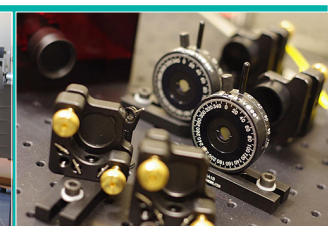


Ćwiczenie 7

Badanie własności pompy ciepła współpracującej z kolektorem słonecznym



I. Zagadnienia do opracowania.

1. Procesy przenoszenia ciepła:
 - a) przewodzenie ciepła;
 - b) promieniowanie temperaturowe;
 - c) dyfuzja.
2. Promieniowanie elektromagnetyczne Słońca.
3. Efekt cieplarniany.
4. Kolektor słoneczny:
 - a) rodzaje kolektorów;
 - b) budowa i zasada działania kolektorów słonecznych;
 - c) sprawność kolektora.
5. Podstawy termodynamiki:
 - a) przemiany gazowe;
 - b) zasady termodynamiki;
 - c) układ termodynamiczny;
 - d) przemiany termodynamiczne odwracalne i nieodwracalne;
 - e) zjawisko Joule'a – Thomsona.
6. Pompa ciepła:
 - a) podział pomp ciepła;
 - b) budowa i zasada działania pompy ciepła;
 - c) współczynnik sprawności i moc pompy.
7. Słoneczne instalacje ciepłe.
8. Budowa stanowiska pomiarowego oraz przebieg doświadczenia.

II. Zadania doświadczalne.

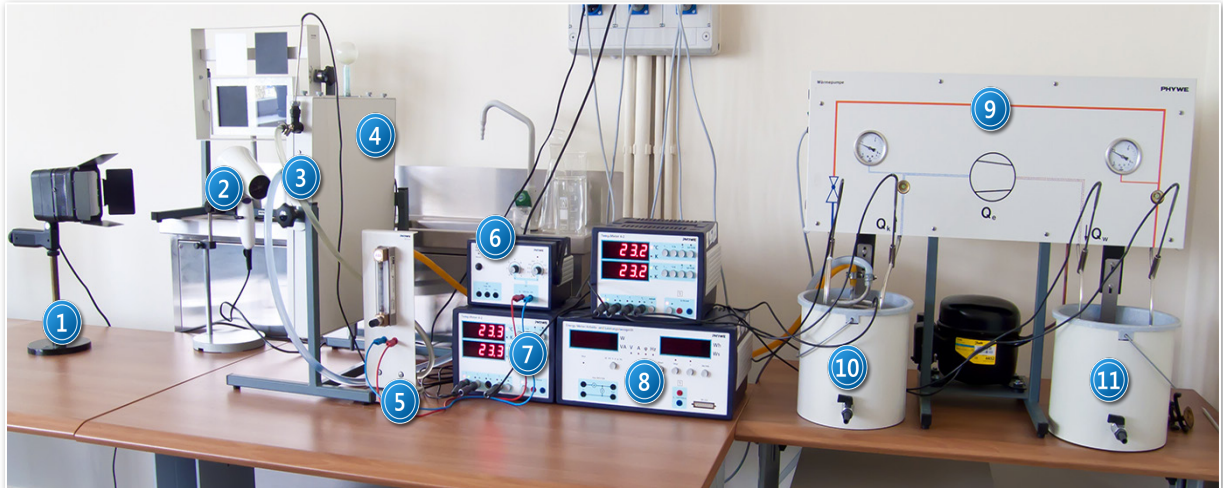
1. Zapoznać się z układem pomiarowym przedstawionym na *Zdjęciu 1*. Wykonać pomiary według szczegółowego opisu procedur pomiarowych zamieszczonego w *Dodatku*.
2. Określić współczynnik sprawności wodnego kolektora słonecznego.



Wskazówka

Czynności z punktów II.2. – II.4. wykonać według szczegółowych instrukcji zamieszczonych w *Dodatku*.

