

Efektywność przygotowania ciepłej wody w węźle cieplnym współpracującym z instalacją kolektorów słonecznych

Efficiency of domestic hot water production in a district heating substation cooperating with the solar collector installation

KAZIMIERZ ŻARSKI

DOI 10.36119/15.2024.6.2

W artykule przedstawiono problematykę efektywności technicznej i ekonomicznej przygotowania ciepłej wody w węźle cieplnym współpracującym z instalacją kolektorów słonecznych. W przykładowym budynku mieszkalnym, na podstawie danych meteorologicznych roku porównawczego, obliczono roczny stopień pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę oraz wyznaczono współczynnik efektywności technicznej i ekonomicznej systemu w czasie jednego roku. Wyznaczono prosty czas zwrotu przykładowej inwestycji polegającej na dołączeniu do węzła cieplnego baterii kolektorów słonecznych.

Słowa kluczowe: węzeł cieplny, kolektory słoneczne, efektywność techniczna i ekonomiczna

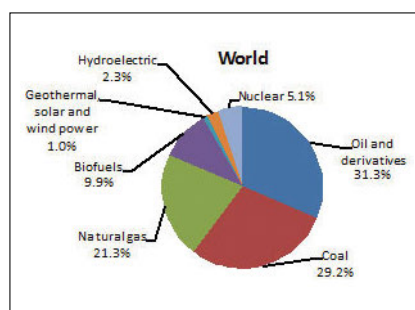
The article describes the issues of technical and economic efficiency of hot domestic water production in a district heating substation cooperating with a solar panel installation. In an example residential building, based on meteorological data from the reference year, the annual degree of coverage of hot water demand was calculated, and the efficiency and economic coefficient of the system were determined during one year. A simple payback period for an example investment consisting of connecting a solar collector battery to a heating substation was determined.

Keywords: district heating substation, solar panels, technical and economic effectiveness

Wstęp

Konieczność wykorzystania energii odnawialnej w ogrzewaniu budynków i w przygotowaniu ciepłej wody nie budzi dziś wątpliwości. Rozwój technologii i konkurencja producentów spowodowała, że koszt urządzeń do pozyskania energii odnawialnej, w tym słonecznej, jest obecnie relatywnie niższy niż 20 lat temu. Również systemy pomocy finansowej oferowane przez fundusze celowe i banki powodują dalsze zainteresowanie inwestycjami w odnawialne źródła ciepła i energii. Udział odnawialnych źródeł ciepła i energii w ogrzewnictwie i chłodnictwie w Europie i w Polsce jest coraz większy [11]. Ilustruje to rys. 1. Jednak w światowym bilansie eksploatacji źródeł udział źródeł geotermalnych, wiatrowych i słonecznych, według UNEP (United Nations Environment Program) i ILO (International Labor Organization) jest równy ok. 1% [4] (rys. 2), w Brazylii (kraju do niedawna uznawanym za potęgę

Rys. 1. Udział odnawialnych źródeł w ogrzewnictwie i chłodnictwie w Europie [11]



Rys. 2. Struktura światowej konsumpcji energii [4]

gę gospodarczą) [4,6]), przykładowo 0.3%. Ten wskaźnik obejmuje wszystkie formy zużycia energii pierwotnej: produkcję energii elektrycznej, ogrzewnictwo, chłodnictwo, transport, przemysł chemiczny, sektor militarny, telekomunikacyjny i in.).

Zwiększenie udziału odnawialnych źródeł w ogrzewaniu budynków i przygotowaniu ciepłej wody jest trendem korzystnym, jednak o atrakcyjności przedsięwzięcia inwestycyjnego decydują nie tylko względy natury ogólnej, społecznej, ekologicznej,

Dr inż. Kazimierz Żarski – niezależny ekspert HVAC, emerytowany pracownik naukowy Politechniki Bydgoskiej, Wyższej Szkoły Zarządzania Środowiskiem w Tucholi i Wyższej Szkoły zawodowej w Gnieźnie

ale także czynniki natury finansowej, czyli opłacalność z punktu widzenia odbiorcy, ostatecznego ogniwa w łańcuchu dystrybucji kosztów ciepła i energii. Trudno wymagać, np. od wspólnot mieszkaniowych, aby ponosiły koszty inwestycji proekologicznej przynoszącej niewielkie efekty finansowe, mierzone długim, przekraczającym czas życia inwestycji, czasem zwrotu nakładów inwestycyjnych.

