



ZESZYTY ENERGETYCZNE, TOM VII

*Wyzwania naukowe w dobie światowej transformacji energetycznej*

2020, s. 281–289

---

---

## **Analiza instalacji opartej na pracy pompy ciepła wspomagananej przez ogniwa PVT i kolektory słoneczne**

**Natalia Generowicz**

Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki,  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Promotor: Paweł Ocoń

e-mail: [ngenerowicz@min-pan.krakow.pl](mailto:ngenerowicz@min-pan.krakow.pl)

### **Streszczenie**

W ostatnim czasie, zgodnie z europejską dyrektywą 2020, każde państwo członkowskie UE zwraca coraz większą uwagę na sektor energetyczny. Wyznaczone cele dotyczą zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych o 20% w porównaniu z poziomem z 1990 r., pokrycia zapotrzebowania na energię ze źródeł odnawialnych na poziomie 20% oraz zwiększenia efektywności energetycznej o 20%. Znaczną uwagę zwraca się w szczególności na budynki i sektor mieszkaniowy, stanowiący 27% globalnego zużycia energii i emisji CO<sub>2</sub>. Jeśli chodzi o wielkość instalacji, w ostatnich latach kilka badań koncentrowało się na pompach ciepła jako systemach grzewczych. Od momentu zwrócenia uwagi na rozproszoną produkcję energii coraz częściej mówi się o systemach hybrydowych, zdolnych do wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej. W przypadku technologii PV udowodniono, że chłodzenie powierzchni roboczej jest kluczowym czynnikiem eksploatacyjnym, który należy wziąć pod uwagę, w celu uzyskania wyższej sprawności. Prawidłowe chłodzenie może poprawić sprawność elektryczną i z czasem zmniejszyć tempo degradacji ogniwa. Ponadto ciepło usuwane przez system chłodzenia może być wykorzystywane w zastosowaniach domowych. W systemach PVT (hybrydowy system fotowoltaiczny i termiczny) tylko 15–20% energii słonecznej padającej na panel PVT może zostać zamienione na energię elektryczną, a pozostała część na ciepło. Ta część energii ciepłej może zostać wykorzystana do uzyskania efektu grzewczego.

Wielkoskalowe systemy lokalnego ogrzewania wodnego i systemy fotowoltaiczne PVT są najbardziej obiecującymi rozwiązaniami. Niektóre badania dotyczą hybrydowych systemów ogrzewania pomieszczeń, w skład których wchodzi panel PVT i pompy ciepła. Zalety tych systemów polegają na dostarczaniu energii do ogrzewania pomieszczeń w okresie zimowym oraz ciepłej wody użytkowej w innych porach roku i wytwarzaniu energii elektrycznej.

Praca ma na celu analizę systemu grzewczego dla budynków wielorodzinnych, opartego na pompie ciepła, ogniwach PVT z systemem nadążnym za słońcem, obrotowych kolektorach słonecznych oraz magazynie energii cieplnej w gruncie. Zaproponowany system grzewczy będzie w dalszych etapach pracy badany na dwóch instalacjach w Polsce, w budynkach różniących się co najmniej dwukrotnie zapotrzebowaniem na energię cieplną.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, ogniwa PVT, kolektory słoneczne, magazynowanie ciepła

## 1. Wprowadzenie

W ciągu ostatnich lat, zgodnie z zaleceniami europejskiej dyrektywy 2020, wszystkie państwa członkowskie UE zaczęły zwracać coraz większą uwagę na sektor energetyczny. Wyznaczone cele dotyczyły zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych o 20% w porównaniu z poziomem z 1990 r., pokrycia zapotrzebowania na energię ze źródeł odnawialnych na poziomie 20% oraz zwiększenia efektywności energetycznej o 20% [1]. Środki w zakresie efektywności energetycznej dotyczą wszystkich sektorów przemysłu, transportu i budownictwa. Na uwagę zasługuje w szczególności sektor mieszkaniowy (w odniesieniu do budynków), stanowiący 27% globalnego zużycia energii i emisji CO<sub>2</sub> [2], [3].

