

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Analiza wydajności kolektora słonecznego przeznaczonego dla systemu ogrzewania budynku o niskim zapotrzebowaniu na ciepło

JAROSŁAW FLORCZUK, KRZYSZTOF ARENDT

**POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA, KATEDRA PODSTAW
BUDOWNICTWA I INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ**

STRESZCZENIE

Niniejsza praca przedstawia wyniki badań numerycznych kolektora słonecznego, przeznaczonego dla budynków o niskim zapotrzebowaniu na ciepło. W pracy przedstawiono nowatorską koncepcję kolektora słonecznego o obniżonej wydajności, niskich kosztach wykonania oraz wykorzystującego istniejące elementy konstrukcji przekryć budynku. Istotną zaletą kolektora jest brak ingerencji w architekturę zewnętrzną budynku. Za pomocą symulacji numerycznej określono optymalne parametry pracy oraz całkowitą wydajność zaproponowanego rozwiązania. Uzyskane wyniki porównano z wydajnością tradycyjnych rozwiązań kolektorów słonecznych. Wyniki analizy potwierdziły, iż zaproponowane rozwiązanie charakteryzuje się wieloma zaletami w stosunku do tradycyjnych rozwiązań i jest w stanie pokryć zapotrzebowanie na ciepło typowych budynków nisko-energetycznych.

The performance of solar panel in integrated heating system dedicated for low-energy residential buildings

ABSTRACT

The performance of solar panel in integrated heating system dedicated for low-energy residential buildings is presented. This framework presents the novel concept of solar panel which characterizes with simple design as well as low investment and maintenance costs. According to the simple structure of solar panel, the architectural design of the building remains absolutely unaffected. Both the operating parameters and the total annual heat gain were calculated on the basis of numerical simulations. Obtained results were compared with other types of solar panel. The final output confirmed that presented solar panel has plenty of advantages over the classical structures utilizing solar energy. Moreover, the total annual heat gain obtained in the research was very promising to satisfy the standard of passive house.

1. WSTĘP

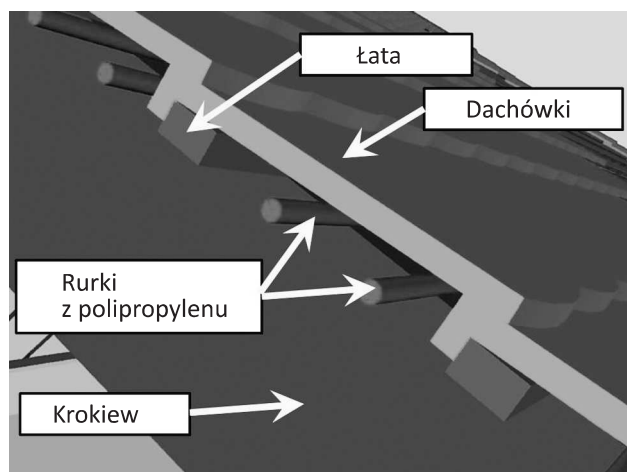
Kryzys energetyczny, spowodowany nadmierną eksploatacją zasobów paliw kopalnych, to najprawdopodobniej największy problem gospodarczy i ekologiczny naszych czasów. Dlatego też XXI wiek to okres radykalnych zmian w zakresie pozyskiwania oraz ograniczenia zużycia energii. Problem ten w dużej mierze dotyczy budynków mieszkalnych, które są odpowiedzialne za zużycie niemal 40% produkowanej energii pierwotnej [1]. W obliczu realnej groźby wyczerpania zasobów paliw kopalnych, niezbędnym staje się skuteczne ograniczenie zapotrzebowania budynków na energię pochodzącą ze źródeł nieodnawialnych, przy jednoczesnym zachowaniu komfortu cieplnego w pomieszczeniach. Obecnie znanych jest wiele systemów wykorzystujących odnawialne źródła energii w celu zaspokojenia potrzeb grzewczych budynku. Jednak coraz większą uwagę zwraca się nie tylko na implementację nowoczesnych technologii, ale również na ograniczenie zapotrzebowania budynków na ciepło. Poprzez zastosowanie odpowiedniej termoizolacyjności zewnętrznych przegród termicznych oraz systemu odzyskiwania ciepła ze zużytego powietrza wentylacyjnego, w znacznym stopniu można zredukować straty ciepła z budynku. Powszechnie znanym przykładem realizacji tego podejścia są budynki pasywne. Dzięki obniżonemu zapotrzebowaniu na ciepło, budynki te mogą z powodzeniem wykorzystywać technologie ogrzewania nawet o niskiej wydajności, bazujące na odnawialnych źródłach energii. Do zapewnienia komfortu cieplnego w okresie zimowym wystarczą źródła ciepła, których temperatura nie przekracza 50°C [2]. Największym potencjałem w tym zakresie cechuje się energia słoneczna, najłatwiej dostępna oraz najbardziej ekologiczna spośród wszystkich odnawialnych źródeł energii. Niestety, większość systemów wykorzystujących energię słoneczną charakteryzuje się wysokim kosztem inwestycyjnym oraz długim okresem jego zwrotu. Ponadto, w wyniku stałej ekspozycji na działanie zewnętrznych czynników atmosferycznych, w znacznym stopniu zostaje ograniczona ich żywotność.