Stopień pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę w świetle wybranych badań

W literaturze zajmującej się efektywnością działania słonecznych układów przygotowania ciepłej wody można znaleźć wiele sprzeczności i niejednoznaczności w określeniu stopnia pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę przez kolektory słoneczne. Jeszcze inny stopień atrakcyjności systemów słonecznych prezentują, ze zrozumiałych względów, producenci i dostawcy urządzeń. W [3] Żukowski, powołując się na [2], na podstawie przeprowadzonych badań w Białymstoku potwierdza, że stopień pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę w badanych instalacjach jest zbliżony do danych w [2]: nie przekracza 34.7% w miesiącach o wyższej temperaturze i 24.2% w pozostałym okresie, średnio w roku 32.6%. Są to dane, które będą zbliżone do wyników symulacji prezentowanych w tym artykule. Z kolei Dąbrowski [1] podaje dane uzyskane z badań polowych dla firmy Viessmann: pokrycie zapotrzebowania na ciepłą wodę: w roku 72% i 94% w okresie od kwietnia do września. Są to wartości skrajne, których nie udało się uzyskać w symulacji hour by hour [5] przy rozsądnej liczbie kolektorów słonecznych i rozsądnej pojemności zasobników ciepłej wody. Autorowi nie są znane przypadki osiągnięcia wyższego stopnia pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę niż 35-40% w ciągu roku, chyba że mówimy o obiektach agroturystycznych działających wyłącznie w miesiącach letnich. Analiza efektywności przygotowania ciepłej wody w kolektorze słonecznym w niniejszym artykule jest oparta o dane godzinowe nasłonecznienia w Polsce (Toruń) [5, 8], co pozwala na dokładny dobowy bilans ciepła kolektora słonecznego i na uwzględnienie stopnia wypełnienia zasobnika ciepłej wody.

Bilans cieplny kolektora słonecznego

Do przygotowania ciepłej wody najczęściej są używane kolektory płaskie,

Rys. 3. Kolektor płaski – bilans cieplny [7, 10]



Tab.1. Przykładowe dane techniczne kolektora słonecznego [10]

KS2100F TLP AC	
Numer katalogowy:	14.47.02
Powierzchnia brutto kolektora:	2,06 m ²
Sprawność optyczna:	81,6%
Współczynnik strat ciepła a ₁ :	3,38 W/(m ² K)
Współczynnik strat ciepła a ₂ :	0,013 W/(m ² K ²)

Powierzchnia absorbera $A_0=1.817 \text{ m}^2$

cieczowe lub próżniowe. Na rys.3. przedstawiono bilans cieplny kolektora płaskiego. W tabeli 1. podano przykładowe dane techniczne kolektora płaskiego.

Podstawowym parametrem doboru kolektora słonecznego jest powierzchnia absorbera. Tak zwana sprawność optyczna (niefortunna nazwa handlowa) to sprawność kolektora z pominięciem strat ciepła do otoczenia na drodze przenikania i promieniowania (nie tylko w paśmie widzialnym, jak sugeruje nazwa). Jest to iloraz energii pochłoniętej przez kolektor do energii padającej na powierzchnię kolektora, bez uwzględnienia straty ciepła do otoczenia przez przenikanie i na drodze promieniowania. Współczynnik strat ciepła a_1 jest współczynnikiem liniowym przenikania ciepła, odniesionym do powierzchni czynnej (absorbera). Straty ciepła nie mają charakteru w pełni liniowego. Charakteryzuje je współczynnik strat ciepła a_2 , nieliniowy, odniesiony do drugiej potęgi różnicy temperatury, uwzględniający składową promieniowania do otoczenia. Straty mocy cieplnej przy danej temperaturze wody i otoczenia są równe sumie strumienia Φ_1 i Φ_2 :

$$\Phi_1 = a_1 \cdot A_0 (t_{sr} - t_e) \quad (1)$$

$$\Phi_2 = a_2 \cdot A_0 (t_{sr} - t_e)^2 \quad (2)$$

gdzie:

- Φ_1 – liniowy strumień strat ciepła, W,
- Φ_2 – nieliniowy strumień strat ciepła, W,
- a_1 – liniowy współczynnik strat ciepła, W/(m² K),
- a_2 – nieliniowy współczynnik strat ciepła, W/(m² K²),
- A_0 – powierzchnia absorbera, m²,
- t_{sr} – średnia temperatura cieczy wewnątrz kolektora, °C,
- t_e – temperatura powietrza zewnętrznego (otoczenia), °C.