Ostatnie badania skupiają się na hybrydowej pompie ciepła, zdolnej do pracy z wieloma źródłami ciepła, w celu maksymalizacji wydajności [4]. Głównym wyzwaniem związanym z tymi systemami jest zapewnienie ich wysokiej sprawności w warunkach zimnego klimatu, z wykorzystaniem systemów magazynowania ciepła [5], [6]. Ponieważ wysoka sprawność retencyjna w małych instalacjach jest trudna do osiągnięcia, naukowcy zwracają uwagę na możliwość sezonowego magazynowania energii cieplnej i innych komponentów, takich jak wysokotemperaturowe pompy ciepła, które są niezbędne do osiągnięcia efektywnej pracy instalacji [7].

Powietrzne pompy ciepła charakteryzują się najwyższymi kosztami eksploatacji, ponieważ temperatura źródła ciepła podlega najbardziej znaczącym wahaniom sezonowym. Wodne i geotermalne pompy ciepła posiadają z kolei lepsze parametry i niższe koszty eksploatacji, z uwagi na wyższą temperaturę źródła ciepła [8], [9]. Systemy energii słonecznej i gruntowe pompy

ciepła to dwa obiecujące sposoby na zmniejszenie zużycia energii kopalnej i emisji gazów cieplarnianych. Geotermalne pompy ciepła w biegu czasu mają problem pozyskiwania ciepła z gruntu, co skutkuje obniżaniem się współczynnika *COP* systemu [10].

W ostatnim czasie, od momentu zwrócenia uwagi na rozproszoną produkcję energii, rozprzestrzeniają się systemy hybrydowe, zdolne do wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej. Kolektory fotowoltaiczne (PV) i słoneczne kolektory ciepłe są coraz częściej instalowane w nowo powstałych budynkach mieszkalnych. Dlatego też integracja systemów kolektorów słonecznych z budynkami jest jednym z najbardziej dyskutowanych zagadnień badawczych w zakresie wykorzystania odnawialnych źródeł energii [11].

W przypadku technologii PV udowodniono, że chłodzenie powierzchni roboczej jest kluczowym czynnikiem operacyjnym, który należy wziąć pod uwagę w celu osiągnięcia ich wyższej wydajności [12]. Właściwe chłodzenie może poprawić wydajność elektryczną i z czasem zmniejszyć tempo degradacji ogniwa. Ponadto ciepło usuwane przez system chłodzenia może być wykorzystywane w zastosowaniach domowych. W systemach PVT tylko 15–20% energii słonecznej padającej na panel PVT może zostać zamienione na energię elektryczną, a pozostała część na ciepło [13], [14]. Ta część energii ciepłej może zostać wykorzystana do uzyskania efektu grzewczego. Hybrydowy system fotowoltaiczny i termiczny (PVT) jest technologią, która integruje panele fotowoltaiczne i komponenty pobierające ciepło w jednym module [15], [16].

Wielkoskalowe systemy lokalnego ogrzewania wodnego i systemy fotowoltaiczne PVT są najbardziej obiecującymi rozwiązaniami. Niektóre badania dotyczą hybrydowych systemów ogrzewania pomieszczeń, w skład których wchodzi panele PVT i pompy ciepła [17], [18]. Zalety tych systemów polegają na dostarczaniu energii do ogrzewania pomieszczeń w okresie zimowym oraz ciepłej wody użytkowej w innych porach roku i wytwarzaniu energii elektrycznej [19], [20].