Alternatywą dla typowych systemów wykorzystujących energię słoneczną jest innowacyjna koncepcja kolektora słonecznego w postaci polipropylenowych rurek z płynem, ułożonych pod pokryciem dachowym. Rozwiązanie to, ze względu na swoją konstrukcję oraz wykorzystane materiały, charakteryzuje się niskim kosztem inwestycji i utrzymania oraz brakiem ingerencji w architekturę zewnętrzną budynku. Przydatność określonego typu kolektora słonecznego zależy od konkretnego rozwiązania

systemu ogrzewania, zapotrzebowania budynku na ciepło oraz wydajności samego kolektora. Powszechną miarą wydajności kolektorów słonecznych jest ich sprawność definiowana na podstawie otrzymanych wartości temperatur przepływającego płynu oraz ilości pozyskanego ciepła. W niniejszej pracy zostały przedstawione wyniki analizy numerycznej wydajności kolektora o niskiej wydajności.

2. BUDOWA KOLEKTORA SŁONECZNEGO

Analizowany kolektor słoneczny (Rys. 1) składa się z typowych elementów konstrukcji dachu: krokwi, izolacji termicznej (pomiędzy krokwiami), łąt oraz dachówek ceramicznych. Główny element stanowi pozyskująca energię instalacja, w postaci sieci polipropylenowych rurek z przepływającym płynem, ułożona pomiędzy warstwą pokrycia dachowego a warstwą izolacji termicznej.



Rysunek 1. Przekrój przez dach

Zestawienie parametrów materiałów, z których wykonane są poszczególne elementy składowe kolektora, przedstawia Tabela 1. Parametry materiałowe przyjęto na podstawie [3, 4]. Należy zaznaczyć, że właściwości chemiczne przepływającego przez kolektor płynu muszą uniemożliwiać przemianę fazową w przypadku wystąpienia ujemnym temperatur. Dzięki prostocie konstrukcji oraz zastosowanym materiałom, analizowany kolektor posiada szereg zalet w stosunku do typowych paneli słonecznych:

- brak ingerencji w architekturę zewnętrzną budynku,
- rozmiar systemu może być dopasowany do zapotrzebowania na ciepło; ograniczany jedynie przez powierzchnię dachu, która jest zwykle większa od typowej powierzchni zabudowy kolektorami tradycyjnymi,