3. Wyznaczyć współczynnik sprawności pompy ciepła.
4. Określić całkowitą sprawność układu pompa – kolektor.



Zdjęcie 1. Stanowisko pomiarowe do badania układu pompa ciepła – kolektor słoneczny: 1 – lampa halogenowa; 2 – suszarka; 3 – sonda termoelektryczna; 4 – kolektor słoneczny; 5 – pompa wodna z miernikiem przepływu; 6 – zasilacz pompy wodnej; 7 – cyfrowy miernik temperatury; 8 – miernik mocy, czasu i energii elektrycznej; 9 – pompa ciepła; 10 – rezerwuar z parownikiem i wymiennikiem ciepła; 11 – rezerwuar ze skraplaczem.

III. Zestaw przyrządów.

1. Kolektor słoneczny.
2. Pompa ciepła.
3. Parownik.
4. Skraplacz.
5. Wymiennik ciepła.
6. Rezerwuar wymiennika.
7. Lampa halogenowa o mocy 1 kW.
8. Cyfrowy miernik temperatury.
9. Miernik mocy, czasu i energii elektrycznej.
10. Sondy termoelektryczne.
11. Pompa wodna z zasilaczem.
12. Suszarka.
13. Grzałka.
14. Metrówka.
15. Stoper.

IV. Literatura.

1. R. Eisberg, R. Resnick – „Fizyka kwantowa atomów, cząsteczek, ciał stałych, jąder i cząstek elementarnych”, PWN, Warszawa 1983.
2. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker – „Podstawy fizyki”, T 2., PWN, Warszawa 2003.
3. H. Kaiser – „Wykorzystanie energii słonecznej”, Wydawnictwo AGH, Kraków 1995.
4. W. Lewandowski – „Proekologiczne odnawialne źródła energii”, WNT, Warszawa 2002.
5. Z. Pluta – „Słoneczne instalacje energetyczne”, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej 2007.
6. M. Zawadzki – „Kolektory słoneczne pompy ciepła na tak”, Oficyna Wydawnicza Polska Ekologia, Warszawa 2003.
7. PHYWE Systeme GmbH & Co.KG – “Solar Ray Collector”, Laboratory Experiments, Physics3.6.01-00, 2008.
8. L. Andr en – “Solar Installations. Practical Applications for the Built Environment”, James & James Science Publishers, London 2003.
9. R. Eisberg, R. Resnick – “Quantum Physics of Atom, Molecules, Solids, Nuclei and Particles”, John Wiley & Sons Ltd, New York 1985.
10. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker – “Fundamentals of Physics”, John Wiley & Sons Ltd, New York 2001.
11. M. Fox – “Optical Properties of Solid”, Oxford University Press, Oxford 2001.

Dodatek

Przebieg doświadczenia

I. Wykonać pomiary temperatur przy temperaturze wody na wejściu kolektora $T_{IN} \approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ oraz przy oświetlaniu kolektora lampą.

1. Rezerwuar z umieszczonym wymiennikiem ciepła (10 na *Zdjęciu 1*) wypełnić wodą, tak aby spirale wymiennika ciepła były całkowicie zanurzone. Powstałą kąpiel starannie wymieszać.
2. Umieścić w zlewce grzałkę. Mieszając, podgrzać wodę do temperatury około $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, po czym wyłączyć zasilanie grzałki. W trakcie trwania kolejnych etapów doświadczenia należy regularnie mieszać wodę w rezerwuarze i utrzymywać możliwie stałą temperaturę wody na wejściu kolektora.
3. Ustawić lampę halogenową w odległości 70 cm od kolektora, a kolektor prostopadle do kierunku padającego światła.
Włączyć lampę.

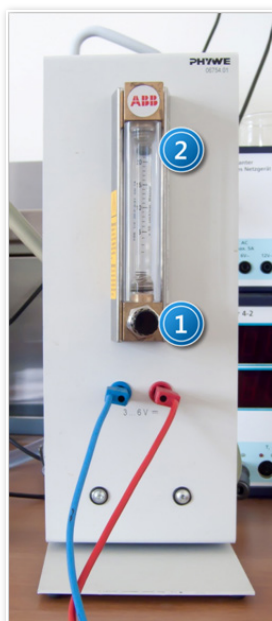


UWAGA!

