

KONWERSJA ENERGII PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO Z WYKORZYSTANIEM ZWIERCIADEŁ PARABOLICZNYCH

Jolanta Fieducik¹

¹ Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, ul. Oczapowskiego 11, Olsztyn, e-mail: jolanta.fieducik@uwm.edu.pl

STRESZCZENIE

Wykorzystanie energii słonecznej jest obiecującym źródłem energii odnawialnej na pokrycie różnorodnych potrzeb energetycznych naszego społeczeństwa. Celem pracy będzie analiza możliwości konwersji energii słonecznej za pomocą zwierciadeł parabolicznych na energię cieplną niezbędną do zaspokojenia potrzeb w ciepłą wodę dla rodziny 4-osobowej. Niniejsze opracowanie przedstawia symulacje wykorzystania promieniowania słonecznego przy użyciu instalacji z koncentracją promieniowania. Paraboliczne zwierciadło kieruje skoncentrowaną wiązkę promieniowania słonecznego na rurę umieszczoną w ogniskowej zwierciadła, rura ta jest wypełniona wodą, która pod wpływem promieniowania słonecznego się ogrzewa. W artykule założono stałe wymiary zwierciadła i przekrój rury, natomiast symulację przeprowadzono dla różnych współczynników. Do obliczeń przyjęto, że współczynnik odbicia promieniowania słonecznego od zwierciadła r jest zmienny i przeprowadzono analizę jego wpływu na ilość ogrzanej cieczy. Współczynnik absorpcji promieniowania przez powierzchnię rury oznaczono przez a , współczynnik termicznej emisyjności powierzchni rury oznaczony e oraz przeprowadzono symulacje przy zmiennych jego wartościach na ilość ogrzanej cieczy. Z obliczeń i ich analizy wynika, że przy odpowiednio dobranych współczynnikach istnieje możliwość zaspokojenia potrzeb 4-osobowej rodziny w ciepłą wodę, przy użyciu zaproponowanej instalacji w warunkach Polski.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, zwierciadło paraboliczne, bilans energii,

CONVERSION OF SOLAR RADIATION USING PARABOLIC MIRRORS

ABSTRACT

The use of solar energy is a promising source of renewable energy to cover the energy needs of our society. The aim of the study will be to analyze the possibility of converting solar energy using parabolic reflectors to the heat energy needed to meet the needs for hot water of a family of 4-people. This study presents simulations of the use of solar radiation using radiant concentration systems. The parabolic mirror directs the concentrated beam of sunlight onto a tube located in the focal plane, which is filled with water that heats up under the influence of solar radiation. This article assumes constant mirror geometry and tube cross section, while the simulation is performed for different coefficients. For calculations it was assumed that the reflection coefficient of sunlight from the mirror r is variable and an analysis of its effect on the amount of heated liquid was made. The radiation absorption coefficient across the tube surface was determined by a , the thermal surface emissivity coefficient was determined as e and the simulations were performed at variable values for the amount of heated liquid. The calculations and their analysis show that it is possible to meet the needs for warm water of a 4-person family in Poland using appropriately chosen coefficients of the proposed installation.

Keywords: solar radiation, parabolic reflector, energy balance.

WPROWADZENIE

Promieniowanie słoneczne dociera do Ziemi w sposób ciągły, w mniejszym lub większym natężeniu i jest podstawowym czynnikiem zasobów

energetycznych na Ziemi. W Polsce, szczególnie ubogie w strumień energii pochodzącej z promieniowania słonecznego są miesiące późnej jesieni oraz wczesnej zimy, jak listopad, grudzień oraz styczeń i luty. W pozostałych miesiącach jest na-

