

Krzysztof NEUPAUER, Sebastian PATER, Katarzyna MYSZOR

e-mail: kneupauer@chemia.pk.edu.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, Kraków

Teoretyczne i doświadczalne napromieniowanie powierzchni kolektora słonecznego

Wstęp

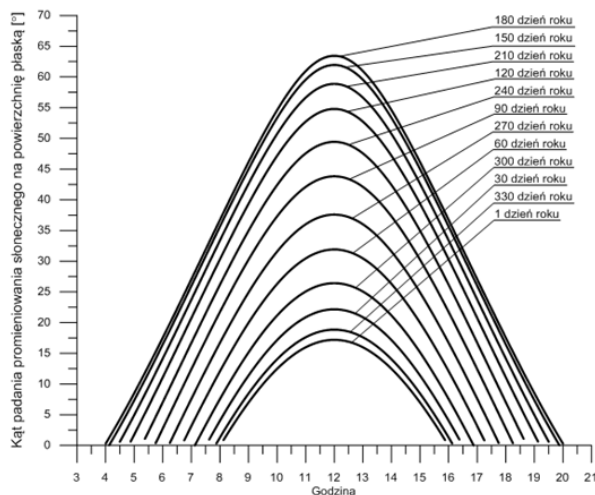
Słońce w ciągu roku dostarcza kuli ziemskiej największą ilość energii spośród źródeł odnawialnych. Pozyskiwanie energii oparte na promieniowaniu słonecznym nosi nazwę energetyki słonecznej, a jej początki sięgają lat 50. XX wieku [Böer, 2005]. Jest to dziedzina nauki bardzo szybko rozwijająca się. Jej zakres tematyczny może być traktowany szeroko: od rozwiązań instalacyjnych systemów słonecznych, do pasywnego wykorzystania energii promieniowania słonecznego [Gogół, 2003].

Promieniowanie słoneczne, docierające ze Słońca do Ziemi, składa się w 6% z promieniowania ultrafioletowego (UV), w 48% z promieniowania podczerwonego (IR) oraz w 46% ze światła widzialnego [Duffie i Beckmann, 2006]. Strumień promieniowania słonecznego dostarczany do zewnętrznej warstwy atmosfery Ziemi, w jednostce czasu na jednostkową powierzchnię ustawioną prostopadle do padającego promieniowania w średniej odległości Ziemi od Słońca wynosi około 1367 W/m^2 [Duffie i Beckmann, 2006]. Jest to tzw. stała słoneczna. Podczas przechodzenia przez atmosferę, moc promieniowania obniża się na skutek odbicia, rozproszenia i absorpcji na cząsteczkach gazów i pyłów [Neupauer i Magiera, 2009].

Promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi charakteryzowane jest różnymi wielkościami, z których istotne znaczenie w energetyce słonecznej mają: gęstość strumienia energii promieniowania słonecznego, napromieniowanie (nasłonecznienie, insolacja) i usłonecznienie. Promieniowanie słoneczne zależy silnie od regionu i pory roku. Dla obszaru Europy Środkowej nasłonecznienie dzienne waha się latem od $7,5 \text{ kWh/m}^2$ do $0,1 \text{ kWh/m}^2$ zimą. Suma globalnego rocznego napromieniowania dla tego obszaru wynosi $700 - 1000 \text{ kWh/m}^2$, a usłonecznienie określające ilość godzin słonecznych w ciągu roku wynosi średnio ok. 1600 h [Quaschnig, 2011].

Szacowanie napromieniowania

Teoretycznie ilość energii docierającej w ciągu roku do powierzchni kolektora zależna jest bezpośrednio od kąta wzniesienia Słońca α_s . Jest to kąt zawarty pomiędzy płaszczyzną horyzontu, a linią prostą poprowadzoną w kierunku Słońca, zgodną z kierunkiem padania promieniowania bezpośredniego [Chwieduk, 2011].

Rys. 1. Zależność kąta padania bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą α_s , od dnia w roku oraz od godziny w danym dniu

Na rys. 1 przedstawiono zależność obliczonego kąta padania promieniowania słonecznego α_s od godziny w wybranych dniach roku według równania:

$$\alpha_s = \arcsin(\cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\phi)\sin(\delta)) \quad (1)$$

gdzie:

 ϕ – szerokość geograficzna, [°] δ – deklinacja słoneczna, czyli kąt zawarty pomiędzy prostą łączącą Ziemię i Słońce, a płaszczyzną równika, [°] ω – kąt godzinny, czyli kątowe odchylenie wschodu lub zachodu Słońca od lokalnego południka w wyniku ruchu obrotowego Ziemi wokół jej osi; różnica każdej godziny odpowiada zmianie kąta o -15° przed południem oraz o $+15^\circ$ po południu, [°]dla szerokości geograficznej odpowiadającej lokalizacji prowadzenia badań, tj. $49^\circ 47' 6'' \text{ N}$.

