

## ANALIZA WŁASNOŚCI OPTYCZNYCH IZOLACJI TRANSPARENTNEJ I ICH WPLYW NA EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNĄ PRZEGRODY

Dariusz HEIM\*, Piotr PUCHAŁA\*

\* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mails: [dariusz.heim@p.lodz.pl](mailto:dariusz.heim@p.lodz.pl), [petee@o2.pl](mailto:petee@o2.pl)

**Streszczenie:** W pracy omówiono zagadnienia związane z charakterystykami optycznymi izolacji półprzezroczystej oraz przeprowadzono teoretyczną analizę jej wybranych parametrów. Wykorzystując zaawansowane modele numeryczne przeanalizowano zestaw teoretycznych charakterystyk optycznych w celu znalezienia najlepszego rozwiązania dla warunków Polskich. Przyjętym kryterium wyboru była charakterystyka energetyczna warstwy izolacji i jej globalny bilans energetyczny, w szczególności zmienne strumienie zysków i strat ciepła przez warstwę materiału transparentnego.

**Słowa kluczowe:** izolacje transparentne, przepuszczalność, promieniowanie słoneczne, energooszczędność.

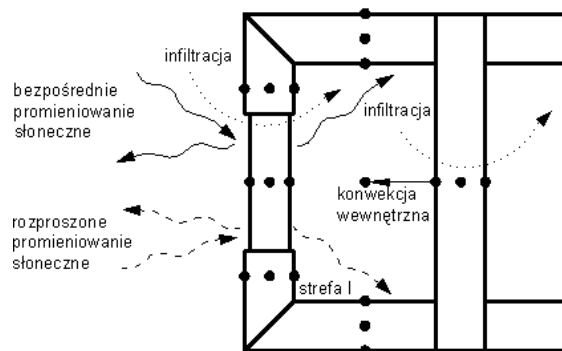
### 1. WPROWADZENIE

Celem przeprowadzonych symulacji było znalezienie materiału izolacji transparentnej (IT) posiadającego takie właściwości optyczne, aby możliwe było jego zastosowanie, bez dodatkowych elementów zacieniających czyli „odpornego” na zyski ciepła od promieniowania słonecznego poza sezonem grzewczym. Dodatkowym zadaniem było zapewnienie maksymalnych zysków ciepła zimą gwarantujących komfort cieplny użytkownikom pomieszczenia oraz poprawiających bilans cieplny budynków.

W ramach niniejszej pracy wykonano ponad 200 symulacji przeprowadzonych na jednostrefowym modelu dla różnych materiałów IT w tych samych warunkach klimatycznych. Symulacje były prowadzone dla pojedynczego pomieszczenia testowego o wymiarach 6×5×3 m. Ściana akumulacyjna z izolacją transparentną miała wystawę południową o całkowitej powierzchni 15 m<sup>2</sup>. Przestrzeń wewnętrzną została zdefiniowana jako jedna strefa, natomiast przegroda stanowiąca ścianę akumulacyjną podzielona była na 1 lub 2 strefy termiczne w zależności od rozpatrywanego przypadku. W pomieszczeniu nie założono żadnego systemu sterowania temperaturą oraz ilością wymianianego powietrza, jak i dla przejrzystości wyników nie założono żadnych wewnętrznych zysków ciepła.

### 2. MODELOWANIE PRZEGRODY Z IT

Metodologia analizowania przegród częściowo przezroczystych zaproponowana przez Clarke'a (2001) [1] nie uwzględnia możliwości tworzenia niejednorodnej struktury izolacji transparentnej i możliwe jest jedynie zdefiniowanie materiału jako homogenicznego. Ponadto struktura bazy danych nie daje możliwości określenia właściwości optycznych warstw transparentnych dla dowolnego kąta padania promieni słonecznych, a jedynie dla wybranych pięciu kątów (0, 40, 55, 70 i 80°). Zjawiska zachodzące w izolacji transparentnej wpływające na właściwości optyczne i termiczne nie są modelowane w programie na podstawie jej struktury, a w oparciu o bezpośrednio wprowadzane przez użytkownika charakterystyki cieplne i optyczne. Pomimo pewnych ograniczeń wynikających z założeń modelu izolację transparentną można modelować z wystarczającą dokładnością [2,3]. Podstawowe ścieżki przepływu energii w przypadku modelowania izolacji jako niezależnej przegrody przedstawiono graficznie na rys. 1.



