

dr hab inż. Jerzy Wołoszyn, prof. AGH

2021/2022

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego

**Magazynowanie energii termicznej z wykorzystaniem
otworowego wymiennika ciepła**

1. Wprowadzenie

1.1. Cel ćwiczenia

Głównym celem ćwiczenia jest wyznaczenie efektywności energetycznej procesu magazynowania energii termicznej w gruncie. Cele cząstkowe to:

- wyznaczenie zmian mocy termicznej w czasie dla otworowego wymiennika ciepła,
- określenie ilości zmagazynowanej/odzyskanej energii na podstawie odczytów z rozproszonego systemu pomiaru temperatury,
- zapoznanie się studentów z metodami magazynowania energii termicznej.

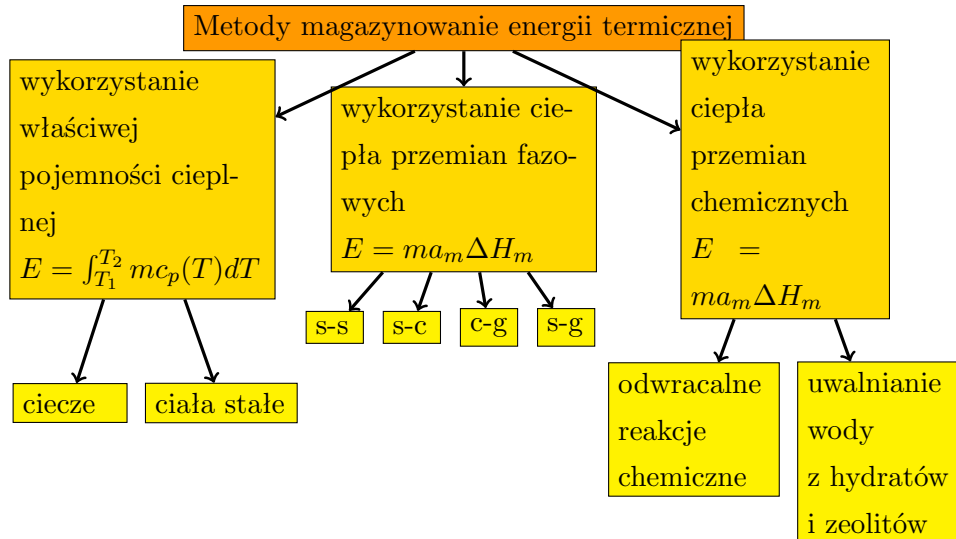
1.2. Informacje podstawowe

Metody magazynowania energii termicznej (ang. Thermal Energy Storage – TES) można podzielić na trzy podstawowe sposoby (rys. 2.1), to znaczy układy wykorzystujące: właściwą pojemność cieplną substancji, ciepło przemiany fazowej substancji oraz ciepło przemian chemicznych. Magazynowanie energii w układach wykorzystujących właściwą pojemność cieplną substancji odbywa się w wyniku zmiany temperatury tejże substancji. W układach wykorzystujących ciepło przemiany fazowej magazynowanie energii odbywa się w wyniku przemiany fazowej medium magazynującego przy niewielkiej zmianie temperatury. Magazynowanie energii w układach wykorzystujących ciepło przemian chemicznych może być realizowane na dwa sposoby: w wyniku odwracalnych reakcji chemicznych oraz procesu sorpcji/desorpcji.

Magazynowanie energii termicznej podzielone jest według zakresu temperatur; możemy wyróżnić: magazynowanie niskotemperaturowe do 120°C; magazynowanie średnotemperaturowe od 120°C do 500°C oraz magazynowanie wysokotemperaturowe powyżej 500°C. Ze względu na czas magazynowania możemy wyróżnić: magazynowanie krótkoterminowe – od kilku godzin do kilku dni, magazynowanie średnioterminowe – od kilku dni do kilku tygodni oraz magazynowanie długoterminowe, sezonowe. Wybór rozwiązania konstrukcyjnego oraz metody magazynowania energii termicznej zależy głównie od źródła oraz odbiornika energii [1].

