

ANALIZA WIDMOWA SKŁADOWEJ ODBITEJ PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DOCIERAJĄCEGO DO POWIERZCHNI PIONOWEJ

Dominika KNERA*, Dariusz HEIM

*Politechnika Łódzka, Katedra Inżynierii Środowiska
ul. Wólczajska 213, 90-924 Łódź, e-mail: dominika.knera@p.lodz.pl, dariusz.heim@p.lodz.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę widmową składowej promieniowania słonecznego odbitego od przeciwległej zabudowy i docierającego do elewacji budynku. Przeanalizowano dwie orientacje fasady, wschodnią i zachodnią, zlokalizowane w środowisku zurbanizowanym. Charakterystykę spektralną promieniowania wykonano dla promieniowania widzialnego oraz bliskiej podczerwieni. Obrazy cyfrowe wykonano z wykorzystaniem filtrów fotograficznych o znanej przepuszczalności promieniowania słonecznego. Analiza została przeprowadzona na podstawie pomiarów wykonanych od sierpnia do marca, dla wytypowanych dni charakteryzujących się nieboskłonem zachmurzonym lub bezchmurnym. Otrzymane wyniki pokazują istotną różnicę w udziale promieniowania o różnych długościach fali w całkowitym promieniowaniu docierającym do fasad, w zależności od warunków nieboskłonu, środowiska zewnętrznego i otaczającej zabudowy.

Słowa kluczowe: promieniowanie słoneczne, promieniowanie odbite, analiza spektralna, środowisko zurbanizowane, obraz cyfrowy

1. WPROWADZENIE

Promieniowanie słoneczne docierające do zadanej powierzchni jest szeroko opisane w literaturze m.in. [1, 2, 3]. Jednakże sprowadza się głównie do wyznaczenia ilościowej wartości natężenia napromieniowania E [W/m^2]. W niektórych przypadkach ocena ilościowa promieniowania całkowitego docierającego do zadanej powierzchni może być niewystarczająca. Dotyczy to głównie sytuacji, kiedy udział promieniowania bezpośredniego małe względem pozostałych składowych, jak w przypadku pionowych powierzchni elewacji budynku. Jeżeli dodatkowo powierzchnia fasady charakteryzuje się właściwościami selektywnymi, jak niektóre ogniwa fotowoltaiczne, ilość oszacowanej energii może być obciążona istotnym błędem. Efektywność paneli fotowoltaicznych jest zależna nie tylko

od temperatury i ilości docierającego promieniowania słonecznego, ale również od jego rozkładu widmowego. Każda z dostępnych technologii ogniw fotowoltaicznych ma inną wydajność przy różnych długościach fali promieniowania [4, 5]. Zwłaszcza panele wykonane z krzemu amorficznego są aktywne jedynie w wąskim zakresie promieniowania słonecznego.

Rozkład widmowy promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi jest zależny od wielu czynników, w tym: odległości słońca od ziemi, długość drogi, jaką pokonuje promieniowanie słoneczne czy składu atmosfery [6]. Ponadto, charakterystyka spektralna promieniowania docierającego do powierzchni pionowej w środowisku zurbanizowanym jest uzależniona od parametrów otaczającej zabudowy (m.in. jej barwy), które wpływają na widmo promieniowania odbitego.

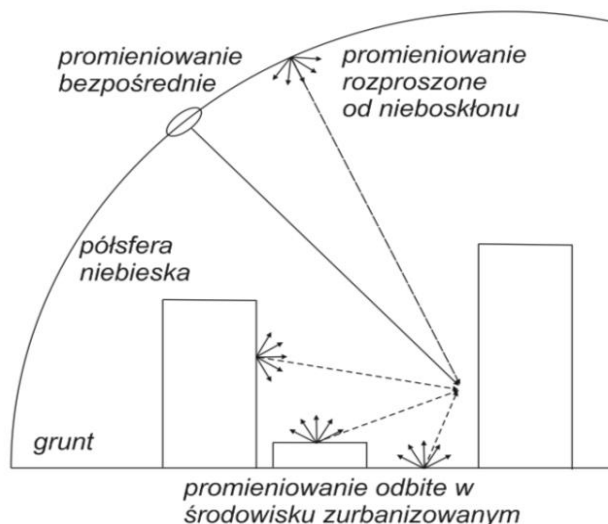
Głównym celem pracy jest analiza widmowa składowej odbitej promieniowania słonecznego docierającego do fasady budynku w środowisku zurbanizowanym z wykorzystaniem analizy spektralnej obrazu cyfrowego.