wet nadmiar energii, którą można uzyskać z promieniowania słonecznego do celów użytkowych w ramach zapotrzebowania dla celów komunalnych w budynkach jednorodzinnych. Energię z promieniowania słonecznego można uzyskać na drodze różnych procesów fizycznych. Zwykle, są to ogniwa fotowoltaiczne, kolektory słoneczne oraz inne systemy wykorzystujące pośrednio energię promieniowania słonecznego jak energia wiatru czy pompy ciepła. Systemy przetwarzające energię promieniowania słonecznego na inne rodzaje energii ciągle są doskonałe i osiągają coraz większą wydajność. Jednym ze stosowanych systemów konwersji energii promieniowania słonecznego jest wykorzystanie do tego celu sferycznych zwierciadeł parabolicznych. Przedmiotem tego artykułu będzie analiza możliwości konwersji energii słonecznej za pomocą zwierciadeł parabolicznych na energię cieplną niezbędną do zaspokojenia potrzeb w ciepłą wodę dla rodziny 4 osobowej. Zwierciadła paraboliczne są szczególnie predysponowane do tego celu, ponieważ za pomocą tych zwierciadeł można uzyskać wodę użytkową o wysokiej temperaturze, nawet w miesiącach jesiennych i zimowych, przy względnie niewielkich kosztach takich systemów.

ISTOTA KONWERSJI ENERGII W ZWIERCIADŁACH PARABOLICZNYCH

Zwierciadła paraboliczne są umieszczone w kierunku wschód – zachód i obracane względem Słońca tak, aby padające promieniowanie słoneczne było wzdłuż osi zwierciadła. Promieniowanie słoneczne padające wzdłuż osi zwierciadła jest skupiane w ognisku zwierciadła. W celu uzyskania energii cieplnej z promieniowania słonecznego, w ognisku zwierciadła umieszcza się rurę odbiorczą, absorbującą promieniowanie. Schematycznie przedstawione to jest na rysunku 1.

Przez rurę odbiorczą przepływa woda, która jest ogrzewana przez skupione promieniowanie słoneczne. Temperatura wody wypływającej z rury odbiorczej, zależy od wielu czynników, takich jak natężenie promieniowania słonecznego, powierzchni czynnej zwierciadła, szybkości przepływu wody, zdolności odbijającej zwierciadła, zdolności absorbujących powierzchni rury oraz różnego rodzaju strat energii w postaci energii promienistej i bezpromienistej.

BILANS ENERGII

Bilans energetyczny prowadzący do ogrzania wody w rurze zwierciadła parabolicznego, w układzie przedstawionym na rysunku 1, ogólnie można zapisać następująco:

Energia zabsorbowana przez rurę odbiorczą jest wynikiem zabsorbowania promieniowania słonecznego skupionego przez zwierciadło i zależy od energii bezpośrednio dostarczonej przez Słońce – Q_s oraz energii pochodzenia słonecznego uzyskanej w wyniku rozproszenia – Q_r oraz energii pochodzącej od otoczenia Q_t , można zapisać jako sumę;

$$Q_a = Q_s + Q_r + Q_t \quad (1)$$

Energia całkowita zaabsorbowana przez rurę (Q_a) = [energia tracona przez emisję cieplną promieniowania poprzez rurę (Q_c) + energia odprowadzona przez ciecz (Q_o) + energia tracona w wyniku przewodnictwa ciepła w układzie mocowania rury (Q_p) + energia tracona poprzez przewodnictwo powietrza (Q_g)]

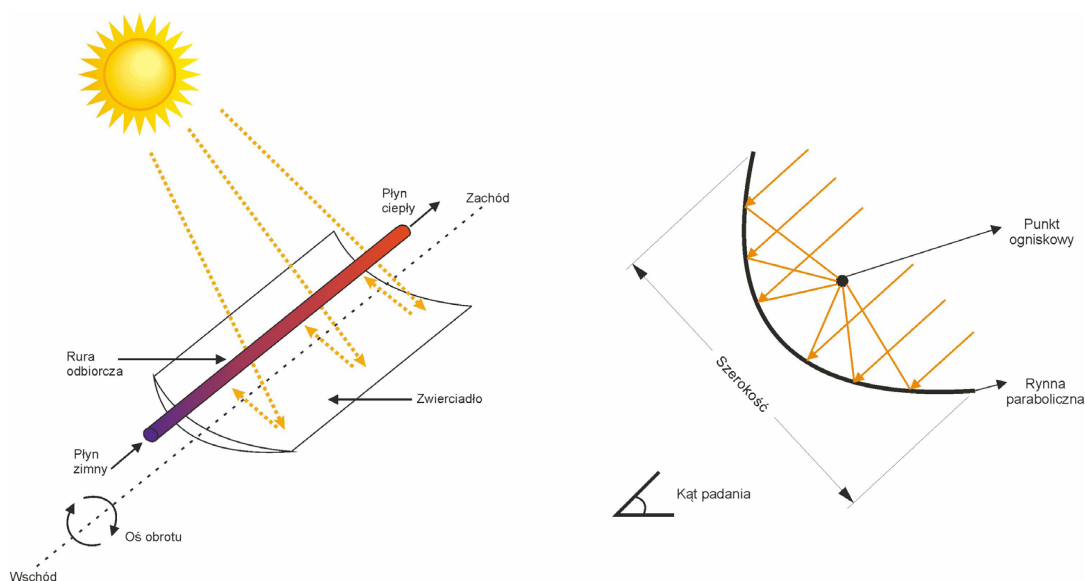
Powyższy bilans można więc ogólnie zapisać:

$$Q_a = Q_c + Q_o + Q_p + Q_g \quad (2)$$

Oznaczenia użytych wielkości są podane powyżej.

Bilans energii związany z absorpcją promieniowania słonecznego oraz straty w układzie z rurą odbiorczą zawierającą ciecz był analizowany w szeregu pracach [Sintali i in. 2014, Tziivanidis i in. 2015]. W celu uproszczenia analizy cieplnej w układzie, dla niezbyt wysokich temperatur ogrzewanej cieczy, przy ogrzewaniu cieczy w zwierciadłach parabolicznych, pominięto w bilansie energię traconą w wyniku przewodnictwa ciepła – Q_p , energię traconą w wyniku przewodnictwa poprzez powietrze – Q_g , energię uzyskiwaną przez rurę odbiorczą od promieniowania termicznego – Q_t oraz wpływ na ogrzewanie cieczy energii pochodzenia słonecznego uzyskanej w wyniku rozproszenia – Q_r . Przy oświetleniu bezpośrednim promieniowaniem słonecznym, powyższe postacie energii wpływają w sposób mało istotny na całkowity bilans energii.

Biorąc pod uwagę powyższe uproszczenia, zjawiska fizyczne zachodzące podczas przekazywania energii słonecznej do cieczy zawartej w rurze odbiorczej, w jednostkowym przedziale czasu, można zapisać w następującej postaci [Algora, Rey-Stolle 2016]:



Rys. 1. Schemat zwierciadła parabolicznego i jego ustawienie względem Słońca, wraz z schematem pokazującym ogniskowanie promieniowania słonecznego.

Fig. 1. Parabolic mirror layout and its orientation to the sun, along with a diagram showing the focus of solar radiation.

$$Q_s = Q_e + Q_c \quad (3)$$

Równanie (3) może być wyrażone w jawnej postaci:

$$r \alpha I_s w l = \sigma \varepsilon \pi D l (T_c)^4 + \pi d^2 / 4 \rho c_w (T_c - T_p) v$$

Oznaczenia parametrów:

- $r = \rho$ – określa współczynnik odbicia promieniowania słonecznego od zwierciadła,
- α – określa współczynnik absorpcji promieniowania przez powierzchnię rury,
- I_s – natężenie promieniowania słonecznego padającego na zwierciadło [W/m²K],
- w – szerokość zwierciadła [m],
- l – długość zwierciadła [m],
- σ – stała Stefana-Boltzmann [W/m²K⁴],
- ε – współczynnik termicznej emisyjności powierzchni rury,
- D – średnica zewnętrzna rury [m],
- d – średnica wewnętrzna rury [m],
- T_c – temperatura wyjściowa cieczy [K],
- T_p – temperatura wejściowa cieczy [K],
- ρ – gęstość cieczy w rurze [kg/m³],
- c_w – ciepło właściwe cieczy [J/kgK],
- v – prędkość przepływu cieczy w rurze [m/s].

Geometryczne wielkości wyrażone w równaniu (4) przedstawia rysunek 2.