Do podstawowych wymagań stawianych magazynom energii termicznej można zaliczyć:

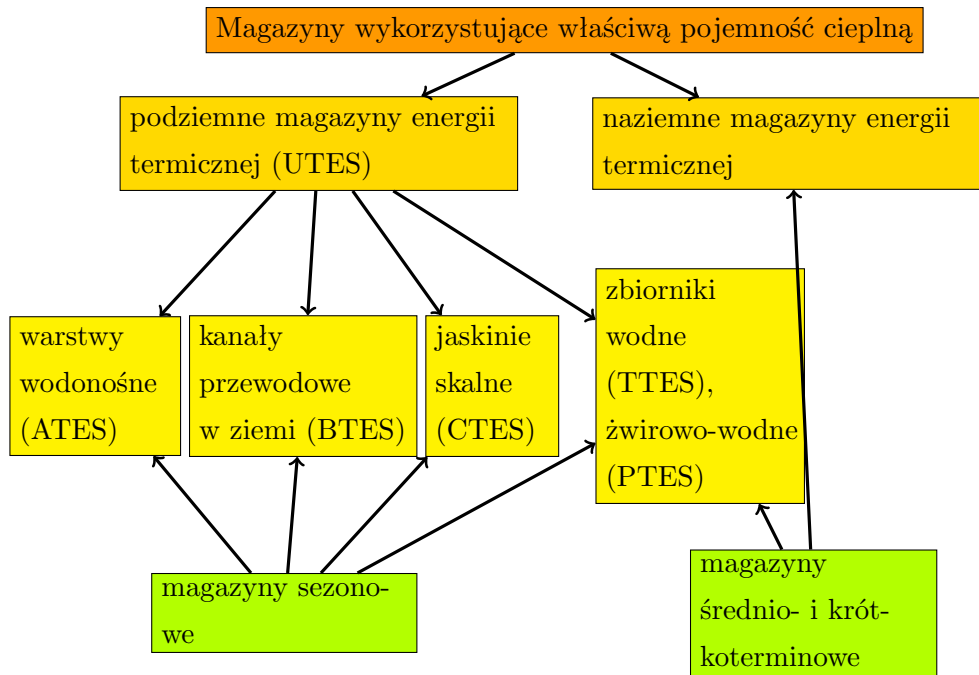
- dużą gęstość energii, aby magazyn zajmował możliwie małą przestrzeń – J/m^3 ,



Rysunek 1.1. Podział metod magazynowania energii termicznej; s-s (ciało stałe – ciało stałe), s-c (ciało stałe – ciecz), c-g (ciecz – gaz), s-g (ciało stałe – gaz) [6]

- dużą pojemność cieplną – J/K,
- wystarczającą moc ładowania i rozładowywania, aby magazyn mógł przyjmować i oddawać wymagane strumienie energii,
- niskie straty w czasie postoju, a tym samym wysoką sprawność,
- trwałość konstrukcji i stabilność parametrów pracy w dłuższym czasie (cykle, lata),
- odporność na warunki zewnętrzne, korzystna cena.

Podwyższenie temperatury medium magazynującego to najprostszy sposób zmagazynowania energii termicznej, a jej ilość można wyznaczyć z równania przedstawionego na rysunku 2.1. Dzięki wykorzystaniu właściwej pojemności cieplnej substancji możliwe jest magazynowanie energii termicznej w cieczach lub ciałach stałych (rys. 2.2). Technicznie magazynowanie energii wykorzystujące właściwą pojemność cieplną podzielono na systemy podziemne i naziemne. W ramach podziemnego magazynowania energii (ang. Underground Thermal Energy Storage – UTES) możemy wyróżnić: układy wykorzystujące warstwy wodonośne (ang. Aquifer Thermal Energy Storage – ATES), układy wykorzystujące kanały przewodowe w ziemi, tak zwane otworowe wymienniki ciepła (ang. Borehole Thermal Energy Storage – BTES), układy wykorzystujące jaskinie (ang. Cavern Thermal Energy Storage – CTES) oraz podziemne zbiorniki wodne (ang. Tank Thermal Energy Storage – TTES) lub zbiorniki zagłębione w gruncie wypełnione wodą i żwirem (ang. Pit Thermal Energy Storage – PTES). W ramach naziemnego magazynowania energii możemy wyróżnić: układy wykorzystujące zbiorniki na przykład z wodą.

