

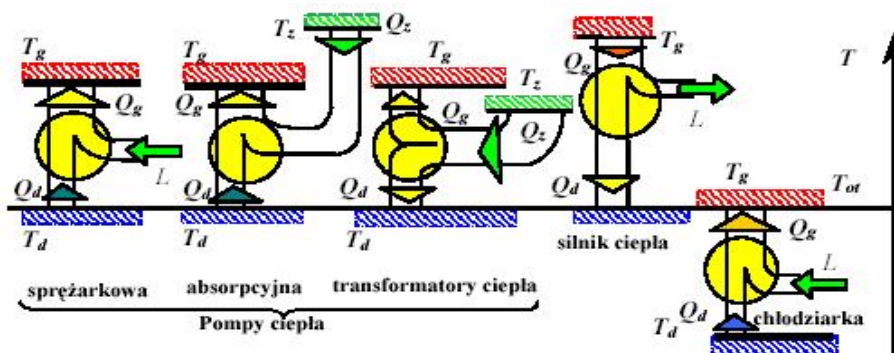
Laboratorium odnawialnych źródeł energii

Ćwiczenie nr 3

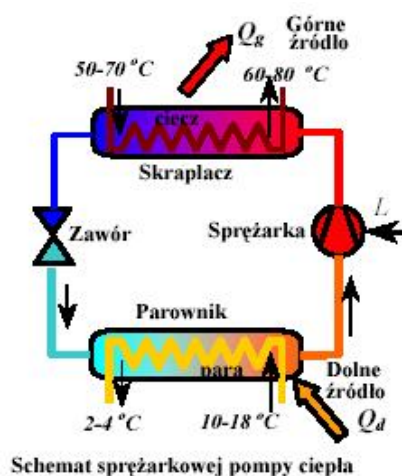
Temat: Wyznaczanie współczynników efektywności i sprawności pompy ciepła.

1. Wstęp.

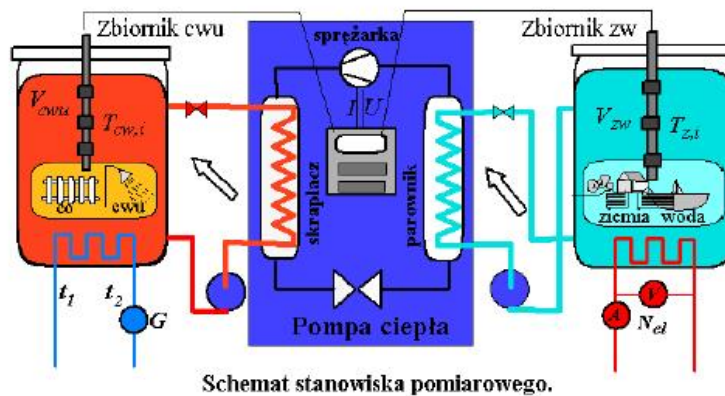
Zadaniem pompy ciepła jest transport ciepła z dolnego, niskotemperaturowego źródła ciepła, do górnego źródła o temperaturze wyższej. Zgodnie z II zasadą termodynamiki proces taki nie może zajść samorzutnie – aby był możliwy konieczne jest dostarczenie pracy lub ciepła do układu. W przypadku pompy ciepła pracę wykonuje sprężarka, natomiast dodatkowe ciepło jest dostarczane z zewnętrznych źródeł. Porównanie poszczególnych typów pomp ciepła na tle poziomów energetycznych, wyrażonych przez temperatury górnego i dolnego źródła ciepła przedstawia poniższy rysunek.



W trakcie ćwiczenia korzystano ze sprężarkowej pompy ciepła z czynnikiem jednoskładnikowym (freonem), której działanie obrazuje poniższy rysunek.



W parowniku następuje dostarczenie ciepła czynnikiem, który następnie jest sprężany w sprężarce, czyli wykonywana jest nad nim praca. Sprężony czynnik wpływa do skraplacza, gdzie skraplając się, przy stałym ciśnieniu i temperaturze, oddaje ciepło do otoczenia. Do regulacji przepływu służy zawór. W badanym przypadku zarówno dolne jak i górne źródło ciepła stanowiły zbiorniki z wodą, dzięki czemu możliwa była szybka obserwacja transportu ciepła ze względu na niską pojemność cieplną wody. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawia poniższy rysunek.