Efektywny strumień ciepła przekazany do instalacji przygotowania ciepłej wody Φ_{cw} [W] (z uwzględnieniem strat przesyłu i akumulacji) jest równy

$$\Phi_{cw} = I_{sol} \cdot \eta_o - \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_d - \Phi_a \quad (3)$$

a współczynnik efektywności ε (z uwzględnieniem strat przesyłu i akumulacji)

$$\varepsilon = \frac{\Phi_{cw}}{I_{sol}} = \frac{I_{sol} \cdot \eta_o - \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_d - \Phi_a}{I_{sol}} \quad (4)$$

gdzie:

- I_{sol} – natężenie promieniowania słonecznego (całkowitego), padającego na powierzchnię kolektora [W],
- η_o – sprawność optyczna kolektora słonecznego.
- Φ_δ – straty ciepła przy przesyśle (orientacyjnie, w przeciętnych warunkach 5-10%) [W],
- Φ_δ – straty ciepła akumulacji (orientacyjnie 3-5%) [W],

pozostałe oznaczenia jak we wzorach (1)..(3).

Stopień pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę jest również wskaźnikiem efektywności. Jest to iloraz objętości wody podgrzanej w kolektorze słonecznym w typowym zakresie temperatury (np. od 10 °C do 55 °C) i całkowitej objętości zużytej ciepłej wody. W okresie o niskiej temperaturze powietrza zewnętrznego osiągnięcie temperatury wody 55 °C jest niemożliwe (jest to zwykle 20-25 °C), a więc proste podzielenie objętości wody podgrzanej przez kolektory (do niższej temperatury) przez całkowitą objętość wody jest wskaźnikiem mylącym, zawyżającym rzeczywisty współczynnik pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę. O wartości użytkowej decyduje temperatura ciepłej wody.

Roczna efektywność kolektorów słonecznych oparta na danych meteorologicznych

Dane meteorologiczne roku porównawczego [8] zawierają wartości natężenia promieniowania słonecznego na

płaszczyznę o określonej orientacji i pochyleniu do poziomu. W tab. 2 pokazano początek obliczeń bilansu ciepła kolektora w 8640 rekordach godzin roku.

tość średnią w roku w analizowanym przykładzie.

Przytoczony w [1] stopień pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę w okre-

minuje kolektor słoneczny jako źródło ciepła ze względu na nieosiągnięcie wymaganej różnicy temperatury obudowy kolektora i wody w zbiorniku (w górnej części węzownicy układu słonecznego).

b. Z kolektorem słonecznym powinien być skojarzony oddzielny wymiennik pojemnościowy z odpowiednim układem czujników temperatury.

c. Wymiennik pojemnościowy współpracujący z kolektorem słonecznym powinien być wyposażony w czujnik temperatury w górnej części zbiornika i na wysokości wejścia węzownicy z kolektora słonecznego – umieszczenie czujnika w dolnej strefie zbiornika prowadzi do **chłodzenia** zgromadzonej wody zamiast jej ogrzewania. De facto pojemność zasobnika należy liczyć od miejsca wejścia węzownicy słonecznej do góry zbiornika. Przy węzownicy o znacznej długości, ta pojemność zmniejsza się do 25÷30% pojemności całkowitej.

d. Woda podgrzana wstępnie w wymienniku słonecznym jest kierowana do jednostopniowej sekcji podgrzania wody w węźle cieplnym.

e. Cyrkulacja ciepłej wody powinna być włączona do wymiennika w węźle cieplnym.