2. CHARAKTERYSTYKA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO DOCIERAJĄCEGO DO FASADY BUDYNKU

Promieniowanie słoneczne docierające do dowolnej powierzchni nachylonej do poziomu pod zadaniem kątem ($\neq 0^\circ$) składa się z trzech składowych: promieniowania bezpośredniego, rozproszonego od nieboskłonu oraz odbitego od otoczenia i gruntu (rys. 1). Podczas analiz energetycznych budynków ilość docierającego promieniowania odbitego ma istotne znaczenie, zwłaszcza jeśli znajdują się one w otoczeniu innych obiektów. Promieniowanie odbite może pochodzić od gruntu, otaczającej roślinności oraz budynków znajdujących się

* Autor korespondencyjny, e-mail: dominika.knera@p.lodz.pl

w pobliżu. Ilość i jakość promieniowania odbitego jest zależna od wielu czynników, takich jak wielkość promieniowania całkowitego docierającego do powierzchni ziemi, położenie słońca, charakterystyka materiałowa otaczających powierzchni czy występowanie roślinności. Ponadto, ze względu na zmienność elementów otoczenia w ciągu całego roku wynikającą ze zmian położenia słońca, szaty roślinnej czy występowania śniegu, promieniowanie odbite od otoczenia również będzie się istotnie zmieniać.



Rys. 1. Składowe promieniowania słonecznego w środowisku zurbanizowanym.

Fig. 1. Solar radiation components in urban environment.

3. ANALIZA PRZYPADKU

3.1. Opis otoczenia analizowanego budynku

Analiza została przeprowadzona dla wybranych elewacji budynku Politechniki Łódzkiej, zorientowanych odpowiednio na wschód i zachód. Dla wytypowanych dni przeanalizowano charakterystykę spektralną składowej odbitej promieniowania docierającego do obu elewacji budynku. Na rysunku 2 przedstawiono widok zabudowy otaczającej budynek. Można zauważyć, że otoczenie dla fasady wschodniej i zachodniej znacznie się różni. Po stronie wschodniej przed budynkiem znajduje się drzewo, które wpływa istotnie na zmienność całkowitego promieniowania odbitego docierającego do analizowanej powierzchni. Po stronie zachodniej roślinność znajduje się dalej i nie ma istotnego wpływu na promieniowanie odbite. Ponadto, zabudowa miejska po stronie wschodniej jest odsunięta od analizowanej powierzchni i składa się z wyższych budynków. Po stronie zachodniej bliżej analizowanej fasady znajdują się budynki niższe, z dużą

powierzchnią widocznych dachów, budynki wyższe znajdują się w dalszej odległości.



a)



b)

Rys. 2. Widok zabudowy otaczającej fasadę a) wschodnią, b) zachodnią zarejestrowany w bezchmurny dzień marca.

Fig. 2. View of buildings surrounding a) eastern, b) western façade registered in a day with clear sky in March.

3.2. Sprzęt pomiarowy

Stanowiska pomiarowe znajdują się na czwartym piętrze analizowanego budynku, po wschodniej i zachodniej stronie. Pomiary wykonywano za pomocą zmodyfikowanego aparatu fotograficznego Nikon D5300, w którym został usunięty filtr IR znajdujący się przed matrycą, dzięki czemu na obrazach cyfrowych zarejestrowano pełne spektrum promieniowania widzialnego wraz z promieniowaniem bliskiej podczerwieni, o całkowitym zakresie długości fali od 380 nm do 1200 nm. Do wykonywania zdjęć wykorzystano obiektyw typu 'rybie oko' o kącie widzenia 180°, który umożliwia odwzorowanie na jednym zdjęciu całej półprzestrzeni znajdującej się przed fasadą budynku [7, 8]. Ponadto, do pomiarów wykorzystano cztery filtry fotograficzne o przepuszczalnościach promieniowania słonecznego zestawionych w tabeli 1. Biorąc pod uwagę przepuszczalności promieniowania słonecznego poszczególnych filtrów, wyznaczono pięć zakresów długości fali promieniowania słonecznego przedstawionych w tabeli 2. Analiza spektralna promieniowania słonecznego docierającego do fasady została wykonana z uwzględnieniem tych zakresów.

Tabela 1. Charakterystyka filtrów fotograficznych wykorzystanych w analizie.

