

BADANIE TRANSPORTU SKONCENTROWANEGO PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

E. Bożek, M. Filipowicz

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Kraków

STRESZCZENIE

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań parametrów skoncentrowanego światła transmitowanego przy użyciu światłowodów. Koncentracja została osiągnięta za pomocą zwierciadlanego koncentratora promieniowania słonecznego. Przedstawiono wpływ pracy układu śledzącego położenie słońca na ilość transmitowanego światła, a także wykazano możliwość wykorzystania koncentratora promieniowania słonecznego jako źródła światła dziennego. Przeanalizowano widma światła odbitego od talerza parabolicznego i przetransmitowanego za pomocą światłowodu o zmiennej długości.

WSTĘP

W ostatnich latach coraz bardziej rozwija się rynek nowoczesnych technologii związanych z budownictwem. Jest to podyktowane dążeniem do zmniejszania zużycia energii elektrycznej ze względów ekonomicznych oraz ekologicznych. Szacuje się, że w skali świata około 20% energii elektrycznej zużywane jest na cele oświetleniowe. Aby to wysokie zużycie zmniejszyć powszechnie wymienia się klasyczne żarówki na energooszczędne nowoczesne świetlówki lub coraz częściej na lampy LED. Widmo światła pochodzącego od świetlówek różni się znacznie od widma światła dziennego, które dla człowieka jest najzdrowszym rodzajem oświetlenia. Ustawiczne przebywanie w warunkach złego oświetlenia może powodować spadek sprawności widzenia, bóle głowy, zmęczenie, obniżenie wydajności pracy, a nawet zwiększa ryzyko wystąpienia groźnych wypadków. Najlepszym zatem rozwiązaniem jest maksymalne wykorzystanie światła słonecznego.

Oprócz dziennego, bocznego oświetlenia pomieszczeń (okna, drzwi balkonowe) używane są również inne technologie pozwalające wykorzystać promieniowanie słoneczne. Istnieją dwa główne typy systemów doświetlających wykorzystujących promieniowanie słoneczne: doprowadzające jedynie światło rozproszone (cieniujące) oraz wprowadzające również promieniowanie bezpośrednie. Spośród tych pierwszych wyróżnia się takie, które blokują bezpośrednie promieniowanie słoneczne, ale przepuszczają promieniowanie rozproszone oraz takie, które rozpraszają lub przekierowują bezpośrednie promieniowanie słoneczne na strop lub powyżej linii wzroku. Natomiast w drugim z typów

wyróżnia się systemy do przekierowania światła rozproszonego, przekierowania światła bezpośredniego, rozpraszania oraz transportu światła na większe odległości. System powinien być tak dobrany, by przede wszystkim spełniał wymagania użytkowników pod kątem wykonywanych przez nich prac, był dostosowany do budynku oraz strefy klimatycznej. Ponadto należy wziąć pod uwagę czynniki takie jak widoczność na zewnątrz, ilość światła doprowadza w głąb pomieszczenia, jednorodność oświetlenia, potrzebę śledzenia promieni itp. Nieodpowiedni wybór systemu może powodować przegrzanie pomieszczeń czy też występowanie olśnienia (Kischkoweit-Lopin, 2002). W takich instalacjach stosowane są m.in. półki szklane, układy lusterek, świetliki dachowe, a także systemy światłowodów. Te ostatnie pozwalają na doprowadzenie promieni słonecznych do pomieszczeń w których użycie pozostałych technologii nie jest możliwe.

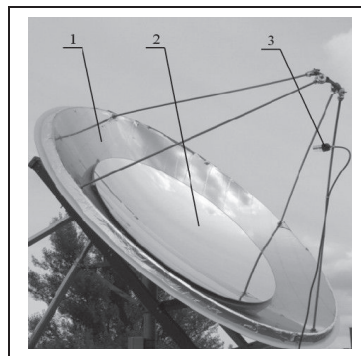
Badaniom koncentracji i transmisji promieniowania słonecznego poświęcony jest szereg prac badawczych. Na Ege University, Solar Energy Institute w Turcji wykonano badania nad transmisją światła z użyciem światłowodu o długości ok. 3 m, zbierającego światło z powierzchni ok. 0,85 m². Otrzymano całkowitą sprawność systemu równą 0,42 (Kandilli, Ulgen, Hepbasli, 2008). Z kolei na Uniwersytecie w Arizonie trwają prace nad zaprojektowaniem układu koncentrującego i transmitującego promieniowanie słoneczne do procesu fotosyntezy glonów w celu usuwania nadmiaru CO₂ w spalinach. W pracy (Ono, Cuello, 2004) zaprezentowano dane, z których wynika, iż obecnie koncentratory promieniowania słonecznego osiągają już wydajność wyższą niż 45%. Na tej samej Uczelni NASA sfinansowało serię badań nad zastosowaniem skoncentrowanego promieniowania słonecznego. W badaniach wykorzystano dwa systemy koncentrujące. Jednym z nich był układ oparty na soczewkach Fresnela Mini 7-Lens Himawari, który powstał już na początku lat 80-tych w Japonii. Światło skupiane było przez sześciokątne soczewki o łącznej powierzchni 0,22 m², zamknięte w ochronnej powłoce z żywicy akrylowej (o średnicy 0,94 m) i następnie transmitowane przez siedem kabli (o długości 10 m) światłowodowych składających się z 20 żył każdy, gdzie średnica jednej żyły to 0,51 mm. Taki system posiadał całkowitą sprawność 23,2% (Mori, 1985). Drugi system oparty był na układzie dwóch pół metrowych parabolicznych lusterek - Optical Waveguide (OW), w ogniskach których

