są najwyższe. Najniższe koszty inwestycyjne występują w przypadku akumulacji ciepła poprzez wodę, ale w zbiorniku zagłębionym w gruncie, a w dalszej kolejności dla takiego samego typu rozwiązania tylko dla mieszanki wodno-żwirowej. Natomiast najmniejszy potencjał energetyczny występuje dla magazynowania energii termalnej w gruncie poprzez system sond gruntowych, około 3,5-krotnie większy jak dla akumulacji ciepła poprzez zastosowanie wody (co pokazują największe wymagane pojemności dla BTES). Metody ATES, czyli magazynowania energii cieplnej w warstwie wodonośnej wymagają około 2,5-krotnie większych pojemności jak systemy wodne (TTES lub PTES).

W przypadku magazynu energii w postaci zasobnika wodnego o wymaganym ze względu na optymalną stratyfikację termiczną w jego wnętrzu stosunku wysokości do średnicy $H / D = 3 - 4$, możemy oszacować wymiary dla takiego magazynu energii cieplnej:

- dla 2 dni magazynowania: $H = 95$ m, $D = 30$ m,
- dla 4 dni magazynowania: $H = 120$ m, $D = 37$ m,
- dla 6 dni magazynowania: $H = 140$ m, $D = 42$ m.

Dla układu PTES, w którym zbiornik w przekroju poprzecznym jest w kształcie trapezu, można określić przykładowe wymiary dolnej i górnej podstawy zbiornika (w kształcie prostokąta), przy założeniu H wynoszącej 20 m. Oczywiście jest, że można zaproponować także inne wymiary dla wykopów pod magazyn PTES, które również spełnią wymóg zapewnienia odpowiedniej pojemności magazynu.



Tabela 5. Wymiary magazynu energii PTES na potrzeby Elektrociepłowni Kielce

Czas magazynowania	PTES							
	woda		woda		woda + żwir		woda + żwir	
	podstawa dolna		podstawa górna		podstawa dolna		podstawa górna	
	A, m	B, m	A, m	B, m	A, m	B, m	A, m	B, m
2 dni	30	77	62	108	30	81	139	190
4 dni	50	79	101	130	50	97	180	227
6 dni	60	102	121	162	60	122	223	284

Z punktu widzenia magazynowanie energii termalnej w gruncie niezbędne jest określenie wymaganej powierzchni terenu. Przy założeniu wykonania odwiertów na potrzeby sond gruntowych głębokości 70 m, niezbędna powierzchnia działki o wysokiej pojemności cieplnej gruntu wynosi:

- dla 2 dni magazynowania: $A = 2\,363\text{ m}^2$
- dla 4 dni magazynowania: $A = 4\,725\text{ m}^2$
- dla 6 dni magazynowania: $A = 7\,088\text{ m}^2$.

Jeśli chodzi o magazynowanie energii w warstwie wodonośnej (ATES), obliczone pojemności dotyczą wymaganej wielkości dla wód podziemnych.

Bez względu na zastosowane rozwiązanie, magazynowanie energii termalnej pozwoliłoby na redukcję emisji zanieczyszczeń do atmosfery w wysokości:

- dla 2 dni magazynowania: $\text{SO}_2 - 3,412\text{ Mg}$, $\text{NO}_x - 2,184\text{ Mg}$, pył – $0,008\text{ Mg}$, $\text{CO} - 2,392\text{ Mg}$, $\text{CO}_2 - 1\,571\text{ Mg}$,
- dla 4 dni magazynowania: $\text{SO}_2 - 6,825\text{ Mg}$, $\text{NO}_x - 4,369\text{ Mg}$, pył – $0,016\text{ Mg}$, $\text{CO} - 4,785\text{ Mg}$, $\text{CO}_2 - 3\,143\text{ Mg}$,
- dla 6 dni magazynowania: $\text{SO}_2 - 10,238\text{ Mg}$, $\text{NO}_x - 6,553\text{ Mg}$, pył – $0,024\text{ Mg}$, $\text{CO} - 7,177\text{ Mg}$, $\text{CO}_2 - 4\,715\text{ Mg}$.

1.3. Pasywne systemy magazynowania energii w budynkach

Systemy pasywne magazynowania energii w budynkach umożliwiają przechowywanie nadmiernych zysków ciepła pochodzących z promieniowania słonecznego. Najczęściej wykorzystywane są w tym przypadku substancje zmienno fazowe (PCM) wkomponowane w strukturę budynku, np. w przegrody czy też w elementy osłony przegród przezroczystych, tj. rolety i żaluzje. Są to systemy z bezpośrednim pochłanianiem ciepła, szeroko omówione w treściach wykładowych.

Poza takimi rozwiązaniami możemy jeszcze wyróżnić układy z pośrednim pochłanianiem ciepła oraz z wyizolowanym magazynem ciepła. Systemy pośrednie wymagają dodatkowych elementów absorbujących energię, które mogą być zarówno stacjonarne, np. ściany Trombe'a jak i przesuwne, np. akwaria, kwietniki.



Wyizolowany magazyn ciepła może być w formie zasobnika wody umieszczonego na dachu budynku lub w osobnym pomieszczeniu. Akumulacyjny zbiornik dachowy może być wyposażony w system przesuwnych rolet, które pozwalają na odbicie promieniowania słonecznego od swojej powierzchni w okresie letnim w ciągu dnia oraz pełnią funkcję izolacji cieplnej w okresie zimowym, zabezpieczając zmagazynowaną energię przed stratami do otoczenia.

W celu akumulacji energii można także wykorzystywać złoża kamienne umieszczone w piwnicy pod podłogą najniższej kondygnacji. Magazyny ciepła w postaci substancji o stałym stanie skupienia, pozwalają uzyskać dużo wyższe temperatury w porównaniu do rozwiązań wodnych (często nawet 10-krotnie wyższe).

2. Metodyka magazynowania chłodu

Magazynowanie chłodu odbywa się na potrzeby ograniczenia zużycia energii przez instalacje klimatyzacyjne. Systemy chłodnicze zasilane ciepłem ostatnio coraz częściej wspomagają układy kogeneracyjne, tworząc w ten sposób systemy trigeneracyjne. Chętnie również do zasilania obserwuje się wykorzystanie ciepła odpadowego. Stąd też optymalizacja energetyczna układów chłodniczych silnie wpływa na sprawność tych rozwiązań. W przypadku odbiorników charakteryzujących się cyklicznym zapotrzebowaniem na chłód, do których należą takie obiekty jak biura, kina, czy też sklepy wielkopowierzchniowe, magazynowanie chłodu w okresie zmniejszonego zapotrzebowania stanowi odpowiedź na zwiększenie efektywności ekonomiczno-energetycznej.

Dotychczas popularne rozwiązania stanowiły magazyny ciepła jawnego, natomiast ostatnio rozważane są możliwości akumulacji ciepła utajonego poprzez zastosowanie substancji zmiennofazowych o odpowiednio niskiej temperaturze zmiany stanu skupienia dostosowanej do temperatury pracy instalacji (Souayfane i inni, 2016). Poza odpowiednim do zastosowania zakresem temperaturowym przemiany fazowej wykorzystywane substancje zmiennofazowe powinny także charakteryzować się wysokim ciepłem właściwym i utajonym oraz wysoką przewodnością cieplną obu faz.

Poza właściwościami termicznymi należy także uwzględnić charakterystykę fizyczną, chemiczną i ekonomiczną.

Parametry fizyczne:

- duża gęstość, i nieznaczne jej zmiany podczas przejścia fazowego,
- niskie ciśnienie pary,
- niska lepkość,
- stała wydajność (cykliczność),
- brak efektu przechłodzenia,

- szybkość procesu krystalizacji.