W przeprowadzonych i przeanalizowanych powyżej badaniach brakuje jednak poruszenia takich aspektów, jak:

- a) badania nad termicznymi i elektrycznymi parametrami PVT na szynach słonecznych w połączeniu z systemami pomp ciepła woda/woda,
- b) badania nad regeneracją gruntu przez PVT i wykorzystaniem ciepła odpadowego z kolektorów słonecznych,
- c) wpływ na efektywność energetyczną budynków wielorodzinnych starego typu, łącznie z ogrzewaniem i chłodzeniem za pomocą gruntowych pomp ciepła ze wspomaganie słonecznym,
- d) wpływ na poprawę współczynnika *COP* w gruntowej pompie ciepła, poprzez regenerację gruntu i wpływ regeneracji gruntu na długotrwałą eksploatację GSHP (gruntowe pompy ciepła). Pojawia się więc pytanie, czy możliwe jest utrzymanie stałego współczynnika *COP*

i efektywności energetycznej pompy ciepła w kolejnych sezonach grzewczych? Ma ono zasadnicze znaczenie dla długoterminowego przewidywania korzyści ekonomicznych systemów ogrzewania/chłodzenia pompą ciepła.

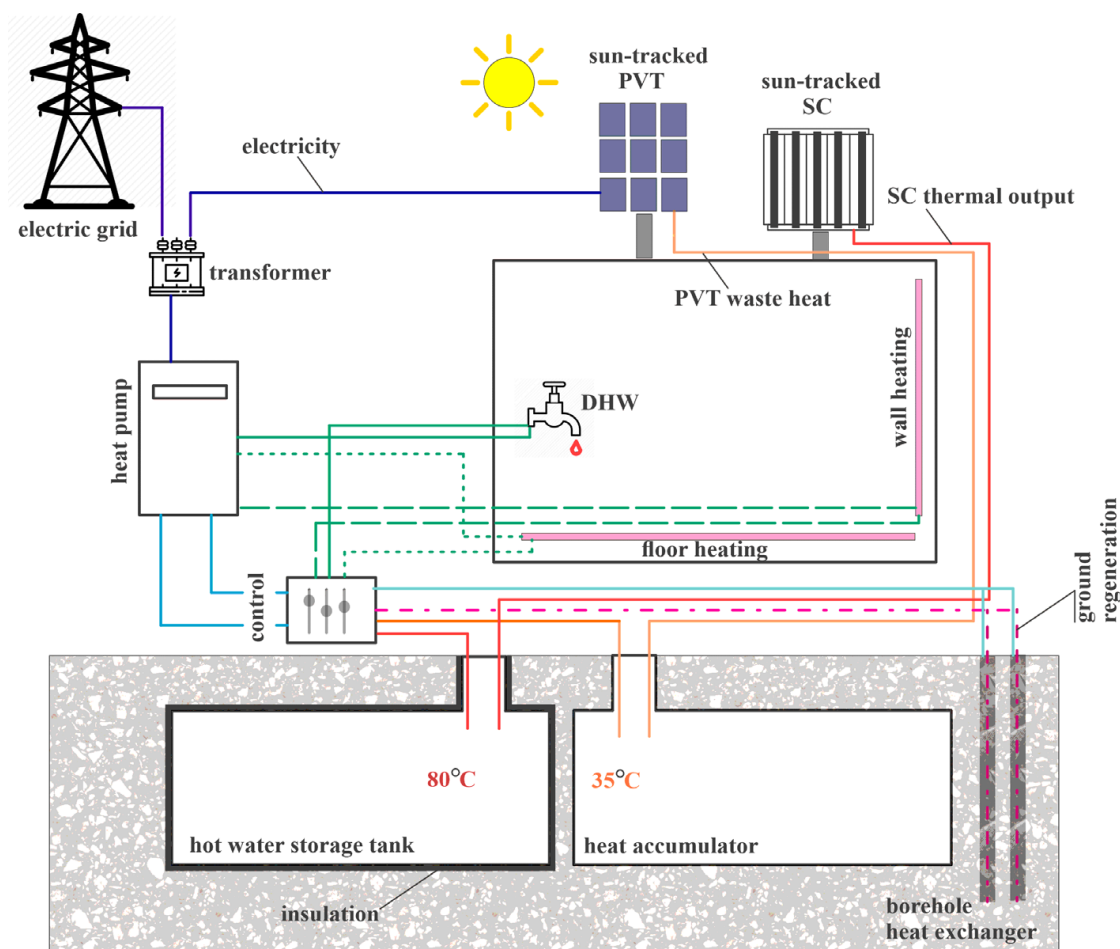
## 2. Analiza poszczególnych składowych instalacji opartej na pracy pompy ciepła wspomaganiej przez ogniwa PVT i kolektory słoneczne

