MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-M/2012
ZESZYT 6
ROK 109
ISSUE 6
YEAR 109

ANETA GŁUSZEK, KRZYSZTOF NEUPAUER[1]

ŚLAD WĘGLOWY PŁASKIEGO KOLEKTORA SŁONECZNEGO

CARBON FOOTPRINT OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR

Streszczenie

Przedstawiono analizę zużycia energii cieplnej do podgrzania wody na bazie różnych nośników energii. Na podstawie pracy rzeczywistej instalacji solarnej zlokalizowanej w okolicach Krakowa, oszacowano roczną emisję GHG wynikającą z zapotrzebowania na CWU dla 4-osobowej rodziny w 2011 r. W oparciu o dane rzeczywiste z 2010 r. zgromadzone drogą wywiadu bezpośredniego określono wskaźnik CF w przeliczeniu na jeden płaski cieczowy kolektor słoneczny. W obliczeniach uwzględniono obciążenie środowiska związane z transportem elementów kolektora do zakładu produkcyjnego.

Słowa kluczowe: ślad węglowy, płaski kolektor słoneczny, zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową, koszty podgrzewania wody

Abstract

An analysis of heat energy consumption for water heating depending on the type of device has been presented. On the basis of an existing solar installation, located near Krakow, annual GHG emissions relating to the preparation of domestic hot water have been estimated, for a family of four in 2011. Based on real data from 2010 collected by a direct interview, the carbon footprint (CF) per one flat-plate solar collector has been assessed. The calculations include the environmental burden associated with the transport of the collector's components to the plant.

Keywords: carbon footprint, flat-plate solar collector, domestic hot water consumption, water heating costs

[1] Dr inż. Aneta Głuszek, mgr inż. Krzysztof Neupauer, Politechnika Krakowska.

1. Definicja śladu węglowego

Emisje gazów cieplarnianych (GHG) i konieczność ich ograniczania oraz poprawa efektywności energetycznej i wzrost udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w końcowym bilansie energii stanowią trzy z wiodących wyzwań w zakresie ochrony środowiska. Miarą osiągnięcia celów w gospodarce niskoemisyjnej, efektywnie wykorzystującej zasoby środowiska, może być tzw. ślad węglowy – wskaźnik CF (*ang. Carbon Footprint*) wyrażony w kg ekwiwalentu CO_2. Wskaźnik CF definiowany jest jako suma emisji GHG wywołanych bezpośrednio lub pośrednio przez osobę, organizację, proces lub produkt [1]. W bilansie GHG można wyróżnić 3 główne kategorie emisji:

- bezpośrednie będące np. rezultatem spalania paliw czy reakcji chemicznych związanych z procesem produkcyjnym,
- pośrednie wynikające ze zużycia energii elektrycznej,
- pośrednie związane z transportem surowców i gotowych produktów.

Równoważnik CO_2 dla danego gazu określa się mnożąc masę gazu przez potencjał tworzenia efektu cieplarnianego GWP (*ang. Global Warming Potencial*) zdefiniowany Intergovermental Panel for Climate Change [2]. GWP dla metanu wynosi 21, a dla podtlenku azotu 310. Oznacza to, że emisje 1 kg metanu i podtlenku azotu są równoważne odpowiednio 21 i 310 kg ditlenku węgla.