Tabela 1. Parametry materiałowe

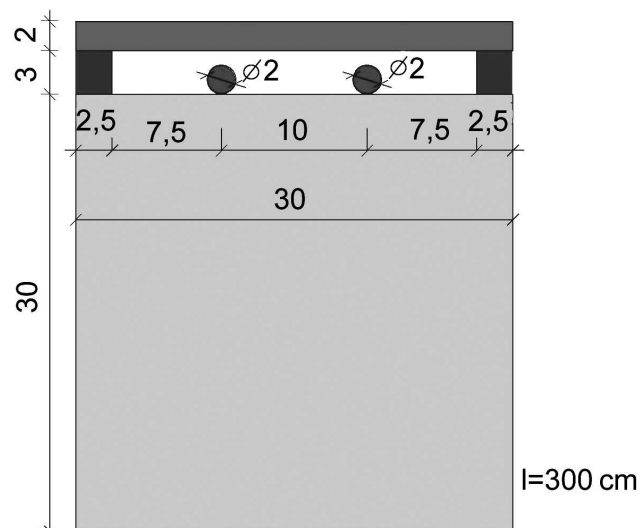
Nazwa materiału	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]	Gęstość ρ [kg/m ³]	Ciepło właściwe C_p [J/(kg·K)]	Emisyjność ϵ [-]
Ceramika	1,0	2000	800	0,93
Drewno	0,16/0,35	550	1600	0,86
Polipropylen	0,40	910	2450	0,97
Styropian	0,035	40	1460	0,60

- umiejscowienie systemu rurek bez narażenia na bezpośrednie działanie czynników atmosferycznych gwarantuje dłuższy okres użytkowania jak również optymalną wydajność,
- konstrukcja oraz zastosowane materiały znacznie obniżają koszt inwestycji oraz okres jego zwrotu.

3. Analiza wydajności kolektora słonecznego

Ostateczna ocena przydatności analizowanego kolektora w systemach ogrzewania o niskim zapotrzebowaniu na ciepło wymaga wykonania całorocznej symulacji pracy kolektora. Do tego celu zastosowano metodę elementów skończonych w programie komputerowym ABAQUS (wersja 6.8). Całoroczną symulację pracy przeprowadzono na podstawie trójwymiarowego modelu kolektora, którego geometrię przedstawia Rysunek 2. Wykorzystany model uwzględnia wartości parametrów materiałowych przedstawionych w Tabeli 1.

Główne kryterium wydajności kolektora słonecznego stanowi ilość pozyskanego ciepła oraz wartość temperatury płynu na wylocie z rurki. Efektywność pracy kolektora zależy od warunków klimatycznych, parametrów operacyjnych oraz parametrów mate-



Rysunek 2. Geometria modelu kolektora słonecznego

riałowych poszczególnych elementów. Na potrzeby analizy założono, że kolektor słoneczny jest jednym z komponentów budynku o łącznej kubaturze 896 m³, znajdującego się w mieście Elbląg. Warunki klimatyczne dla tej lokalizacji przyjęto na podstawie średniego roku meteorologicznego z bazy klimatycznej [5]. Warunki konwekcyjnej wymiany ciepła na wewnętrznej powierzchni kolektora przyjęto na podstawie [6]. Całoroczna symulacja pracy kolektora wymaga zdefiniowania optymalnych wartości parametrów operacyjnych, a także określenia stopnia zgodności przyjętego modelu z rzeczywistością. Wykonano również analizę wpływu współczynnika absorpcji powierzchni pokrycia dachowego na wydajność kolektora.

3.1. Optymalizacja parametrów operacyjnych

Kluczowy wpływ na wydajność pracy kolektora słonecznego mają parametry operacyjne. Pod tym pojęciem należy rozumieć temperaturę płynu na wlocie do rurki oraz wartość masowego natężenia przepływu. Pierwsza seria symulacji dotyczyła zdefiniowania wartości parametrów operacyjnych.

3.1.1. Temperatura płynu na wlocie do rurki

Wartość temperatury płynu na wlocie do rurki jest w znacznym stopniu uzależniona od systemu gromadzenia energii. W związku z przeznaczeniem kolektora dla systemów o niskim zapotrzebowaniu na ciepło przyjęto, że system gromadzenia energii będzie systemem niskotemperaturowym, przeznaczonym głównie na cele grzewcze. Na tej podstawie założono stałą wartość temperatury płynu na wlocie, wynoszącą 20°C. Wartość ta została przyjęta do dalszej analizy wydajności kolektora słonecznego.