Parametry chemiczne:

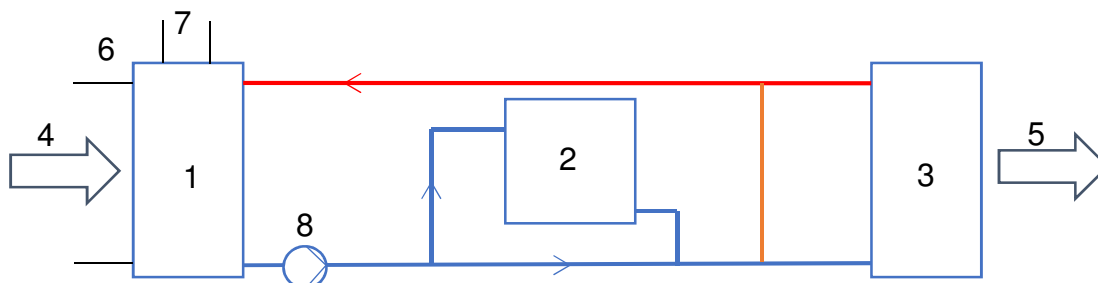
- niepalny, niewybuchowy,
- nietrujący,
- niekorozyjny,
- brak rozkładu chemicznego,
- podlegający recyklingowi.

Parametry ekonomiczne:

- tani,
- dostępny,
- opłacalny w eksploatacji.

W celu wykorzystania substancji zmiennofazowych niezbędne są odpowiednie dodatkowe zasobniki wkomponowane w system chłodzenia obiektu. Przykładowe rozwiązanie prezentuje rysunek poniżej.

[Tekst alternatywny. Schemat instalacji chłodniczej z magazynem chłodu. Strzałkami zaznaczono przepływ energii, blokami odpowiednie elementy systemu, a liniami współpracę pomiędzy nimi.]



Rys. 3. Schemat instalacji chłodniczej z magazynem chłodu:

1 – chiller absorpcyjny, 2 – magazyn ciepła utajonego, 3 – odbiornik chłodu,
4 – ciepło dostarczone, 5 – chłód odebrany, 6 – zasilanie wodą grzewczą,
7 – chłodzenie, 8 - pompa

Akumulacja chłodu może się odbywać w porze nocnej. Jest to charakterystyczne dla obiektów biurowych, dla których w tym czasie nie obserwujemy zapotrzebowania na chłód. W zależności od urządzeń chłodniczych zastosowanych w budynku należy przyjąć temperaturę czynnika chłodniczego jak i wymaganą temperaturę materiału akumulującego chłód. Jako magazyn ciepła utajonego można zastosować czynnik spośród szeregu substancji zmiennofazowych dostępnych komercyjnie. Część z nich wraz z ich charakterystyką zestawiono w tabeli poniżej.



Dobór odpowiedniego do warunków pracy PCM jest zagadnieniem analizowanym w pierwszej kolejności przy analizie procesów magazynowania chłodu. I tak przykładowo w przypadku dostarczania chłodu na potrzeby pracy klimakonwektorów zmiana fazy dla zastosowanej w akumulatorze substancji powinna być niższa niż kiedy bierzemy pod uwagę zasilanie systemu z pasywnymi belkami chłodzącymi. W pierwszym przypadku swoje zastosowanie znajdują takie PCM jak RT5HC, RT8 czy savE OM08, a w drugim przypadku RT 15, PureTemp 15 czy PlusICE PCM S15.

Tabela 6. Własności wybranych PCM dostępnych komercyjnie
(Źródło: opracowanie własne na podstawie Kapica, Karwacki, 2018)

Nazwa materiału	Temperatura topnienia, °C	Ciepło właściwe, kJ/kgK	Ciepło utajone, kJ/kg	Przewodność cieplna, W/mK	Gęstość, kg/m ³
ORGANICZNE					
RT0*	-1 - 0	2	175	0,2	760-880
A2**	2	2,2	200	0,2	765
RT2HC*	1 -3	2	200	0,2	760-880
PureTemp 4****	5	1,78 – 2,26	187	0,15 – 0,25	880 -960
RT5HC*	5 - 6	2	250	0,2	770 - 880
RT8*	6 - 9	2	175	0,2	770 - 880
savE OM08***	8	1,71 – 2,11	180	0,17 – 0,24	1050 - 1111
RT10HC*	9 - 10	2	200	0,2	770 - 880
RT11HC*	10 - 12	2	200	0,2	770 - 880
RT 15*	10 - 17	2	155	0,2	770 - 880
PureTemp 15****	15	2,25 - 2,56	182	0,15 – 0,25	880 - 960
RT 18HC*	18	2	260	0,2	770 - 880
PureTemp 18****	18	1,47 – 1,74	192	0,15 – 0,25	860 - 950
NIEORGANICZNE					
savE HS01***	1	2 – 3,9	350	0,55 – 2,2	924 - 1010
PlusICE PCM S15**	15	1,9	160	0,43	1510

*producent: RubiTherm

**producent: PCM Products

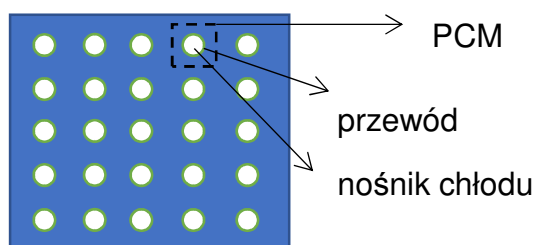
***producent: PLUSS

****producent: PureTemp

Kwestia wyboru odpowiedniego materiału nie jest jednak jedynym zagadnieniem istotnym przy projektowaniu zasobników materiałów zmiennofazowych wykorzystywanych do akumulacji chłodu. Koniecznym do rozważenia jest także

geometria zasobnika, w szczególności geometria powierzchni wymiany ciepła. Najbardziej popularnym rozwiązaniem jest układ, kiedy nośnik ciepła (woda) przepływa przez przewody o odpowiednim przekroju, a one są otoczone materiałem zmienno fazowym znajdującym się wewnątrz zasobnika. Dla takiego układu na podstawie bilansu ciepła akumulowanego w elementach o masie M wyprowadzono równanie dla nośnika ciepła, materiału zmienno fazowego oraz ścianki przewodu. Wymiana ciepła rozważana jest dla pojedynczego przewodu wraz z towarzyszącą masą substancji akumulującej chłód (zgodnie z rysunkiem poniżej).

[Tekst alternatywny. Schemat geometrii zasobnika magazynującego chłód w przekroju poprzecznym. Poszczególne okręgi prezentują przewody, którymi płynie nośnik chłodu i są dookoła otoczone PCM.]