2. Koszty podgrzania wody

Elektrociepłownia Kraków w 2011 r wyprodukowała ok. 1 891 GWh energii elektrycznej oraz 7 414 TJ energii cieplnej, co łącznie stanowiło ok. 3 950 MWh energii równoważnej i spowodowało roczną emisję 1 765 tys. ton CO_2 [3]. Średnia cena netto ciepłej wody użytkowej (CWU) z sieci ciepłowniczej dla okolic Krakowa w 2011 r. wynosiła 12,5 zł/m^3 [4]. W sytuacji idealnej, gdy nie występują straty i sprawność wynosi 100%, do podgrzania 1 m^3 wody o $\Delta T = 45°C$ (od 10°C do 55°C) potrzebna jest energia 0,19 GJ. W warunkach rzeczywistych do podgrzania wody pochodzącej z wodociągów do temperatury 45°C konieczne jest dostarczenie średnio o około 45% energii więcej, niż wynika z obliczeń dla warunków idealnych. W tabeli 1 zestawiono obliczenia kosztów przygotowania ciepłej wody użytkowej [5]. O ilości energii potrzebnej do podgrzania wody decydują sprawności: η_g – wytwarzania energii cieplnej dla urządzeń służących do przygotowania CWU, η_d – przesyłu ciepłej wody od urządzenia, które ją podgrzewa do miejsca jej poboru, η_s – akumulacji ciepła w systemie CWU ($\eta_s = 0{,}83 \div 0{,}86$ dla zbiorników usytuowanych wg standardów budynku niskoemisyjnego), η_e – regulacji systemu grzewczego. Końcowe roczne zapotrzebowanie na ciepło Q_k do podgrzania wody użytkowej wynosi (1):

$$Q_k = \frac{cp_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T}{\eta_g \cdot \eta_d \cdot \eta_s \cdot \eta_e} \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^3}\right] \tag{1}$$

Tabela 1

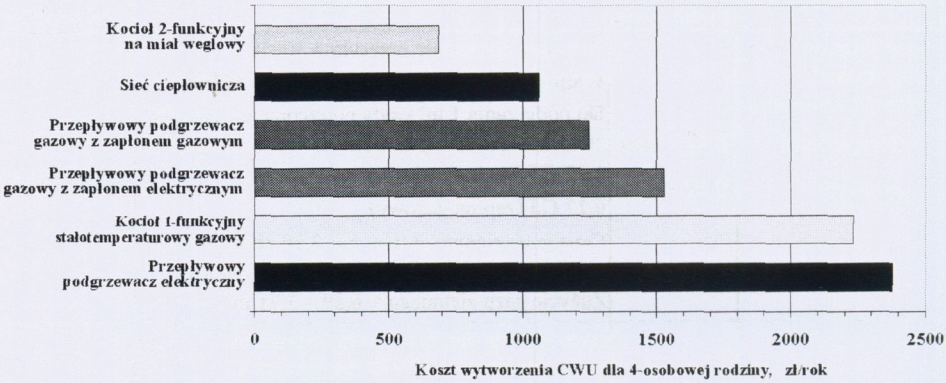
Porównanie emisji GHG i kosztów podgrzania 1 m^3 wody o ΔT = 45°C (bez podatku VAT)