(Zasady kompozycji schematu połączeń, algorytmy automatycznej regulacji oraz błędy i nieprawidłowości w połącze-

Tab. 2. Bilans cieplny kolektora w roku w odstępie 1 godziny (1 doba roku)

M	D	H	DBT	t _w [°C]	t _{cw} [°C]	S ₄₅ [W/m ²]	Q _{sol} [kWh]	Q ₁ [kWh]	Q ₂ [kWh]	Q _{ef} [kWh]	Q _{ef+} [kJ]
1	1	1	0.2	25.00	20.00	0	0.0000	2.9876	0.0161	-3.0037	0.00
1	1	2	0.1	25.00	20.00	0	0.0000	2.9996	0.0162	-3.0159	0.00
1	1	3	0.1	25.00	20.00	0	0.0000	2.9996	0.0162	-3.0159	0.00
1	1	4	0	25.00	20.00	0	0.0000	3.0117	0.0164	-3.0280	0.00
1	1	5	-0.2	25.00	20.00	0	0.0000	3.0358	0.0166	-3.0524	0.00
1	1	6	-0.4	25.00	20.00	0	0.0000	3.0599	0.0169	-3.0767	0.00
1	1	7	-0.6	25.00	20.00	0	0.0000	3.0840	0.0171	-3.1011	0.00
1	1	8	-0.5	25.00	20.00	0	0.0000	3.0719	0.0170	-3.0889	0.00
1	1	9	-0.5	25.00	20.00	22.1	0.4885	3.0719	0.0170	-2.6004	0.00
1	1	10	-0.4	25.00	20.00	44.2	0.9770	3.0599	0.0169	-2.0998	0.00
1	1	11	-0.6	25.00	20.00	59.9	1.3240	3.0840	0.0171	-1.7771	0.00
1	1	12	-0.9	25.00	20.00	63.6	1.4058	3.1201	0.0176	-1.7318	0.00
1	1	13	-1.1	25.00	20.00	52.3	1.1560	3.1442	0.0178	-2.0060	0.00
1	1	14	-1	25.00	20.00	33.7	0.7449	3.1321	0.0177	-2.4049	0.00
1	1	15	-0.9	25.00	20.00	10.5	0.2321	3.1201	0.0176	-2.9056	0.00
1	1	16	-0.8	25.00	20.00	0	0.0000	3.1081	0.0174	-3.1255	0.00
1	1	17	-0.9	25.00	20.00	0	0.0000	3.1201	0.0176	-3.1376	0.00
1	1	18	-1	25.00	20.00	0	0.0000	3.1321	0.0177	-3.1498	0.00
1	1	19	-1.1	25.00	20.00	0	0.0000	3.1442	0.0178	-3.1620	0.00
1	1	20	-1.4	25.00	20.00	0	0.0000	3.1803	0.0182	-3.1986	0.00
1	1	21	-1.6	25.00	20.00	0	0.0000	3.2044	0.0185	-3.2229	0.00
1	1	22	-1.9	25.00	20.00	0	0.0000	3.2406	0.0189	-3.2595	0.00
1	1	23	-2.1	25.00	20.00	0	0.0000	3.2647	0.0192	-3.2839	0.00
1	1	24	-2.4	25.00	20.00	0	0.0000	3.3008	0.0196	-3.3204	0.00

Oznaczenia: M – miesiąc, D – dzień, H – godzina, DBT – temperatura powietrza zewnętrznego t_w – temperatura obudowy kolektora, t_{cw} – temperatura wody podgrzanej w kolektorze, S₄₅ – orientacja S, kąt pochylenie 45°, Q_{sol} – ciepło promieniowania słonecznego, Q₁ – liniowe straty ciepła, Q₂ – nieliniowe straty ciepła, Q_{ef} – bilans ciepła, Q_{ef+} – dodatni bilans ciepła

Tab. 3. Dane wejściowe do projektu układu podgrzewania ciepłej wody w kolektorach słonecznych

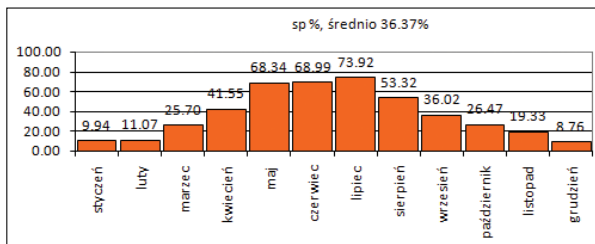
Dane kolektora				
A ₀₁ [m ²]	η ₀	szt	typ	A ₀ [m ²]
1.817	0.811	15	płaski	27.255