Rys. 4. Geometria zasobnika magazynującego chłód

Dla poszczególnych elementów magazynu chłodu równania mają następującą postać:

- dla czynnika odbierającego chłód:

$$M_w \cdot C_{p_w} \cdot \frac{dT_{sr,w}}{d\tau} = \dot{m}_w \cdot C_{p_w} [T_{w1}(\tau) - T_{w2}(\tau)] + \frac{T_p(\tau) - T_{sr,w}(\tau)}{R_w} \quad (3)$$

- dla substancji magazynującej:

$$M_{PCM} \cdot C_{p_{PCM}}(T_f) \cdot \frac{dT_{PCM}}{d\tau} = \frac{T_p(\tau) - T_{PCM}(\tau)}{R_{PCM}} + \dot{Q}_a \quad (4)$$

- dla przewodu:

$$M_w \cdot C_{p_w} \cdot \frac{dT_w}{d\tau} = \frac{T_{PCM}(\tau) - T_p(\tau)}{R_{PCM}} + \frac{T_{sr,w}(\tau) - T_p(\tau)}{R_w} \quad (5)$$

gdzie:

M – masa, kg

C_p – ciepło właściwe, J/kgK



T – temperatura, °C

τ – czas, s

$\dot{m}$ – strumień masowy, kg/s

R – opór wnikania ciepła, m²K/W

$\dot{Q}_a$ – straty chłodu do otoczenia, W

Indeksy:

w – czynnik odbierający chłód

sr, w - średnia arytmetyczna z parametrów w_1 i w_2

p – materiał ścianki przewodu

PCM – substancja zmiennofazowa

f - zmiana fazy

W równaniach 3-5 założono, że wnikanie ciepła od cieczy zachodzi na zasadzie konwekcji, a w pozostałych materiałach przez przewodzenie. Biorąc te zależności pod uwagę, opór wnikania ciepła między materiałem PCM a ścianką rury (6) oraz między wodą a ścianką (7) wynosi odpowiednio:

$$R_{PCM} = \frac{\delta_{PCM}}{\lambda_{PCM} \cdot A_{PCM}} + \frac{\delta_p}{2 \cdot \lambda_p \cdot A_{PCM,p}} \quad (6)$$

$$R_w = \frac{1}{\alpha_w \cdot A_w} + \frac{\delta_p}{2 \cdot \lambda_p \cdot A_{w,p}} \quad (7)$$

gdzie:

R – opór wnikania ciepła, m²K/W

δ – grubość, m

λ – przewodność cieplna, W/mK

α – konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła, W/m²K

A – powierzchnia, m²

$$\alpha_w = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{\delta} \quad (8)$$

gdzie:

Nu – liczba Nusselta, -

W przyjętym układzie geometrii, długość przewodu jest znacznie większa niż jego średnica. Dodatkowo przepływ będzie miał charakter laminarny, czyli odbiór ciepła zachodzi przy odpowiednio niskiej prędkości przepływu. Dlatego też liczbę podobieństwa Nu można przyjąć jako stałą i wynoszącą 4,364 (Baehr, Stephan, 2006).



Dla przykładowego budynku biurowego moc agregatu chłodniczego wynosi 7,5 kW, natomiast zapotrzebowanie chłodu dla okresu szczytowego w godzinach od 7 do 17 to 9,2 kW, co oznacza, że w okresie nocnym magazyn energii powinien zakumulować 1,7 kW strumienia chłodu. Zakładając, że chiller absorpcyjny pracuje tylko w okresie szczytowym (10h), oznacza to, że zapotrzebowanie chłodu w magazynie wynosi 17kWh. Przyjmując dodatkowo, iż budynek jest chłodzony przy wykorzystaniu klimakonwektorów, które wymagają temperatury zasilania 7°C, a dolną granicą pracy agregatu jest 12°C, wymaga to magazynu chłodu dla takiego przejścia temperaturowego o masie około 1 623 kg (zasobnik o pojemności 1 623 l) wody. Natomiast przy zastosowaniu PCM: RT5HC lub RT8 i wykorzystaniu jedynie ich zmiany stanu skupienia, będziemy musieli wyposażyć nasz magazyn chłodu odpowiednio w 245 kg (zasobnik o pojemności ok. 300 l) i 350kg (zasobnik o pojemności ok. 430 l) PCM. Są to wielkości około 5 - 6-krotnie mniejsze w porównaniu do zasobnika wodnego.

Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia współpracy instalacji chłodniczej z chillerem i magazynem chłodu jest sterowanie ich pracą. Przy działaniu elementów automatyki sterujących pracą zaworów mieszających trójdrogowych pojemność chłodnicza magazynu pozwala na utrzymanie temperatur pracy obiegu poniżej zadanego poziomu (Karwacki i inni, 2019). Dzięki temu można zmniejszyć pojemność cieplną magazynu tak, aby utrzymać temperaturę poniżej poziomu wymaganego dla dolnej granicy pracy agregatu. Pozwala to na obniżenie zapotrzebowania na chłód w magazynie oraz zużycia substancji akumulującej, czyli zmniejsza koszty zarówno eksploatacyjne jak i inwestycyjne.

3. Magazynowanie energii przy współpracy z OZE wraz z przykładami

3.1. Instalacje solarne termiczne

Energia zużywana na cele ogrzewania pomieszczeń i przygotowania ciepłej wody użytkowej w budynkach mieszkalnych i usługowych stanowi łącznie największy udział w zużyciu energii końcowej. Zagadnienie to dotyczy zarówno Polski, jak i pozostałych krajów europejskich. Przyjmując pokrycie pełne lub w znacznym stopniu tego zapotrzebowania przez odnawialne źródła energii, zbliżamy się do spełnienia wskaźników określających stopień realizacji polityki klimatyczno-ekonomicznej kraju. Wszystkie przyjęte w nim działania wpisują się w wytyczne i wymagania dla założeń aktów prawnych Unii Europejskiej dotyczących dbałości o stan klimatu na świecie.

Wykorzystanie energetyki słonecznej w celu produkcji energii cieplnej na potrzeby instalacji centralnego ogrzewania oraz ciepłej wody użytkowej w budynkach

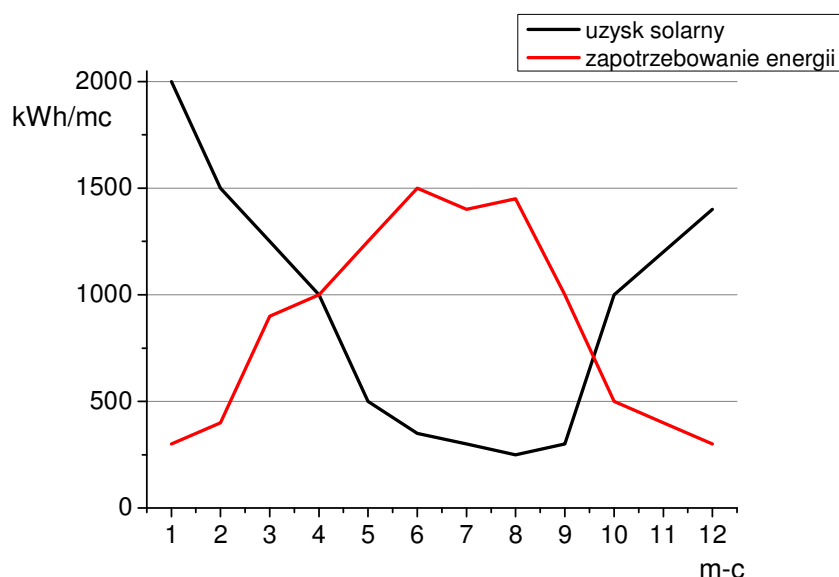


wykazuje największy potencjał techniczny. Słońce stanowi źródło energii charakteryzujące się nieskończonym dostępem jak również niewyczerpywalnością oraz wysoką wartością strumieni emitowanego ciepła na poziomie $3,8 \times 10^{23}$ kW. Część z niego podlega absorpcji na chmurach i cząsteczkach aerozoli, a jedynie około $1,8 \times 10^{14}$ kW jest przechwytywane przez Ziemię, która jest oddalona o 150 milionów km od Słońca. Do powierzchni ziemi dociera jedynie około 60% z tej wartości, natomiast pozostałe 40% ulega odbiciu z powrotem i jest absorbowane przez atmosferę. Zakładając wykorzystanie 0,1% uzyskanej w ten sposób energii ze sprawnością 10% możliwa byłaby do wygenerowania 4-kroć światowego zapotrzebowania na energię, czyli 300 GW (Stokowiec, 2021). Fakt ten ukazuje, że roczne napromieniowanie powierzchni ziemi przekracza 7500-krotnie roczne światowe zużycie energii, co ukazuje solarny potencjał energetyczny, który przekracza możliwości wszystkich nieodnawialnych źródeł energii, wliczając w to paliwa kopalne oraz energię nuklearną.