Obudowa lampy silnie się nagrzewa! Zabrania się dotykania jej oraz zasłaniania otworów wentylacyjnych.

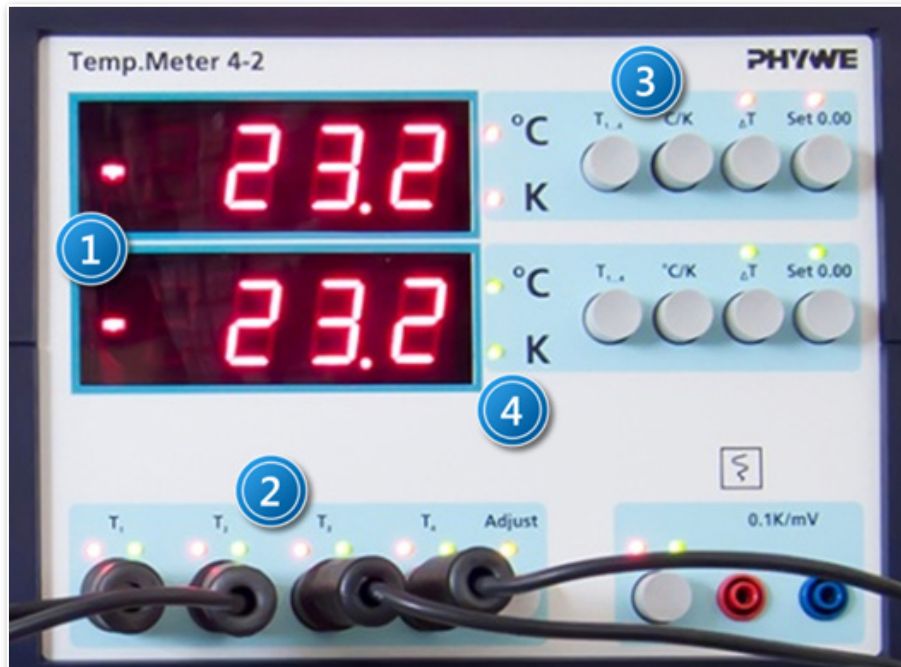
Lampę należy wyłączyć niezwłocznie po wykonaniu pomiarów.

4. Włączyć zasilacz pompy wodnej (*Zdjęcie 2*) i ustawić pokrętkę regulacji napięcia na wartość 4 V, a pokrętkę regulacji ogranicznika prądu na wartość 1 A.
5. Przy pomocy zaworu pompy wodnej ustawić prędkość przepływu na $100\text{ cm}^3/\text{min}$. Podczas wykonywania pomiarów stale kontrolować szybkość przepływu wody w obiegu kolektora.



Zdjęcie 2. Pompa cyrkulacyjna: 1 – zawór regulacji szybkości przepływu; 2 – wskaźnik przepływu.

6. Z cyfrowego miernika temperatury (Zdjęcie 3) notować wskazania temperatur na wejściu T_{IN} i wyjściu T_{OUT} kolektora oraz temperaturę w rezerwarze z wymiennikiem ciepła T_R przez 30 minut co 1 minutę. Po przeprowadzeniu każdego pomiaru wymieszać wodę w rezerwarze.



Zdjęcie 3. Cyfrowy miernik temperatury: 1 – wyświetlacze wskazujące temperaturę z wybranego kanału wejściowego; 2 – kanały wejściowe, świecenie czerwonej kontrolki – mierzona temperatura wyświetlana jest na górnym wyświetlaczu, zielonej kontrolki – na dolnym wyświetlaczu; 3 – przyciski sterujące kanałami, od lewej: zmiana kanału wejściowego, zmiana skali temperatury, zmiana trybu pracy, ustawienie zera; 4 – wskaźnik wybranej skali temperatury.