Zapotrzebowanie na ciepłą wodę		
liczba osób	m _{cw} jednostkowa [kg/d]	Ooj. zas. [kg]
30	40	1200

W każdej dobie obliczono objętość wody, która pozostała w zasobniku. Założono, w uproszczeniu, 40% zużycia w godzinach rannych i 60% zużycia w godzinach wieczornych. Dane wejściowe do projektu podano tabeli 3. Przyjęto wskaźnik powierzchni absorbera ok. 0.9 m² na mieszkańca oraz pojemność zasobnika odpowiadającą dobowemu zapotrzebowaniu na ciepłą wodę. Przyjęcie większej pojemności nie ma uzasadnienia technicznego, albowiem prowadzi do nieustannego przechowywania nadmiaru wody podgrzanej w kolektorze słonecznym i do jej stygnięcia.

Na rys. 4 pokazano wyniki obliczeń stopnia pokrycia (sp) zapotrzebowania na ciepłą wodę w miesiącach roku i war-

Rys. 4. Wyniki obliczeń stopnia pokrycia zapotrzebowania na ciepłą wodę w miesiącach roku i wartość średnia w roku [5,8]



sie od kwietnia do września (94%) wymagały w zamontowania ok. 1000 kolektorów płaskich [5,8], co jest wielkością absurdalną, a i tak pokrycie rocznego zapotrzebowania nie przekroczyłoby 65%.

Połączenie węzła cieplnego z kolektorami słonecznymi – uwarunkowania techniczne i ekonomiczne

Włączenie układu kolektorów słonecznych do węzła cieplnego wymaga spełnienia pewnych warunków:

a. Nie zaleca się stosować wymienników pojemnościowych z dwiema węzownicami, gdyż podgrzanie wody w zbiorniku przez układ węzła cieplnego spowoduje wymieszanie wody (w dłuższym okresie czasu, np. kilku godzin), co wyeli-

niach układów słonecznych podgrzewania ciepłej wody zostaną rozwinięte w odrębnym artykule.)

Do dalszych analiz przyjęto węzeł cieplny w budynku dla 30 mieszkańców, jak w przykładzie w tab. 3. Do rozliczeń z dostawcą ciepła przyjęto średnią godzinową moc cieplną do przygotowania ciepłej wody. Wyciąg z obliczeń zawiera tab. 4.

Do obliczeń ekonomicznych przyjęto ceny ciepła według [9], poziom od kwietnia 2024 r.

W tabeli 5. porównano roczne opłaty za ciepło w budynku bez kolektorów słonecznych i w budynku wyposażonym w instalację kolektorów słonecznych do przygotowania ciepłej wody oraz wyznaczono prosty czas zwrotu nakładów inwestycyjnych przy rozbudowie węzła cieplnego

Tab. 4. Wyciąg z obliczeń węzła cieplnego (autor zakłada, że metodyka obliczeń węzła cieplnego jest Czytelnikowi znana)

Liczba mieszkańców	l_m	30	
Liczba mieszkań	LM	15	
Jednostkowe, średnie dobowe zapotrzebowanie na c.w.	m_{std}	45	
Średnie dobowe zapotrzebowanie na c.w.	m_{std}	1350.0	kg/d
Średnie godzinowe zapotrzebowanie na c.w.	m_{sh}	56.3	kg/h
Współczynnik nierównomierności 20 minutowej	N_{20}	5.86	
Maksymalne, 20 minutowe zapotrzebowanie na c.w.	m_{20}	329.8	kg/h
Chwilowy strumień objętości w instalacji c.w. (wg PN-EN 806)	q	0.78	dm ³ /s
Temperatura ciepłej wody	t_{cw}	55	°C
Temperatura wody zimnej	t_{wz}	10	°C
Zapotrzebowanie na moc do c.w. średnie	Φ_{cwsr}	2.94	kW
Zapotrzebowanie na moc do c.w. 20 minutowe	Φ_{cw20}	43.56	kW
Zapotrzebowanie na moc do c.w. chwilowe	Φ_{cwmax}	145.20	kW