Równanie (4) będzie podstawą do określania wielkości masy cieczy zależnej od tempera-

tury cieczy wypływającej z rury odbiorczej, po nagraniu poprzez światło słoneczne. Objętość ogrzanej wody wypływającej z rury odbiorczej w jednostce czasu wynosi:

$$V(t) = \pi d^2 / 4 v \quad (4)$$

Na podstawie równania (4) prędkość przepływającej cieczy, zależy od szeregu parametrów i wynosi:

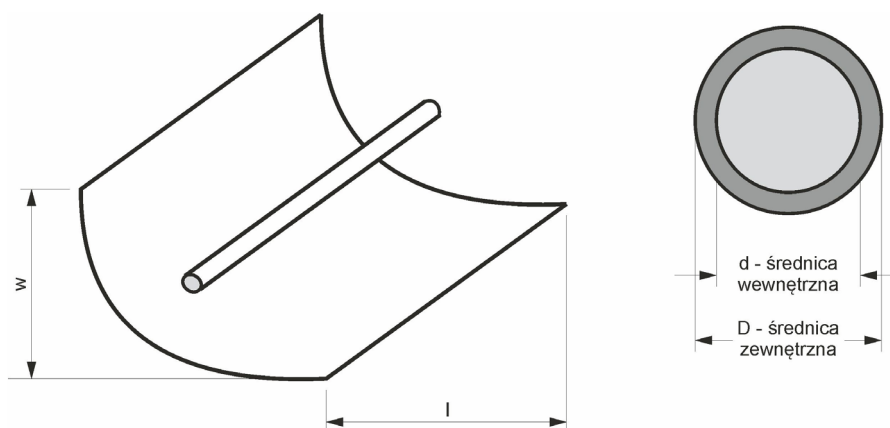
$$v = (r \alpha I_s w l - \sigma \varepsilon \pi D l (T_c)^4) / \pi d^2 / 4 \rho c_w (T_c - T_p) \quad (5)$$

W celu określenia możliwości pozyskania cieczy (wody) o odpowiednich parametrach, istotnym jest, jaką ilość wody o odpowiedniej temperaturze w jednostce czasu można uzyskać w systemie przedstawionym na rysunku 1, w warunkach fizycznych bliskich warunkom rzeczywistym i porównać tą wielkość z potrzebami 4-osobowej rodziny.

Masę ciepłej wody o określonej temperaturze m , w jednostce czasu, na podstawie równania (5) określono następująco:

$$m = \rho \cdot v \cdot \pi d^2 / 4 \quad (6)$$

Do obliczeń masy ciepłej wody przyjęto zmienny strumień promieniowania słonecznego I_s padającego na zwierciadło od 150 W/m² do 1000 W/m². Założono, że długość zwierciadła wynosi $l = 5$ m, szerokość oznaczono przez $w = 1$ m i są to wielkości stałe. Do obliczeń przyjęto, że współ-



Rys. 2. Przekrój przez zwierciadło z zaznaczeniem szerokości – w , długości – l , średnicy zewnętrznej – D , średnicy wewnętrznej – d .

Fig. 2. Cross-section through the mirror with a selection of the width – w , length – l , D – outer diameter, d – inner diameter.

czynnik odbicia promieniowania słonecznego od zwierciadła r jest zmienny i przeprowadzono w artykule analizę jego wpływu na masę ogrzanej cieczy. Współczynnik absorpcji promieniowania przez powierzchnię rury oznaczono przez α i przeprowadzono symulacje przy zmiennych jego wartościach na masę ogrzanej cieczy. Współczynnik termicznej emisyjności powierzchni rury oznaczony ε i również rozpatrywano jego zmiany i wpływ na masę ogrzewanej wody. Masa ogrzanej wody nie zależy od przekroju rury. W obiegu jako czynnik roboczy wykorzystano wodę o gęstości $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ i ciepłe właściwym wody $c_w = 4180 \text{ J/kgK}$. Obliczenia przeprowadzono dla zapewnienia w ciepłą wodę użytkową c.w.u. czteroosobową rodzinę na dobę. Przyjęto, że zużycie ciepłej wody użytkowej c.w.u. na osobę wynosi 60 litrów na dobę, zatem zużycie ciepłej wody użytkowej dla czterech osób wynosi 240 litrów na dobę. Jest to zgodne z Normą zużycia wody w Polsce określoną w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 r. w sprawie przeciętnych norm zużycia wody (Dz. U. Nr 8, poz. 70).

ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW NA MASĘ OGRZANEJ WODY

Obliczono prędkość przepływu wody w instalacji. Założono długość zwierciadła $l = 5 \text{ m}$, natomiast szerokość zwierciadła $w = 1$. Założono stałą różnicę temperatur $\Delta T = 45\text{K}$, oraz stałe współczynniki $\alpha = 1$, $r = 1$, $\varepsilon = 1$.

Z rysunku 3 wynika, że prędkość cieczy przy stałym przekroju rury jest proporcjonalna do natężenia promieniowania słonecznego.

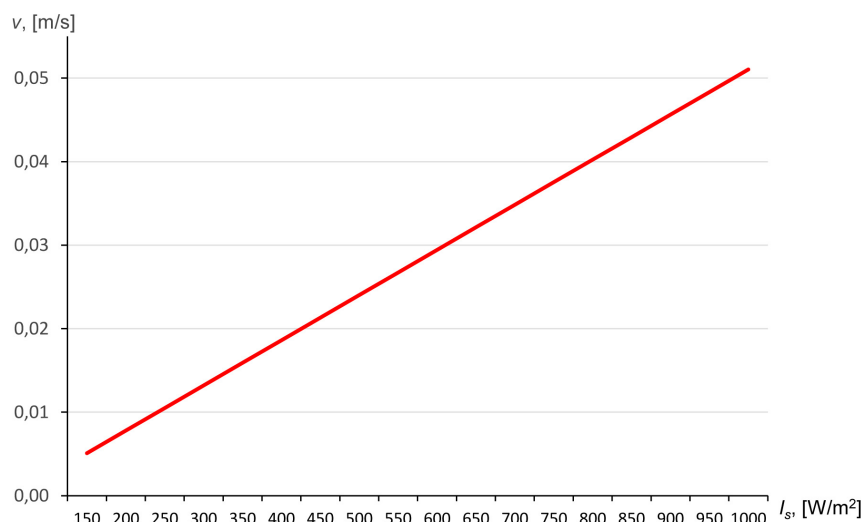
Do następnej analizy przyjęto różne wartości zmiennych współczynników α , ε , r oraz stałą wartość ΔT . Rysunek 4 przedstawia wykres masy ogrzanej wody w czasie 6 godzin dla idealnego układu skupiającego dla zmiennego natężenia promieniowania słonecznego. Przyjęto, że współczynniki α i r mają najwyższe możliwe wartości równe jeden, a współczynnik ε ma wartość zero (brak emisji termicznej). Przyjęto, że temperatura wejściowa cieczy $T_p = 283\text{K}$ natomiast temperatura wyjściowa cieczy T_k wynosi 328 ($\Delta T = 45$).

Jak widać na rysunku 4 dla przyjętych parametrów, dzienne zapotrzebowanie na ciepłą wodę dla 4 osobowej rodziny może być zaspokojone przy natężeniu promieniowania słonecznego $I_s \geq 450 \text{ W/m}^2$.

Na rysunku 5 przedstawiono wykresy dla różnych wartości współczynników α , r , ε .

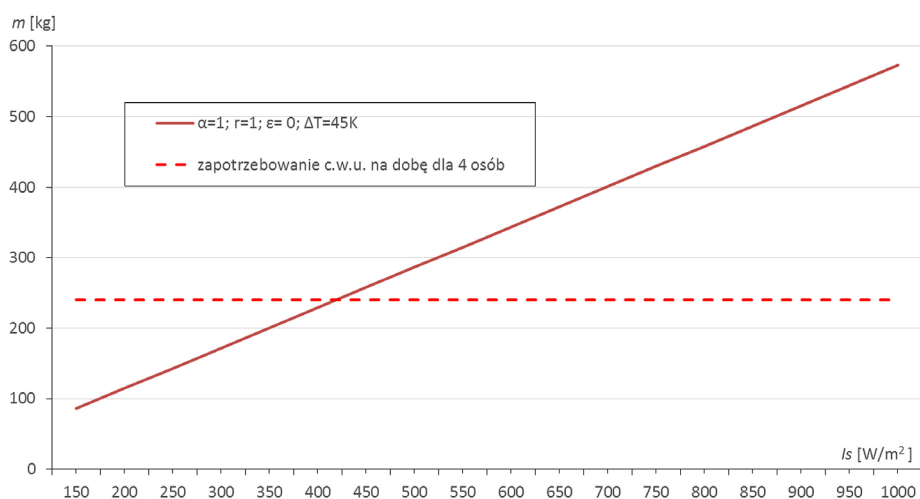
Z analizy rysunku 5. wynika, że przy zastosowanych współczynnikach $\alpha = 1$ i $r = 1$ oraz $\varepsilon = 0$ (linia bordowa) zaspokojone zostaną potrzeby na ogrzanie ciepłej wody użytkowej dla 4 osób przy natężeniu promieniowania słonecznego I_s wynoszącym $\geq 450 \text{ W/m}^2$.

