



Analiza pracy solarnego systemu grzewczego przy wykorzystaniu programu TRNSYS 17

Bartosz Sosnowski, Magdalena Nems

*Politechnika Wroclawska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Zakład Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych
E-mail: magdalena.nems@pwr.edu.pl*

REKOMENDACJA: *dr hab. inż. Jacek Kasperski, prof. uczelni, PWr*

STRESZCZENIE

Obecnie dąży się do coraz szerszego wykorzystywania odnawialnych źródeł energii, nie tylko w zastosowaniach przemysłowych, ale również dla użytkowników domowych. Celem pracy był projekt i weryfikacja działania innowacyjnego systemu grzewczego dla budynku jednorodzinnego. Głównym elementem instalacji był cieczowy, skupiający kolektor słoneczny. Symulacje rocznej pracy systemu dla warunków klimatycznych Warszawy zostały wykonane w programie TRNSYS 17. Dla rozpatrywanego budynku o powierzchni użytkowej 100 m² proponowany system pokrył zapotrzebowanie na ogrzewanie w 18.4% oraz 75.5% zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową. Okres zwrotu inwestycji oszacowano na 11 lat.

SŁOWA KLUCZOWE: *instalacja solarna, system ogrzewania, symulacje komputerowe*

1. WSTĘP

Według raportów z ostatnich lat, budynki jednorodzinne w Unii Europejskiej zużywają około 79% całkowitego zużycia energii na cele ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej [1]. To bardzo wysoka wartość, która determinuje zarówno ustawodawców jak i projektantów do poszukiwania alternatywnych rozwiązań. W kontekście wykorzystania odnawialnych źródeł energii, duży potencjał posiada energia promieniowania słonecznego. Warto wspomnieć, iż najnowszy raport REN21 [2] wskazuje Polskę jako światowego lidera w przyroście zastosowania instalacji solarnych. Przyrost ten

wyniósł aż 179% w roku 2018 w stosunku do roku 2017 [2]. Można zaobserwować znaczny przyrost prac badawczych mających na celu poszukiwanie nowych rozwiązań dla budynków jednorodzinnych. Liczne zespoły naukowe opracowują całkiem nowe rozwiązania, jak i starają się sprawdzić możliwość instalacji systemów stosowanych w przemyśle w mniejszej skali dla odbiorców indywidualnych.

Aby zweryfikować działanie innowacyjnego rozwiązania na pierwszych poziomach gotowości technologicznej, często sięga się po oprogramowanie służące do symulacji pracy instalacji. Do analiz systemów grzewczych wiodącym w skali światowej oprogramowaniem jest TRNSYS, który powstał na University of Wisconsin-Madison w USA ok. 40 lat temu i obecnie doczekał się 18 wersji [3]. Program pozwala na wykonanie symulacji działania systemu obejmującego wskazane komponenty, o określonej budowie i parametrach. Szczytuje przy tym warunki meteorologiczne wybranej stacji pogodowej oraz korzysta z układów równań przypisanych do komponentów, przy wykorzystaniu których wykonywane są obliczenia ze wskazanym przez użytkownika krokiem czasowym. W dalszej części pracy opisano projektowany system grzewczy ze skupiającym kolektorem słonecznym oraz budynek, w którym miał zapewniać komfort cieplny na przestrzeni roku. Opisano komponenty, które użyto do budowy instalacji w programie TRNSYS 17, oraz ich zasadę współdziałania. W kolejnym rozdziale przeprowadzono analizę działania systemu w skali roku z krokiem godzinowym, a następnie wykonano obliczenia czasu zwrotu instalacji. Całość zakończono wnioskami.

2. OPIS ANALIZOWANEGO BUDYNKU

Obiektem analizy wpływu wykorzystania systemu solarne do podgrzewu ciepłej wody użytkowej, oraz ogrzewania budynku jest wolnostojący dom jednorodzinny o powierzchni użytkowej 100 m² znajdujący się w Warszawie (52°13'56" N, 21°00'30" E). Dach budynku jest nachylony pod kątem 45° do powierzchni ziemi. Budynek zamieszkiwany jest stale przez rodzinę czteroosobową. Poprzez wykorzystanie komponentu Type 109 program TRNSYS 17 dostarczył informacji dotyczących warunków pogodowych dla danej lokalizacji. Są to dane godzinowe dla typowego roku meteo (TMY), obejmujące promieniowanie słoneczne, temperaturę otoczenia oraz prędkość wiatru.

Tabela 1: Konstrukcja obiektu oraz straty ciepłne.