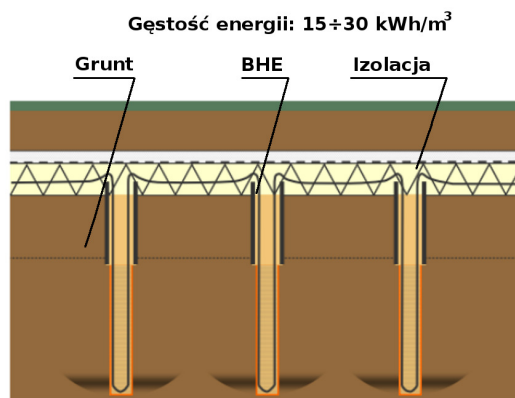


Rysunek 1.2. Podział magazynów energii termicznej wykorzystujących właściwą pojemność cieplną substancji [6]

1.3. Systemy BTES

Magazynowanie energii z wykorzystaniem otworowych wymienników ciepła (BTES) to system sezonowego magazynowania energii termicznej w układzie zamkniętym. Jest to metoda podziemnego magazynowania energii oparta na wykorzystaniu od kilkunastu do nawet kilku tysięcy otworowych wymienników ciepła (ang. Borehole Heat Exchanger – BHE), które umożliwiają zarówno pozyskiwanie ciepła, jak i przekazywanie go do górotworu (rys. 2.3). Technologia ta stosowana jest na coraz większą skalę w instalacjach grzewczo-chłodniczych, we współpracy z kolektorami słonecznymi, przy pozyskaniu ciepła odpadowego na niskim i wysokim poziomie temperaturowym (do 100°C), jak również z pompami ciepła – jako dolne źródło ciepła. Pasywne systemy BTES zaprojektowano w ten sposób, aby sezonowo magazynować i odbierać ciepło, w przeciwieństwie do często spotykanych instalacji (ang. Ground Source Heat Pump – GSHP), które mają na celu tylko odprowadzić ciepło z górotworu.

Energia dostarczana do górotworu może pochodzić z różnych źródeł, głównie są to kolektory słoneczne, tak zwane ciepło odpadowe oraz pompy ciepła pracujące w trybie chłodzenia (rys. 2.4). Górotwór można wykorzystać jako niskotemperaturowe źródło ciepła lub magazyn energii termicznej. W sytuacji wykorzystania jako źródło niskotemperaturowe instalacja cieplna wyposażona jest w pompę ciepła. Do zapewnienia prawidłowej eksploatacji górotwór należy jednak regenerować. W przypadku braku regeneracji i wieloletniej



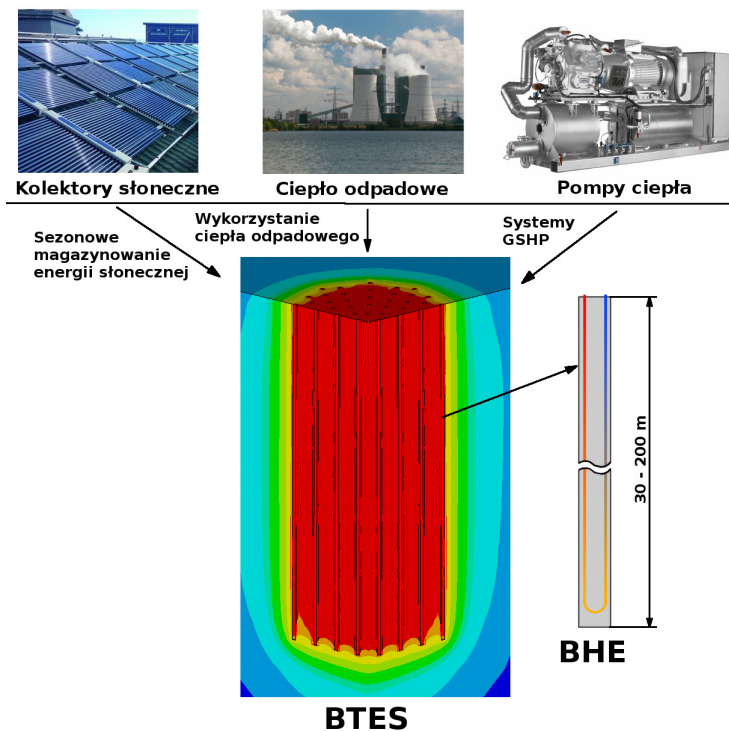
Rysunek 1.3. Schemat magazynów energii w technologii BTES [4]

eksploatacji jego temperatura sukcesywnie maleje [5]. Regeneracja może odbywać się naturalnie (system GSHP) – w wyniku promieniowania słonecznego, ciągłego transportu ciepła z wnętrza ziemi lub dzięki przepływowi wód podziemnych. Górotwór można również regenerować sztucznie, a do realizacji takiego systemu należy sprzęgnąć GSHP z BTES, do którego energia dostarczana jest na przykład z kolektorów słonecznych, układów chłodzenia, wentylacji lub jako ciepło odpadowe. Systemy takie, choć często klasyfikowane jako magazyny energii, traktują górotwór jako źródło ciepła, które w celu wydłużenia czasu eksploatacji w danym cyklu grzewczym wymaga regeneracji. Drugim typem systemów BTES są instalacje wykorzystujące górotwór pasywnie, bez pomocy pompy ciepła.