Zaproponowana instalacja będzie opierać się o system oparty w 100% na skojarzonym chłodzeniu, ogrzewaniu i zasilaniu (CCHP), w tym sezonowym podziemnym magazynowaniu energii. System ten pozwoli na:

- wykorzystanie energii słonecznej jako podstawowego źródła energii odnawialnej,
- wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej za pomocą paneli PVT (fotowoltaicznych-termicznych),
- stworzenie sezonowego podziemnego magazynu ciepła w systemie,
- dostarczenie ogrzewania i chłodzenia do budynku za pomocą pompy ciepła,
- dostarczanie energii elektrycznej do budynku poprzez PV,
- wykorzystanie ciepła odpadowego z inteligentnych kolektorów słonecznych PVT lub słonecznych do regeneracji gruntu,
- utrzymanie wysokiego współczynnika *COP* pompy ciepła podczas kolejnych sezonów grzewczych.

Proponowany system (rys. 1) to niskotemperaturowy system grzewczy ( $\sim 35^{\circ}\text{C}$ ) dla budynków opartych na pompie ciepła, wykorzystujący ciepło odpadowe z chłodzenia paneli PV i podziemnego magazynowania energii cieplnej.

Idea systemu polega na tym, że ciepło odpadowe z chłodzenia paneli PV jest magazynowane w zakopanych pod ziemią zbiornikach magazynowych. Pozwala to na zwiększenie temperatury gruntu wokół zbiornika i przywrócenie zdolności gruntu do dostarczania ciepła po okresie grzewczym. Ponadto panele PV będą produkować energię elektryczną potrzebną w proponowanym systemie, a także niezbędną do pokrycia zapotrzebowania na ciepło w budynku. Ze względu na chłodzenie paneli PV oczekuje się zwiększenia efektywności produkcji energii elektrycznej o 5–10%. Ciepło zmagazynowane w ziemi oraz zbiorniki magazynowe będą wykorzystywane przez pompę ciepła do dostarczania ciepła do budynku. Dzięki zastosowaniu systemu magazynowania energii cieplnej współczynnik *COP* pompy ciepła zostanie zwiększony. Wartość średniego rocznego współczynnika *COP* jest wyższa niż 5, w związku z tym do uruchomienia sprężarki w cyklu pompy ciepła potrzeba mniej energii elektrycznej. System będzie w pełni odnawial-



Rys. 1. Schemat zaproponowanego systemu instalacji wykorzystującej OZE

ny, ponieważ energia elektryczna dostarczana do pompy ciepła będzie wytwarzana przez panele PV. Nowością jest zastosowanie systemu śledzenia słońca w panelach PV, w celu zwiększenia ilości energii elektrycznej produkowanej w ciągu dnia. Ponadto kolektory słoneczne z systemem śledzenia słońca są wykorzystywane do wspomaganie produkcji ciepłej wody użytkowej w okresie wiosenno-jesiennym. Ciepłe powietrze za skraplaczem będzie wykorzystywane do podgrzewania ciepłej wody użytkowej za pomocą płytowego wymiennika. Ciepło to może być również wykorzystane do podwyższenia temperatury podziemnego systemu magazynowania energii cieplnej oraz do przygotowania ciepłej wody użytkowej. W związku z tym spodziewany jest wzrost zarówno ogólnej efektywności systemu, jak również wydajności gruntowej pompy ciepła. W ciepłym klimacie modyfikacja ta może zostać wykorzystana do podgrzewania ciepłej wody użytkowej, podczas gdy w krajach o klimacie umiarkowanym (Polska, Czechy, Niemcy) moc pompy ciepła zostanie zwiększona w sezonie grzewczym.