Element	Powierzchnia, m ²	Współczynnik przenikania ciepła, U , W/m ² K	Współczynnik strat ciepła, U_a , W/K
Podłoga	100	0,3	30
Strop	100	0,18	18
Ściany	95	0,23	21,8
Okna i drzwi	25	1,1	27,5
		Suma	97,3

Do przedstawienia budynku zastosowano komponent Type 12a, który wykorzystuje dane pogodowe do obliczeń zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Całkowity współczynnik strat ciepła dla domu został przyjęty jako $U_a = 135,2$ W/K, bazując na wartościach wymaganych współczynników przenikania ciepła według [4], przedstawionych w tab. 1 oraz przyjmując współczynnik wynikający z wymiany powietrza w budynku.

Do obliczeń przyjęto współczynnik wymiany powietrza na godzinę równy 0,5. Jego poziom jest wymagany dla tego typu konstrukcji. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Budownictwa [4] przyjęto również strumień powietrza zewnętrznego (tab. 2). Współczynnik strat ciepła przez wentylację dla tych założeń przyjmuje wartość $U_w = 37,9 \text{ W/K}$.

Tabela 2: Dobrany wymagany strumień powietrza zewnętrznego dla poszczególnych pomieszczeń

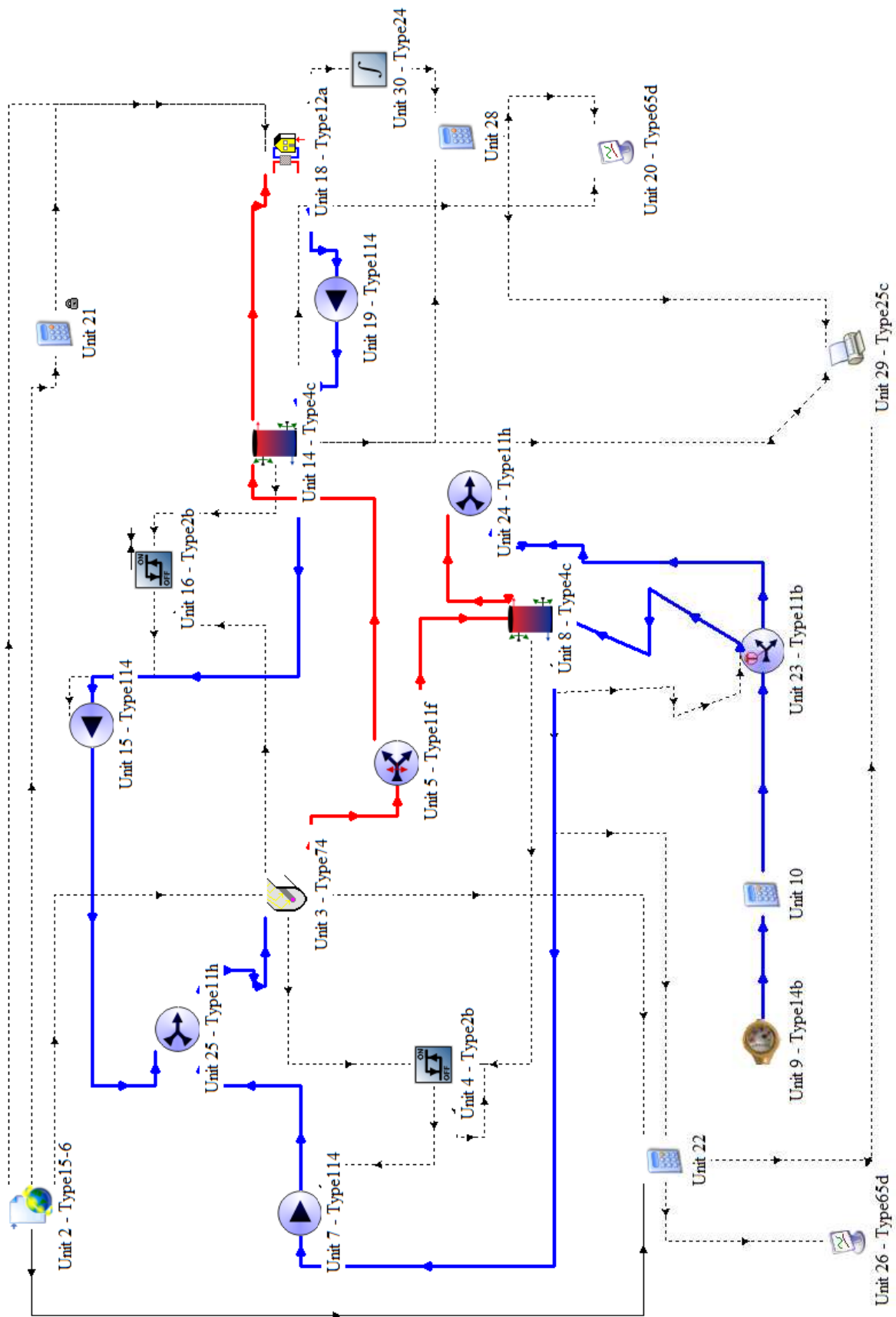
Element	Strumień powietrza zewnętrznego, m ³ /h
Kuchnia	50
Łazienka	50
2 × Sypialnia	40
Toaleta	30
Kotłownia	30
Salon	30
Suma	230