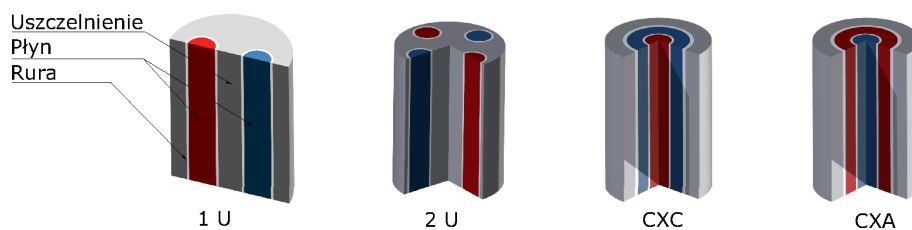
1.4. Otworowe wymienniki ciepła

W technologii BTES górotwór stanowi medium magazynujące energię termiczną, a otworowe wymienniki ciepła łączą magazyn z odbiorcą. Typowy otworowy wymiennik ciepła to rura umieszczona w wydrążonym otworze z materiałem uszczelniającym, który wypełnia przestrzeń otworu wokół rury. W rurze przepływa woda lub ciecz niezamarzająca. Obieg nośnika ciepła jest obiegiem zamkniętym. Najczęściej spotykane w praktyce konstrukcje wymienników (rys. 2.5) to otwory z pojedynczą U-rurką (składają się z rury wlotowej, rury powrotnej oraz materiału uszczelniającego), z podwójną U-rurką (składają się z dwóch rur wlotowych, dwóch powrotnych oraz materiału uszczelniającego) oraz wymienniki koncentryczne (składające się z rury powrotnej znajdującej się w rurze wlotowej oraz materiału uszczelniającego). Spotykane są również konstrukcje z potrójną U-rurką.

W otworach wykonywanych specjalnie do celów magazynowania energii termicznej możliwe jest zastosowanie dowolnej konstrukcji otworowego wymiennika ciepła. Najczęściej jednak wykonywane są otwory pionowe o konstrukcji pojedynczej lub podwójnej U-rurki, średnicy około 150 mm i głębokościach do 100 m. U-rurki otworowych wymienników ciepła



Rysunek 1.4. Metody wykorzystania magazynu energii z otworowymi wymiennikami ciepła – na podstawie [3]



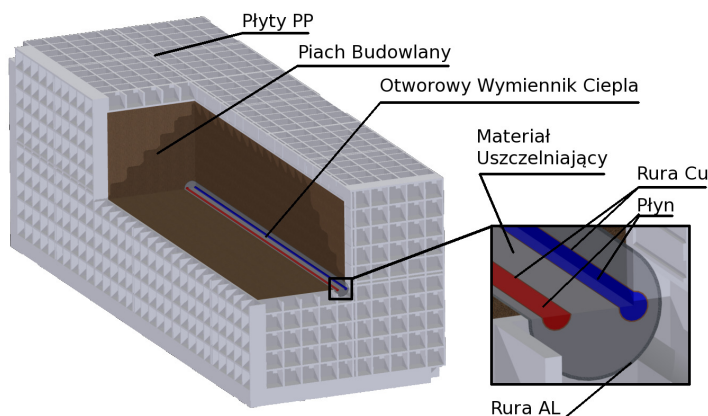
Rysunek 1.5. Typowe konstrukcje otworowych wymienników ciepła

wykonuje się z polietylenu (PEHD lub PE), natomiast rury wymienników koncentrycznych mogą być stalowe, z włókien szklanych lub z polipropylenu [2].