7. Po dokonaniu ostatniego odczytu wyłączyć lampę.
8. Powtórzyć pomiary z punktu I. 6. w *Dodatku* dla kolektora bez szyby i tylnej płyty.
9. Skręcić do minimum pokrętko regulacji napięcia zasilacza pompy, a następnie wyłączyć pompę wodną.
10. Opróżnić zbiornik wody przy pomocy kranu spustowego.
11. Na podstawie otrzymanych wyników we wspólnym układzie współrzędnych sporządzić wykresy zależności temperatur T_{IN} , T_{OUT} oraz T_R w funkcji czasu.
12. Obliczyć różnice temperatur na wejściu i wyjściu kolektora.
13. Obliczyć współczynnik sprawności kolektora korzystając z wzoru:

$$\eta = \frac{c_w \dot{m}(T_{OUT} - T_{IN})}{qA} \quad , \quad (1)$$

gdzie: T_{OUT} – temperatura wody na wyjściu kolektora;

T_{IN} – temperatura wody na wejściu kolektora;

c_w – ciepło właściwe wody, $c_w = 4186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$;

\dot{m} – prędkość przepływu wody, $\dot{m}_1 = 100 \text{ g/min}$, $\dot{m}_2 = 200 \text{ g/min}$;

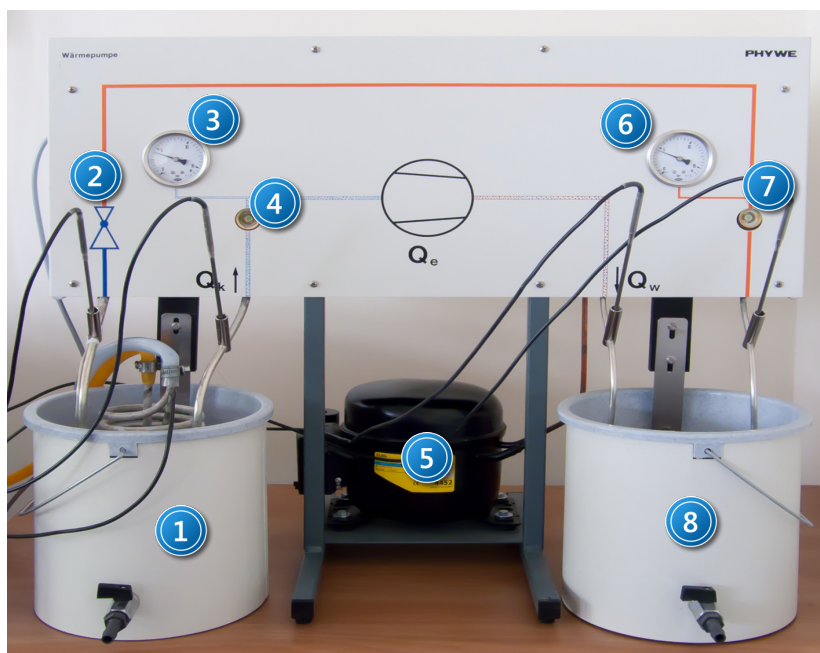
A – powierzchnia czynna kolektora, $A = 0,12 \text{ m}^2$;

q – natężenie padającego światła w odległości 70 cm od kolektora, $q = 1 \text{ kW/m}^2$.

Obliczyć błędy wyznaczonych wartości współczynników sprawności kolektora.

II. Wyznaczyć sprawność pompy ciepła.

1. Napełnić rezerwuary (1 i 8 na Zdjęciu 4) zimną wodą (około $10 \text{ }^\circ\text{C}$) do poziomu zaznaczonego na ściankach zbiornika, tak aby spirale wymienników ciepła były całkowicie zanurzone. Woda w zbiorniku skraplacza nie może być zimniejsza niż w zbiorniku parownika. Wymieszać wodę w rezerwuarach.