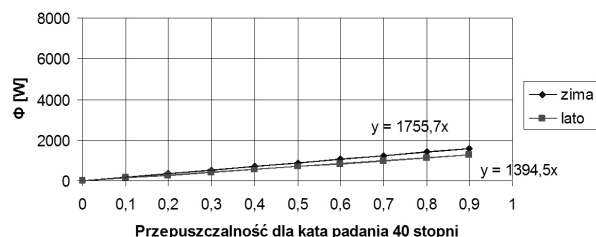
Rys. 1. Izolacja Transparentna jako niezależna przegroda.  
Fig. 1. Transparent insulation as a separate partition.

### 3. ANALIZOWANE MATERIAŁY

Po wstępnej analizie możliwych dla szerokości geograficznej Polski azymutów słońca liczbę analizowanych przypadków ograniczono do 200. Analizowano m.in. ilość energii przenikającą przez izolację transparentną, temperaturę w poszczególnych strefach i fragmentach przegrody oraz zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia. Pierwsze wyniki analiz przedstawiono na rysunkach 2÷4. Ilustrują one zależności jednostkowej energii, która przenika przez izolację transparentną od przepuszczalności tej izolacji przy kącie padania promieni słonecznych 40 oraz 55° (rys. 2 i 3), a także różnicę pomiędzy jednostkową energią promieniowania słonecznego przenikającą przez IT latem i zimą dla kątów 40 i 55° (rys. 4). We wszystkich przypadkach ściana miała orientację południową.

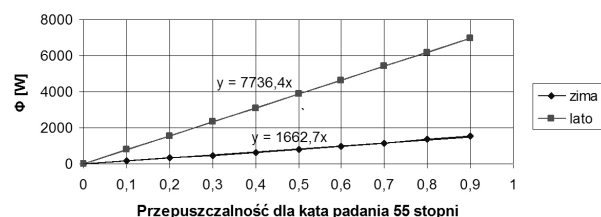
Przedstawione wyniki potwierdzają przypuszczenie, iż dla warunków polskich kąt graniczny pomiędzy pożądanymi zyskami a stratami ciepła znajduje się w zakresie 40÷55°. Przy wzroście przepuszczalności o 0,1 dla kąta padania 40° wzrost jednostkowej mocy zysków ciepła wynosi 176 W dla zimy i 140 W dla lata, zaś dla kąta 55° odpowiednio 160 W dla zimy i aż 773 W dla lata. Chcąc jednak dokonać prawidłowej oceny materiału trzeba zwrócić uwagę nie tylko na charakter zmian zysków ciepła, ale również wziąć pod uwagę relacje pomiędzy zyskami energii zimą i latem (rys. 1). Izolacja transparentna wtedy będzie spełniała swoje zadanie, gdy zimą zapewni maksymalne, zaś latem minimalne zyski energii. Dla kąta padania 40° wraz ze wzrostem przepuszczalności IT wzrasta nie tylko ilość pozyskanej podczas zimy energii, ale również zwiększa się różnica pomiędzy energią pozyskaną zimą a latem. Tym samym kąt 40° będzie kątem decydującym, jeśli chodzi o wybór najlepszego materiału. Wraz ze wzrostem przepuszczalności ilość pozyskanej zimą energii rośnie o około 25% szybciej niż ilość energii pozyskanej podczas lata. Uznając za kryterium wyboru materiału wartość jednostkowej energii pozyskanej oraz różnicę pomiędzy energią pozyskaną latem i zimą można uznać, iż przepuszczalność IT przy kącie padania promieni słonecznych 40° powinna być możliwie największa.

Podobnie analizując rysunek 3 zauważyć można, iż wraz ze wzrostem przepuszczalności przy kącie padania promieni słonecznych 55° wzrasta ilość energii przenikającej przez IT. Jednak przeciwnie niż dla kąta padania 40° wraz ze wzrostem przepuszczalności ilość energii pozyskanej przez IT rośnie ponad cztery razy szybciej w lecie niż w zimie. Wartość bezwzględnej różnicy pomiędzy ilością energii pozyskanej podczas lata i zimy wzrasta niekorzystnie wraz ze wzrostem przepuszczalności (rys. 4). W praktyce mogłoby spowodować to przegrzewanie pomieszczenia w okresie lata i konieczność jego chłodzenia.