Tab. 5. Porównanie rocznych opłaty za ciepło w przykładowym budynku bez kolektorów słonecznych i w budynku wyposażonym w instalację kolektorów słonecznych do przygotowania ciepłej wody wraz z obliczeniem prostego czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych [12]

	bez kolektora	z kolektorem
moc średnio-godzinowa. c.w. [kW]	2.94	
opłata stała (moc zamówiona) [zł/MW]	229163.52	229163.52
opłata stała (moc zamówiona) [zł]	673.74	673.74
opłata stała (przesył) [zł/MW]	20822.4	20822.4
opłata stała (przesył) [zł]	61.22	61.22
roczne zużycie ciepła (ze stratami cyrkulacji 40%) [GJ]	115.62	85.58
opłata zmienna (zużycie) [zł/GJ]	96.33	96.33
opłata zmienna (zużycie) [zł]	11137.56	8244.18
opłata zmienna (przesył) [zł/GJ]	36.56	36.56
opłata zmienna (przesył) [zł]	4227.03	3128.90
łącznie [zł]	16099.55	12108.05
Różnica [zł]	3991.50	
Koszt instalacji na podstawie kosztorysu szczegółowego [zł]	112000.00	
Prosty czas zwrotu [lata]	28.05	

o instalację kolektorów słonecznych do przygotowania ciepłej wody.

Wnioski

Autor jest daleki od generalizowania wniosków wynikających z powyższego przykładu, ale wynik analizy atrakcyjności połączenia węzła cieplnego zasilanego z miejskiego systemu ciepłowniczego z in-

stalacją kolektorów słonecznych w innej skali obiektu będzie podobny. Atrakcyjność przedsięwzięcia mogą zwiększyć dotacje i bezzwrotne pożyczki, ale w czasie eksploatacji instalacji kolektorów słonecznych należy się liczyć z kosztami konserwacji i wymiany niektórych urządzeń i elementów po ok. 7-8 latach, które w prostym rachunku są niewidoczne. Autorowi są znane niefortunne realizacje in-

stalacji słonecznych, nie działające właściwie. Popelnione błędy w projektowaniu i wykonawstwie są powodem rozgoryczenia inwestorów liczących na „darmowe” ciepło. Autor nie jest przeciwnikiem odnawialnych źródeł ciepła, uważa tylko, że każda inwestycja w OZE wymaga rachunku ekonomicznego, nawet uproszczonego, opartego o prosty czas zwrotu nakładów inwestycyjnych i realnego spojrzenia na efekty ekologiczne, które nie zawsze są oczywiste, jak np. w przypadku samochodów z napędem elektrycznym. Analiza ekonomiczna z użyciem NPV (bieżącej wartości netto) daje zwykle mniej korzystny wynik niż metodyka obliczenia czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych.

LITERATURA

- [1] Dąbrowski J.: *Kolektory słoneczne do podgrzewania wody użytkowej* Efektywność i opłacalność instalacji, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław 2009
- [2] Yao C., B Hao B., Liu S., Chen X.: *Analysis for common problems in solar domestic hot water system field-testing in China*, Energy Procedia, 2015
- [3] Żukowski M.: *Energy efficiency of a solar domestic hot water system*, https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/10/e3sconf_asee2017_00209.pdf
- [4] <https://www.en.investe.sp.gov.br/business-sectors/green-economy/renewable-energy/>
- [5] Program symulacyjny do obliczeń kolektorów słonecznych, oprac. autora
- [6] 4th International Workshop | Advances in Cleaner Production, São Paulo, 2013
- [7] [8] www.hevalex.pl
- [8] Dane meteorologiczne roku porównawczego dla Torunia, wmo122500iso,
- [9] <file:///C:/Users/110/Downloads/cenny-i-stawki-dla-uprawnionych-odbiorcow-od-01042024-r.pdf>
- [10] www.budowaplus.pl
- [11] <https://ecieplo.pl/gorne-zrodlo-odbiorniki-ciepła/ogrzewanie-i-chłodzenie/wzrasta-udział-oze-w-sektorach-ogrzewnictwa-i-chłodnictwa-w-unii-europejskiej/>
- [12] Kosztorys szczegółowy instalacji kolektorów słonecznych

Dostęp do stron internetowych: 05.2024