2. Opis stanowiska laboratoryjnego

2.1. Opis stanowiska

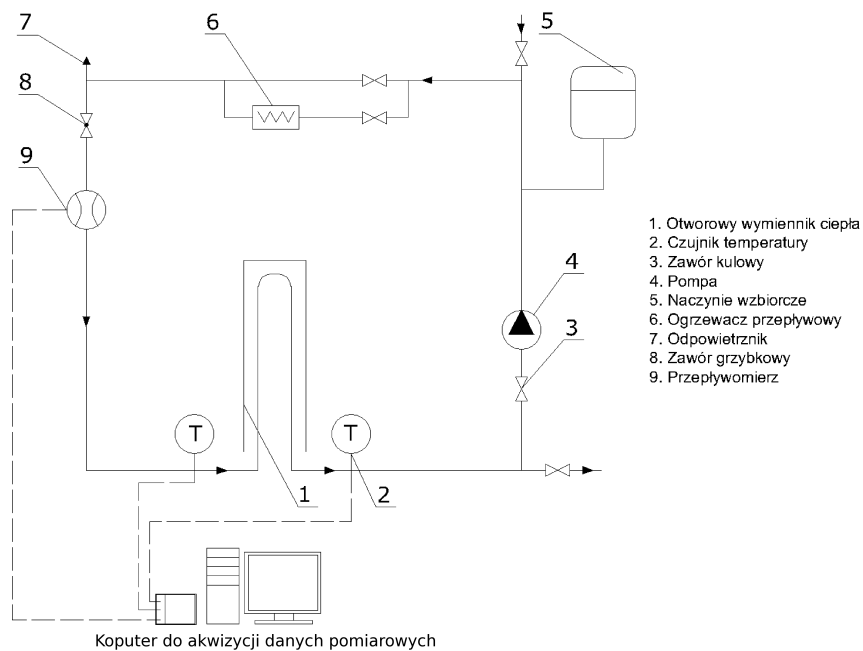
Magazyn energii termicznej stanowi prostopadłościenny zbiornik z płyt polipropylenowych o wymiarach $1m \times 1m \times 3m$ z wymiennikiem otworowym o długości $2,5m$ ułożonym w osi zbiornika (rys. 3.1). Zbiornik wypełniono piachem budowlanym, który stanowi medium magazynujące. Na rysunku 3.2 przedstawiono schemat opracowanego stanowiska laboratoryjnego, natomiast na rysunku 3.3 poglądowe zdjęcie stanowiska.



Rysunek 2.1. Widok laboratoryjnego magazynu energii z wymiennikiem otworowym

Na wpływie i wypływie do otworowego wymiennika ciepła (1) dokonywany jest pomiar temperatury (2) płynu, którego obieg wymuszono pompą cyrkulacyjną (4). Ogrzewacz przepływowy (6) stanowi źródło ciepła zarówno w obiegu zamkniętym, jak również w obiegu otwartym. Zastosowane zawory kulowe (3) pozwalają wybrać tryb pracy instalacji, a zawór grzybkowy (8) pozwala na precyzyjną regulację strumienia przepływu. Za pomocą przepływomierza (9) dokonywany jest pomiar strumienia objętości przepływającego płynu. Zastosowane naczynie wzbiorcze (5) kompensuje zmiany objętości płynu w wyniku jego rozszerzalności termicznej, natomiast odpowietrznik (7) umożliwia odprowadzenie powietrza z instalacji.

Podstawowe elementy wykonanego U-rurowego otworowego wymiennika ciepła to miedziana U-rurka o średnicy $0,018m$ i grubości ścianki $0,0011m$, materiał uszczelniający (Termocem) oraz rura aluminiowa o średnicy $0,08m$ i grubości ścianki $0,002m$ zapewnia-



Rysunek 2.2. Schemat instalacji na stanowisku laboratoryjnym



Rysunek 2.3. Stanowisko laboratoryjne

jąca odpowiedni kształt wymiennika. W tabeli 3.1 przedstawiono parametry geometryczne otworowego wymiennika ciepła.

Wykonana instalacja umożliwia pracę w układzie zamkniętym lub otwartym, a zastosowana pompa obiegowa oraz zawór regulacyjny pozwalają na płynną regulację prędkości przepływu czynnika. Możliwy jest również pomiar strumienia objętości przepływającego

Tabela 2.1. Parametry geometryczne otworowego wymiennika ciepła

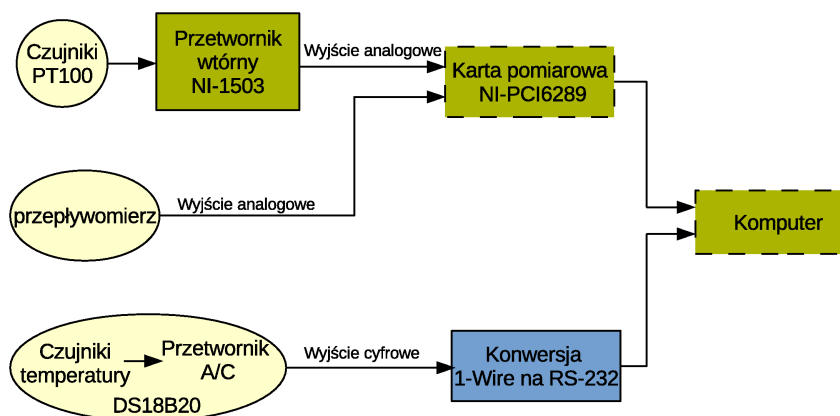
Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
Długość wymiennika	L	m	2,5
Średnica rury aluminiowej	D_{al}	m	0,08
Grubość rury aluminiowej	b	m	0,002
Zewnętrzna średnica U-rury miedzianej	$D_{p,o}$	m	0,018
Wewnętrzna średnica U-rury miedzianej	$D_{p,i}$	m	0,0158
Rozstaw rur U-rurek wymiennika	w	m	0,046