Rodzaj źródła ciepła	Sprawność źródła ciepła	Obliczenia	Wskaźnik CF [kg eq.CO_2]
Przepływowy podgrzewacz gazowy z zapłonem: - elektrycznym - gazowym	0,84 ÷ 0,99 0,66 ÷ 0,74	Założona sprawność przesyłu = 100%. Wartość opałowa gazu ziemnego = **35 MJ/m^3**. Do podgrzania 1 m^3 wody potrzebna jest energia zawarta w paliwie gazowym wynosząca ok.: **0,22 GJ** (zapłon elektryczny), **0,27 GJ** (zapłon gazowy). Cena gazu ziemnego typu E = **2,20 zł/m^3** (wraz z opłatą abonamentową i opłatą stałą za gaz). Zużycie gazu ziemnego = **6,29 – 7,71 m^3**.	11,79 ÷ 14,47
Kotły dwufunkcyjne stałotemperaturowe na paliwo stałe (CWU i centralne ogrzewanie)	0,65 ÷ 0,77	Sprawność przesyłu od kotła do punktów czerpania wody = 80% (bez cyrkulacji). Sprawność kotła = 71%. Wartość opałowa miału węglowego = **24 MJ/kg**. Cena miału (typ IIA 24 MJ/kg) = **0,54 zł/kg**. Aby uzyskać **0,19 GJ** do podgrzania 1 m^3 wody potrzebna jest energia zawarta w paliwie węglowym wynosząca **0,34 GJ**. Zużycie miału: **14,13 kg**. Koszt podgrzania 1 m^3 wody = **7,64 zł**.	28,78
Kotły jednofunkcyjne stałotemperaturowe gazowe (CWU)	0,4 ÷ 0,72	Założono: η_d = 80%, η_s = 86%, η_g = 70%. Wartość opałowa gazu ziemnego = **35 MJ/m^3**. Cena gazu ziemnego typu E = **2,20 zł/m^3**. Aby uzyskać **0,19 GJ** do podgrzania 1 m^3 wody potrzebna jest energia zawarta w paliwie węglowym wynosząca **0,39 GJ**. Zużycie gazu ziemnego = **11,27 m^3**. Koszt podgrzania 1 m^3 wody = **24,80 zł**.	20,91
Przepływowy podgrzewacz elektryczny	0,99 ÷ 1,00	Aby dostarczyć wodzie 0,19 GJ energii cieplnej, należy zużyć **52,82 kWh** energii elektrycznej *). Cena 1 kWh energii elektrycznej = **0,5 zł/ kWh**. Koszt energii elektrycznej zużytej do podgrzania 1 m^3 wody = **26,41 zł**.	23,56 **)
Mieszkaniowy miniwęzeł cieplny z obudową (sieć ciepłownicza)	0,88 ÷ 0,90	Minimalna ilość energii potrzebna do ogrzania 1 m^3 wody = **0,27 GJ/m^3**. Cena 1 GJ energii cieplnej = **43,72 zł/GJ**. Koszt podgrzania 1 m^3 wody = **11,80 zł**.	33,48 **)

*) 1 GJ = 278 kWh

**) obliczono na podstawie wskaźników emisji zanieczyszczeń z Elektrociepłowni Kraków z 2011r.

Nie uwzględniając kosztów inwestycyjnych, przeznaczonych na zakup urządzenia grzewczego na rys. 1 porównano roczne koszty brutto (z 23% VAT) przygotowania CWU dla 4-osobowej rodziny w oparciu o średnie ceny nośników energii z 2011 r.



Rys. 1. Porównanie rocznych kosztów przygotowania ciepłej wody użytkowej dla 4-osobowej rodziny, przy założeniu dobowego zużycia ciepłej wody 0,05 m^3/osobę

Fig. 1. Cost comparison of annual hot water usage for a family of four, based on the assumption that hot water daily usage is 0.05 m^3/person

Wysokie i ciągle rosnące koszty przygotowania CWU w tradycyjnych urządzeniach grzewczych, oraz wprowadzenie programów dofinansowania do montażu instalacji solarnych spowodowały rozwój rynku kolektorów słonecznych. Produkcja energii cieplnej w instalacjach solarnych jest całkowicie wolna od emisji CO_2, pod warunkiem, że są to tzw. instalacje pasywne – grawitacyjne.