Proponowany system jest rozwiązaniem kompleksowym, zapewniającym klientowi gotowy system dostarczania ciepła do budynku, w całości oparty na instalacjach wykorzystujących OZE. System ten będzie oferowany wraz z niezbędnymi systemami automatyki i sterowania i będzie bezobsłu-

gowy dla użytkownika końcowego. Ponadto będzie on autonomiczny, ponieważ wytwarza energię elektryczną potrzebną do zasilania komponentów. Zapotrzebowanie na energię pierwotną budynku, który będzie wyposażony w proponowany system energetyczny, wynosi zero, więc wskaźnik zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną dla dostaw ciepła do budynków może być zredukowany do 0.

System zawiera kilka innowacyjnych rozwiązań:

1. Dzięki ponownemu wykorzystaniu ciepła odpadowego z PVT w połączeniu z podziemnym magazynowaniem energii osiągany jest wysoki współczynnik *COP* pompy ciepła o średniej rocznej ponad 5. Typowe pompy ciepła typu woda/woda mają maksymalny współczynnik *COP* wynoszący 4. Tak wysoki współczynnik *COP* umożliwia efektywne podziemne magazynowanie energii, dzięki czemu sprężarka pompy ciepła zużywa 20% mniej energii elektrycznej rocznie.
2. Opracowanie wysokowydajnej techniki regeneracji gruntu dzięki transferowi ciepła z podziemnego magazynu do gruntu i z odwiertów do gruntu, przez co współczynnik *COP* pompy ciepła nie zmniejsza się w kolejnych latach. Jest to w rzeczywistości najbardziej znacząca innowacja w tym systemie, która prowadzi do utrzymania stałego współczynnika *COP* przez lata pracy pompy ciepła.
3. PVT z chłodzeniem i inteligentnym śledzeniem słońca pozwoli na osiągnięcie konwersji energii słonecznej/elektrycznej na poziomie 18% oraz konwersji energii słonecznej/termicznej do 60%, w celu zmaksymalizowania wydajności energii odnawialnej.

Głównym problemem w przypadku wodnych systemów grzewczych opartych na pompach ciepła jest fakt, że grunt przez lata pracy pompy ciepła zmniejsza swoją zdolność grzewczą. Po sezonie grzewczym, kiedy z gruntu pobierana jest duża ilość ciepła, nie ma wystarczającego czasu na przywrócenie zdolności grzewczej gruntu. Dlatego współczynnik efektywności pompy ciepła obniża się co roku o 10–15%, a tym samym wzrasta zużycie energii elektrycznej przez sprężarkę pompy ciepła. Producenci pomp ciepła deklarują ich mierzony w warunkach laboratoryjnych współczynnik efektywności, jednak rzeczywistość eksploatacyjna jest inna i jest o ok. 30% wyższa od deklarowanej (zwłaszcza w przypadku braku wody gruntowej). Eksploatacja całego systemu może być wówczas droższa, niż ogrzewanie przy pomocy kondensacyjnych kotłów gazowych. System ten proponuje przełomowe rozwiązanie, pozwalające na regenerację mocy grzewczej gruntu poprzez wykorzystanie ciepła odpadowego z paneli PVT i ciepła odpadowego z kolektorów słonecznych, w czasie, gdy temperatura wyjściowa jest niższa niż 40°C i nie może być wykorzystana do ogrzewania wody użytkowej. Tego typu rozwiązanie może być kamieniem milowym dla szerszej realizacji systemów grzewczych opartych na pompach ciepła woda/woda oraz dla przyszłości efektywności energetycznej budynków w UE.

Znaczącym atutem instalacji jest fakt, że została ona zaprezentowana w Polsce podczas dwóch realizowanych projektów:

- HySOL – instalacja o mocy elektrycznej 20 kW i cieplnej 45 kW umieszczona w Oświęcimiu przy budynku straży pożarnej,
- SOPSAR – instalacja z podziemnym blokiem ciepłowniczym o mocy elektrycznej 41kW i cieplnej 75kW zlokalizowana w Limanowej oraz fabryka firmy CZAMARA.