czynnika, co wraz z pomiarem temperatury pozwala określić moc wymiennika oraz ilość energii wprowadzonej i odzyskanej z magazynu.

2.2. Opis zastosowanej aparatury pomiarowej

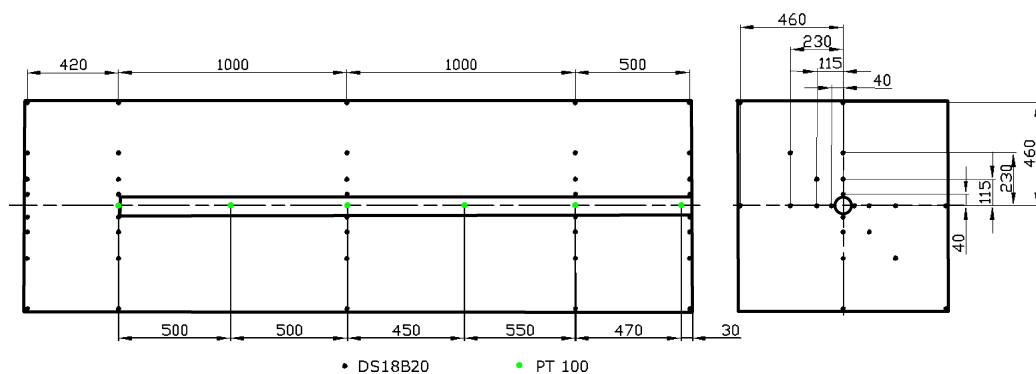
Najistotniejsze elementy zaprojektowanego i zestawionego toru pomiarowego (rys. 3.4) to wielokanałowy zestaw do pomiaru temperatury oraz rozproszony system pomiaru temperatury oparty o układy scalone DS18B20. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na:

- pomiar temperatury płynu na wpływie i wypływie nośnika ciepła,
- pomiar temperatury materiału uszczelniającego w kilku punktach na osi wymiennika (rys. 3.5),
- pomiar temperatury w 110 punktach medium magazynującego (rys. 3.5),
- wizualizację rozkładu temperatury w kilku przekrojach medium magazynującego.



Rysunek 2.4. Schemat toru pomiarowego stanowiska laboratoryjnego

Pomiaru temperatury czynnika na wpływie i wypływie dokonano przy pomocy rezystancyjnych czujników temperatury Pt100 wykonanych w klasie 1/10 B według PN-EN 60751. Do



Rysunek 2.5. Schemat rozmieszczenia czujników temperatury na stanowisku laboratoryjnym

Do pomiaru temperatury w osi wymiennika zastosowano czujniki rezystancyjne Pt100 wykonane w klasie 1/3 B według PN-EN 60751. Zastosowanie czujników z czterema przewodami pozwoliło wyeliminować wpływ rezystancji przewodów pomiarowych na wynik pomiaru. Do pomiaru strumienia objętości przepływającego płynu wykorzystano przepływomierz z kołem łopatkowym o klasie dokładności 2. Akwizycję danych pomiarowych z powyższych przyrządów zrealizowano z zastosowaniem karty pomiarowej NI PCI-6289 oraz układu do kondycjonowania (przetwornik wtórny) sygnału NI SCXI-1503 oraz pakietu LabView. Zaletą takiego rozwiązania jest duża dokładność oraz możliwość wykonywania pomiarów z wysoką częstotliwością próbkowania.

Do pomiaru rozkładu temperatury w magazynie wykorzystano rozproszony system pomiaru temperatury oparty o układy scalone DS18B20 (rys 3.4). System składa się z dwudziestu dwóch linii pomiarowych, w każdej po pięć czujników rozmieszczonych zgodnie z rysunkiem 3.5. Zaletą takiego rozwiązania jest niska cena oraz brak zakłóceń w torze pomiarowym, ponieważ sygnał przesyłano w postaci cyfrowej z wykorzystaniem magistrali 1-wire oraz portu szeregowego RS-232. Do celów akwizycji danych pomiarowych zastosowano środowisko Linux z wykorzystaniem wolnodostępnego systemu zarządzania relacyjnymi bazami danych PostgreSQL oraz program do odczytu temperatury Digttemp. Tak wykonany system pozwala na zdalną obserwację mierzonych wielkości.