3.1.2. Wartość masowego natężenia przepływu

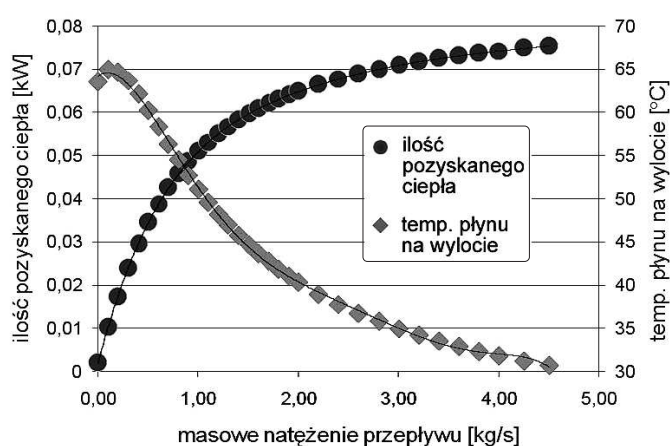
Masowe natężenie przepływu (MNP) to parametr, którego wartość istotnie wpływa na ilość pozyskiwanej przez kolektor energii. Na potrzeby wykonywanej

analizy wydajności kolektora, wartość tą przyjęto jako stałą. Takie podejście jest znacznym uproszczeniem, gdyż stała wartość MNP ogranicza ilość pozyskiwanej energii przy zmiennych warunkach atmosferycznych. Z drugiej strony, największe zyski energii występują w okresie letnim, w związku z czym zasadne jest zdefiniowanie stałej, optymalnej wartości masowego natężenia przepływu dla najbardziej nasłonecznionego dnia w roku. W rzeczywistości wartość ta powinna być korygowana przez system sterowania zależnie od zmian warunków atmosferycznych. Końcowa ocena wydajności kolektora słonecznego będzie oparta na wartościach temperatury płynu na wylocie z rurki oraz ilości pozyskanego przez kolektor ciepła. W celu zdefiniowania optymalnej wartości masowego natężenia przepływu wykonano analizę zależności pomiędzy:

- temperaturą płynu na wylocie z rurki i masowym natężeniem przepływu,
- ilością pozyskanego przez kolektor ciepła i masowym natężeniem przepływu.

Symulacje numeryczne zostały wykonane dla modelu ustalonego przewodzenia ciepła. Warunki klimatu zewnętrznego przyjęto jak dla najbardziej nasłonecznionego dnia w roku na podstawie bazy klimatycznej [5].

Wyniki symulacji potwierdziły istotny wpływ parametru MNP na wydajność kolektora słonecznego. Uzyskane zależności wskazują, że wraz ze wzrostem wartości MNP maleje temperatura płynu na wylocie z rurki, w przeciwieństwie do ilości pozyskanego przez kolektor ciepła. Na podstawie analiz ustalono różne zakresy optymalnych wartości MNP dla temperatury płynu na wylocie z rurki (od 0 do 1 kg/s) oraz ilości pozyskanego przez kolektor ciepła (od 2 do 5 kg/s). W celu zdefiniowania stałej wartości MNP, niezbędnej do przeprowadzenia dalszej analizy, wykonano porównanie wyników obu zależności (Rys. 3).



Rysunek 3. Zależność temp. płynu na wlocie oraz ilości pozyskanego ciepła od masowego natężenia przepływu

Stwierdzono, że optymalny zakres MNP wynosi od 0,5 do 1,5 kg/s. Wartość optymalna parametru MNP została zdefiniowana na podstawie iloczynu wartości z obu zależności i wyniosła 1,4 kg/s. Wartość ta została wykorzystana do dalszej analizy wydajności kolektora słonecznego.