Jednakże, energetyka solarna silnie charakteryzuje się stochastycznością, czyli zmiennością zarówno w cyklach dobowych jak i rocznych. Stąd też, mimo, iż ze znaczną dokładnością jesteśmy w stanie przewidzieć uzysk solarny nawet na kilka lat w przód, to i tak instalacje słoneczne są źródłem mało stabilnym. Dlatego istotnym jest, aby elementem dodatkowym takiego układu stał się magazyn ciepła. Pozwoli on na wyrównanie rozbieżności pomiędzy największym zapotrzebowaniem na energię a jej dostępnością. Taki akumulator jest niezbędny zarówno z punktu widzenia cyklu dobowego (np. wysokie zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową występuje w porach późnowieczornych, kiedy operacja słoneczna jest znikoma) jak i rocznego (np. najwyższe zapotrzebowanie na ciepło na potrzeby centralnego ogrzewania występuje w okresie zimowym, gdy dzień jest krótki a noc stosunkowo długa).

Przykład dychotomii pomiędzy zapotrzebowaniem na ciepło dla budynku mieszkalnego oraz natężeniem promieniowania słonecznego odbieranego z powierzchni 10m^2 w kolejnych miesiącach roku prezentuje rysunek poniżej.

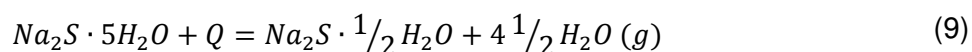
[Tekst alternatywny. Wykres dwuwymiarowy. Opis osi X: kolejne miesiące roku, opis osi Y – energia dla danego miesiąca. Na wykresie znajdują się krzywe, która pokazują zapotrzebowanie energii dla budynku w danym miesiącu (linia czerwona) oraz możliwości odbioru energii solarnej przez instalację w związku z nasłonecznieniem w kolejnych miesiącach (linia czarna).]



Rys. 5. Przykładowy profil zapotrzebowania na energię ciepłą w budynku mieszkalnym i natężenie promieniowania słonecznego w ciągu roku.

Wnioski, jakie pozwala wyciągnąć analiza rysunku dotyczą konieczności stosowania magazynów energii dla systemów opartych o energię słoneczną. Najprostsze zasobniki akumulują energię od Słońca na kilka godzin, z założenia pozwalają na wykorzystanie nadwyżek południowych w godzinach wieczornych lub porannych kolejnego dnia. Substancją magazynującą jawną energię ciepłą jest woda znajdująca się w specjalnych zbiornikach – zasobnikach solarnych na potrzeby ciepłej wody użytkowej o charakterystycznej konstrukcji determinującej ich smukłość, która pozwala na stratyfikację termiczną wody wewnątrz zbiornika (omówione w punkcie 1.1 Krótkoterminowe magazyny ciepła w budownictwie mieszkaniowym).

Jednakże bardziej poszukiwane rozwiązania dotyczą akumulacji energii solarnej wykorzystywanej do wytwarzania ciepła przez okresy kilku miesięcy, czyli przechowywania energii uzyskanej w okresach letnich do wykorzystania w trakcie sezonu grzewczego. Jednym z badanych rozwiązań jest zastosowanie procesów termochemicznych pozwalających na sezonowe magazynowanie energii. Instalacja pilotażowa powstała w ramach projektu MERITS (Bujalski, Starosielec, 2017) i dotyczyła przeniesienia kompaktowego rozwiązania ze skali laboratoryjnej do rzeczywistej. Jako odwracalną reakcję chemiczną wykorzystano przekształcenie siarczku sodu w formie półwodnego hydratu do pentahydratu, tworząc uwodnioną sól:





Proces dehydratacji (desorpcji) soli zachodzi w temperaturze około 80°C. Podczas procesu odwrotnego (hydratacja / sorpcja) wydzielane jest ciepło reakcji, które może zostać wykorzystane w celu podgrzania czynnika roboczego w instalacji centralnego ogrzewania lub ciepłej wody użytkowej.

Taka bateria termochemiczna składa się z dwóch zbiorników szczelnie odseparowanych od siebie zaworem wyposażonych w wymienniki ciepła: reaktor i parownik/skrapacz. Reaktor ma za zadanie dostarczyć wymagany strumień ciepła (proces ładowania) dla procesu hydratacji soli oraz odebrać go podczas dehydratacji (proces rozładowania). Zawór pomiędzy zbiornikami jest otwarty w trakcie procesu ładowania/rozładowania.

Dodatkowo układ można wyposażyć w jeszcze jedno źródło energii odnawialnej, jakim jest gruntowy wymiennik ciepła, który dostarczy energię w trakcie cyklu pracy baterii na potrzeby skroplenia pary wodnej lub odparowania wody.

Instalacja prototypowa MERITS magazynuje energię solarną i współpracuje z instalacją grzewczą, chłodniczą oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. System długookresowego magazynowania energii cieplnej składa się z wodnego bufora ciepła (w którym energia solarna magazynowana jest w pierwszej kolejności) oraz dwóch zestawów baterii termochemicznych (odbierających nadwyżki ciepła z instalacji solarnej). Zamontowane kolektory słoneczne posiadają całkowitą powierzchnię absorberów 12,4 m², a pojemność energetyczna magazynu termochemicznego to 350 MJ.

Innym rozwiązaniem możliwym do wykorzystania w połączeniu z instalacją kolektorów słonecznych, pozwalającą na wspomaganie zasilania instalacji ciepłej wody użytkowej i centralnego ogrzewania jest zastosowanie magazynów z substancjami zmiennofazowymi. Tutaj można stosować np. parafiny lub hydraty soli. W takich rozwiązaniach problem mogą stanowić układ hydrauliki przewodów wypełnionych substancją zmiennofazową, system przewodów grzewczych oraz kontrola temperatury. Parametry przykładowego magazynu energii, w którym substancję magazynującą stanowi hydrat soli zestawiono w tabeli poniżej.