Zdjęcie 4. Pompa ciepła: 1 – rezerwuar z parownikiem; 2 – zawór rozprężny; 3 – manometr mierzący nadciśnienie czynnika roboczego po opuszczeniu parownika; 4 – wiertnik umożliwiający obserwację stanu czynnika roboczego po opuszczeniu parownika; 5 – kompresor sprężający czynnik roboczy; 6 – manometr mierzący nadciśnienie czynnika roboczego po opuszczeniu skraplacza; 7 – wiertnik umożliwiający obserwację stanu czynnika roboczego po opuszczeniu skraplacza; 8 – rezerwuar ze skraplaczem.

2. Dokonać pomiaru wielkości:
 - ciśnienia za skraplaczem p_1 (manometr (6)) oraz ciśnienia za parownikiem p_2 (manometr (3));
 - temperatury wody T_1 w zbiorniku skraplacza oraz temperatury T_2 w zbiorniku parownika;

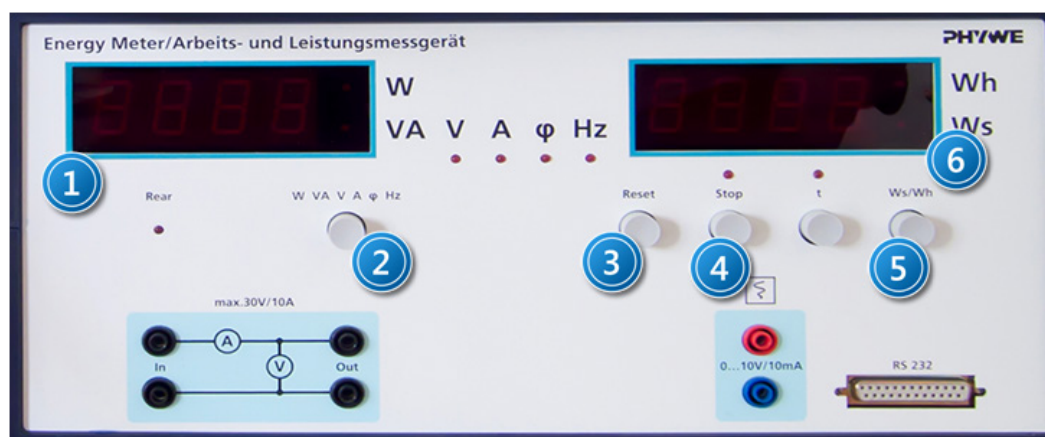
- temperatury czynnika chłodzącego na wejściu parownika T_p^{IN} oraz na wyjściu parownika T_p^{OUT} , temperatury czynnika chłodzącego na wejściu skraplacza T_s^{IN} oraz na wyjściu skraplacza T_s^{OUT} .
- 3. Włączyć zasilanie pompy.
- 4. Przez 30 minut co 2 minuty mierzyć p_1 , p_2 , T_1 , T_2 , T_p^{IN} , T_p^{OUT} , T_s^{IN} , T_s^{OUT} oraz obserwować wskazania miernika mocy.



UWAGA!

W trakcie wykonywania pomiarów, co około 2 minuty, należy mieszać wodę w obu zbiornikach.

- 5. Wyłączyć pompę ciepła.
- 6. Zanotować wskazania licznika energii elektrycznej (Zdjęcie 5) i skasować wskazania miernika.



Zdjęcie 5. Miernik mocy, czasu i energii elektrycznej: 1 – wyświetlacz wartości mocy; 2 – przycisk wyboru funkcji woltomierza; 3 – przycisk „RESET”; 4 – przycisk „STOP”; 5 – przycisk wyboru jednostek energii; 6 – wyświetlacz energii elektrycznej zużytej przez pompę.

- 7. Opróżnić zbiorniki wody przy pomocy kranów spustowych.
- 8. We wspólnym układzie współrzędnych sporządzić wykres temperatur w funkcji czasu.
- 9. Wyznaczyć wartości zmiany temperatur wody w jednostce czasu $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ z przebiegu funkcji $T_1(t)$ oraz $T_2(t)$ metodą przybliżenia wyników doświadczalnych odpowiednimi wielomianami. Wyniki przedstawić na wykresie. Określić błąd wyznaczonej wielkości. Zinterpretować otrzymane wyniki.