Pomiary polegały na odczycie temperatur źródła dolnego oraz górnego, a także na odczycie energii zużytej przez sprężarkę. Dodatkowo należało wyznaczyć objętość dolnego i górnego źródła ciepła w celu wyznaczenia ciepła oddanego przez dolne źródło ciepła oraz ciepła pobranego przez górne źródło. Istotnym parametrem jest również czas trwania doświadczenia, który pozwala wyznaczyć moc sprężarki, jak również moce oddane i pobrane w dolnym i górnym źródle ciepła.

Celem doświadczenia jest wyznaczenie współczynników efektywności oraz sprawności pomy, a także przedstawienie zmian tychże czynników w czasie, co pozwoli zaobserwować zmiany efektywności wymiany cieplnej w pompie w czasie oraz ze zmieniającymi się temperaturami (różnicą temperatur) dolnego i górnego źródła ciepła.

2. Wyniki pomiarów.

W tabeli poniżej przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów.

| t [min] | Tg1[°C] | Tg2[°C] | Tg3[°C] | Td1[°C] | Td2[°C] | Td3[°C] | Eel [kJ] |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 0 | 24 | 23,4 | 22,9 | 19,2 | 19 | 19,5 | 0 |
| 5 | 25,8 | 25,5 | 24,9 | 16,3 | 16,5 | 17,1 | 567 |
| 10 | 29,3 | 29,1 | 28,4 | 13,4 | 13,8 | 14,1 | 1081 |
| 15 | 32,9 | 32,6 | 31,9 | 10,7 | 10,8 | 11,3 | 1620 |
| 20 | 36,3 | 36 | 35,2 | 8,1 | 8,3 | 8,8 | 2170 |
| 22,5 | 38,5 | 38 | 37,3 | 6,7 | 7 | 7,4 | 2419,2 |
| 25 | 37,6 | 37,8 | 37,7 | 7 | 6,8 | 7,2 | 2419,2 |

3. Obliczenia.

W pierwszej kolejności należy wyznaczyć masę wody w dolnym i górnym źródle ciepła. Dokonuje się tego na podstawie objętości wody w obu zbiornikach. Przyjmujemy, że obie objętości są jednakowe (w rzeczywistości są praktycznie identyczne).

W celu wyznaczenia pożądanego objętości zmierzono zbiorniki, uwzględniając grubość ścian oraz niecałkowite napełnienie zbiorników; otrzymano następujące wyniki: średnica: $D = 0.475\text{m}$, wysokość: $H = 0.62\text{m}$. Objętość: $V = 0.1098\text{ m}^3$. Masa wody: $m = V \cdot \rho$, gdzie gęstość wody dobrano odpowiednio do jej temperatury.

Moc oddana przez dolne źródło, Q_d , jest w kolejnych odstępach czasu liczona z następującego wzoru:

$$Q_d = m_d \cdot c(T) \cdot (T_{d0} - T_{dn}) / t \cdot 60, n = 1 \dots 6.$$

Podobnie moc oddana w górnym źródle:

$$Q_g = m_g \cdot c(T) \cdot (T_{gn} - T_{g0}) / t \cdot 60, \quad n = 1 \dots 6.$$

Współczynnik efektywności pompy jest zdefiniowany jako: $\varepsilon = \frac{Q_g}{N}$ [-], gdzie N – moc

pobrana przez sprężarkę [W], $N = \frac{E_{el}}{t \cdot 60}$.

Sprawność jest określona jako: $\eta = \frac{Q_g}{N + Q_d} \cdot 100\%$ [%]

Rachunek błędów:

- niepewność standardowa wyznaczenia objętości S_v :

- niepewność pomiaru wysokości zbiornika H: -niepewność

eksperymentatora: $\Delta e = 0,001 \text{ m}$, niepewność wzorcowania: $\Delta w = 0,0001 \text{ m}$,

$$S_H = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta e^2 + \frac{1}{3} \Delta w^2} = 0,00058 \text{ m};$$

- niepewność pomiaru średnicy zbiornika D: -niepewność

eksperymentatora: $\Delta e = 0,001 \text{ m}$, niepewność wzorcowania: $\Delta w = 0,0001 \text{ m}$,

$$S_D = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta e^2 + \frac{1}{3} \Delta w^2} = 0,00058 \text{ m};$$

$$S_v = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2} D H S_D\right)^2 + \left(\frac{\pi}{4} D^2 S_H\right)^2} = 0,000287 \text{ m}^3.$$

- niepewność standardowa wyznaczenia masy: jako, że gęstość wody została

odczytana z tablic przyjęto, iż odchylenie $S_\rho = 0$. Dlatego $S_m = \sqrt{\rho S_v^2}$. Konkretnie wartości dla każdego z pomiarów umieszczono w tabeli poniżej.