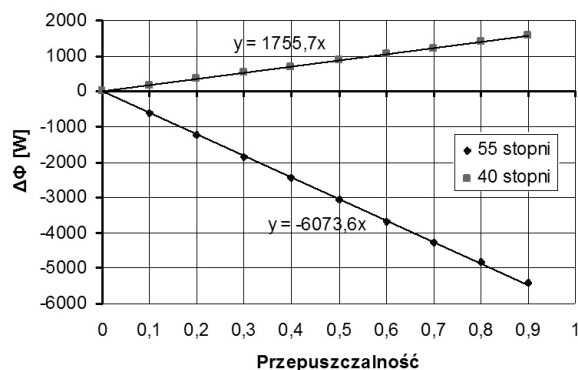
Rys. 2. Zyski ciepła od promieniowania słonecznego dla maksymalnej przepuszczalności przy kącie padania 40°.

Fig. 2. Solar heat gains for TI with maximum transmittance for 40° angle.



Rys. 3. Zyski ciepła od promieniowania słonecznego dla maksymalnej przepuszczalności przy kącie padania 55°.

Fig. 3. Solar heat gains for TI with maximum transmittance for 55° angle.



Rys. 4. Różnica zysków energii słonecznej między zimą a latem.

Fig. 4. Solar gains differences between winter and summer.

Biorąc to pod uwagę przepuszczalność promieniowania słonecznego IT dla kąta padania promieni słonecznych 55° powinna być już minimalna. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń dalszej analizie poddano materiały o współczynnikach przepuszczalności promieniowania zamieszczonych w tabelicy 1.

W tabelicy 2 zamieszczono otrzymane z analiz symulacyjnych wartości maksymalnej mocy zysków ciepła od promieniowania słonecznego oraz wynikowe temperatury w pomieszczeniu. Najkorzystniejszy bilans zysków ciepła dla zimy i lata otrzymano dla materiału oznaczonego numerem 10 – 1739 W.

Tabela 1. Zestaw materiałów o wybranych współczynnikach przepuszczalności promieniowania słonecznego.  
Table 1. The set of selected material transmittance.

	Przepuszczalność promieniowania słonecznego				
	0°	40°	55°	70°	80°
material 1	0,9	0	0	0	0
material 2	0,9	0,1	0	0	0
material 3	0,9	0,2	0	0	0
material 4	0,9	0,3	0	0	0
material 5	0,9	0,4	0	0	0
material 6	0,9	0,5	0	0	0
material 7	0,9	0,6	0	0	0
material 8	0,9	0,7	0	0	0
material 9	0,9	0,8	0	0	0
material 10	0,9	0,9	0	0	0

Tabela 2. Maksymalna moc zysków od promieniowania oraz temperatury wynikowe w pomieszczeniu dla wybranych IT.  
Table 2. Maximum solar heat gains and resultant temperature for selected IT.

	Moc zysków ciepła od promieniowania słonecznego $\Phi$			Temperatura w pomieszczeniu					
	[W]			T [°C]					
	zima	lato	różnica	zima			lato		
				min	śr	max	max	śr	min
material 1	1413	0	1413	0,01	2,77	5,91	21,69	20,59	19,14
material 2	1589	139	1450	0,33	3,21	6,47	22,37	21,23	19,75
material 3	1765	279	1486	0,64	3,63	7,00	23,03	21,87	20,38
material 4	1940	418	1522	0,92	4,02	7,50	23,68	22,50	20,99
material 5	2116	558	1558	1,20	4,40	7,97	24,31	23,11	21,58
material 6	2291	697	1594	1,46	4,75	8,42	24,93	23,71	22,16
material 7	2467	837	1630	1,71	5,09	8,85	25,55	24,30	22,73
material 8	2642	976	1666	1,94	5,42	9,26	26,15	24,87	23,29
material 9	2818	1116	1702	2,17	5,73	9,66	26,75	25,44	23,84
material 10	2994	1255	1739	2,39	6,03	10,04	27,33	26,00	24,37
bez IT	0	0	0	-0,68	1,67	4,73	21,80	20,87	19,51