Znajomość kąta padania promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą jest niezbędna do określenia gęstości strumienia energii promieniowania bezpośredniego na płaszczyznę prostopadłą do kierunku promieniowania po przejściu przez atmosferę i jest obliczana wg równania:

$$I = G_{sc} D \left(\frac{T}{\sin(\alpha_s)} \right) \quad (2)$$

gdzie:

 G_{sc} – stała słoneczna, [W/m^2] D – przepuszczalność atmosfery idealnej, $D = 0,906$, [-] T – współczynnik zamglenia, [-].

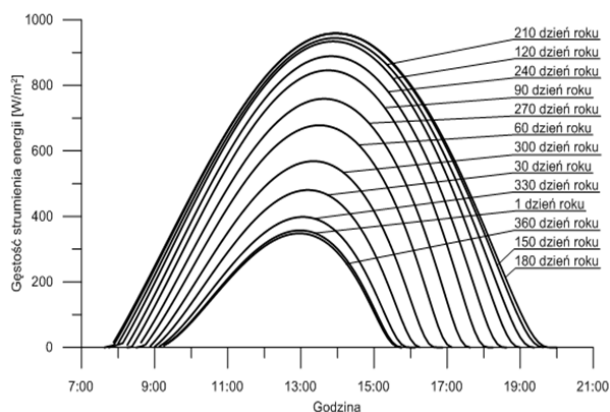
Na rys. 2 przedstawiono wykresy ilości energii słonecznej padającej na jednostkę powierzchni badanego kolektora w jednostce czasu dla wybranych dni w roku obliczone według równań (2) i (3):

$$G_p = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \cos(\theta_\beta) \right) \quad (3)$$

gdzie:

 n – kolejny dzień roku, [-] θ_β – kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego, [°].

Niesymetryczność przebiegów na rys. 2 spowodowana jest sposobem montażu badanego kolektora słonecznego. Kolektor nachylony był do poziomu pod kątem $\beta = 35^\circ$ i odchyłony od kierunku południowego o kąt $\gamma = 60^\circ$ na zachód. Obliczenia wykonano w programie MathCAD.



Rys. 2. Obliczeniowa ilość energii słonecznej padającej na jednostkę powierzchni badanego kolektora w jednostce czasu lokalnego dla wybranych dni w roku

Weryfikacja eksperymentalna

Wyniki obliczeń porównano z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi z instalacji grzewczej pracującej w warunkach rzeczywistych. Badania prowadzono od stycznia 2011 do grudnia 2013 roku. Instalacja badawcza, zlokalizowana 60 km na południe od Krakowa w województwie małopolskim, posiadała w swoim składzie płaskie cieczowe kolektory słoneczne o powierzchni czynnej wynoszącej ok. 14,7 m².

Gęstość mocy promieniowania słonecznego mierzono za pomocą pyranometru klasy 1 zgodnie z normą [ISO 9060, 1990], który pracował w płaszczyźnie kolektora słonecznego. Kolektor słoneczny zamontowano równolegle do połaci dachu budynku odchylonej o 60° na zachód od kierunku południowego i nachylonej pod kątem 35° do poziomu.

Korzystając z równań (2) i (3) określono teoretyczne napromieniowanie dla promieniowania bezpośredniego na powierzchnię kolektora dla bezchmurnej pogody. Wyniki obliczeń teoretycznych i doświadczalnych zestawiono w tab. 1. Dane teoretyczne przedstawiono dla parametrów pracy rozpatrywanego kolektora słonecznego oraz dla zorientowania w kierunku południowym (kąt $\gamma = 0^\circ$).

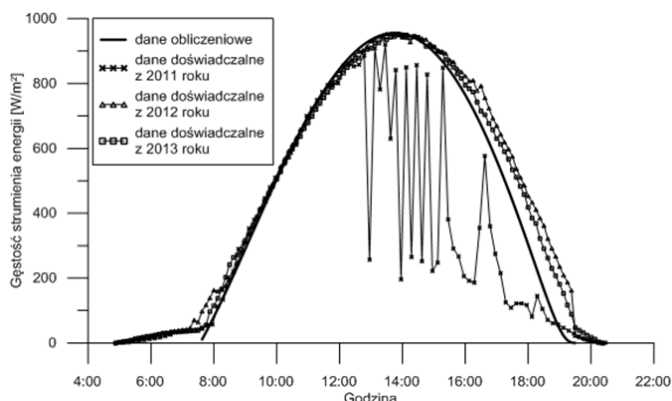
Tab. 1. Wartości teoretyczne i doświadczalne napromieniowania powierzchni kolektora