umieszczone zostały koncentratory wtórne wykonane z kwarcu (topiona krzemionka), skąd z kolei strumień światła trafiał do kabli światłowodowych o długościach po 10 m. Oba kable składały się z 37 żył o średnicy 1 mm każda. Sprawność ogólna tego układu wyniosła 40,5% i została następnie podniesiona do wartości 46,1% poprzez wymianę kabli światłowodowych na wydajniejsze (Nakamura, Case, Jack, Cuello, 1999). Natomiast w Department of Energy's Oak Ridge National Laboratory wykorzystuje się układ koncentratora promieniowania słonecznego (widzialnego, IR i UV), w którego ognisku umieszczone zostało tzw. zimne lustro. Lustro to odbija i skupia z całego widma słonecznego jedynie promieniowanie z zakresu fal widzialnych, które następnie przesyłane jest kilkoma 12-milimetrowymi włóknami światłowodowymi do miejsc oświetlanych. Pozostałe promieniowanie - ultrafioletowe oraz podczerwone - wykorzystywane jest do zasilania fotowoltaiki (Muhs, Earl, 2001).

W Katedrze Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego na AGH w Krakowie trwają obecnie badania związane z tą tematyką. Pierwsze wyniki i ich analiza przedstawiona została w niniejszym artykule.

METODA BADAŃ

Aby przetransmitować większą ilość światła niż w standardowym układzie światłowodów wykorzystano koncentrator promieniowania słonecznego. Urządzenie to składa się z parabolicznego lustra o średnicy 1,2 m, osadzonego na talerzu o średnicy 1,8 m, wyklejonym folią refleksyjną (rys. 1). Aby koncentrator mógł prawidłowo pracować zintegrowany został z układem śledzącym położenie słońca opartym na algorytmie astronomicznym. Do transmisji światła użyto kabla światłowodowego o długości 10 m, składający się z 25 żył (każda o średnicy 0,75 mm) (Filipowicz, Wajss, Tomski, Szubel, Sornek, Bożek, Gastoł, 2012). Zastosowane światłowody są dostępne w handlu i używane m.in. do tworzenia dekoracyjnych systemów oświetleniowych. W pobliżu ogniska koncentratora umieszczona była głowica kabla światłowodowego (rys. 1), natomiast drugi koniec światłowodu znajdował się w ciemni wyposażonej w czujnik natężenia światła. Natężenie światła za zewnątrz było mierzone za pomocą czujnika natężenia znajdującego się na dachu w pobliżu koncentratora. Sygnały z obu czujników były kierowane do programowalnego układu pomiarowo-sterującego PLC połączonego z komputerem. Wykonano również badanie widma promieniowania transmitowanego z wykorzystaniem jednej żyły światłowodu o średnicy 0,85 mm przy użyciu spektrometru optycznego Science-Surplus z detektorem Sony ILX511 linear CCD.