Dodatkowe zyski ciepła od mieszkańców oraz technologii zostały uwzględnione w kalkulatorze (komponent Unit 21) i przekazane do komponentu Type 12a. W trakcie okresu grzewczego założono, że system utrzymuje temperaturę wewnętrzną równą 20°C.

Na podstawie przyjętej liczby mieszkańców założono dzienne zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową wynoszące 200 l i dobrano zbiornik o pojemności 400 l. W przypadku zbiornika C.O. ustalono pojemność zbiornika 750 l, co powinno wystarczyć na kilkudniową akumulację nadwyżki z instalacji solarnej. Dla powyższych objętości dobrano zasobniki serii Mega N [5]. Wybrane zbiorniki pracują w pozycji pionowej, posiadają obudowę z tworzywa sztucznego, izolację ze specjalnego polistyrenu EPS200, oraz mają zabezpieczenie przed korozją w postaci emalii ceramicznej. Biorąc pod uwagę specyfikację producenta, średni współczynnik strat zasobnika założono na poziomie 2,5 W/m²K. Do zbiorników zostały zamontowane grzałki elektryczne o mocy 2,5 kW dla c.w.u., oraz 5 kW dla C.O. Powierzchnia czynna dobrego kolektora skupiającego wyniosła 11,25 m² z maksymalną sprawnością 0,75 i stratami cieplnymi na poziomie 0,6 W/m²K dla nachylenia 45° [6].

Zasada działania projektowanej instalacji grzewczej (rys. 1) jest następująca: słoneczny kolektor skupiający podąża za słońcem i absorbuje bezpośrednio promieniowanie słoneczne, w wyniku czego podgrzewa przepływający przez absorber czynnik roboczy w postaci glikolu etylenowego 50%. Następnie czynnik transportowany jest przez rozdzielacz do dwóch zbiorników, gdzie przekazuje ciepło do wody. Bezpieczna temperatura w zbiorniku kontrolowana jest przez regulator SOLARCOMP S1, który przy przekroczeniu temperatury 95°C wysyła informację OFF do pompy obiegowej.

Przekazane ciepło wykorzystywane jest do celów użytkowych oraz do ogrzewania podłogowego budynku. W systemie zastosowano dodatkowe źródło energii w postaci grzałek elektrycznych sterowanych regulatorami SOLARCOMP S1, które stanowią uzupełnienie pracy systemu solarnego w okresie wiosennym i jesiennym, oraz są głównym źródłem ciepła w okresie zimowym.



Rys. 1: Schemat zaprojektowanego systemu solarnego w programie TRNSYS 17

Do zaprojektowania systemu wykorzystano następujące komponenty:

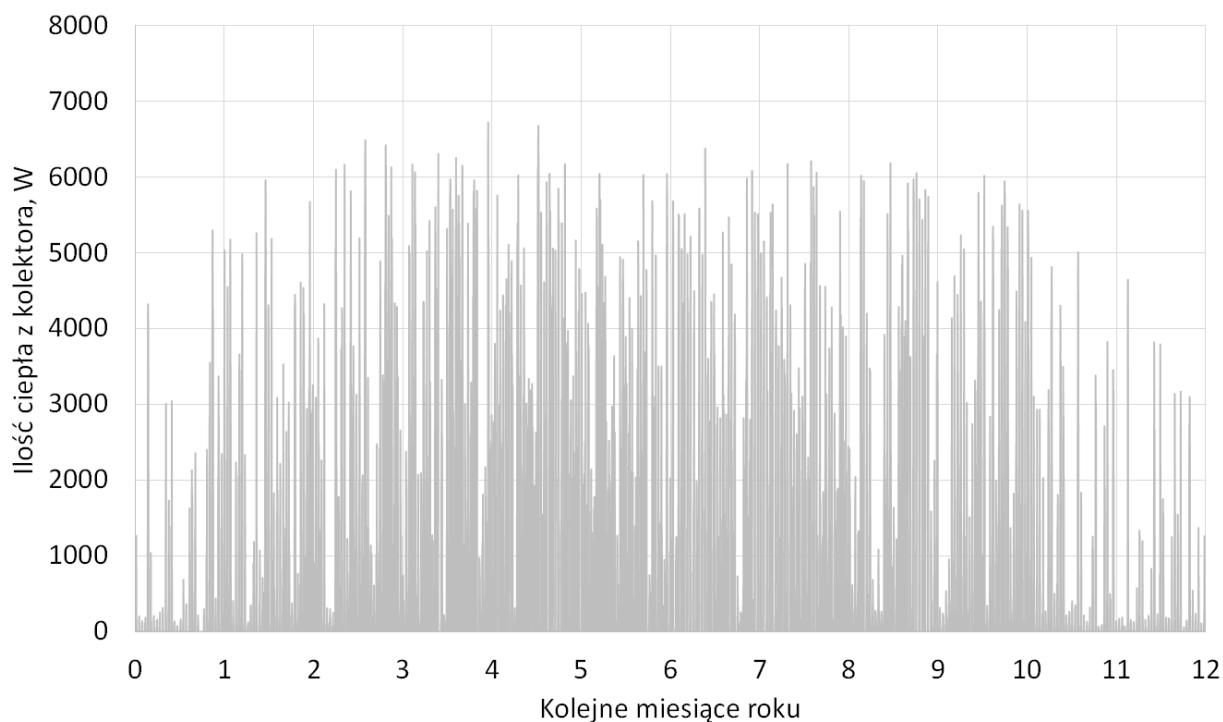
1. Type15-6: odczytuje informacje w regularnych interwałach czasowych z zewnętrznych plików pogodowych dla TMY, interpoluje je dla kroków czasowych mniejszych niż godzina i przekształca je tak, aby inne komponenty mogły z nich korzystać,
2. Type74: definiuje informacje dotyczące budowy i zasady działania słonecznego kolektora skupiającego. Wykorzystywany w komponencie model optyczny uwzględnia specjalne cechy złożonego koncentratora parabolicznego typu CPC, natomiast standardowy model Hottela–Whilliera służy do oceny wydajności cieplnej kolektora [7],
3. Type114: definiuje działanie pompy obiegowej, która w tym przypadku utrzymuje stałe masowe natężenie przepływu cieczy na wylocie. Charakterystyka uruchamiania i zatrzymywania pompy nie jest modelowana i zależy współpracy z innymi komponentami [7],
4. Type4c: określa parametry pracy zbiornika c.w.u. oraz c.o. Komponent analizuje model warstwowy (segmentowy) wodnego zbiornika akumulacyjnego z możliwością podłączenia dodatkowego wewnętrznego podgrzewacza w postaci grzałki elektrycznej. W analizowanym układzie założono podział zbiornika c.o. na 5 obszarów temperaturowych, a zbiornika c.w.u. na 6 obszarów. Model zbiornika uwzględnia założenie, że strumienie medium roboczego płynące w górę i w dół z każdego obszaru temperaturowego są w pełni mieszane przed wejściem do kolejnego segmentu [7],
5. Type2b: tworzy funkcję kontrolną dla pozostałych komponentów, która może przyjmować wartość 0 bądź 1; kontroluje temperaturę w zbiorniku dla określonej wartości maksymalnej (przyjętej na poziomie 95°C),
6. Type14b: sterownik odpowiedzialny za profil czasowy poboru ciepłej wody użytkowej,
7. Type12a: oblicza bieżące zapotrzebowania na ciepło obiektu mieszkalnego,
8. Kalkulator: wykonuje matematyczne działania i może służyć do uzupełniania dodatkowych danych wejściowych. W tym przypadku dla podanych wartości zysków ciepła od ludzi (250 W) i technologii (800 W),
9. Type11h: zapewnia zmieszanie się dwóch strumieni o tym samym składzie,
10. Type11f: zapewnia rozdzielenie się strumienia na dwa, które uzyskują wartości w zależności od informacji uzyskanej z Type4c,
11. Type65d: tworzy wykresy poglądowe pozwalające sprawdzić otrzymywane wyniki godzinowo w skali roku,
12. Type25c: umożliwia przekonwertowanie standardowego pliku wyjściowego na wybrany przez siebie format (np. xlsx),
13. Type24: sumuje wartości dla danego okresu (operator całkujący),
14. Type11b: zapewnia dostawę świeżej wody do zbiornika przy odbiorze sygnału kontrolnego.

W każdym z komponentów zdefiniowano parametry pracy urządzeń, korzystając z kart katalogowych oraz zdefiniowano ich warunki współpracy.