3.2. Weryfikacja poprawności pracy przyjętego modelu kolektora słonecznego

Do analizy wydajności kolektora słonecznego ważne jest określenie stopnia zgodności przyjętego modelu z rzeczywistością. Wykonano serię symulacji numerycznych, przedstawiających relację między parametrami niezależnymi (temperatura płynu na wlocie, natężenie promieniowania słonecznego, temperatura powietrza zewnętrznego), a temperaturą płynu na wylocie. Na potrzeby uzyskania poszczególnych zależności uzmienniano jeden z niezależnych parametrów, przyjmując wartości pozostałych jako stałe. Symulacje numeryczne zostały wykonane dla modelu ustalonego przewodzenia ciepła z uwzględnieniem określonej optymalnej wartości MNP.

Otrzymane wyniki były zgodne z przewidywanymi (np. im większe natężenie promieniowania słonecznego, tym wyższa temperatura płynu na wylocie). Potwierdzona została tym samym poprawność przyjętego modelu obliczeniowego.

3.3. Wpływ współczynnika absorpcji na wydajność kolektora słonecznego

Skuteczność procesu konwersji fototermicznej zależy w bardzo dużym stopniu od współczynnika absorpcji powierzchni, która bierze udział w procesie wymiany ciepła. Wykonano serię symulacji numerycznych, które określiły zależność pomiędzy temperaturą płynu na wylocie, ilością pozyskanego przez kolektor ciepła, a współczynnikiem absorpcji pokrycia dachowego.

Symulacje zostały wykonane dla modelu ustalonego przewodzenia ciepła z uwzględnieniem określonej wcześniej optymalnej wartości MNP. Warunki klimatu zewnętrznego przyjęto jak dla najbardziej nasłonecznionego dnia w roku na podstawie bazy klimatycznej [5].

Wyniki wskazują silną zależność pomiędzy ilością pozyskanego przez kolektor ciepła a wzrostem współczynnika absorpcji. Otrzymana zależność wykazuje podobieństwo do wyników H. Suehrcke [7]. Wykonana analiza przedstawia również możliwość zwiększenia temperatury płynu na wylocie o $\approx 30^{\circ}\text{C}$.

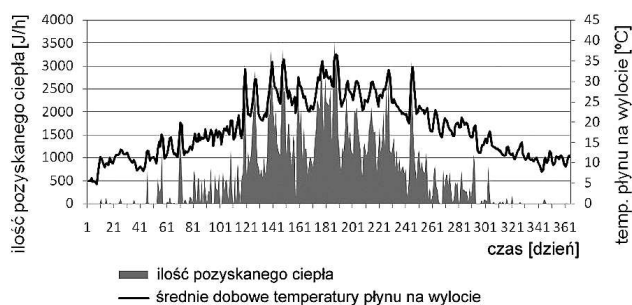
3.4. Całoroczna symulacja pracy kolektora słonecznego

Ostateczna analiza wydajności kolektora wymaga określenia całkowitej ilości pozyskanego ciepła oraz temperatury płynu na wylocie z rurki, na podstawie całorocznej symulacji pracy. Istotny wpływ na kryterium oceny wydajności mają: warunki atmosferyczne, wartość masowego natężenia przepływu, temperatura płynu na wlocie do rurki oraz parametry materiałowe. Całoroczne warunki klimatu zewnętrznego przyjęto na podstawie bazy klimatycznej dla miasta Elbląg [5]. Do obliczeń wykorzystano procedurę 'SolarTemperature' napisaną w języku programowania FORTRAN. Procedura ta, w oparciu o bazę klimatyczną, obliczała wartości temperatury słonecznej oraz współczynnika przejmowania ciepła na każdym kroku czasowym symulacji w programie komputerowym ABAQUS. Uzmienniane w ten sposób warunki konwekcyjnej wymiany ciepła na zewnętrznej powierzchni kolektora miały na celu symulację realnych warunków pracy. Całoroczna symulacja została wykonana dla modelu niestacjonarnego procesu wymiany ciepła. W obliczeniach uwzględniono określoną wcześniej stałą wartość temperatury płynu na wlocie do rurki (20°C) oraz stałą wartość masowego natężenia przepływu (1,4 kg/s).