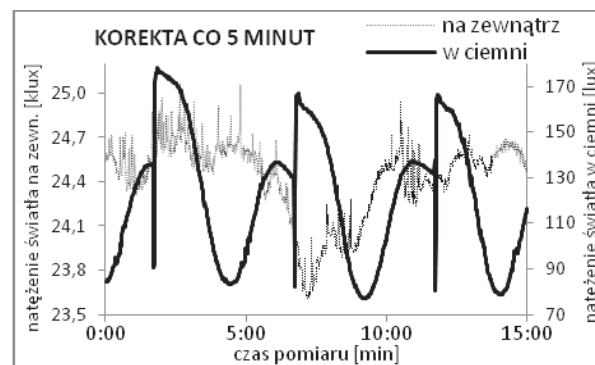
Rys. 1. Jedno z usytuowań głowicy światłowodu przy koncentratorze. 1- folia refleksyjna, 2- lustro paraboliczne, 3- głowica kabla światłowodowego

RELACJA MIĘDZY NATĘŻENIEM OŚWIETLENIA NA ZEWNĄTRZ I W CIEMNI

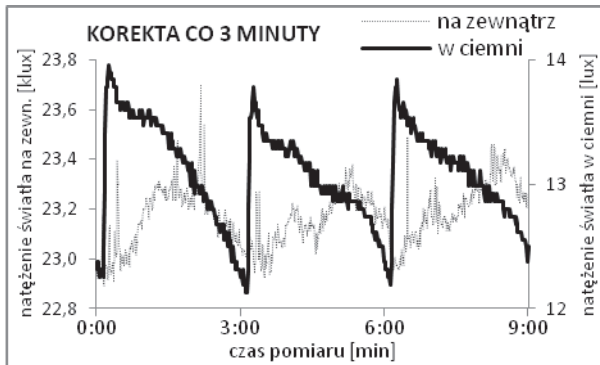
Pomiary wykonano dla trzech różnych usytuowań głowicy skierowanej na koncentrator tj. 80 cm, 100 cm i 180 cm odległości od powierzchni lustra oraz dla głowicy skierowanej na tarczę słoneczną. Ustalono, że najlepsze usytuowanie dla głowicy kabla światłowodowego skierowanego na koncentrator znajduje się w odległości 100 cm od powierzchni lustra. Natomiast w ciemni zmieniano odległość końcówki światłowodu od czujnika: 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50 i 60 cm.

Na wykresach (rys. 2, 3, 4) przedstawiono zależność natężenia światła zewnętrznego oraz światła padającego na czujnik wewnątrz ciemni w tym samym czasie. Głowica światłowodu była usytuowana w najkorzystniejszym miejscu tj. 100 cm od powierzchni lustra a końcówka światłowodu w odległości 5 cm od czujnika w ciemni. Ciągła krzywa przedstawia natężenie światła zmierzone w ciemni (skala po prawej stronie), natomiast kropkowana – na zewnątrz (skala po lewej stronie).

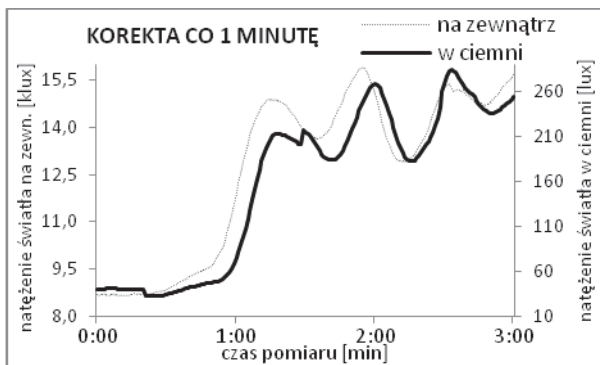
Widoczny jest efekt dokładności układu śledzącego położenie słońca na ilość transmitowanego światła. Dla każdego z trzech przedstawionych przebiegów ustawiany był inny czas korekty położenia koncentratora. Pierwszy przypadek to korekta ustawienia co 5 minut, drugi – co 3 minuty, natomiast ostatni – co minutę.



Rys. 2. Wykresy natężenia światła przetransmitowanego – korekta ustawienia co 5 minut



Rys. 3. Wykresy natężenia światła przetransmitowanego – korekta ustawienia co 3 minuty



Rys. 4. Wykresy natężenia światła przetransmitowanego – korekta ustawienia co minutę

Widoczna jest praca układu śledzącego położenie słońca. Widoczne załamania na ciągłej krzywej (zwłaszcza dla rys. 2, 3) są efektem zmian kątów ustawienia koncentratora podczas śledzenia położenia słońca. Najlepszy efekt dała korekta kątów przeprowadzana co minutę (rys. 4), gdzie krzywa dla czujnika w ciemni jest bardzo podobna do krzywej natężenia światła zewnętrznego (załamania charakterystyczne dla rys. 2 i 3 są słabo widoczne).