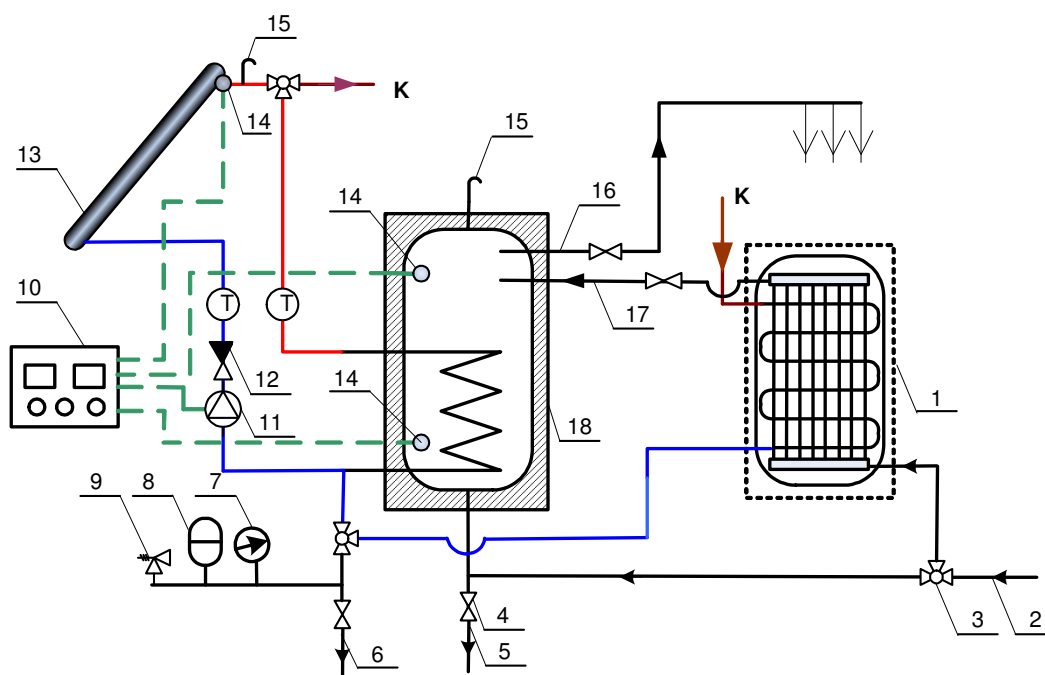
Tabela 7. Parametry domowego magazynu PCM opartego na hydracie soli
(źródło: opracowanie własne na podstawie

<https://ieo.pl/dokumenty/aktualnosci/06092024/raport%20mapa%20drogowa%20dla%20rynku%20magazynu%20ciep%20C3%B3w%20C5%82a%20w%20polsce.pdf>)

Parametr	Wartość możliwa do uzyskania	Wartość przeciętna
Moc obciążenia	6-8 kW (max do 3h)	5 kW (max przez 3-5 h)
Pojemność magazynowania	18-24 kWh	Ok. 12 kWh (wartość docelowa do zastosowań mieszkaniowych)
Gęstość magazynowania	100 kWh/m ³	40 kWh/m ³
Moc rozładowania	Ok. 7 kW	4-6 kW

Analizy numeryczne oraz badanie eksperymentalne prowadzone dla były także dla współpracy instalacji solarnej ze zmiennofazowym magazynem energii, w którym jako substancję akumulującą przyjęto parafinę (Stokowiec, 2021). Schemat analizowanej instalacji przedstawiono na rysunku poniżej. Odbiór ciepła może być realizowany na potrzeby zaopatrzenia budynku w ciepłą wodę użytkową.

[Tekst alternatywny. Schemat instalacji solarnej współpracującej zarówno z zasobnikiem magazynującym wypełnionym PCM jak i zasobnikiem c.w.u. Blokami zaznaczono odpowiednie elementy systemu oraz je ponumerowano i podpisano, a liniami przewody łączące poszczególne urządzenia oraz armaturę. Kolorem czerwonym oznaczono przepływ glikolu transportującego energię termalną od kolektora słonecznego, a niebieskim powrót glikolu do kolektora. Na zielono zaznaczono instalację automatyki systemu. W zasobnikach znajdują się wymienniki ciepła.]



Rys. 6. Schemat instalacji solarnej wraz z zasobnikiem magazynującym energię
1-zasobnik parafinowy, 2-zasilanie wodą zimną, 3- zawór trójdrogowy, 4-zawór,
5-zrzut wody, 6-spust płynu z obiegu kolektora, 7-manometr, 8-naczynie wzbiorcze,
9-zawór bezpieczeństwa, 10-panel sterujący, 11-pompa solarna, 12-zawór zwrotny,
13-kolektor słoneczny, 14-czujnik temperatury, 15- odpowietrznik, 16-pobór wody
cieplej, 17-dopływ wody ciepłej ze zbiornika akumulującego do zasobnika solarnego,
18-zasobnik solarny, T- termometr, K-obieg kolektorowy

Dla przedstawionego układu przeprowadzono modelowanie matematyczne procesów ładowania i rozładowania zasobnika energii termalnej z uwzględnieniem właściwości PCM, geometrii układu oraz usytuowania zasobnika w instalacji. W tym celu wyprowadzono bilanse ciepła dla materiału zmiennofazowego oraz dla czynnika przekazującego/odbierającego energię. Do obliczeń założono, że jako PCM wykorzystano parafinę o następujących parametrach termodynamicznych: ciepło właściwe - 2100 J/(kgK), entalpia zmiany fazy - 173,6 kJ/kg, temperatura topnienia - 64°C. Określono również wielkość użytecznej mocy kolektora słonecznego, uwzględniając równanie Hottela-Whilliera-Blissa (10) (Pluta, 2006).

$$Q_u = A_p \cdot F_R \cdot [G(\tau\beta) - U_L \cdot (T_{wi} - T_a)] \quad (10)$$

gdzie:

A_p – powierzchnia absorbera, m²

F_R – współczynnik odprowadzenia ciepła z kolektora, -

$G(\tau\beta)$ – zaabsorbowana moc promieniowania słonecznego, W/m²

U_L – zastępczy współczynnik strat absorbera, W/m²K

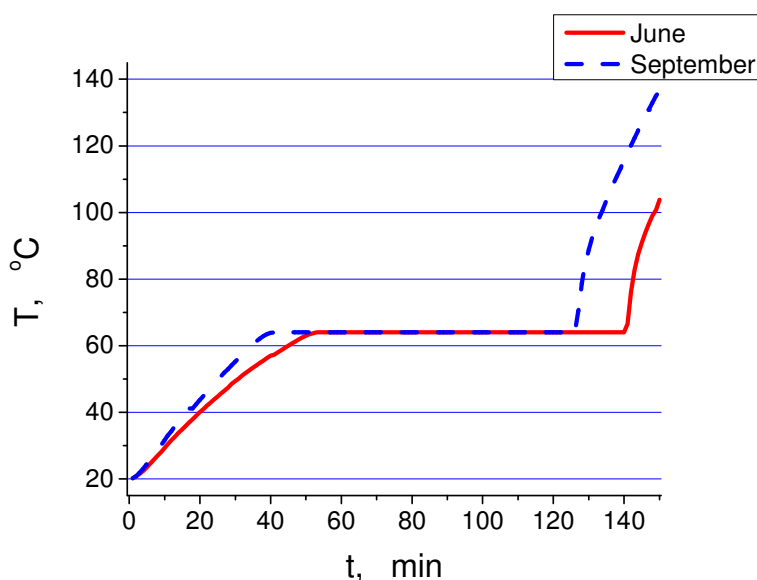
T_a – temperatura otoczenia, °C



T_{w1} - temperatura czynnika solarnego, °C

Zmianę temperatury substancji zmiennofazowej w czasie procesu ładowania, czyli odbierania energii solarnej, przedstawiono na wykresie 7 dla dwóch przykładowych miesięcy o korzystnym potencjale energetycznym z punktu widzenia uzysku solarnej (czerwiec – June i wrzesień – September).

[Tekst alternatywny. Wykres dwuwymiarowy. Opis osi X: czas wyrażony w minutach, opis osi Y – temperatura w stopniach Celsjusza. Na wykresie znajdują się krzywe, która pokazują wzrost temperatury substancji zmiennofazowej w czasie procesu ładowania zasobnika dla dwóch miesięcy: czerwiec (czerwona linia ciągła) wrzesień (niebieska linia przerywana). Krzywe ukazują zarówno wzrost temperatur jak i proces zmiany stanu skupienia PCM (linia prosta).]