Natomiast przy współczynnikach $\alpha = 0,75$, $r = 0,75$, $\varepsilon = 0,75$ (linia pomarańczowa) zaspokojone zostaną potrzeby na ogrzanie ciepłej wody użytkowej dla 4 osób przy natężeniu promieniowania słonecznego I_s wynoszącym $\geq 800 \text{ W/m}^2$. Niestety dobór współczynników $\alpha = 0,5$, $r = 0,5$, $\varepsilon = 0,5$ (linia niebieska) nie spełnia wymagań ogrzania ciepłej wody użytkowej dla 4 osób przy zachowaniu pozostałych parametrów zwierciadła.



Rys. 3. Prędkość przepływu wody w zależności od natężenia promieniowania słonecznego. Parametry przyjęte do obliczeń: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, $T_c = 328\text{K}$, $T_p = 283\text{K}$, $\Delta T = 45$, $\alpha = r = 1$, $\varepsilon = 1$.

Fig. 3. Flow rate of water depending on the intensity of solar radiation. Parameters accepted for calculation: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, $T_c = 328\text{K}$, $T_p = 283\text{K}$, $\Delta T = 45$, $\alpha = r = 1$, $\varepsilon = 1$.



Rys. 4. Masa ogrzanej wody w czasie 6 godzin dla idealnego układu parabolicznego w zależności od strumienia promieniowania słonecznego. Parametry przyjęte do obliczeń: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, $T_c = 328\text{K}$, $T_p = 283\text{K}$, ($\Delta T = 45$), $\alpha = 1$, $r = 1$, $\varepsilon = 0$. Pozioma linia przerywana określa wydajność wynoszącą 240 litrów przy 6-godzinym oświetleniu promieniowaniem słonecznym, jest to zapotrzebowanie na c.w.u. dla czterech osób.

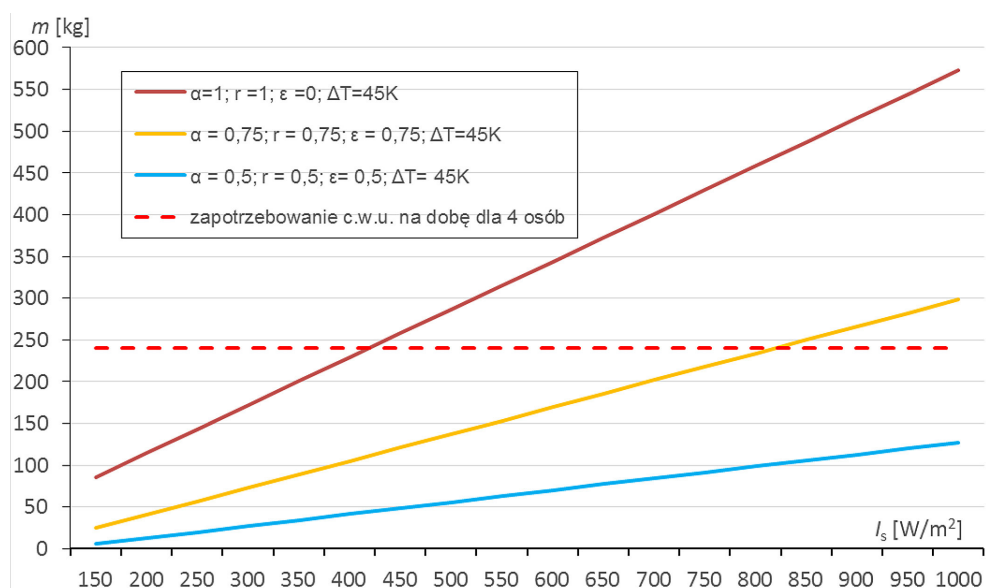
Fig. 4. Mass of heated water in 6 hours for ideal parabolic system depending on the solar radiation stream. Parameters used in the calculation: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, $T_c = 328\text{K}$, $T_p = 283\text{K}$, ($\Delta T = 45$), $\alpha = 1$, $r = 1$, $\varepsilon = 0$. The horizontal dashed line indicates a yield of 240 liters at 6 hours of sunlight, which is the need for c.w.u. for 4 people.