WZMOCNIENIE STRUMIENIA ŚWIATŁA

Jednym z ważniejszych wielkości w badaniach nad transmisją światła jest współczynnik transmisji. Określa on ilość światła jaką przepuści dany ośrodek. W celu porównania ilości przetransportowanego światła niezależnie od warunków pogodowych obliczono strumień świetlny dla światła zewnętrznego padającego na głowicę światłowodową ϕ_2 oraz emitowanego przez końcówkę światłowodu znajdującego się w ciemni ϕ_1 . W obliczeniach strumienia świetlnego padającego na głowicę uwzględniono sumaryczne pole powierzchni wszystkich żył kabla światłowodowego S , natomiast do obliczenia strumienia wewnątrz ciemni wykorzystano znajomość odległości końcówki światłowodu od czujnika d . Poniżej przedstawiono wzory wg których określono strumień świetlny (1) i (2):

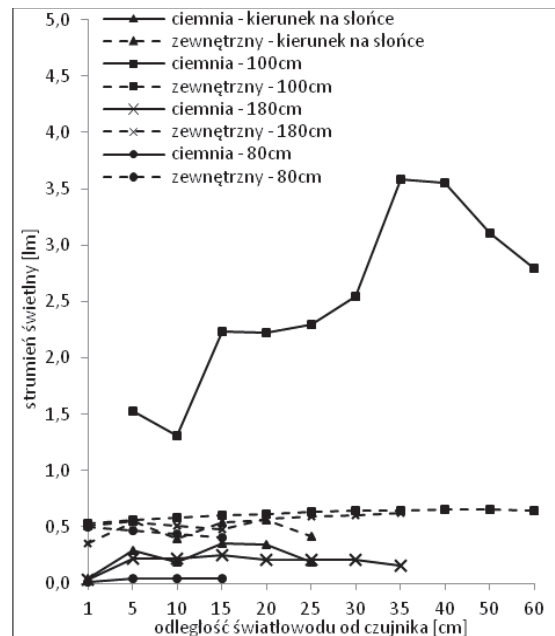
$$\phi_1 = I_{1, sr} \cdot d^2 \quad [lm] \quad (1)$$

$$\phi_2 = I_{2, sr} \cdot S \quad [lm] \quad (2)$$

Posługując się strumieniami świetlnymi ϕ_1 i ϕ_2 określonymi ze wzorów (1) i (2)¹ wyznaczono współczynnik transmisji światła przez światłowód będący stosunkiem ilości doprowadzonego do odbiornika światła do ilości światła padającego na końcówki światłowodu. Współczynnik transmisji α jest dany wyrażeniem:

$$\alpha = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{I_{1, sr} \cdot d^2}{I_{2, sr} \cdot S} \quad (3)$$

Wartości strumienia ϕ_1 i ϕ_2 przedstawiono na rys. 5. Pokazane są wartości strumienia dla wymienionych wcześniej odległości powierzchni koncentratora-głowica oraz dodatkowo przedstawiono wartości strumienia dla orientacji przestrzennej końcówki światłowodu, zgodnej z orientacją czujnika natężenia oświetlenia (płaszczyzna horyzontalna). Pozwala to na określenie jakości światłowodu – im większy współczynnik α , tym lepszy światłowód z punktu widzenia właściwości użytkowych w systemie doświetlania pomieszczeń światłem dziennym. Współczynnik ten może przyjmować wartości w przedziale 0-1, a po wyrażeniu ich w procentach - od 0% (całkowita blokada promieniowania) do 100% (całkowita transmisja bez żadnych strat).



Rys. 5. Zależność strumienia świetlnego doprowadzonego do ciemni i zewnętrznego

¹ Uwaga: wyrażenie (1) jest przybliżone. Poprawne wyliczenie pierwszego strumienia wymaga znajomości krzywej rozsyłu światła przez światłowód. Przyjęte uproszczenie oznacza, że emisja światła ze światłowodu zachodzi ze stałą intensywnością w kąt bryłowy równy jednemu radianowi.

Z rys. 5 wynika, że dla usytuowania głowicy w odległości 100 cm od powierzchni lustra zaobserwowano wzmocnienie strumienia końcowego względem początkowego, współczynnik α jest większy od 100%. W tym przypadku otrzymano ponad 5-krotnie większy strumień przetransmitowanego światła w porównaniu do światła padającego na czujnik zewnętrzny. Możemy zatem zdefiniować:

$$\eta = \frac{\phi_1}{\phi_2} \quad (\text{dla } \phi_1 > \phi_2) \quad (4)$$

wzmocnienia światła η wyniku wykorzystania skoncentrowanego promieniowania słonecznego.