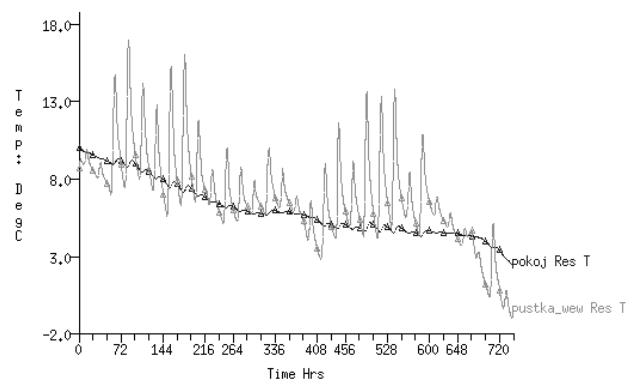
Tabela 3. Sezonowe zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia.  
Table 3. Annual energy requirements for heating and cooling.

	Sezonowe zapotrzebowanie na energię przy temperaturze 24°C dla lata oraz 22°C dla zimy [kWh/rok]		
	rok		
	ogrzewanie	chłodzenie	łącznie
material 1	2819	0	2819
material 10	1745	259,65	2005
bez IT	5041,98	86,08	5128

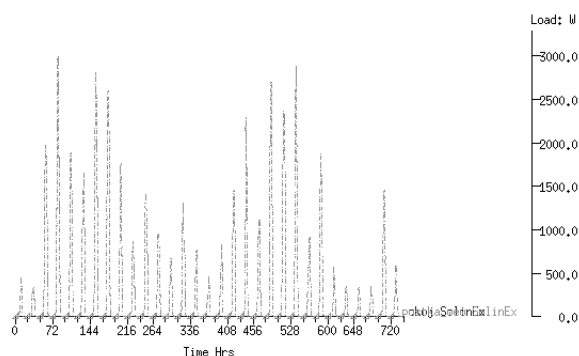
Jednocześnie maksymalna temperatura wynikowa w pomieszczeniu nieznacznie przekroczyła 24°C. Dodatkowo porównując sezonowe zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia (tablica 3) przy założeniu temperatury powietrza wewnętrznego w zakresie 22÷24°C, ko-

rzystniejsze wyniki otrzymano także dla materiału 10, dla którego łączne zapotrzebowanie na energię jest o około 800 kWh mniejsze niż dla materiału oznaczonego numerem 1. Ponadto w porównaniu do tradycyjnej izolacji nieprzezroczystej zastosowanie materiału IT o parametrach zgodnych z materiałem 10 pozwala ograniczyć łączne zapotrzebowanie na energię o 60%.

Na rysunkach 5 i 6 zamieszczono przykładowe historie zmian zysków ciepła i temperatury wynikowej w pomieszczeniu w grudniu. Założono, że analizowane pomieszczenie pozbawione jest jakiegokolwiek systemu grzewczo-chłodzącego. Z przedstawionych historii wynika, że nawet dla miesiąca o stosunkowo niewielkich sumach promieniowania słonecznego i niskich temperaturach wewnętrznych charakterystyka cieplna przegrody pozwala na utrzymanie w miarę stabilnych warunków wewnętrznych ( $T_i > 0^\circ\text{C}$ ). Natomiast po ciepłej stronie izolacji może dochodzić do chwilowego przemarzania, jednak efekt ten związany jest z okresem niewielkiego promieniowania słonecznego oraz niskich temperatur zewnętrznych.

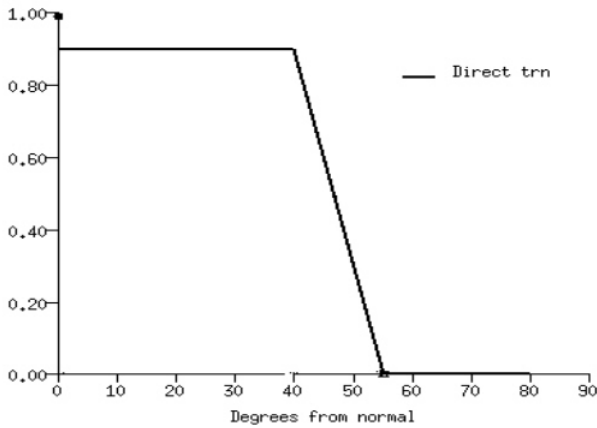


Rys. 5. Historia zmian temperatury wynikowej dla grudnia.  
Fig. 5. History of resultant temperature in December.