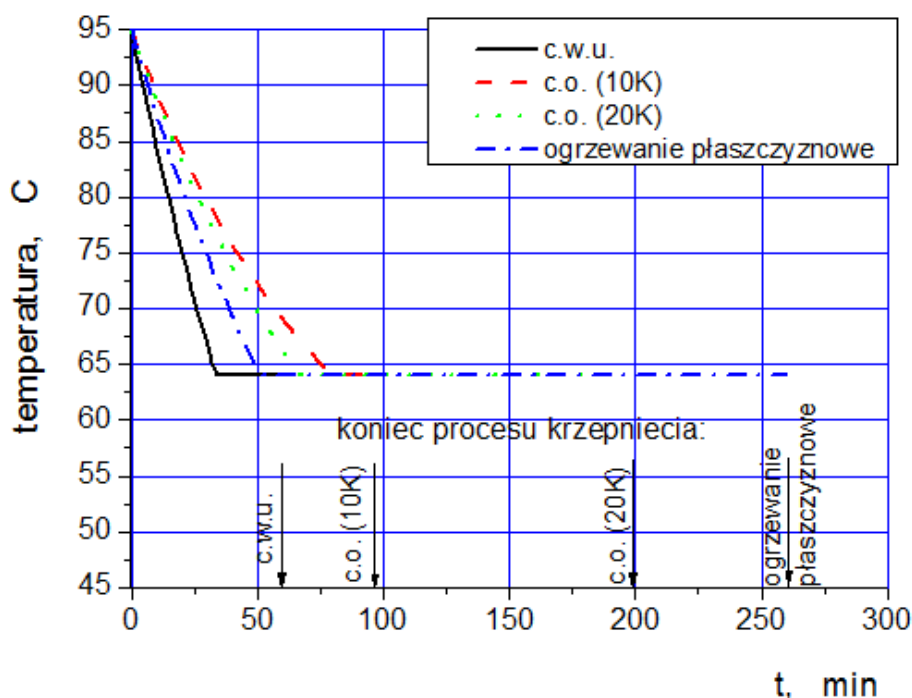
Rys. 7. Proces ładowania zasobnika PCM w czerwcu (June) i we wrześniu (September).

Na wykresie obserwujemy zachodzące 3 procesy: podwyższanie temperatury PCM od temperatury otoczenia do temperatury przejścia fazowego, topnienie substancji zmiennofazowej i podwyższanie jej temperatury powyżej temperatury zmiany fazy. Proces zmiany fazy dla parafiny zachodzi po niespełna godzinie od rozpoczęcia akumulacji energii termalnej i trwa do około dwóch godzin lub ponad dwóch godzin w zależności od miesiąca. O obrazuje to linia stałej temperatury w czasie na wykresie.

Proces rozładowania zasobnika można analizować, biorąc pod uwagę różne aspekty. W przytoczonym przykładzie zdecydowano się na uzależnienie go od temperatury na wyjściu z zasobnika czynnika (wody) odbierającego ciepło. Przyjęto

realizację zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową (55°C) i porównano z instalacją grzewczą grzejnikową przy założeniu różnicy temperatur zasilania i powrotu na instalacji 10 lub 20K oraz z instalacją grzewczą płaszczyznową o niższych parametrach czynnika rozprowadzającego ciepło. Wykres zależności temperatury PCM w czasie zaprezentowano poniżej.

[Tekst alternatywny. Wykres dwuwymiarowy. Opis osi X: czas wyrażony w minutach, opis osi Y – temperatura w stopniach Celsjusza. Na wykresie znajdują się krzywe, która pokazują spadek temperatury substancji zmiennofazowej w czasie procesu rozładowania zasobnika dla różnych założeń jego pracy. Krzywe ukazują zarówno spadek temperatur jak i proces zmiany stanu skupienia PCM (linia prosta).]



Rys. 8. Wykres zależności spadku temperatury w wymienniku parafinowym w funkcji czasu

Parafina wewnątrz zbiornika została podgrzana do temperatury powyżej temperatury topnienia, nie uzyskując przy tym jeszcze temperatury parowania. Początkowo proces rozładowania zasobnika dotyczy odbierania od parafiny ciepła jawnego, czyli jedynie obniżania jej temperatury w czasie. Dodatkowo na wykresie można odczytać czas niezbędny do zakończenia procesu krzepnięcia dla każdego z przytoczonych rozwiązań. Wynosi on od kilkudziesięciu minut (ciepła woda użytkowa) do prawie 2h (ogrzewanie płaszczyznowe).



3.2. Magazynowanie energii elektrycznej oraz instalacje fotowoltaiczne

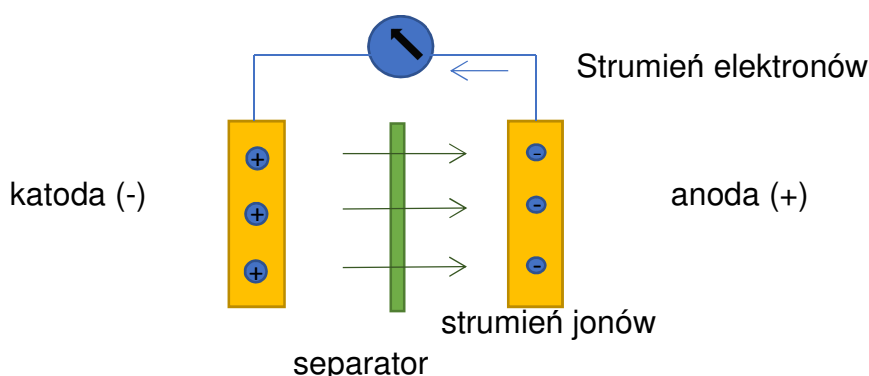
Magazynowanie energii z instalacji fotowoltaicznych może być realizowane w układzie odwracalnym „power-to-power” lub nieodwracalnym „power-to-x”, gdzie możemy wyróżnić power-to-heat (w tym green power to heat), gdzie energia elektryczna przekształcana jest w ciepłą oraz power-to-hydrogen, gdzie energia elektryczna przekształcana jest w paliwo wodorowe. Szczególny przypadek mogą stanowić magazyny służące zielonej elektromobilności. Wszystkie przytoczone rozwiązania służą zwiększeniu podaży energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii pogodowo-zależnych (energetyki solarnej i wiatrowej), która pozwoli na zwiększenie pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną z tych źródeł oraz przyczyni się do realizacji polityki klimatycznej kraju.

Najtańszym z omówionych rozwiązań jest forma power-to-heat, która dzięki niskim nakładom finansowym może mieć największy wkład w redukcję emisji zanieczyszczeń pochodzących ze spalania paliw kopalnych. Polega ona na przekształcaniu energii elektrycznej w ciepło jawne (czynnikiem akumulującym najczęściej jest woda, rzadziej magazyny podziemne). Spotyka się także rozwiązania wykorzystujące magazynowanie ciepła utajonego. W każdym z nich niezbędne są dwa wymienniki ciepła wewnątrz magazynu: pierwotny odbierający energię ze źródła odnawialnego i wtórny do zasilania obiegów grzewczych. Wykorzystanie tego typu technologii zostało omówione przy okazji współpracy pomp ciepła i kotłów elektrodowych z magazynami ciepła (punkt 1.2 Magazyny ciepła w MŚP, przemysłe i ciepłownictwie).

Z punktu widzenia magazynów odwracalnych jednym z najbardziej rozpowszechnionych rozwiązań akumulatorów energii dla instalacji fotowoltaicznych są akumulatory litowo-jonowe, w szczególności najbardziej popularne w ostatnich latach akumulatory LiFePO₄, czyli akumulatory litowo-żelazowo-fosforanowe, które szczegółowo zostały omówione w treściach wykładowych.