Na rysunku 6 przedstawiono masę ogrzanej wody w zależności od różnicy temperatur $\Delta T = 35\text{K}$, $\Delta T = 45\text{K}$, $\Delta T = 55\text{K}$, $\Delta T = 65\text{K}$ pozostałe wartości współczynników α , r , ε , wynosiły 0,75.

Jest to wykres wydajności ogrzanego strumienia masy wody w ciągu 6 godzin dla realnego układu parabolicznego przy różnych oświetleniach. Przyjęto, że wartości współczynników α , r , ε posiadają średnie wartości równe 0,75. Natomiast do rozważań wykorzystano zmien-

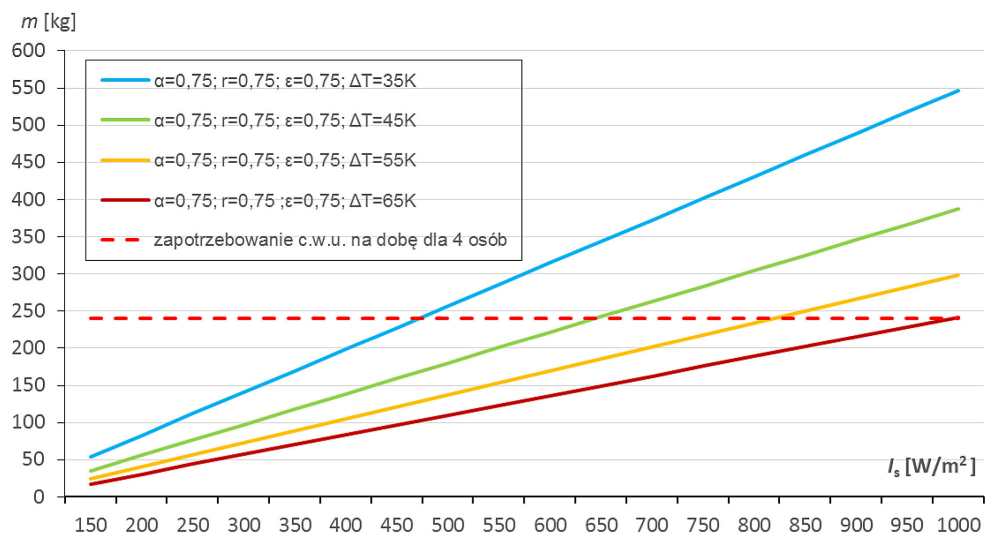
ne różnice temperatury $\Delta T = 35\text{K}$, $\Delta T = 45\text{K}$, $\Delta T = 55\text{K}$, $\Delta T = 65\text{K}$.

Dla wszystkich zadanych różnic temperatur w przedziale od 35÷65K zostanie zaspokojone zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową dla 4 osób przy ogrzewaniu 6 godzin dziennie. Podgrzanie wody o różnicę temperatur $\Delta T = 35\text{K}$ zostanie osiągnięte przy natężeniu promieniowania słonecznego 450 W/m², a o różnicę temperatur $\Delta T = 45\text{K}$ przy natężeniu 600 W/m², natomiast o róż-



Rys. 5. Masa ogrzanej wody w czasie 6 godzin w zależności od strumienia promieniowania słonecznego dla zmiennych wartości parametrów α , r , ϵ . Parametry przyjęte do obliczeń: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, $T_c = 328\text{K}$, $T_p = 283\text{K}$, ($\Delta T = 45$) i odpowiednio linia bordowa $\alpha = r = 1$, $\epsilon = 0$, linia żółta $\alpha = r = \epsilon = 0,75$, linia niebieska $\alpha = r = \epsilon = 0,5$. Pozioma linia przerywana określa wydajność wynoszącą 240 litrów przy 6-godzinym oświetleniu promieniowaniem słonecznym, jest to zapotrzebowanie na c.w.u. dla czterech osób.