3.4.1. Wyniki symulacji całorocznej pracy kolektora

Analiza godzinowego zysku ciepła oraz średniej dobowej temperatury płynu na wylocie z rurki (Rys. 4) wykazała, że przez większość czasu w sezonie zimowym, średnie dobowe temperatury płynu na wylocie są mniejsze od przyjętej temperatury na wlocie, wynoszącej 20°C.

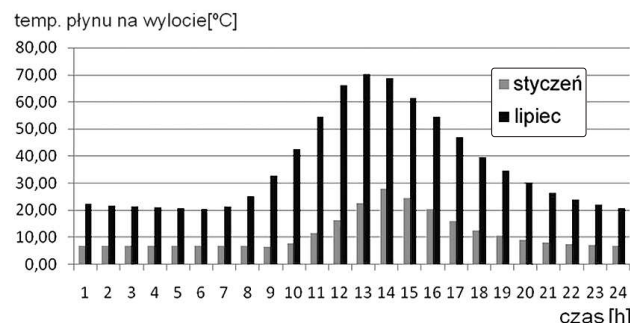
Wynik ten znajduje odzwierciedlenie w ilości pozyskiwanego ciepła, która w sezonie zimowym jest bardzo mała. Należy zaznaczyć, że w rzeczywistym rozwiązaniu praca kolektora została by wstrzymana przez system sterowania w przypadku ujemnych wartości pozyskiwanego ciepła. W okresie letnim występuje pozytywna korelacja pomiędzy temperaturą płynu na



Rysunek 4. Godzinowy zysk ciepła oraz średnia dobowa temp. płynu na wylocie

wylocie oraz ilością pozyskanego ciepła. Największa wydajność kolektora słonecznego występuje pomiędzy kwietniem i sierpniem.

Porównanie wielkości temperatur płynu na wylocie z rurki, otrzymanych w ciągu doby okresu zimy i lata (Rys. 5) wskazuje wyraźne różnice w wydajności kolektora w zależności od warunków atmosferycznych.

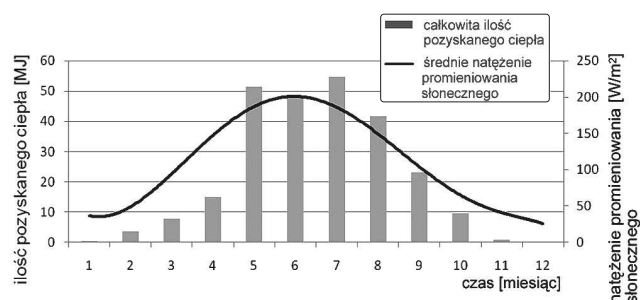


Rysunek 5. Porównanie temperatur płynu na wylocie w styczniu i lipcu

Maksymalna wartość temperatury płynu na wylocie wyniosła 71°C, co stanowi wzrost o 48°C w stosunku do temperatury powietrza zewnętrznego. W okresie zimowym, maksymalna wartość temperatury płynu na wylocie wyniosła zaledwie 28°C.

Na podstawie analizy miesięcznych zysków ciepła (Rys. 6) można stwierdzić, że najwyższa wydajność kolektora słonecznego występuje w lipcu.

Całkowita ilość ciepła pozyskanego w tym miesiącu wyniosła 54MJ. Warto zauważyć, że pomimo najwyższej średniej wartości natężenia promieniowania słonecznego w czerwcu, całkowita ilość ciepła pozyskanego przez kolektor w tym miesiącu jest wyraźnie mniejsza od tej pozyskanej zarówno w maju jak i lipcu.