Table 1. Characteristics of photographic filters used in analysis.

	Filtr	Przepuszczalność promieniowania słonecznego
F1	bez filtra	od 380 nm
F2	HOYA HMC K2	od 480 nm
F3	HOYA HMC G	od 540 nm
F4	HOYA HMC 25A	od 605 nm
F5	HOYA INFRARED (R72)	od 720 nm

Tabela 2. Zakresy długości fali promieniowania słonecznego wyznaczone na podstawie przepuszczalności poszczególnych filtrów fotograficznych.

Table 2. Solar radiation wavelength ranges determined based on transmittance of individual photographic filters.

Oznaczenie	Przedział	Promieniowanie
F1÷F2	380÷480 nm	niebieskie
F2÷F3	480÷540 nm	zielone
F3÷F4	540÷605 nm	żółte
F4÷F5	605÷720 nm	czerwone
F5	720÷1200 nm	bliska podczerwień

3.3. Metoda pomiaru

Pomiary były wykonywane w wybrane dni każdego miesiąca, od sierpnia do marca, charakteryzujące się nieboskłonem całkowicie zachmurzonym lub bezchmurnym. Ze względu na brak odpowiednich warunków pogodowych, w sierpniu nie wykonano pomiarów w dniu o nieboskłonem zachmurzonym, a w październiku o nieboskłonem bezchmurnym. Zdjęcia były wykonywane, co pół godziny przez cały dzień od wschodu do zachodu słońca. Ostatecznie, obrazy cyfrowe dla przypadków, kiedy wysokość kątowa słońca nad horyzontem była poniżej 5° zostały wykluczone z analizy. W tabeli 3 pokazano przykładowe obrazy cyfrowe otaczającej zabudowy wykonane z wykorzystaniem poszczególnych filtrów w wybranym dniu marca o nieboskłonem bezchmurnym.

Wykonane zdjęcia zostały następnie poddane analizie fotometrycznej. Na jej podstawie wyznaczono średnią jasność obrazów cyfrowych otaczającej zabudowy. Na koniec wyznaczono wskaźnik udziału procentowego promieniowania słonecznego dla każdego zakresu długości fali zgodnie z zależnościami określonymi wzorami (1) i (2).

$$w_n = \frac{f_n - f_{n+1}}{f_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

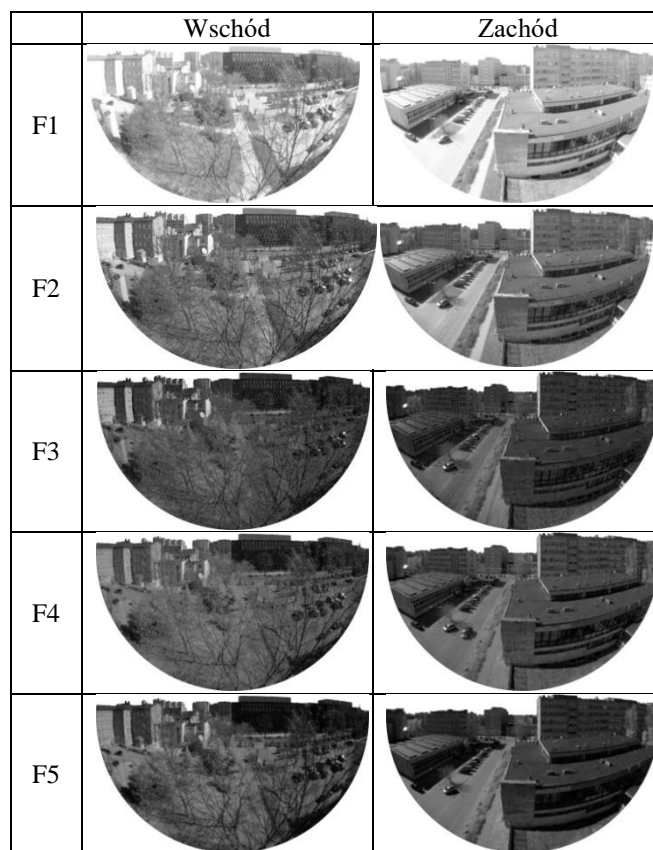
$$w_5 = \frac{f_5}{f_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

$n=1, 2, 3, 4$ – numer odpowiadających filtrów;
 w – wskaźnik udziału procentowego promieniowania słonecznego z odpowiedniego zakresu długości fali, [%];
 f – średnia jasność obrazu cyfrowego rejestrującego powierzchnie gruntu i otaczających budynków [-].