3. Przeprowadzenie i opracowanie wyników pomiarów

3.1. Przeprowadzenie pomiarów

Wykonanie pomiarów na stanowisku laboratoryjnym przebiega według następujących punktów.

1. Podłączenie elementów wykonawczych do sieci 230 V - wykonuje prowadzący zajęcia.
2. Sprawdzenie wyłącznika bezpieczeństwa.
3. Włączenie układu sterującego instalacją hydrauliczną.
4. Włączenie układu kontrolno-pomiarowego.
5. Uruchomienie komputera z oprogramowaniem do akwizycji danych pomiarowych.
6. Ustawienie trybu pracy instalacji.
7. Uruchomienie i zapis pomiarów na dysku PC.

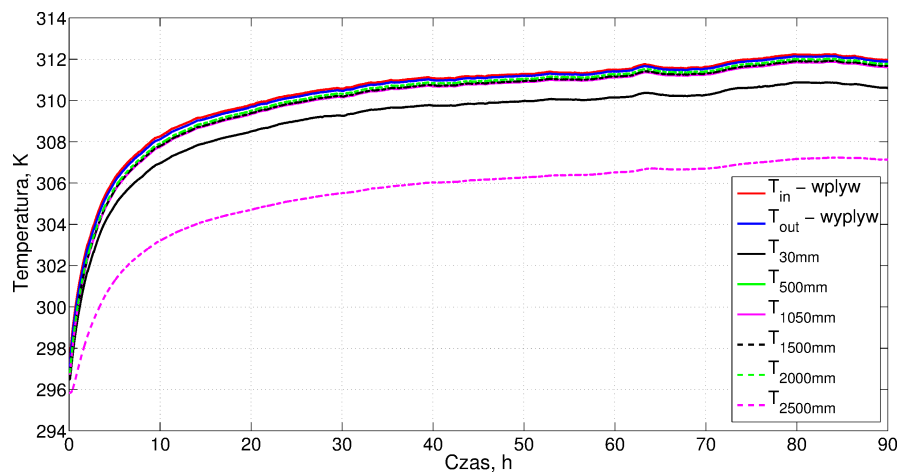
3.2. Opracowanie wyników pomiarów

Na rysunku 4.1 przedstawiono przykładowe zmiany temperatury na wpływie i wypływie oraz w wybranych punktach wymiennika w procesie magazynowania energii. **Z racji, że proces magazynowania energii w gruncie charakteryzuje się dużą bezwładnością, pomiary trwają kilkadziesiąt godzin. Wobec tego, wyniki pomiarów w postaci plików tekstowych zostaną udostępnione z wykorzystaniem platformy UPEL.**

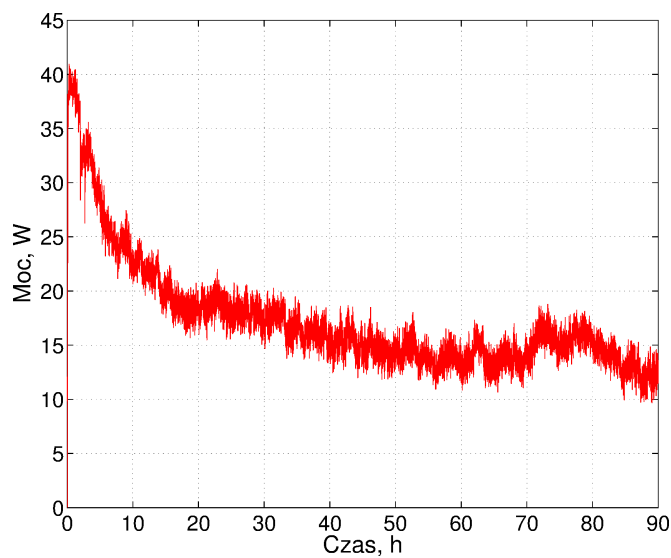
Moc termiczną wymiennika należy określić na podstawie zależności:

$$Q(t) = \dot{V}_f \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{in}(t) - T_{out}(t)) \quad (3.1)$$