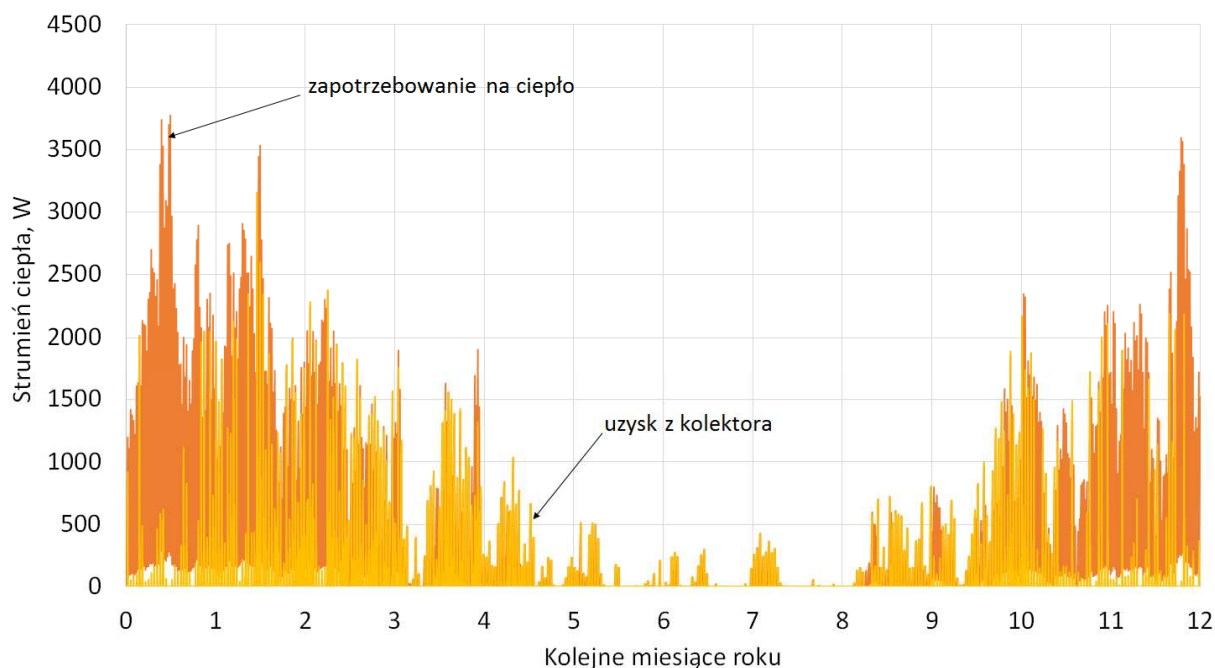
3. WYNIKI SYMULACJI

Do określenia skuteczności działania przedstawionego systemu solarnego wykonano symulacje jego rocznej pracy z krokiem godzinowym. Otrzymane w postaci pliku tekstowego dane wyjściowe ze wskazanych komponentów przekonwertowano do programu EXCEL. Wyniki usystematyzowano, aby wskazać uzyski z instalacji solarnej, które można wykorzystać bezpośrednio do pokrycia zapotrzebowania budynku. Rezultaty przedstawiono w postaci graficznej, która pozwala na obserwacje specyfiki działania systemu na przestrzeni typowego roku meteorologicznego.

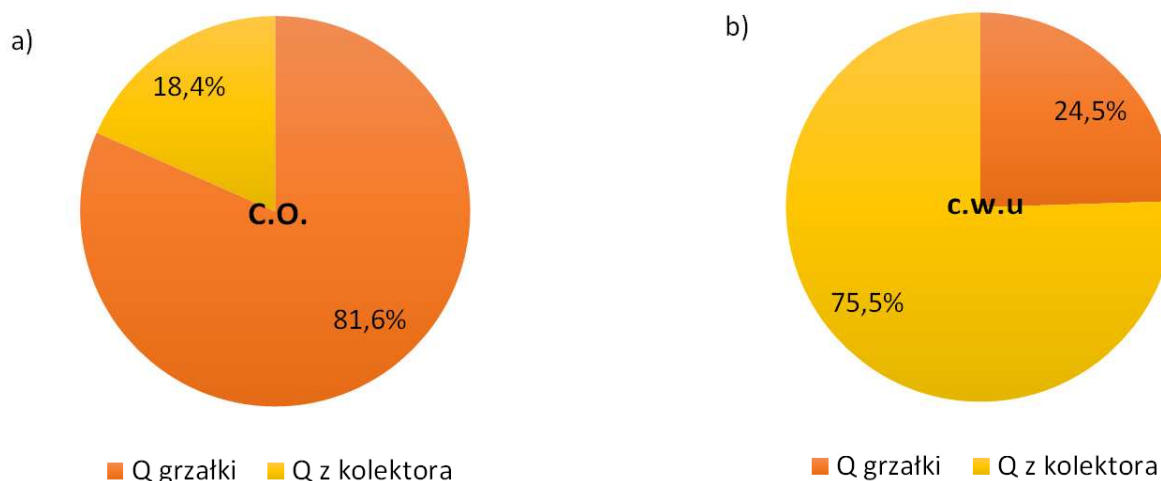
Na rysunku 2 przedstawiono ilość energii uzyskanej przez słoneczny kolektor skupiający, skierowany w stronę równika. Ruch urządzenia odbywał się wokół własnej osi poprowadzonej w orientacji północ-południe. Dzięki zastosowaniu powyższego rozwiązania kolektor skupiający mógł zaabsorbować większą część promieniowania słonecznego w okresach zimniejszych, niż kolektory innego typu. Przyczyniło się to do zwiększenia zakresu wpływu na zapotrzebowanie na c.o. oraz c.w.u. Najwyższe wartości zaabsorbowanej energii przypadły w okolicach początku kwietnia – prawie 7 kW mocy cieplnej. Jest to związane bezpośrednio z panującymi w danym okresie warunkami meteorologicznymi, w tym szczególnie z zachmurzeniem nieba, gęstością docierającego promieniowania słonecznego oraz temperaturą otoczenia. Natomiast na rys. 3 przedstawiono zapotrzebowanie na c.o. dla budynku i pokrycie tego zapotrzebowania przez system solarny. W okresie początek grudnia–koniec stycznia pokrycie zapewnione przez system solarny jest znikome, więc musi w większym stopniu pochodzić ze źródła dodatkowego.