Wszystkie akumulatory (także przytoczone w trakcie wykładów oraz omówione w niniejszym opracowaniu) zbudowane są w analogiczny sposób: posiadają katodę i anodę, co przedstawiono na rysunku poniżej. Kwestie je różniące dotyczą jedynie typu materiałów wykorzystanych do budowy tych elektrod.

[Tekst alternatywny. Schemat budowy akumulatora energii elektrycznej. Poszczególne bloki prezentują elementy układu, a strzałkami oznaczono kierunek przepływu strumienia jonów oraz elektronów.]



Rys. 9. Budowa akumulatora energii elektrycznej.

Akumulator to w ogólnym ujęciu elektrochemiczny przetwornik energii, który potrafi przetwarzać energię zgromadzoną w wyniku procesów chemicznych w energię elektryczną i odwrotnie. Zbudowany jest z elektrody dodatniej i ujemnej wykonanych z różnych metali przewodzących i dodatkowo w zbiorniku znajduje się ciecz przewodząca prąd elektryczny (elektrolit). Anoda i katoda oddzielone są porowatą przegrodą, czyli separatorem.

Do technologii wykorzystywanych na rynku w znaczącym stopniu zaliczymy poza bateriami LiFePO₄ również akumulatory niklowo-metalowo-wodorotlenkowe (NiMH) (Wojciechowski, 2017). Są to ogniwa wielokrotnego ładowania, które praktycznie wyparły z rynku baterie niklowo-kadmowe (Ni-Cd). Jak każdy akumulator posiadają dwie elektrody (dodatnią i ujemną). Pozytywne elektrody są wykonane z wodorotlenku niklu Ni(OH)₂, natomiast negatywne elektrody ze stopów zawierających cer, nikiel, neodym, lantan, cynk, tytan i kobalt, czyli tzw. hybryd metali. Natomiast elektrolit występuje pod postacią roztworu wodorotlenku potasu. Obudowa tego typu akumulatorów jest przeważnie wykonana z metalu lub tworzywa sztucznego. Rozwiązanie stanowi lepszą alternatywę dla akumulatorów niklowo-kadmowych, gdyż charakteryzuje się wyższą gęstością energii. Ponadto są one zdolne zmagazynować większą ilość energii w porównaniu do rozwiązań Ni-Cd przy takiej samej wielkości. Dodatkowo nie zawierają kadmu, co czyni je bezpiecznymi dla środowiska naturalnego oraz cechuje je długa żywotność, czyli wysoka odporność na głębokie cykle ładowania i rozładowania.

Stosowane są także akumulatory litowo-polimerowe (Li-Po) stanowiące rodzaj akumulatora litowo-jonowego zbudowane z metalicznego litu oraz przewodników polimerowych. Ze względu na zastosowanie polimerów akumulatory te są lekkie.



Inną alternatywę dla akumulatorów litowo-jonowych stanowią baterie litowo-siarkowe (Li-S). Wykorzystują one lit jako anodę i siarkę jako katodę. Posiadają one wyższą pojemność energii, a poprzez zastosowanie w niektórych z nich dodatkowego rozwiązania w postaci pokrycia katody kwasem polikarylowym, nie występuje obawa o wyciek elektrolitu. Dodatkowo baterie te charakteryzują się niskimi kosztami. Technologię Li-S rozwijała firma Solidion Technology, uzyskując gęstość magazynowanej energii na poziomie 380 Wh/kg.

Największy potencjał rozwojowy w zakresie dostarczania energii elektrycznej prezentuje technologia ogniw paliwowych: opiera się na odwróconym procesie elektrolizy, który przy użyciu prądu elektrycznego rozkłada wodę na wodór (może być on wykorzystany jako źródło energii do procesów spalania) i tlen. Wytwarzanie energii elektrycznej odbywa się w trakcie reakcji chemicznej przekształcającej tlen (z powietrza atmosferycznego) i wodór w wodę, uwalniając także energię cieplną. Ogniwo paliwowe również zbudowane jest z dwóch elektrod: anody i katody, które są katalizatorami odpowiednio wodoru i tlenu. W ogniwie znajduje się również półprzepuszczalna dla elektrolitu membrana, która rozdziela wodór na elektrony i jony. Technologia ta cechuje się wysoką efektywnością i dużą gęstością energetyczną rzędu 33 kWh/kg.

Zastosowanie ogniw paliwowych do magazynowania energii elektrycznej pozwala niwelować problemy dotyczące niestabilności pracy odnawialnych źródeł energii pogodo zależnych, takich jak energetyka fotowoltaiczna czy też wiatrowa. W hybrydowych systemach energetycznych wykorzystanie ogniw paliwowych stanowi uzupełnienie układu, pozwalając na zmniejszenie zależności od sieci energetycznej poprzez magazynowanie nadmiaru energii wyprodukowanej przez panele fotowoltaiczne w okresach silnego nasłonecznienia i wykorzystanie jej w okresach niedoboru. Natomiast w hybrydowych systemach opartych na pracy turbin wiatrowych, ogniwa paliwowe mogą pełnić rolę stabilizatora energetycznego, przejmując automatycznie rolę głównego źródła zasilania w sytuacji niewystarczającej produkcji energii elektrycznej przez turbinę wiatrową.

Ogniwa paliwowe dzielimy na:

- alkaliczne (AFC),

Paliwem jest wodór, więc charakteryzują się wysoką wydajnością i profilem ekologicznym.

Działają w temperaturach 60-100°C.

Wrażliwe na zanieczyszczenia.

- z membraną do wymiany protonów (PEMFC),

Paliwem jest wodór, więc charakteryzują się wysoką wydajnością i profilem ekologicznym.

Pracują w niskich temperaturach < 100°C.



Wymagają detekcji wycieków wodoru i odpowiedniej wentylacji układu.

- ze stałym tlenkiem (SOFC),

Paliwem jest wodór, więc charakteryzują się wysoką wydajnością i profilem ekologicznym.

Przekształcają metan z gazu ziemnego w wodór poprzez reforming parowy (co wiąże się z emisją CO₂) lub przekształcają amoniak w wodór przy użyciu odpowiednich katalizatorów.

Pracują w bardzo wysokich temperaturach (600-1000°C); wymagają efektywnego chłodzenia i odporności materiałów na wysoką temperaturę.

- z kwasem fosforowym (PAFC),

Pracują w temperaturach 150-200°C

Elektrolit w postaci kwasu fosforowego jest korozyjny.

Konieczne systemy ochrony przed wyciekami elektrolitu.

- ze stopionym węglanem (MCFC)

Paliwem jest wodór, więc charakteryzują się wysoką wydajnością i profilem ekologicznym.

Pracują w temperaturach około 650°C.

Elektrolit w postaci stopionego węglanu jest żrący; wymagają materiałów odpornych na korozję.

- zasilane bezpośrednio metanolem (DMFC)

Występuje metanol w stanie ciekłym, dzięki czemu jest to rozwiązanie łatwe do transportu.

Pracują w niskich temperaturach (50-100°C).

Wymagają detekcji wycieków paliwa oraz ochrony przed kontaktami z toksycznymi oparami.

Prowadzone badania wykazały, że wszystkie wymienione technologie mogą być używane w systemach hybrydowych z OZE. W szczególności PEMFC i SOFC, które mogą wspomagać magazynowanie energii oraz stabilizować dostawy energii niestabilnych źródeł takich jak fotowoltaika i elektrownie wiatrowe (Grodzka).