10. Obliczyć wartość współczynnika sprawności pompy korzystając z wzoru:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P} = \frac{c_w m_w \Delta T_1}{P \Delta t} \quad (2)$$

gdzie: \dot{Q} – natężenie przepływu ciepła, przekazane przez skraplacz, $\dot{Q} = c_w m_w \frac{\Delta T_1}{\Delta t}$;

P – elektryczna moc sprężarki, $P = 120$ W;

c_w – ciepło właściwe wody, $c_w = 4182$ J/kg·K;

m_w – masa wody, $V = 3,9$ dm³;

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$ – zmiana temperatury wody w jednostce czasu.

11. Z wyników pomiarów dla czasu $t = 10$ min odczytać wartości ciśnień czynnika roboczego p_1 i p_2 .

12. Z Tabeli 1. odczytać odpowiadającą ciśnieniu p_2 wartość właściwej entalpii pary czynnika roboczego h_1 oraz wartość objętości właściwej pary v oraz odpowiadającą ciśnieniu p_1 wartość właściwej entalpii czynnika roboczego w stanie ciekłym h_3 .

W celu skorzystania z tabeli parametrów czynnika roboczego, do wskazań manometru należy dodać wartość ciśnienia atmosferycznego równą 1 barowi (1 bar = 10⁵ Pa).

13. Obliczyć efektywność objętościową sprężarki korzystając ze wzoru:

$$\lambda = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_g} \quad , \quad (3)$$

gdzie: \dot{V} – rzeczywiste natężenie przepływu czynnika roboczego przez sprężarkę,

$$\dot{V} = v \frac{\dot{Q}}{h_1 - h_3};$$

\dot{Q} – natężenie przepływu ciepła pobieranego przez parownik;

v – objętość właściwa par czynnika roboczego;

h_1 – entalpią właściwą par czynnika;

h_3 – entalpią właściwą czynnika w stanie ciekłym;

\dot{V}_g – geometryczne natężenie przepływu, $\dot{V}_g = V_g f$;

V_g – pojemnością skokowa sprężarki, $V_g = 5,08$ cm³;

f – liczba obrotów tłoka sprężarki na minutę, $f = 1450$ min⁻¹.

Tabela 1. Parametry czynnika roboczego pompy: Θ – temperatura, p – wartość bezwzględna ciśnienia, v – objętość właściwa pary, h' – entalpia właściwa cieczy, h'' – entalpia właściwa pary.

Θ °C	p MPa	v m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg
-30	0.08436	0.22596	161.10	380.45
-20	0.13268	0.14744	173.82	386.66
-10	0.20052	0.09963	186.78	392.75
-8	0.21684	0.09246	189.40	393.95
-6	0.23418	0.08591	192.03	395.15
-4	0.25257	0.07991	194.68	396.33
-2	0.27206	0.07440	197.33	397.51
0	0.29269	0.06935	200.00	398.68
2	0.31450	0.06470	202.68	399.84
4	0.33755	0.06042	205.37	401.00
6	0.36186	0.05648	208.08	402.14
8	0.38749	0.05238	210.80	403.27
10	0.41449	0.04948	213.53	404.40
12	0.44289	0.04636	216.27	405.51
14	0.47276	0.04348	219.03	406.61
16	0.50413	0.04081	221.80	407.70
18	0.53706	0.03833	224.59	408.78
20	0.57159	0.03603	227.40	409.84
22	0.60777	0.03388	230.21	410.89
24	0.64566	0.03189	233.05	411.93
26	0.68531	0.03003	235.90	412.95
28	0.72676	0.02829	238.77	413.95
30	0.77008	0.02667	241.65	414.94
32	0.81530	0.02516	244.55	415.90
34	0.86250	0.02374	247.47	416.85
36	0.91172	0.02241	250.41	417.78
38	0.96301	0.02116	253.37	418.69
40	1.0165	0.01999	256.35	419.58
42	1.0721	0.01890	259.35	420.44
44	1.1300	0.01786	262.38	421.28
46	1.1901	0.01689	265.42	422.09
48	1.2527	0.01598	268.49	422.88
50	1.3177	0.01511	271.59	423.63
60	1.6815	0.01146	287.49	426.86
70	2.1165	0.00867	304.29	428.89