Rys. 2: Strumień ciepła pozyskany ze skupiającego kolektora słonecznego



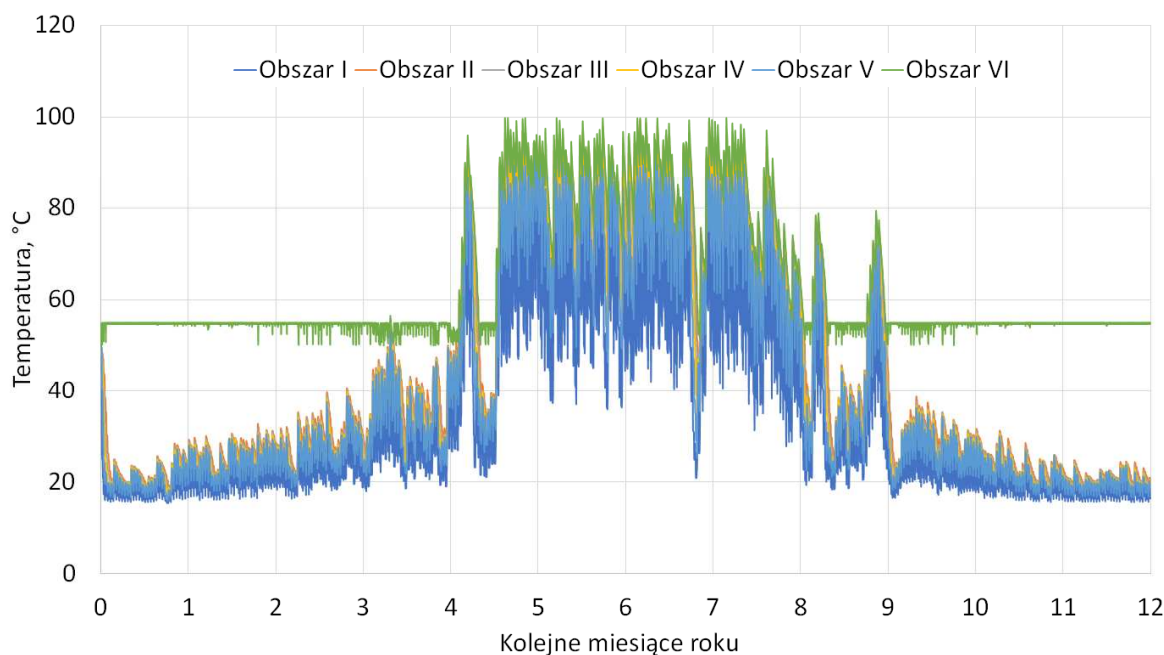
Rys. 3: Potrzeby systemu ogrzewania i ich pokrycie przez kolektor słoneczny