System nie był testowany dla budynków mieszkalnych, ale istnieje możliwość rozbudowy proponowanego rozwiązania dla budynków wielorodzinnych. Widoczna jest również potrzeba opracowania zaawansowanych modeli matematycznych, w celu przeprowadzenia modelowej kontroli progностycznej dla rozwiązania i poprawy jego efektywności podczas pracy systemu. Ze względu na zastosowanie rozwiązań w różnych strefach klimatycznych należy zająć się również kwestiami prawnymi oraz dostosowaniem systemu do różnych warunków pracy. Kwestie legislacyjne są niezwykle istotne, np. w Polsce zmienia się polityka prosumentów, a obecnie przy instalacji instalacji PV o mocy elektrycznej powyżej 50kW nadwyżka musi zostać zwrócona do sieci elektrycznej i sprzedana w wysokości zaledwie 0,03 euro za kWh. Jest to niekorzystne dla użytkowników końcowych, którzy nie mogą magazynować energii elektrycznej w sieci, gdy moc instalacji PV jest wysoka. W Polsce, gdzie sezony grzewcze są wymagające i długie, system powinien dostarczać głównie energię ciepłą, natomiast latem powinien również zaspokajać potrzeby w zakresie klimatyzacji. Z tych powodów optymalizacja jest bardzo potrzebna. Należy także podkreślić, że instalacja została przetestowana tylko w Polsce w klimacie umiarkowanym, głównie dla potrzeb ogrzewania. Jednak w przypadku chłodzenia nadal istnieje potrzeba sprawdzenia, jak zachowuje się system, gdy pompa ciepła jest połączona z instalacją klimakonwektorów.

### 3. Wnioski

Analizowana w artykule instalacja jest innowacyjnym rozwiązaniem, które może przyczynić się do wzrostu zainteresowania pompami ciepła. Do tej pory tego typu urządzenia kojarzone były z wysokimi kosztami inwestycyjnymi i jednoczesnym spadkiem wydajności pracy na przestrzeni czasu. Dzięki ponownemu wykorzystaniu ciepła odpadowego z PVT w połączeniu z podziemnym magazynowaniem energii, współczynnik *COP* pompy ciepła osiągnie wartość o średniej rocznej ponad 5. Tak wysoki współczynnik *COP* ograniczy pobór energii elektrycznej przez sprężarkę pompy ciepła do 20% rocznie. PVT z chłodzeniem i inteligentnym śledzeniem słońca sprawi, że osiągnięcie konwersji energii słonecznej/elektrycznej będzie osiągalne na poziomie 18%, a konwersji energii słonecznej/termicznej wyniesie do 60%.

Proponowany system jest rozwiązaniem kompleksowym, zapewniającym potencjalnemu klientowi gotowy system dostarczania ciepła do budynku w całości oparty na OZE. Zapotrzebowanie na energię pierwotną budynku, który będzie wyposażony w proponowany system energetyczny, wynosi zero, więc wskaźnik zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną dla dostaw ciepła do budynków może być zredukowany do 0.

Wdrożenie takich instalacji na skalę krajową mogłoby mieć pozytywny wpływ na wprowadzane obecnie rozwiązania w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), która jest mocno promowana przez Komisję Europejską. GOZ zakłada między innymi rozwój wykorzystania OZE. Przy odpowiednim wypromowaniu zaproponowanych rozwiązań taka instalacja mogłaby dostać bardzo duże wsparcie ze strony Komisji Europejskiej, szczególnie w zakresie dofinansowań w projektach B+R.