Rysunek 6. Miesięczna ilość pozyskanego ciepła, średnie natężenie promieniowania słonecznego

4. Dyskusja i wnioski

Istotny wpływ na wydajność analizowanego kolektora słonecznego mają parametry operacyjne, temperatura płynu na wlocie oraz masowe natężenie przepływu (MNP). W związku z niskotemperaturowym

źródłem dostarczanego do kolektora płynu przyjęto stałą wartość temperatury płynu na wlocie, wynoszącą 20°C. Wartość parametru MNP określono na podstawie zależności między temperaturą płynu na wylocie, ilością pozyskanego ciepła, a wartością MNP. Otrzymane wyniki symulacji dla ustalonego modelu przewodzenia ciepła, potwierdziły, iż uzmiennianie wartości MNP ma znaczący wpływ na wydajność kolektora. Malejąca wartość MNP powodowała wzrost temperatury płynu na wylocie, przy jednoczesnym obniżeniu ilości pobranego przez kolektor ciepła. Z drugiej strony, rosnąca wartość MNP obniżała temperaturę płynu na wylocie, przy jednoczesnym wzroście ilości pobranego ciepła. Ustalono, że optymalny zakres wartości MNP zawiera się od 0,5 do 1,5 kg/s. Optymalna wartość została zdefiniowana na podstawie iloczynu poszczególnych wyników z obu zależności i wyniosła 1,4 kg/s. Wartość tą przyjęto do dalszej analizy.

Poprawność modelu, przyjętego do oceny wydajności kolektora słonecznego, została poddana weryfikacji. Wykonano analizę zależności pomiędzy temperaturą płynu na wylocie oraz niezależnymi parametrami (temperatura płynu na wlocie, natężenie promieniowania słonecznego, współczynnik konwekcji, temperatura powietrza zewnętrznego). Osiągnięte wyniki symulacji dla ustalonego modelu przewodzenia ciepła, wykazały pozytywną korelację między zmiennymi. Stanowi to potwierdzenie, że przyjęty do analizy model kolektora słonecznego jest w dużym stopniu zbliżony do rzeczywistości.

Poddano analizie wpływ wartości współczynnika absorpcji zewnętrznej powierzchni kolektora na jego wydajność. Na podstawie wyników symulacji numerycznych dla ustalonego modelu przewodzenia ciepła, stwierdzono możliwość wzrostu temperatury płynu na wylocie o $\approx 30^\circ\text{C}$, wraz ze wzrostem współczynnika absorpcji. Otrzymane wyniki są w dobrej korelacji z wnioskami zawartymi w pracy H. Suehrcke [7], które wskazują istotne różnice w ilości pobranego ciepła, pomiędzy pokryciami dachowymi o jasnych i ciemnych kolorach. Dlatego też zasadnym jest wykorzystywanie materiałów pokrycia dachowego o wysokim współczynniku absorpcji.

Ostateczna ocena wydajności kolektora wymagała określenia całkowitej ilości pozyskanego ciepła oraz temperatur płynu na wylocie z rurki, na podstawie całorocznej symulacji pracy. Symulację wykonano dla modelu niestacjonarnego procesu wymiany ciepła z uwzględnieniem wyników poprzednich analiz oraz wykorzystaniem procedury w języku FORTRAN. Otrzymane wyniki wykazały pozytywną korelację pomiędzy temperaturą płynu na wylocie