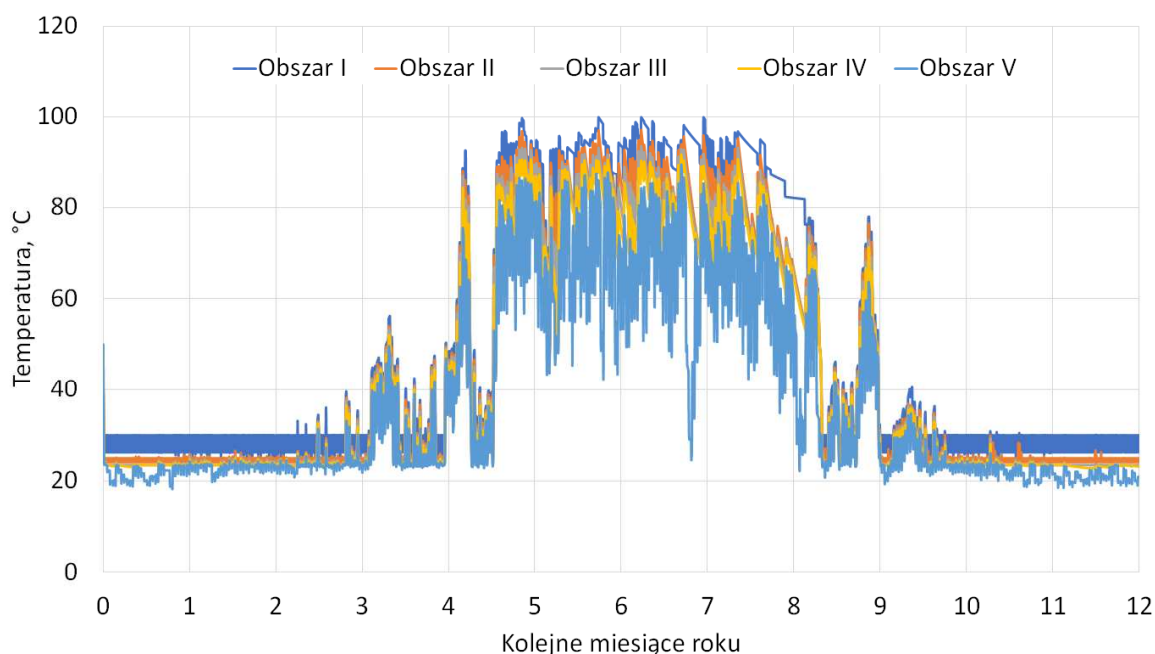
Rys. 4: Procentowe pokrycie zapotrzebowania grzewczego przez kolektor:
 a) systemu ogrzewania, b) produkcji ciepłej wody użytkowej

W tym czasie zapotrzebowanie jest największe, co wpływa bezpośrednio na fakt, że całoroczny udział pokrycia przez instalację solarną wynosi 18,4% (rys. 4a). Między początkiem marca i końcem października instalacja solarna pokrywa znaczną część zapotrzebowania. W przypadku c.w.u. (rys. 4b) udział pokrycia przez system solarny jest znacznie większy. Wynika to z faktu, że zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową jest w przybliżeniu stałe przez cały rok, dzięki czemu instalacja mogła pokryć aż 75,5% potrzeb mieszkańców.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przebieg stratyfikacji, czyli rozkład temperatury wody w zbiornikach w okresie rocznym. W obu przypadkach widać znaczny wzrost temperatury wody we wszystkich analizowanych obszarach w połowie kwietnia,



Rys. 5: Rozkład temperatury w poszczególnych obszarach zbiornika c.w.u.



Rys. 6: Rozkład temperatury w poszczególnych obszarach zbiornika C.O.

który utrzymuje się do połowy sierpnia. Dla zbiornika c.w.u. temperatura w górnej części zbiornika musiała być utrzymywana na poziomie 55°C , aby spełniać warunki norm. W przypadku zbiornika C.O., dla zapewnienia komfortu mieszkańcom, temperatura górnego obszaru wynosiła 30°C . Gdy instalacja solarna nie zapewniała wystarczającej ilości ciepła dogrzew wody w górnych obszarach zbiorników następował przy wykorzystaniu wbudowanych grzałek elektrycznych.

4. ANALIZA EKONOMICZNA

W tabeli 3 przedstawiono ceny głównych elementów wchodzących w skład systemu solarnego. Przy doborze urządzeń kierowano się najbardziej korzystną relacją pomiędzy ceną i jakością. W przypadku doboru kolektora skupiającego wymagane było skorzystanie z azjatyckich dostawców, ze względu na bardzo wysokie ceny na pozostałych rynkach. Przeprowadzone symulacje pozwoliły uzyskać sumy całoroczne strumieni ciepła, które zostały przedstawione w tab. 4.