3. Bilans energetyczno-emisyjny instalacji solarnej

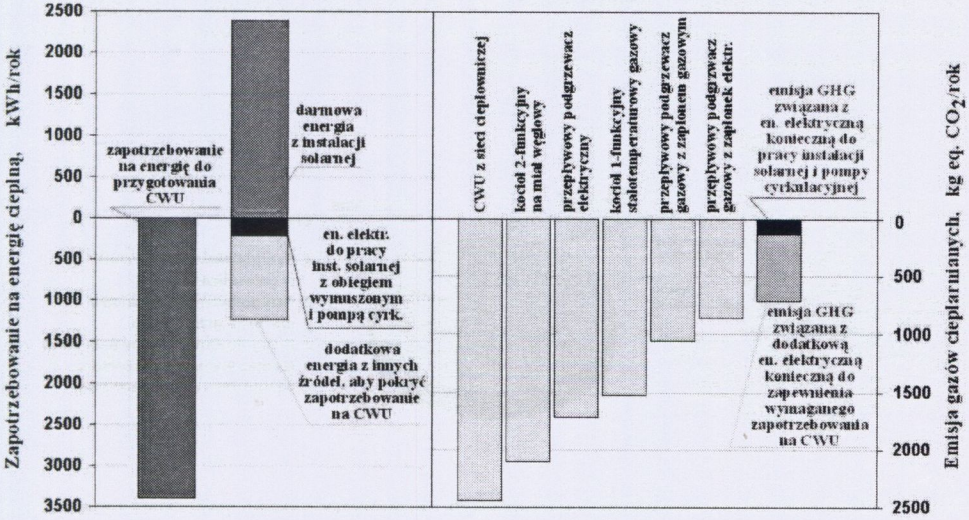
Cztery płaskie, cieczowe kolektory słoneczne o łącznej powierzchni absorbera 7,28 m^2 ustawione optymalnie dla najefektywniejszego pozyskiwania energii słonecznej w okresie całorocznym, pracujące w instalacji solarnej zlokalizowanej w rejonie województwa małopolskiego, w którym promieniowanie roczne na powierzchnię optymalnie pochyloną w 2011 r wynosiło 1003 kWh/m^2 pozwoliły uzyskać 358,3 kWh/m^2, a rzeczywista roczna sprawność instalacji wynosiła 35,8%. Średni, roczny zysk energii z 1 m^2 powierzchni czynnej tych kolektorów, oszacowany na podstawie symulacji wykonanej w programie GetSolar wynosi 410 kWh/m^2, co przy założeniu braku zacienienia i całorocznym napromieniowaniu słonecznym na kolektory słoneczne równym 1488 kWh/m^2 daje średnią roczną sprawność 43%. Obliczeniowe zapotrzebowanie na energię do podgrzania 200 dm^3 wody dla 4-osobowej rodziny od temp. 10°C do 55°C wynosi ok. 9,31 kWh/dobę. W skali roku stanowi to 3401 kWh, a więc oszczędność energii w 2011 r, którą powinna przynieść

instalacja z obiegiem grawitacyjnym, tj. nie wymagająca zasilania w energię elektryczną, może być obliczona z zależności (2):

$$\text{pokrycie} = \frac{\text{uzysk_instalacji}}{\text{zapotrzebowanie}} = \frac{2608}{3401} = 76{,}7\% \qquad (2)$$

Instalacja solarna z obiegiem wymuszonym i pompą cyrkulacyjną CWU zużywa około 0,6 kWh energii elektrycznej na dobę, co rocznie daje 219 kWh [6]. Jeżeli instalacja solarna została zaprojektowana w taki sposób, że nie ma cyrkulacji CWU to konsumpcja energii elektrycznej konieczna do potrzymania systemu sterowania i pracy pompy na obiegu solarnym obniży się do około 0,5 kWh/dobę, co w skali roku stanowi około 182,5 kWh, w tym 15% to zużycie energii elektrycznej przez pompę solarną o mocy 40 W. Rzeczywista roczna oszczędność energii w przypadku zastosowania aktywnego systemu grzewczego wykorzystującego energię słoneczną wynosi: 70,2 ÷ 71,5%. Jednorazowe, godzinowe użycie pompy do napełniania i odpowietrzania instalacji solarnej to dodatkowe zużycie energii elektrycznej około 0,75 kWh/rok.

Wytworzenie 1 GJ energii elektrycznej w warunkach polskich wg bazy danych GEMIS [7] powoduje emisję 247 kg GHG wyrażonych w postaci ekwiwalentu CO_2. Wskaźnik emisji CO_2 związany z wytworzeniem jednostki energii elektrycznej w Elektrociepłowni Kraków, w 2011 r. został oszacowany na 124 kg/GJ [3]. Głównymi surowcami wykorzystywanymi w procesie produkcji energii elektrycznej były: węgiel kamienny – około 78,8 %(*m*/*m*) i biomasa – około 21 %(*m*/*m*). Na rys. 2 przedstawiono roczny bilans emisji gazów GHG związany z przygotowaniem CWU dla 4-osobowej rodziny.