a ilością pobranego przez kolektor ciepła. Największą wydajność kolektora słonecznego stwierdzono w sezonie letnim. Maksymalna efektywność pracy wystąpiła w okresie pomiędzy kwietniem a sierpniem. Oszacowano, że wydajność analizowanego kolektora jest około 10-30% niższa w porównaniu z typowymi rozwiązaniami wykorzystującymi energię słoneczną. Wyniki analiz Hassana [4] wykazały, że największa wydajność płaskiego kolektora słonecznego wystąpiła w okresie pomiędzy marcem a wrześniem. Maksymalna wartość temperatury płynu na wylocie w okresie letnim wyniosła 111°C, co stanowi wzrost o 86°C w stosunku do temperatury powietrza zewnętrznego. W styczniu maksymalna wartość temperatury płynu na wylocie wyniosła 59°C. W przypadku analizowanego kolektora maksymalna temperatura płynu na wylocie w okresie letnim wyniosła 71°C, co stanowi wzrost o 48°C w stosunku do temperatury powietrza zewnętrznego. W okresie zimowym maksymalna wartość temperatury płynu na wylocie wyniosła 28°C. Istnieją znaczące różnice w wynikach obu analiz. Jedną z przyczyn może być fakt przyjęcia przez Hassana wyższej o 10°C temperatury płynu na wlocie, która w przypadku tej analizy została przyjęta na poziomie 20°C. Różnice mogą być również spowodowane odmiennymi warunkami klimatycznymi przyjętymi dla obu symulacji. Wpływ wartości temperatury płynu na wlocie na temperaturę płynu na wylocie był również przedmiotem analiz. Uzyskana zależność wykazała silną relację pomiędzy dwoma parametrami. Wzrost temperatury płynu na wlocie spowodował znaczący wzrost temperatury płynu na wylocie. Niestety, ze względu na przyjęte założenie o zastosowaniu niskotemperaturowego źródła dostarczanego do kolektora płynu, wartość tego parametru jest ograniczona.

Całkowita roczna ilość pozyskanego ciepła przez analizowany panel (o powierzchni 0,9 m²) wyniosła 240 MJ. Przy założeniu, że przedstawiony kolektor znajduje się na całej południowo-wschodniej połaci dachu (50m²), otrzymana ilość pozyskanego ciepła wystarczy do zaspokojenia potrzeb budynku o kubaturze 896 m³ wykonanego zgodnie ze standardem budownictwa pasywnego (zapotrzebowanie na ciepło 15 kWh/m²) [2]. Należy zaznaczyć, że fundamentalny wpływ na funkcjonowanie całego systemu grzewczego wykorzystującego energię słoneczną ma system odbioru, gromadzenia i dystrybucji pozyskanego przez kolektor ciepła. Duże znaczenie ma również system sterowania masowym natężeniem przepływu płynu, którego wartość powinna być utrzymywana w optymalnym zakresie zdefiniowanym na podstawie wykonanych analiz.

Uzyskane wyniki analizy wydajności potwierdziły, że przedstawiony kolektor słoneczny jest przydatnym rozwiązaniem dla systemów ogrzewania budynków, zwłaszcza tych o niskim zapotrzebowaniu na energię. Ponadto, ze względu na zalety wynikające ze swojej budowy: niski koszt inwestycji i utrzymania oraz brak ingerencji w architekturę zewnętrzną budynku, przedstawiony kolektor słoneczny stanowi godną uwagi alternatywę dla typowych rozwiązań wykorzystujących energię słoneczną.

Prawidłowa ocena wydajności kolektora słonecznego wymaga uwzględnienia wpływu nieszczelności pokrycia dachowego. Dalszym kierunkiem prac jest opracowanie zależności pomiędzy siłą wiatru, a ilością pozyskanego przez kolektor ciepła, jak również opracowanie systemu sterowania masowym natężeniem przepływu w celu zwiększenia wydajności przedstawionego typu kolektora słonecznego.

LITERATURA

- [1] H. Tommerup, J. Rose, S. Svendsen, Energy-efficient houses built according to the energy performance requirements introduced in Denmark in 2006, *Energy and Buildings* 39 (2007) 1123-1130.
- [2] V. Badescu, Simulation analysis for the active solar heating system of a passive house, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 2754-2763.
- [3] P. Klemm, *Budownictwo ogólne tom 2 fizyka budowli*, Warszawa, Arkady, 2009.
- [4] M. M. Hassan, Y. Beliveau, *Framework for Evaluation of Active Solar Collection Systems*, Ph.D.
- [5] Ministerstwo Infrastruktury, Baza klimatyczna, <http://www.mi.gov.pl>.
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury „W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie” z dnia 12 kwietnia 2002 ze zmianami z roku 2008.
- [7] H. Suehrcke, E.L. Peterson, N. Selby, Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate, *Energy and Buildings* 40 (2008) 2224-2235.