III. Badanie zespołu kolektor – pompa.

1. Włączyć zasilacz pompy wodnej i ustawić napięcie na wartość 4 V.
2. Przygotować pompę ciepła zgodnie z punktem II.1 *Dodatku*.
3. Otworzyć maksymalnie zawór pompy cyrkulacyjnej.
4. Obserwując wskazania miernika, odczekać aż temperatury T_{IN} na wejściu kolektora oraz T_{OUT} na wyjściu kolektora ustabilizują się i będą w przybliżeniu równe.
5. Przy pomocy zaworu pompy cyrkulacyjnej ustawić prędkość przepływu na 100 cm³/min. Podczas wykonywania pomiarów stale kontrolować szybkość przepływu wody w obiegu kolektora.
6. Włączyć zasilanie pompy.
7. Odczytywać i notować temperaturę T_{IN} na wejściu kolektora, T_{OUT} na wyjściu kolektora, temperaturę wody T_1 w zbiorniku skraplacza oraz temperatury T_2 w zbiorniku parownika w odstępach jednonumitowych aż do momentu, gdy temperatura wody T_1 osiągnie 0 °C.



UWAGA!

W trakcie wykonywania pomiarów należy mieszać wodę w obu zbiornikach co około 2 minuty.

8. Wyłączyć pompę ciepła.
9. Opróżnić zbiorniki wody przy pomocy kranów spustowych.
10. We wspólnym układzie współrzędnych sporządzić wykres temperatur T_{IN} i T_{OUT} w funkcji czasu.
11. Obliczyć sprawność kolektora w chwilach, w których odczytywano temperaturę korzystając z wzoru:

$$\eta = \frac{P_U}{AP_i} = \frac{\dot{m}c_w}{AP_i} (T_{OUT} - T_{IN})$$

gdzie: P_U – moc użyteczna, oddawana przez kolektor;

P_i – gęstość mocy promieniowania padającego na kolektor;

A – powierzchnia czynna kolektora, $A = 0,12 \text{ m}^2$;

\dot{m} – natężenie przepływu masy wody, $\dot{m} = 100 \text{ g/min}$;

c_w – ciepło właściwe wody, $c_w = 4182 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$;

T_{IN} – temperatura wody na wejściu kolektora;

T_{OUT} – temperatura wody na wyjściu kolektora.

Wyniki obliczeń przedstawić na wykresie, przybliżając punkty odpowiednią funkcją.

Określić błąd wyznaczonej wielkości.

Zinterpretować uzyskany wynik.

12. Wyznaczyć wartość współczynnika efektywności pompy ϵ zgodnie z punktami II.8. – II.10. w *Dodatku*.
13. Sprawdzić czy lampa halogenowa znajduje się w odległości 70 cm od kolektora oraz czy kolektor jest ustawiony prostopadle do kierunku padającego światła.
14. Powtórzyć czynności z punktów II.2. – II.12. w *Dodatku*.
Lampę włączyć równocześnie z pompą i stoperem.



UWAGA!

Obudowa lampy silnie nagrzewa się! Zabrania się dotykania obudowy lampy oraz zasłaniania jej otworów wentylacyjnych.

15. Po dokonaniu ostatniego odczytu wyłączyć lampę.
Wyłączyć pompę wodną skręcając do minimum pokrętko regulacji napięcia zasilacza pompy.
16. Przeprowadzić analizę wyników określając wszystkie czynniki jakie mogą mieć wpływ na współczynnik sprawności urządzeń.