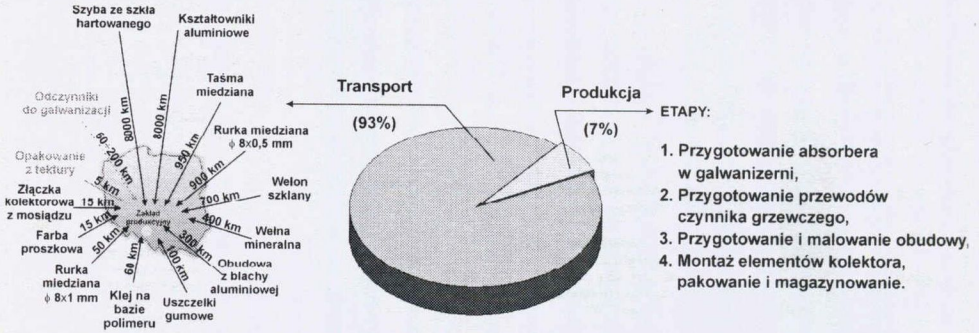
Rys. 2. Roczny wskaźnik CF związany z przygotowaniem ciepłej wody użytkowej dla 4-osobowej rodziny w zależności od typu urządzenia

Fig. 2. Annual carbon footprint (CF) relating to the preparation of domestic hot water for a family of four, depending on the type of device

Wyniki przedstawione na rys. 2 dowodzą, że stosowanie instalacji solarnej pozwala zaoszczędzić energię konieczną do przygotowania ciepłej wody. W sezonie letnim zapotrzebowanie na CWU może być w pełni pokrywane przez instalację solarną. Jednak aby zapewnić komfort użytkowania ciepłej wody przez cały rok, niezależnie od instalacji solarnej, niezbędne jest zastosowanie dodatkowego, konwencjonalnego źródło ciepła, które zabezpieczy potrzeby energetyczne. W obliczeniach założono, że ogrzewanie wody użytkowej wspomagane jest energią elektryczną. Powoduje to, że w skali roku 4-osobowa rodzina mieszkająca w rejonie Krakowa odpowiedzialna jest za emisję około 550 kg eq.CO_2. Gdyby instalacja z kolektorami słonecznymi wspomagana była kotłem na biomasę to roczny bilans emisji CO_2 związany z przygotowaniem CWU obniżyłby się do około 98 kg, ponieważ podczas spalania biomasy emisja CO_2 jest taka sama jak jego ilość pochłonięta przez rośliny w trakcie ich życia.

4. Wskaźnik carbon footprint produkcji płaskiego kolektora słonecznego

Ocena procesów produkcji płaskich kolektorów słonecznych, które pracują w instalacji solarnej opisanej w rozdz. 3 oparta została na danych z 2010 roku [8]. Wszystkie zmiany w procesie produkcyjnym lub zmiany odległości dostaw oraz ich ilość mają wpływ na uzyskane wyniki. Przeprowadzona analiza energetyczno-emisyjna skupia się na procesie produkcji kolektorów słonecznych bez wydobycia surowców mineralnych, tzn. obejmuje granicę systemu „od bramy do bramy", gdzie za bramę wejściową przyjęto punkt pozyskania półproduktów, a bramę wyjściową stanowi punkt uzyskania gotowego wyrobu handlowego wraz z opakowaniem. W granicach analizowanego systemu uwzględniono obciążenie środowiska związane z transportem.



Rys. 3. Udział procentowy emisji GHG pochodzących z produkcji kolektora słonecznego i transportu elementów składowych do zakładu produkcyjnego w rocznym wskaźniku CF

Fig. 3. The percentage of GHG emissions from solar collector production and the transport of components to the manufacturing plant in the annual carbon footprint indicator (CF)