| Lp. | Miesiąc | Wartości teoretyczne | | Wartości doświadczalne ($\gamma = 60^\circ$; $\beta = 35^\circ$) | | |
|-----|-------------|--|---|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | $\gamma = 60^\circ$ $\beta = 35^\circ$ [kWh/m ²] | $\gamma = 0^\circ$ $\beta = 35^\circ$ [kWh/m ²] | 2011 rok [kWh/m ²] | 2012 rok [kWh/m ²] | 2013 rok [kWh/m ²] |
| 1 | styczeń | 50,5 | 77,0 | 20,6 | 13,1 | 10,9 |
| 2 | lut | 75,9 | 108,4 | 33,9 | 26,5 | 28,1 |
| 3 | marzec | 130,7 | 171,6 | 82,6 | 81,0 | 58,7 |
| 4 | kwiecień | 168,8 | 203,4 | 112,1 | 114,2 | 115,2 |
| 5 | maj | 201,6 | 226,4 | 164,4 | 156,6 | 118,5 |
| 6 | czerwiec | 204,7 | 222,1 | 128,6 | 139,1 | 124,1 |
| 7 | lipiec | 206,2 | 227,4 | 116,7 | 146,4 | 153,7 |
| 8 | sierpień | 184,6 | 216,2 | 142,1 | 133,3 | 145,1 |
| 9 | wrzesień | 141,5 | 180,0 | 101,6 | 90,2 | 89,7 |
| 10 | październik | 98,3 | 136,6 | 53,0 | 66,3 | 67,7 |
| 11 | listopad | 56,2 | 84,3 | 31,8 | 28,3 | 25,0 |
| 12 | grudzień | 40,5 | 63,3 | 15,7 | 18,0 | 30,7 |
| | suma | 1 560 | 1 917 | 1 003 | 1 013 | 967 |

Na rys. 3 porównano przebieg teoretycznej i doświadczalnej gęstości strumienia energii promieniowania słonecznego padającego na jednostkę powierzchni kolektora dla wybranego dnia w kolejnych latach prowadzenia badań.

W początkowej części wykresu (pomiędzy godziną 7:00, a 9:00) krzywa teoretyczna i doświadczalne przyjmują rozbieżne wartości. Powstałe różnice spowodowane są przez równania wykorzystywane do obliczeń, które nie uwzględniają promieniowania rozproszonego oraz zastosowany w instalacji pyranometr, który rejestrował promieniowanie słoneczne z całego widma światła słonecznego. W dalszej części wykresu linie schodzą się do jednej trajektorii.

Przebiegi doświadczalne z 2012 i 2013 r. po godzinie 15:00 znowu przyjmują rozbieżne wartości w stosunku do krzywej teoretycznej. Podobnie jak w pierwszej części wykresu spowodowane to jest promieniowaniem rozproszonym padającym na kolektor. Rozbieżności i duże wahania wartości danych doświadczalnych z 2011 roku to efekt zachmurzenia.



Rys. 3. Porównanie obliczonej i zmierzonej gęstości strumienia energii padającej na kolektor w dniu 19 maja 2011, 2012 i 2013 roku

Każdy spadek gęstości strumienia energii obrazuje czas, w którym chmury zasłaniały kolektor przed promieniowaniem słonecznym. Maksimum gęstości strumienia promieniowania dla takiego usytuowania kolektora przypada na dzień 19 maja około godziny 14:00 czasu lokalnego.

Wnioski

Wartości rocznego napromieniowania wyznaczone na drodze teoretycznej (Tab. 1) nie uwzględniały zachmurzenia, dlatego są one większe od wartości rocznego napromieniowania wyznaczonego doświadczalnie. Zachmurzenie występujące na obszarze, w którym znajdowało się stanowisko badawcze było przyczyną niższego średnio o ok. 36% napromieniowania wyznaczonego doświadczalnie w stosunku do nasłonecznienia wyznaczonego teoretycznie.

Około 80% całkowitej rocznej sumy napromieniowania, wyznaczonej na drodze doświadczalnej, przypada na sześć miesięcy od kwietnia do września. Z danych pomiarowych wynika, że w miejscu prowadzenia badań w 2011 r. w tym okresie czasu dostępne było 76% energii w skali roku, a w latach 2012, 2013 udział ten wynosił 77%.

Usytuowanie kolektora słonecznego w instalacji badawczej było narzucone przez uwarunkowania architektoniczne budynku, tzn. orientację względem stron świata i pochylenie połaci dachu. Gdyby powierzchnia kolektora była zorientowana w kierunku południowym (kąt $\gamma = 0^\circ$), to roczne napromieniowanie wyznaczone teoretycznie byłoby większe o ok. 23%.

LITERATURA

- Böer K.W. (ed.), 2005. *The Fifty-year history of the International Solar Energy Society and its national sections*. Vol. 1, 2. American Solar Energy Society Inc., Colorado
- Chwieduk D., 2011. *Energetyka słoneczna budynku*. Arkady, Warszawa
- Duffie J. A., Beckman W. A., 1991. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, New York
- Gogół W., 2003. *Helioenergetyka. Polska Energetyka Słoneczna*, nr 1, 8–9
- ISO 9060, 1990. *Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*
- Neupauer K., Magiera J., 2009. Analiza sprawności kolektorów słonecznych różnych typów. *Czas. Techn. Chemia*, **106**, nr 1, 57–65
- Quaschnig V., 2011. *Regenerative Energiesysteme*. Carl Hanser Verlag, München