Do współpracy z panelami fotowoltaicznymi wykorzystywane mogą być gotowe rozwiązania magazynowania energii przy współpracy z ogniwami paliwowymi. Jednym z nich jest produkt Picea produkcji Home Power Solution (HPS) (ecoprius). Poprzez funkcję magazynowania energii, wspomaga systemy ogrzewania oraz wentylacji. Jednostka HPS Picea współpracuje z panelami fotowoltaicznymi, które celowo są przewymiarowane, aby latem w pełni zaspokajać potrzeby energetyczne gospodarstwa domowego i jednocześnie umożliwiać magazynowanie nadmiaru wyprodukowanej energii przez magazyn długoterminowy. Centrala energetyczna Picea jest wyposażona w niezbędne komponenty do zapewnienia całorocznego



zasilania budynku mieszkalnego jednorodzinnego energią słoneczną. W skład systemu wchodzi:

- elektrolizer, czyli urządzenie służące do produkcji wodoru w procesie elektrolizy,
- ogniwo paliwowe, które konwertuje wodór z powrotem w energię elektryczną (na cele odbiorców w budynku), wytwarzając przy okazji energię cieplną, która może być wykorzystywana do ogrzewania budynku i ciepłej wody użytkowej,
- akumulator przeznaczony do krótkotrwałego magazynowania energii, zapewniając zasilanie jedynie na noc i w pochmurne dni,
- kontroler ładowania słonecznego zarządzający procesem ładowania energii słonecznej,
- hybrydowy falownik mający za zadanie przekształcanie prądu stałego w prąd zmienny,
- magazyn wodoru, który przechowuje wyprodukowany wodór, przeznaczony do długoterminowego przechowywania (z okresu letniego na sezon zimowy),
- moduł wentylacyjny niezbędny do zapewnienia odpowiedniej wentylacji systemu,
- system zarządzania energią mający na celu koordynację efektywnego działania wszystkich elementów układu.

Jak wynika z powyższego przykładu, magazyn wodoru stanowi system wspomagania instalacji odbiorczych jako akumulator długoterminowy, jednakże w celu magazynowania krótkoterminowego należy także zabezpieczyć system w baterię hybrydową do instalacji fotowoltaicznych.

Użytkownicy magazynów energii elektrycznej w sektorze mieszkalnictwa są to przede wszystkim odbiorcy energii elektrycznej korzystający z taryfy dwustrefowej (tzw. nocnej). Poza gospodarstwami domowymi, z taryfy tej korzystają hospicja, domy dziecka, ambasady, klasztory, których zużycie prądu nie przekracza 40 kW.

Średnia pojemność magazynu energii elektrycznej w gospodarstwie domowym wyniosła w 2024 roku 7,3 kWh, a średnia pojemność wodna magazynu ciepła – 192,1 litra (<https://ieo.pl/aktualnosci/1688-raport-rynek-fotowoltaiki-w-polsce-2024>). Dane te zostały pozyskane z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. W instalacjach wodnych magazynów ciepła przodowało województwo pomorskie (308,1 litra pojemności), a ostatnie było województwo świętokrzyskie (132,7 litra).



Spis literatury

- ✓ materiały zwarte:
 - Baehr H. D., Stephan K. (2006). Heat and mass transfer, Berlin
 - Pluta Z. (2006). Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
 - Stokowiec K. (2021). Badania symulacyjne pracy instalacji solarnej z akumulatorem energii, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce
- ✓ artykuły naukowe:
 - Bujalski M., Starosielec B. (2017). Z laboratorium do rzeczywistości. Sezonowe magazynowanie energii cieplnej w bateriach termochemicznych, *Energetyka Ciepła i Zawodowa*, 2, 55-61.
 - Kapica P., Karwacki J. (2018). Kryteria wyboru i przegląd materiałów zmienno fazowych mogących mieć zastosowanie w współpracy z instalacjami chłodniczymi, Materiały konferencyjne „Konferencja 50. Dni Chłodnictwa. Aktualne trendy w rozwiązaniach technicznych urządzeń i systemów chłodniczych, klimatyzacyjnych, wentylacyjnych oraz pomp ciepła”, SYSTHERM
 - Karwacki J., Kwidziński R., Lackowski M., Kapica P., Śniadała T., Leputa P. (2019). Analiza zastosowania magazynu ciepła z materiałem PCM przy niedopasowaniu wydajności źródła i odbiornika chłodu, *Nowa Energia*, 2 (67), 40-49
 - Souayfane F., Fardoun F., Biwole P. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review, *Energy and Buildings*, 129, 396-431
 - Wojciechowski H. (2017). Technologie magazynowania energii. Cz. I, *Instal*, 2, 20-27



✓ akty prawne:

- Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 24 stycznia 2024 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy - Prawo energetyczne, Dz.U. 2024 poz. 266
- Obwieszczenie Ministra Rozwoju i Technologii z dnia 15 kwietnia 2022 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2022 poz. 1225

✓ źródła internetowe:

- <https://connectpoint.eu/products/> (dostęp 20.03.2025)
- <https://ecoprius.pl/pl/magazyny-wodoru-samowystarczalne-budynki.html> (dostęp 22.03.2025))
- Grodzka M. Wykorzystanie ogniw paliwowych w hybrydowych systemach OZE i w magazynowaniu energii – artykuł końcowy <https://ondeflow.pl/artykuly/wykorzystanie-ogniw-paliwowych-w-hybrydowych-systemach-oze-i-w-magazynowaniu-energii-artykul-koncowy/#:~:text=Ogniwa%20paliwowe%20znajduj%C4%85%20zastosowanie%20w,paneli%20fotowoltaicznych%20i%20turbiny%20wiatrowych> (dostęp: 24.03.2025)
- Instytut Energetyki Odnawialnej: Rynek fotowoltaiki w Polsce 2024. URL: <https://ieo.pl/aktualnosci/1688-raport-rynek-fotowoltaiki-w-polsce-2024> (dostęp: 20.03.2025)
- Mapa drogowa dla rynku magazynów ciepła w Polsce Raport 2024 <https://ieo.pl/dokumenty/aktualnosci/06092024/raport%20mapa%20drogowa%20dla%20rynku%20magazyn%C3%B3w%20ciep%C5%82a%20w%20polsce.pdf> (dostęp: 20.03.2025)
- Potencjał wykorzystania technologii Power to Heat w transformacji sektora ciepłownictwa systemowego w Polsce <https://ptec.org.pl/wp-content/uploads/2024/06/RAPORT-PTEZ-Potencjal-wykorzystania-technologie-Power-to-Heat-w-transformacji-sektora-cieplownictwa-systemowego-w-Polsce-PL.pdf> (dostęp: 24.03.2025)



Na etapie opracowywania niniejszych materiałów dydaktycznych wykorzystana zostało wiedza i doświadczenie nabyte w ramach wizyt studyjnych w Instytucie Technologii Paliw i Energii w Zabrze oraz w Žilinská univerzita in Žilina (Słowacja), zrealizowanych w ramach projektu „Dostosowanie kształcenia w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb współczesnej gospodarki” FERS.01.05-IP.08-0234/23. W szczególności dotyczy to zagadnień odnoszących się do najnowszych technologii, trendów badawczych oraz rozwiązań praktycznych stosowanych w obszarze magazynowania energii poprzez procesy zmiennofazowe, ważnych dla studentów kierunków inżynierii środowiska oraz odnawialne źródła energii, pozwalających na lepsze zrozumienie zagadnień z jakimi spotkają się w pracy zawodowej jako inżynierowie, a także na świadome stosowanie innowacyjnych i prośrodowiskowych rozwiązań na każdym etapie procesu inwestycyjnego, zgodnych z ideą zrównoważonego rozwoju i zielonej transformacji.