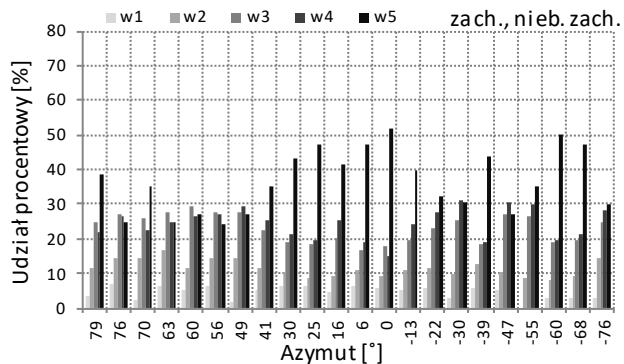
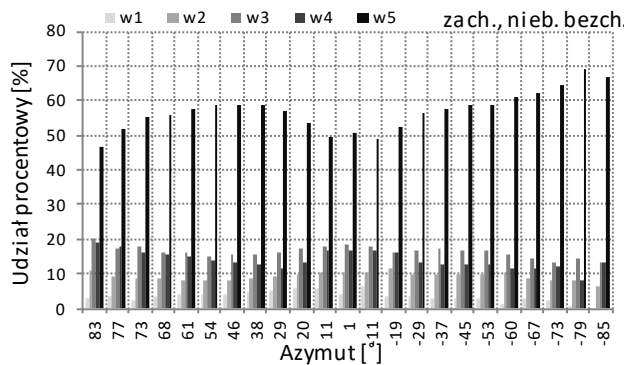
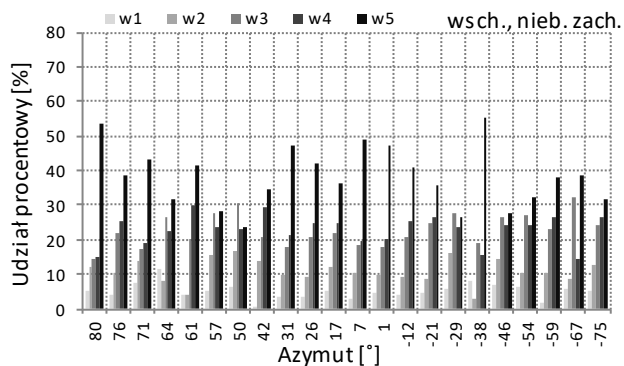
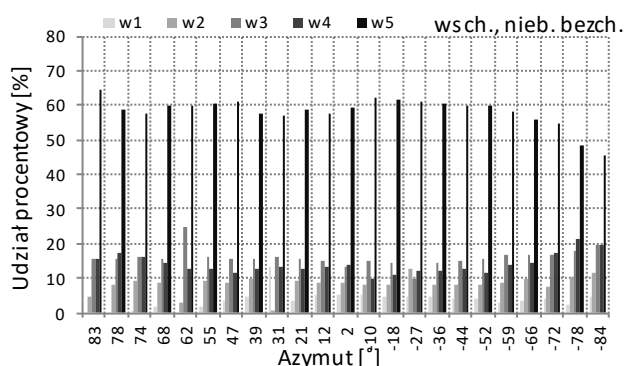
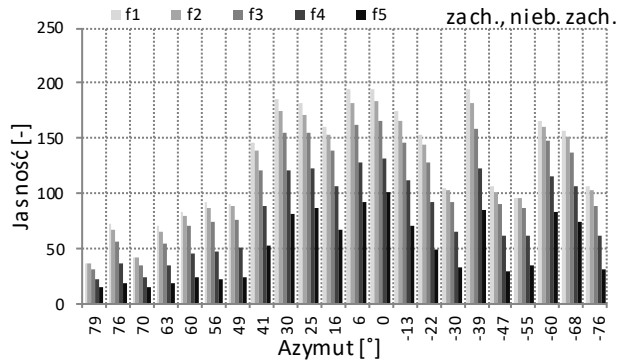
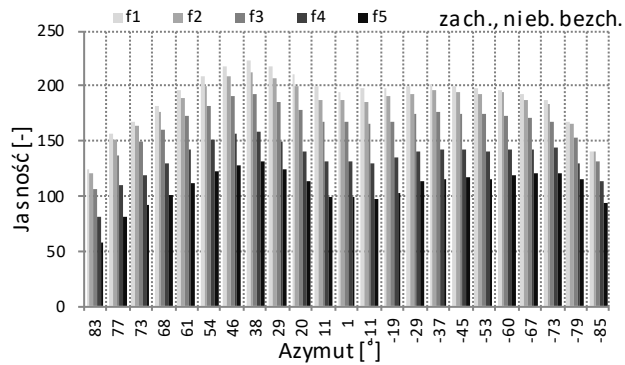
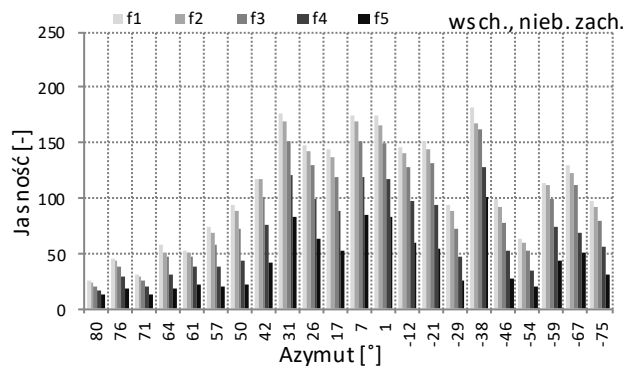
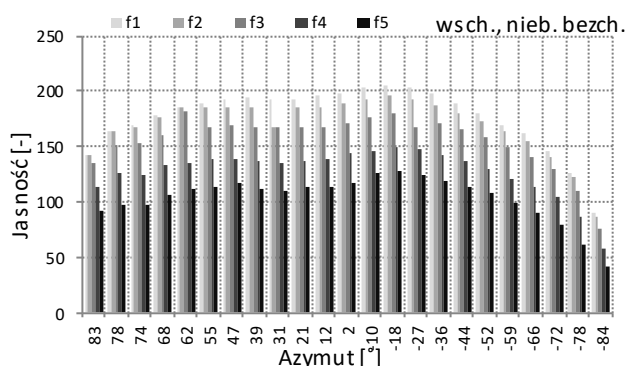
Tabela 3. Obrazy cyfrowe otaczającej zabudowy wykonane z wykorzystaniem poszczególnych filtrów w dzień marca o nieboskłonem bezchmurnym.