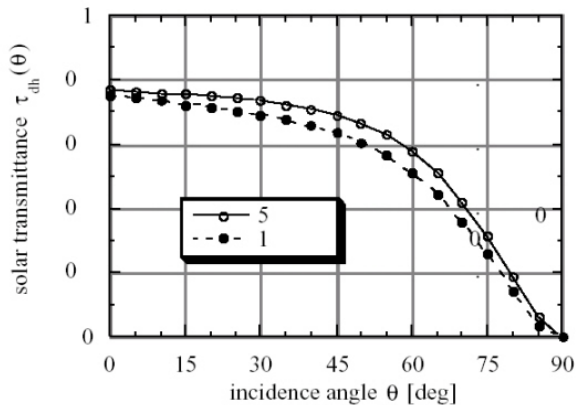


Rys. 6. Historia zmian słonecznych zysków ciepła dla grudnia.  
Fig. 6. History of solar heat gains in December.

Na podstawie otrzymanych wyników opracowano zestaw parametrów optycznych szukanego materiału a na podstawie danych literaturowych znaleziono istniejący materiał o zbliżonej charakterystyce. Wyniki zamieszczono na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Przepuszczalność promieniowania bezpośredniego dla hipotetycznego materiału IT.  
Fig. 7. Direct transmittance of hypothetical TI material.



Rys. 8. Istniejący materiał izolacji transparentnej o charakterystyce najbardziej zbliżonej do poszukiwanej.  
Fig. 8. Existing TIM with properties resembling the required material.

#### 4. PODSUMOWANIE

W Polsce maksymalny kąt padania promieni słonecznych zimą (dla najkrótszego dnia roku) wynosi około 20°, natomiast latem (dla najdłuższego dnia roku) około 62°. Zastosowana metoda obliczeniowa umożliwia zdefiniowanie właściwości optycznych materiałów jedynie dla 5 kątów padania bezpośredniego promieniowania słonecznego tj. 0, 40, 55, 70 i 80°, co praktycznie uniemożliwia

znalezienie dokładnych charakterystyk dla najlepszego materiału. Ostateczny wybór materiału oznaczonego numerem 10 pod kątem zysków ciepła w cyklu całorocznym może być obarczone pewnym błędem.

Otrzymana w wyniku analiz teoretyczna krzywa przepuszczalności materiału 10 istotnie różni się od krzywej doświadczalnej przykładowego materiału stosowanego jako izolacja transparentna. Podstawowa różnica dotyczy przepuszczalności dla kątów powyżej 50°, która w przypadku materiału hipotetycznego powinna wynosić 0.

#### ANALYSIS OF OPTICAL PROPERTIES OF TRANSPARENT INSULATION AND IMPACT ON THERMAL PERFORMANCE

**Summary:** The properties of transparent plaster covering transparent insulation materials (TIM) were investigated using a whole building simulation program (ESP-r). The results of the initial analysis showed the desirable optical properties, estimated for sun incident angles on the façade at a latitude of 52 degrees north. Then, simulations based on real climatic data for Poland were conducted to predict the thermal TIM wall behaviour. The influence of the structure on the diurnal heat storage potential was investigated for summer and winter.

#### Literatura

- [1] Clarke, J.A. *Energy simulation in building design*, 2<sup>nd</sup> edition. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2001.
- [2] Strachan, P.A. & Johnstone, C.M. 1994. Solar Residences with Transparent Insulation: Predictions from a Calibrated Model. *Proc. North Sun '94*, Glasgow: 347-353.
- [3] Heim D., Klemm P., Numerical solution of TIM-PCM solar thermal storage system with ESP-r, *Research in Building Physics*, Carmeliet, J. & Hens, H. & Vermeir G. (ed.), pp. 683-690, Balkema Publishers, 2003.