Tabela 3: Kosztorys systemu uwzględniający główne jego elementy

Element	Cena, PLN
Kolektor skupiający Vicot VKZ102	8235
Zbiornik W – E 400,81N	2325
Zbiornik W – E 750,81N	5766
UPM3 SOLAR, 2 szt.	690
Pompa obiegowa EVOSTA 40-70/130 DAB	495
Regulator SOLARCOMP S1, 2 szt.	443
Suma	17954

Tabela 4: Całoroczna suma strumieni ciepła

Element	Strumień ciepła, kWh
Kolektor	5428
Zapotrzebowanie C.O.	4073
Pokrycie C.O. – grzałka	3324
Pokrycie C.O. – system	749
Zapotrzebowanie c.w.u.	3261
Pokrycie c.w.u. – grzałka	796
Pokrycie c.w.u. – system	2465

Dzięki otrzymanym wartościom pokrycia zapotrzebowania przez system można wykonać analizę ekonomiczną czasu zwrotu inwestycji. Do jej przeprowadzenia założono, że koszt 1 kWh energii elektrycznej dla Warszawy wynosi 0,51 PLN [8, 9]:

$$t = \frac{K}{(Q_{co} + Q_{cwu}) k_{el}} = \frac{17954 \text{ PLN}}{(747 \text{ kWh} + 2465 \text{ kWh}) 0,51 \text{ PLN/kWh}} = 10,95 \text{ lat} \quad (1)$$

gdzie:

K – koszt inwestycji, PLN,

Q_{co} – roczne pokrycie zapotrzebowania na c.o. przez system solarny, kWh,

Q_{cwu} – roczne pokrycie zapotrzebowania na c.w.u. przez system solarny, kWh,

k_{el} – cena 1 kWh energii elektrycznej, PLN.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że czas zwrotu inwestycji wynosi 11 lat.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wyniki całorocznej pracy systemu solarnego dla domu jednorodzinne. Zastosowana instalacja zapewniła pokrycie niewielkiej części zapotrzebowania na c.o. (18,4%). Spowodowane jest to mniejszymi zyskami cieplnymi dla kolektora w okresie grzewczym, kiedy występują największe straty ciepłe budynku. Rozwiązaniem tego problemu mogłoby być zastosowanie dużego zbiornika pozwalającego na akumulację ciepła podczas sezonu letniego, które zostałyby następnie wykorzystane w sezonie zimowym. Rozwiązanie to zostało odrzucone ze względu na trudności techniczne działania takiego systemu, związane z zapewnieniem wystarczającej ilości miejsca na zbiornik (36 m³ dla obiektu o powierzchni 120 m² [10] i bardzo dużej apertury kolektorów. W przypadku c.w.u. system solarne zapewnił 75,5% pokrycia zapotrzebowania. Tak wysoka wartość spowodowana jest tym, że energia potrzebna na podgrzewanie c.w.u. jest stała przez cały rok.

Suma energii zaabsorbowanej przez rok za pomocą słonecznego kolektora skupiającego wyniosła 5428 kWh, a system solarne wykorzystał 3214 kWh – co stanowi 59,2% całkowitej energii. Jest to spowodowane zbyt dużą ilością ciepła, które kolektor uzyskuje w okresie letnim, osiągając wartości przewyższające zapotrzebowanie.

Pod względem ekonomicznym zastosowanie przedstawionego systemu solarne – podczas dłuższej eksploatacji – pozwoli na duże oszczędności. Przyjmując zbliżony koszt instalacji wynoszący 17954 PLN, koszt 1 kWh energii elektrycznej równy 0,51 PLN oraz oszczędność energii elektrycznej, wynikającą z wykorzystania systemu solarne, na 3214 kWh rocznie, wykonano obliczenia pozwalające określić, po ilu latach inwestycja się zwróci. Dla podanego przypadku czas ten wyniósł w przybliżeniu 11 lat.

LITERATURA

- [1] Solar Heat Europe. Available online: <http://solarheateurope.eu> (dostęp: wrzesień 2019).
- [2] REN21. Renewables 2019 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat); REN21: Paris 2019.
- [3] TRNSYS 17: *A TRaNsient SYstems Simulation Program*, University of Wisconsin, USA.
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 14 listopada 2017 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U.z 2017, poz. 2285.
- [5] <http://www.biawar.com.pl/produkt/mega-wezownica-100-1000l/> (dostęp: maj 2019).
- [6] <http://www.biawar.com.pl/produkt/zasobniki-buforowe-bu/> (dostęp: maj 2019).
- [7] *Mathematical Reference, a TRaNsient SYstem Simulation program*, University of Wisconsin-Madison, 4, TRNSYS 17, USA; <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/05-Mathematic-Reference.pdf>
- [8] <http://cena-pradu.pl/> (dostęp: maj 2019).
- [9] http://mfiles.pl/pl/index.php/okres_zwrotu/ (dostęp: maj 2019).
- [10] Antoniadis C.N., *Simulation of Solar Thermal Systems with Seasonal Storage Operation for Residential Scale Applications*, *Procedia Environmental Sciences* **38** (405–412), 2017.