Przedmiotowy kolektor o wymiarach 2018 × 1037 × 89 mm, sprawności optycznej 81,2% i powierzchni całkowitej 2,09 m^2 jest wyrobem złożonym z półproduktów, o łącznej masie 37,37 kg, które są zarówno pochodzenia krajowego jaki i zagranicznego. Podstawą do uwzględnienia w analizie transportu elementów składowych do zakładu produkcyjnego było zestawienie ilości materiałów, odległości dostawcy i sposobu transportu. Transport odbywał się pojazdami samochodowymi LDV lub HDV oraz drogą morską. Całkowite zużycie energii elektrycznej w procesie produkcyjnym liczone na 1 kolektor wynosiło 16,05 kWh. Sumaryczny wskaźnik CF będący sumą emisji gazów cieplarnianych na 4 etapach produkcyjnych oraz emisji pochodzących z transportu wynosił 213 kg eq. CO_2 w przeliczeniu na 1 kolektor (rys. 3). Znaczącym źródłem emisji GHG podczas produkcji kolektora słonecznego są procesy związane ze spalaniem paliwa w silnikach samochodów, którymi transportowane są elementy składowe kolektora. Poziom emisji CO_2 jest ściśle zależny od rodzaju paliwa i wielkość jego zużycia.

5. Podsumowanie

Przestawienie się na gospodarkę słoneczną to sposób na to, żeby światowe zasoby surowców wystarczyły dla przyszłych pokoleń, ale produkcja energii ze źródeł odnawialnych w bilansie cyklu życia nie jest wcale bezemisyjna.

Obciążenie środowiska występuje nie tylko w wyniku procesów produkcyjnych kolektorów słonecznych i ich transportu, ale również w trakcie ich pracy w instalacji z obiegiem wymuszonym. Kolektory słoneczne dobrane efektywnie do liczby domowników i ilości zużywanej przez nich ciepłej wody, pokrywają od kwietnia do września do 100% zapotrzebowania na ciepłą wodę do kąpieli i zmywania. Przez pozostałą część roku przygotowanie CWU musi być wspomagane przez inne konwencjonalne źródło ciepła.

Oznaczenia

CF	–	ślad węglowy	
CWU	–	ciepła woda użytkowa	
GHG	–	gazy cieplarniane	
GWP	–	potencjał efektu cieplarnianego	
HDV	–	ciężkie samochody ciężarowe	
LDV	–	lekkie samochody ciężarowe	
OZE	–	odnawialne źródła energii	
Q_k	–	końcowe zapotrzebowanie na ciepło do podgrzania wody użytkowej	[J/m^3]
cp_w	–	ciepło właściwe wody	[J/(kg·K)]
ΔT	–	różnica między temperaturą wody ciepłej i zimnej	[K]
ρ_w	–	gęstość wody	[kg/m^3]

η_d – sprawność systemu przesyłu ciepłej wody użytkowej [–]
η_e – sprawność wykorzystania i regulacji systemu grzewczego [–]
η_g – sprawność wytwarzania energii cieplnej dla urządzeń [–]
η_s – sprawność akumulacji ciepła w systemie CWU [–]

Literatura

[1] Lynas M.: *Carbon Counter*, HarperCollins Publishers, London, 2007.
[2] CSRinfo, Ministerstwo Gospodarki: *Metodyka wyliczania carbon footprint*, Materiały seminaryjne, 2009, http://www.csrinfo.org/pl/wiedza/publikacje/1563-metodyka-wyliczania-carbon-footprint (strona dostępna w dniu 30.04.2012).
[3] EC S. A. Kraków: Materiały niepublikowane, 2012.
[4] MPEC S. A.: *Cenniki wytwarzania ciepła w 2011r.*, www.mpec.krakow.pl/pl-PL/cenniki.html (strona dostępna w dniu 30.04.2012).
[5] Chudzicki J.: Polski instalator, 9 (2009), 58-65.
[6] Forum Budowlane: *Koszt roczny użytkowania instalacji solarnej*, 2010, http://www.forumbudowlane.pl/vt/24415/0/ (strona dostępna w dniu 13.02.2012).
[7] Baza danych GEMIS 4.6, http://www.gemis.de/ (strona dostępna w dniu 21.05.2011).
[8] Głuszek A.: *Electric energy use and ecological analysis for the production of flat-plate solar collectors*, 18th International Conference Process Engineering and Chemical Plant Design, Berlin 19-23.09.2011, Mat. konferencyjne, (2011), 77-82.