Fig. 5. Weight of heated water in 6 hours depending on the solar radiation stream for variable values of parameters α , r , ϵ . Parameters used for calculations: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, $T_c = 328\text{K}$, $T_p = 283\text{K}$, ($\Delta T = 45$) and burgundy respectively $\alpha = r = 1$, $\epsilon = 0$, yellow $\alpha = r = \epsilon = 0,75$, Blue $\alpha = r = \epsilon = 0,5$. The horizontal dashed line indicates a yield of 240 liters at 6 hours of sunlight, this is the need for c.w.u. for 4 people.



Rys. 6. Masa ogrzanej wody w czasie 6 godzin w zależności od strumienia promieniowania słonecznego dla różnych wartości temperatury końcowej wody użytkowej. Parametry przyjęte do obliczeń: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, przyjęto różnicę temperatur $\Delta T = 35\text{K}$, $\Delta T = 45\text{K}$, $\Delta T = 55\text{K}$, $\Delta T = 65$ współczynniki $\alpha = r = \epsilon = 0,75$. Pozioma linia przerywana określa wydajność wynoszącą 240 litrów przy 6-godzinym oświetleniu promieniowaniem słonecznym, jest to zapotrzebowanie na c.w.u. dla czterech osób.

Fig. 6. Mass of heated water for 6 hours depending on the solar radiation stream for different values of final water temperature. Parameters accepted for the calculation: $w = 1\text{m}$, $l = 5\text{m}$, the temperature difference is $\Delta T = 35\text{K}$, $\Delta T = 45\text{K}$, $\Delta T = 55\text{K}$, $\Delta T = 65$ coefficient $\alpha = r = \epsilon = 0,75$. The horizontal dashed line indicates a yield of 240 liters at 6 hours of sunlight, this is the need for c.w.u. for 4 people.

nicę temperatur $\Delta T = 55\text{K}$ przy natężeniu 800 W/m^2 i o różnicę temperatur $\Delta T = 65\text{K}$ przy natężeniu 1000 W/m^2 .

PODSUMOWANIE

Dla instalacji tego typu przy założonych następujących parametrach: szerokości zwierciadła $w = 1\text{ m}$, długości zwierciadła $l = 5\text{ m}$, co daje powierzchnię zwierciadła 5 m^2 , oraz współczynnikach $\alpha = r = \varepsilon = 0,75$ i temperaturze wyjściowej cieczy $T_c = 328\text{K}$ ($\Delta T = 45$ przy $T_p = 283\text{K}$) może być osiągnięte zaspokojenie potrzeb dla czteroosobowej rodziny przy natężeniu promieniowania słonecznego I_s wynoszącym $\geq 600\text{ W/m}^2$ w ciągu 6 godzin na dobę.

Ze przedstawionej analizy wynika, że jeśli występowałoby natężenie promieniowania słonecznego niższe od 600 W/m^2 i krótszy czas operowania Słońca niż 6 godzin dziennie, to aby zaspokoić zapotrzebowanie w ciepłą wodę użytkową dla 4 osób należy:

- zwiększyć powierzchnię zwierciadła np. przez zwiększenie długości instalacji rynnowej,
- poprawić sprawność instalacji poprzez polepszenie wartości współczynników α , r , ε , czyli dokonać doboru odpowiednich materiałów,

z których jest wykonane zwierciadło i rura odbiorcza,

- ewentualnie obniżyć temperaturę wyjściową cieczy T_c .

Podziękowania

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania Panu Profesorowi Janowi Godlewskiemu za cenne uwagi i naukowe dyskusje, które przyczyniły się do powstania niniejszej publikacji.

LITERATURA

1. Algora C., Rey-Stolle I. 2016. Handbook on Concentrator Photovoltaic Technology, John Wiley and Sons Ltd.
2. Sintali I.S., Egbo G., Dandakouta H. 2014. Energy Equations for Computation of Parabolic-Trough Collector Efficiency Using Solar Position Coordinates. American Journal of Engineering Research 3(10), 25–33.
3. Tzivanidis C., Bellos E., Korres D., Antonopoulos K.A., Mitsopoulos G. 2015. Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. Volume 6, 226–237.