## Literatura

- [1] *Europa 2020*, [www.ec.europa.eu](http://www.ec.europa.eu)
- [2] Grossi I., Dongellini M., Piazzzi A., Morini G.L., *Dynamic modeling and energy performance analysis of an innovatedual-sourceheat pump system*, Applied Thermal Engineering 2018, 142, 745–759. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.022.
- [3] Dongellini M., Naldi Gian C., Morini L., *Sizing effects on the energy performance of reversible air-source heat pumps for office buildings*, Applied Thermal Engineering 2017, 114, 1073–1081. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.010.
- [4] Bauer D., Marx R., Drück H., *Solar district heating systems for small district with medium scale seasonal thermal energy stores*, Energy Procedia 2016, 91, 537–545. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.06.195.
- [5] Han Z., Qu L., Ma X., Song X., Ma C., *Simulation of a multi-source hybrid heat pump system with seasonal thermal storage in cold regions*, Applied Thermal Engineering 2017, 116, 292–302. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.057.
- [6] Staffell I., Brett D., Brandon N., Hawkes A., *A review of domestic heat pumps*, Energy & Environmental Science 2012, 5(11), 9291–9306. DOI: 10.1039/C2EE22653G.
- [7] Tzivanidis C., Bellos E., Mitsopoulos G., Antopoulos K.A., Delis A., *Energetic and financial evaluation of a solar assisted heat pump heating system with other usual heating systems in Athens*, Applied Thermal Engineering 2016, 106, 87–97. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.06.004.
- [8] Chargui R., Sammouda H., *Modeling of a residential house coupled with a dual sourceheat pump using TRNSYS software*, Energy Conversion and Management 2014, 81, 384–399. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.02.040.
- [9] Sayegh M.A., Jadwiszczak P., Axcell B.P., Niemierka E., Bryś K., Jouhara H., *Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating*, Energy and Buildings 2018, 166, 122–144. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.006.



- 
- [10] Wang Z., Huang D., Wang P., Shen Q., *An analysis of solar heating system assisted by ground-source heat pumps in office building*, Procedia Engineering 2015, 121, 1406–1412. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.09.049.
- [11] Emmi G., Zarrella A., De Carli M., Galgaro A., *An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates*, Energy Conversion and Management 2015, 106, 660–675. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.016.
- [12] Chen H., Zhang L., Pengfei J., Xiong Y., Xu P., Zhai H., *Performance study of heat-pipe solar photovoltaic/thermal heat pump system*, Applied Energy 2017, 190, 960–980. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.12.145.
- [13] Siecker J., Kusakana K., Numbi B.P., *A review of photovoltaic systems cooling technology*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017, 79, 192–203. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.053.
- [14] Ge T.S., Wang R.Z., Xu Z.Y., Pan Q.W., Du S., Chen X.M., Ma T., Wu X.N., Sun X.L., Chen J.F., *Solar heating and cooling: Present and future development*, Renewable Energy 2018, 126, 1126–1140. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.081.
- [15] Ma T., Yang H., Lu L., *Performance evaluation of a stand-alone photovoltaic system on an isolated island in Hong Kong*, Applied Energy 2013, 112, 663–672. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.12.004.
- [16] Zondag H.A., Vries D.W., Steenhoven A.A., Helden W.G.J., Zolingen R.J.C., *Thermal and electrical yield of a combi-panel*, Proceedings of ISES World Congress 1999, 3, 96–101.
- [17] Emmi G., Zarrella A., De Carli M., *A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collectors: A case study of a multi-source energy system*, Energy Conversion and Management 2017, 151, 386–399. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.08.077.
- [18] Kamel R.S., Fung A.S., Dash P.R.H., *Solar systems and their integration with heat pumps: A review*, Energy and Buildings 2015, 87, 395–412. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.030.
- [19] Zhou J., Zhao X., Ma X., Du Z., *Clear-days operational performance of a hybrid experimental space heating system employing the novel mini-channel solar thermal and PV/T panels and a heat pump*, Solar Energy 2017, 155, 464–477. DOI: 10.1016/j.solener.2017.06.056.
- [20] Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A., *Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in residential sector*, Applied Thermal Engineering 2017, 114, 938–947. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.058.