Table 3. Digital image of the surrounding buildings made with the use of individual filters in March with clear sky.



4. WYNIKI I ICH ANALIZA

Dla każdego analizowanego dnia wykonano wykresy średniej jasności obrazu cyfrowego rejestrującego powierzchnie gruntu i otaczających budynków oraz wskaźnika udziału procentowego promieniowania słonecznego z odpowiedniego zakresu długości fali. Na rysunkach 3 i 4 pokazano zależności otrzymane dla fasady wschodniej i zachodniej dla dwóch dni marca o nieboskłonem bezchmurnym i zachmurzonym.



Rys. 3. Średnia jasność obrazu cyfrowego rejestrującego powierzchnie gruntu i otaczających budynków dla fasady wschodniej/zachodniej w dniach marca o nieboskłonie bezchmurnym/zachmurzonym.

Fig. 3. Average brightness of the digital image recording the ground and surface of the surrounding buildings for the east/west facade on March with clear/overcast skies.

Rys. 4. Wskaźnik udziału procentowego promieniowania słonecznego z odpowiedniego zakresu długości fali dla fasady wschodniej/zachodniej w dniach marca o nieboskłonie bezchmurnym/zachmurzonym.

Fig. 4. Indicator of the percentage of solar radiation in the relevant wavelength range for the east/west facade on March with clear/overcast skies.

Porównując wyznaczone jasności można zaobserwować istotne różnice między dniami o nieboskłonie bezchmurnym i zachmurzonym. W dzień bezchmurny jasność obrazów jest wyższa niż w trakcie dnia zachmurzonego. Udział poszczególnych zakresów promieniowania również się różni. W dzień bezchmurny, udział promieniowania bliskiej podczerwieni (w5) jest znacznie większy względem pozostałych zakresów. Udziały procentowe poszczególnych zakresów w kolejnych porach dnia są także zmienne i zależne od stopnia zachmurzenia. Natomiast, w trakcie dnia zachmurzonego udział wszystkich zakresów promieniowania jest zbliżony. Jednakże, udział promieniowania niebieskiego dla wszystkich przypadków jest najmniejszy. Ponadto, można zaobserwować różnicę między wynikami dla fasady wschodniej i zachodniej, wynikające z różnych parametrów otaczającej zabudowy i szaty roślinnej.