- niepewność standardowa pomiaru temperatury: $\Delta e = 1.0 \text{ stC}$, $\Delta w = 0.1 \text{ stC}$

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta e^2 + \frac{1}{3} \Delta w^2} = 1,0049 \text{ stC};$$

- niepewność standardowa pomiaru czasu: $\Delta e = 0.25 \text{ min}$, $\Delta w = 0.001 \text{ min}$

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta e^2 + \frac{1}{3} \Delta w^2} = 0,145 \text{ min}.$$

- niepewność standardowa pomiaru energii sprężarki: $\Delta e = 0.1 \text{ kJ}$, $\Delta w = 0.01 \text{ kJ}$

$$S_E = \sqrt{\frac{1}{3} \Delta e^2 + \frac{1}{3} \Delta w^2} = 0,058 \text{ kJ}$$

- niepewność złożona wyznaczenia mocy sprężarki: $S_N = \sqrt{\left(\frac{S_E}{t}\right)^2 + \left(\frac{E \cdot S_t}{t^2}\right)^2}$ [kW]

(obliczone wartości w tabeli poniżej);

- niepewność standardowa wyznaczenia mocy dolnego/górnego źródła ciepła:

$$S_Q = \sqrt{\left(\frac{c \Delta T S_m}{t}\right)^2 + \left(\frac{m c S_T}{t}\right)^2 + \left(\frac{m c S_t}{t^2}\right)^2}$$
 [kW];

- niepewność standardowa wyznaczenia współczynnika efektywności:

$$S_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{S_{Qg}}{N}\right)^2 + \left(\frac{S_N Q_g}{N^2}\right)^2};$$

- niepewność standardowa wyznaczenia sprawności:

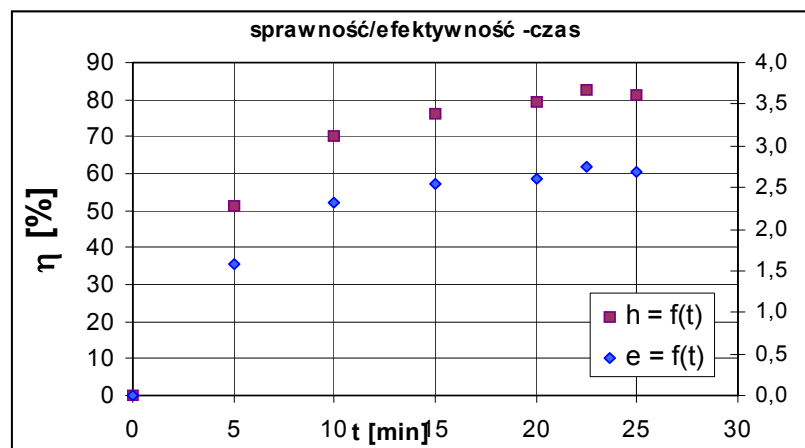
$$S_\eta = \sqrt{\left(\frac{S_{Qg}}{Q_d + N}\right)^2 + \left(\frac{Q_g S_{Qd}}{(Q_d + N)^2}\right)^2 + \left(\frac{S_N Q_g}{(Q_d + N)^2}\right)^2}.$$

Tabele wyników:

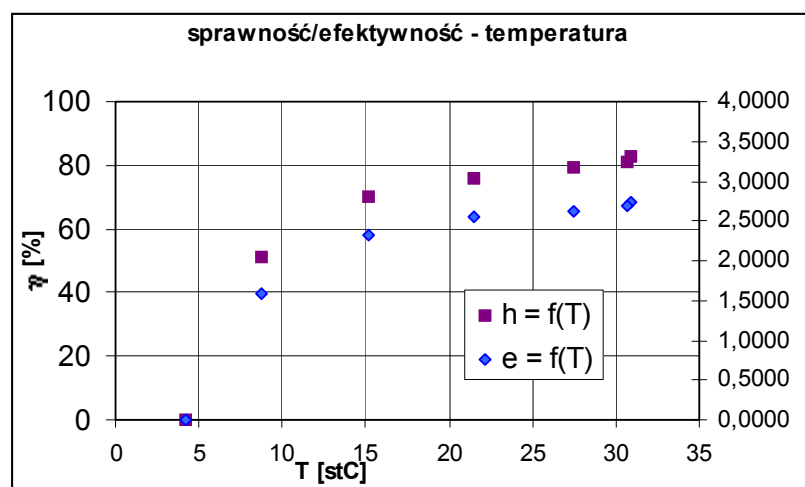
| md [kg] | Smd [kg] | mg [kg] | Smg [kg] | N [kW] | S _N [kW] | T _g [°C] | T _d [°C] |
|----------|----------|----------|----------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 109,6035 | 0,2865 | 109,6035 | 0,2865 | 0,0000 | 0,0000 | 23,4333 | 19,2333 |
| 109,6035 | 0,2865 | 109,4750 | 0,2862 | 1,8900 | 0,0548 | 25,4000 | 16,6333 |
| 109,6035 | 0,2865 | 109,4750 | 0,2862 | 1,8017 | 0,0261 | 28,9333 | 13,7667 |
| 109,6035 | 0,2865 | 109,3224 | 0,2858 | 1,8000 | 0,0174 | 32,4667 | 10,9333 |
| 109,6035 | 0,2865 | 109,3224 | 0,2858 | 1,8083 | 0,0131 | 35,8333 | 8,4000 |
| 109,6035 | 0,2865 | 109,3224 | 0,2858 | 1,7920 | 0,0115 | 37,9333 | 7,0333 |
| 109,6035 | 0,2865 | 109,3224 | 0,2858 | 1,6128 | 0,0094 | 37,7000 | 7,0000 |

| Q _d [kW] | SQ _d [kW] | Q _g [kW] | SQ _g [kW] | ε [-] | Sε [-] | η [%] | Sη [%] |
|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|--------|--------|---------|--------|
| 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3,9702 | 1,5353 | 2,9996 | 1,5335 | 1,5871 | 0,8127 | 51,1856 | 0,2943 |
| 4,1738 | 0,7675 | 4,1943 | 0,7666 | 2,3280 | 0,4268 | 70,1924 | 0,1571 |
| 4,2247 | 0,5117 | 4,5862 | 0,5105 | 2,5479 | 0,2847 | 76,1228 | 0,1069 |
| 4,1356 | 0,3838 | 4,7215 | 0,3829 | 2,6110 | 0,2126 | 79,4345 | 0,0826 |
| 4,1399 | 0,3412 | 4,9077 | 0,3404 | 2,7387 | 0,1908 | 82,7347 | 0,0748 |
| 3,7360 | 0,3073 | 4,3459 | 0,3067 | 2,6946 | 0,1908 | 81,2484 | 0,0743 |

Wykres zależności sprawności/wsp. efektywności od czasu:



Wykres zależności sprawności/efektywności od różnicy temperatur T_g-T_d = T:



4. Wnioski

Współczynnik efektywności pompy informuje o skuteczności transportu ciepła od dolnego źródła do górnego, bez względu na moc (ciepło) oddane w dolnym źródle. Informuje zatem w pewnym sensie o własnościach czynnika sprężanego oraz o sprawności samej sprężarki.

Każda pompa ciepła ma pewną granicę działania – odebranie całego (większości) ciepła od dolnego źródła. Podczas doświadczenia zaobserwowano taki stan – pompa wyłącza się wówczas automatycznie. Osiągnięcie takiego stanu można zaobserwować również w spadku sprawności oraz współczynnika efektywności.

Drugi z wykresów ujawnia wzrost sprawności wraz ze wzrostem różnicy temperatur między górnym i dolnym źródłem ciepła. Taka tendencja jest w pełni uzasadniona, gdyż różnica owa ułatwia wymianę ciepła między źródłami, czyli zjawiska parowania i skraplania czynnika przenoszącego ciepło.