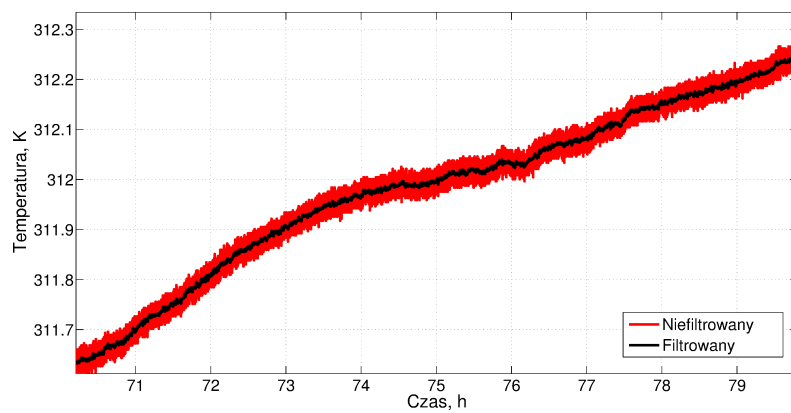
gdzie: gęstość wody ρ_f , ciepło właściwe wody c_f . Na rysunku 4.2 przedstawiono przykładowy wykres zmian mocy wymiennika w czasie procesu magazynowania energii. W celu eliminacji szumu pomiarowego (w zależności od ustawień systemu akwizycji danych pomiarowych) należy zastosować filtr Savitzky'ego-Golay'a. Efektem jego działania jest wykres zmian temperatury płynu przedstawiony na rysunku 4.3.



Rysunek 3.1. Wykres zmian temperatury płynu oraz materiału uszczelniającego w procesie magazynowania energii



Rysunek 3.2. Wykres zmian mocy otworowego wymiennika ciepła w czasie



Rysunek 3.3. Wykres zmian temperatury płynu przed i po zastosowaniu filtra Savitzky-Golay

Ilość dostarczonej/odebranej do/z układu energii należy obliczyć na podstawie zależności:

$$E_{in/out} = \int_{t_{start}}^{t_{stop}} Q(t) dt = \int_{t_{start}}^{t_{stop}} [\dot{V}_f \cdot \rho_f \cdot c_f \cdot (T_{in}(t) - T_{out}(t))] dt \quad (3.2)$$

Właściwości termo-fizyczne wody należy przyjąć z tablic podając źródło.

Na podstawie przeprowadzonych/dostarczonych pomiarów należy określić efektywność energetyczną procesu magazynowania na podstawie równania:

$$eff = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (3.3)$$

Ilość zmagazynowanej energii można oszacować na podstawie rozproszonego pomiaru temperatury wykorzystującego czujniki DS18B20 zgodnie z zależnością:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n T(t = start)}{n} \quad (3.4)$$

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^n T(t = koniec)}{n} \quad (3.5)$$

gdzie n – to liczba czujników.

$$E = m \cdot c_w \cdot (T_k - T_p) \quad (3.6)$$

gdzie: m – masa medium magazynującego, c_w – ciepło właściwe medium magazynującego.

3.3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu z przeprowadzonych/dostarczonych pomiarów należy zawrzeć:

1. Krótki opis i schemat stanowiska pomiarowego.
2. Zamieścić równania z przykładowym podstawieniem danych.
3. Wyniki obliczeń zmian mocy termicznej w czasie.
4. Wyniki obliczeń ilości dostarczonej/odebranej energii z układu (podać metodę całkowania).
5. Ocenić efektywność procesu magazynowania.
6. Oszacować ilość zmagazynowanej/odzyskanej energii na podstawie czujników DS18B20.
7. Sformułować wnioski.

Bibliografia

- [1] R. Domański. *Magazynowanie energii cieplnej*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1990.
- [2] A. Gonet. *Metodyka identyfikacji potencjału cieplnego górotworu wraz z technologią wykonywania i eksploatacji otworowych wymienników ciepła: praca zbiorowa*. Wydawnictwa AGH, 2011.
- [3] M. Li and A. C. K. Lai. Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales. *Applied Energy*, 151:178–191, 2015.
- [4] L. Navarro, A. de Gracia, S. Colclough, M. Browne, S. J. McCormack, P. Griffiths, and L. F. Cabeza. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. *Renewable Energy*, 88:526–547, 2016.
- [5] T. Śliwa and M. A. Rosen. Natural and artificial methods for regeneration of heat resources for borehole heat exchangers to enhance the sustainability of underground thermal storages: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 7(10):13104–13125, 2015.
- [6] J. Wołoszyn. *Wpływ parametrów materiałowych, konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na efektywność podziemnego magazynowania energii termicznej*. Wydawnictwa AGH, 2019.