W tabelach 4 i 5 przedstawiono wartości średnich całodniowych wskaźników udziału procentowego promieniowania słonecznego z odpowiednich zakresów długości fali dla obu fasad we wszystkich analizowanych dniach.

Tabela 4. Wartości średnie wskaźnika udziału procentowego promieniowania słonecznego z odpowiedniego zakresu długości fali dla fasady wschodniej/zachodniej w dniach o nieboskłonie bezchmurnym.

Table 4. Average values of indicator of the percentage of solar radiation in the relevant wavelength range for the east/west facade on day with clear sky.

nieboskłon bezchmurny		miesiące						
		VIII	IX	XI	XII	I	II	III
w1	wsch.	4.8	3.5	3.9	5.9	6.0	5.5	3.7
	zach.	4.6	4.1	5.3	3.7	4.9	4.3	3.4
w2	wsch.	7.1	6.5	8.2	10.0	8.6	9.3	8.2
	zach.	9.1	9.1	10.0	11.6	10.2	9.8	9.3
w3	wsch.	11.6	12.4	17.4	18.4	17.2	16.4	16.0
	zach.	16.4	16.4	20.5	22.9	17.6	16.4	16.4
w4	wsch.	8.1	8.4	19.6	22.1	18.8	16.0	14.0
	zach.	12.3	14.1	21.9	25.4	17.3	15.0	14.0
w5	wsch.	68.4	69.1	50.9	43.6	49.3	52.8	58.2
	zach.	57.5	56.3	42.3	36.4	50.0	54.4	56.9

Wartości wskaźników dla poszczególnych miesięcy są zmienne ze względu na zmienne warunki otoczenia. Jednakże zarówno dla dni o nieboskłonie bezchmurnym jak i zachmurzonym można zauważyć, że udział procentowy poszczególnych zakresów zwiększa się od w1 do w5, z wyjątkiem w3 i w4, które mają zbliżone wartości. Ponadto, zaobserwowano, że w większości miesięcy wskaźniki w2, w3 i w4 są większe dla fasady zachodniej,

czyli udział promieniowania „zielonego”, „żółtego” i „czerwonego” jest większy po stronie zachodniej. Jednocześnie wskaźnik w5 jest większy dla fasady wschodniej, czyli udział promieniowania bliskiej podczerwieni jest większy w porównaniu do fasady zachodniej. Tendencja ta jest zaburzona dla stycznia i lutego, w których odnotowano występowanie pokrywy śnieżnej.

Analizując zmiany w udziale promieniowania bliskiej podczerwieni w rozważanym okresie czasu można zaobserwować istotny wpływ szaty roślinnej zwłaszcza w przypadku fasady wschodniej. W sierpniu i wrześniu w dni o nieboskłonie bezchmurnym udział promieniowania bliskiej podczerwieni osiąga niemal 70%. Natomiast w miesiącach jesiennych i zimowych udział promieniowania bliskiej podczerwieni jest mniejszy i osiąga około 50%.

Tabela 5. Wartości średnie wskaźnika udziału procentowego promieniowania słonecznego z odpowiedniego zakresu długości fali dla fasady wschodniej/zachodniej w dniach o nieboskłonie zachmurzonym.

Table 5. Average values of indicator of the percentage of solar radiation in the relevant wavelength range for the east/west facade on day with overcast sky.

nieboskłon zachmurzony		miesiące						
		IX	X	XI	XII	I	II	III
w1	wsch.	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.4	5.1
	zach.	6.4	6.2	6.0	5.5	6.3	5.3	4.6
w2	wsch.	7.8	9.4	11.6	11.2	11.4	13.7	10.9
	zach.	10.7	12.3	12.6	13.9	12.2	14.7	11.5
w3	wsch.	15.0	20.3	18.2	21.8	22.0	25.1	22.8
	zach.	19.1	22.9	20.7	25.1	20.8	26.2	23.1
w4	wsch.	13.5	20.8	18.7	22.9	27.4	25.7	23.0
	zach.	19.4	22.5	21.7	24.8	23.7	27.8	24.4
w5	wsch.	55.2	44.2	46.0	38.7	33.0	29.0	38.3
	zach.	44.4	36.2	39.0	30.7	37.0	26.0	36.5

5. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono charakterystykę spektralną odbitego promieniowania słonecznego docierającego do fasad budynku, wschodniej i zachodniej, zlokalizowanego w środowisku zurbanizowanym w wybranych miesiącach roku. Analizę widmową promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni wykonano za pomocą obrazów cyfrowych otoczenia fasad z wykorzystaniem filtrów fotograficznych o różnej przepuszczalności promieniowania słonecznego. Pomiar wykonano od sierpnia do marca, dla wytypowanych dni charakteryzujących się nieboskłonem zachmurzonym lub

bezczmurnym. Otrzymane wyniki pokazują istotną różnicę w udziale różnych długości fali w całkowitym promieniowaniu odbitym docierającym do fasady w zależności od warunków nieboskłonu. W dni o nieboskłonie bezchmurnym udział promieniowania bliskiej podczerwieni jest większy i przekracza średnio 50% promieniowania całkowitego. Natomiast w dni o nieboskłonie zachmurzonym udział promieniowania bliskiej podczerwieni jest mniejszy, w większości znacznie poniżej 50%. Ponadto, zaobserwowano, że udział poszczególnych składowych promieniowania różni się dla obu fasad, co potwierdza istotny wpływ otoczenia na promieniowanie docierające do fasady budynku. Dla fasady zachodniej udział promieniowania „zielonego”, „żółtego” i „czerwonego” jest większy. Natomiast udział promieniowania bliskiej podczerwieni jest większy dla fasady wschodniej. Tylko udział promieniowania niebieskiego jest porównywalny dla obu fasad. Poza tym, w opracowanych wynikach widoczny jest również wpływ występowania śniegu oraz szaty roślinnej na widmo promieniowania docierającego do fasady budynku. Przedstawione analizy pozwalają na określenie udziału poszczególnych zakresów długości fali w całkowitym promieniowaniu odbitym docierającym do fasady budynku. Dodatkowo, przy znajomości charakterystyki widmowej promieniowania bezpośredniego i rozproszonego od nieboskłonu, można wyznaczyć podział spektralny całkowitego promieniowania podającego na powierzchnię pionową budynku. Umożliwia to dokładne oszacowanie energii wyprodukowanej przez panele fotowoltaiczne zainstalowane na analizowanej powierzchni z uwzględnieniem wydajności paneli przy określonej długości fali promieniowania słonecznego.

SPECTRAL ANALYSIS OF COMPONENT OF REFLECTED SOLAR RADIATION INCIDENT ON VERTICAL SURFACE

Summary: The paper presents spectral analysis of solar radiation component reflected from opposite buildings and reaching the façades of the building. Two façade orientations were analyzed, eastern and western, located in the urban environment. Spectral characteristics of radiation were made for visible and near infrared radiation. Digital images were made using photographic filters with known solar transmittance. The analysis was based on measurements from August to March, for selected days with clear and overcast skies. The obtained results show a significant difference in the proportion of different wavelengths in the radiation reaching the façades depending on the conditions of the sky, the environment and the surrounding buildings.

Literatura

- [1] Duffie J. A., Beckman W. A.. Solar Engineering of thermal processes, 4th edition, John Wiley & Sons, INC., 2013
- [2] Muneer T., Solar radiation and daylight models, Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2nd edition, 2004
- [3] Chwieduk D., Solar Energy in Buildings: Thermal Balance for Efficient Heating and Cooling, Elsevier, 1st edition, 2014
- [4] Dirnberger D., Blackburn G., Müller B., Reise C., On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies, Solar Energy Materials & Solar Cells 132, str. 431–442, 2015
- [5] Ekea R., , Bettsb T.R., Gottschalg R., Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules, Renewable and Sustainable Energy Reviews 69, str. 429–434, 2017
- [6] Narowski P., Modelowanie natężenia promieniowania słonecznego w symulacjach energetycznych budynków, Energia i budynek, nr 11(54), str. 34-43, 2011
- [7] Górko M., Heim D., Szczepańska E., Porównanie wybranych technik przetwarzania obrazów cyfrowych dla potrzeb określania zewnętrznych warunków oświetleniowych, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, tom IV, str. 37-44, 2009.
- [8] Knera D., Górko M., Heim D., Wykorzystanie techniki fotometrycznej do jakościowej analizy światła odbitego na zadanej powierzchni, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, tom VIII, Nr 2, str. 17-22, 2016