Jeżeli będziemy znać współczynnik koncentracji promieniowania w określonym miejscu koncentratora c to otrzymamy zależność:

$$\eta = c \cdot \alpha \quad (5)$$

Tab. 1 przedstawia uśrednione wartości współczynników koncentracji oraz wzmocnienia światła. Do obliczeń przyjęto, że sprawność światłowodu jest taka sama dla każdego przypadku, a obliczono ją dla przypadku głowicy skierowanej na tarczę słoneczną gdzie współczynnik koncentracji jest znany i wynosi 1. Oszacowano, że w miejscu najkorzystniejszego usytuowania głowicy, uwzględniając straty w światłowodzie, osiągnięto ponad 8-krotną koncentrację światła c .

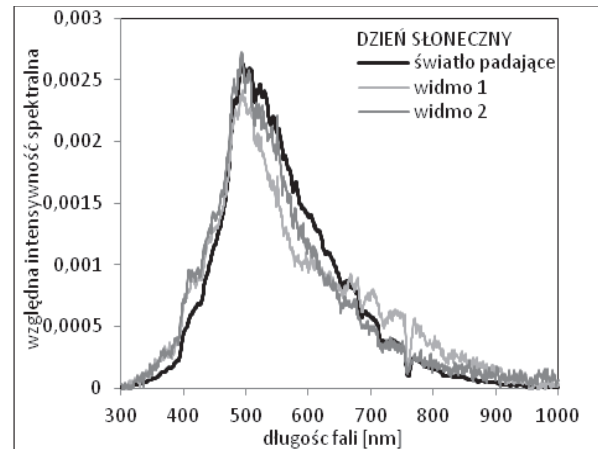
Tab. 1. Wartości parametrów transmisji światła

Usytuowanie głowicy światłowodu	Współczynnik wzmocnienia światła - η	Współczynnik koncentracji światła - c	Współczynnik transmisji - α
Kierunek na słońce	0,47	1,00	0,47
100 cm	4,00	8,55	
180 cm	0,35	0,74	
80 cm	0,08	0,18	

WIDMO ŚWIATŁA ODBITEGO OD KONCENTRATORA

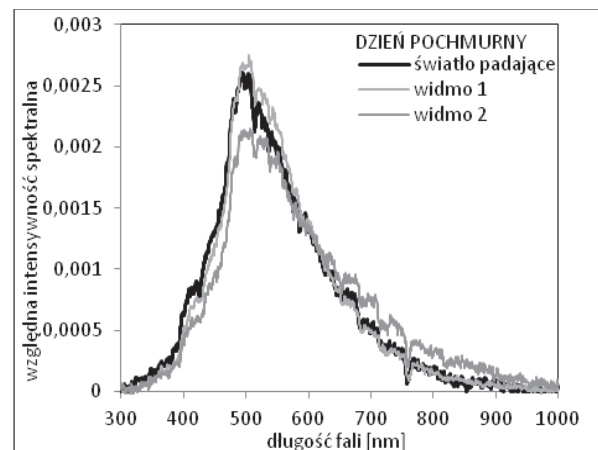
Jednym z najważniejszych aspektów dotyczących oświetlenia jest charakterystyka widmowa. Na podstawie analizy widma promieniowania światła można ocenić jak będą oddawane poszczególne barwy dostrzegane przy świetle dziennym. Z tego powodu porównano widmo światła odbitego od powierzchni koncentratora do widma światła dziennego. Badania przeprowadzone zostały dla kilku punktów pomiarowych zlokalizowanych w pobliżu ogniska koncentratora. Wykonano dwa pomiary – w dzień słoneczny oraz w dzień pochmurny. Wykresy (rys. 6 i 7) przedstawiają widma znormalizowane, porównane do promieniowania słonecznego pochodzącego bezpośrednio z tarczy słonecznej. Prze-

badano osiem punktów, do ilustracji wybrano dwa najbardziej różniące się widma.



Rys. 6. Widma światła odbitego od koncentratora dla dwóch wybranych punktów pomiarowych porównane do widma światła padającego (słoneczny dzień)

Widać, że światło odbite od powierzchni koncentratora nie jest silnie zniekształcone. Zaobserwowane zniekształcenie polega na przesunięciu widma w kierunku krótszych fal - przesunięcie to jest jednak niewielkie, rzędu ok. 20-50 nm. Jest to prawdopodobnie spowodowane faktem, iż powierzchnia koncentratora ma odcień niebieski, pochodzący od foli refleksyjnej. Jednocześnie zaobserwować można nieznacznie większy udział w promieniowaniu składowej światła czerwonego w zakresie długości fali ok. 700-1000 nm.



Rys. 7. Widma światła odbitego od koncentratora dla dwóch wybranych punktów pomiarowych porównane do widma światła padającego (pochmurny dzień)

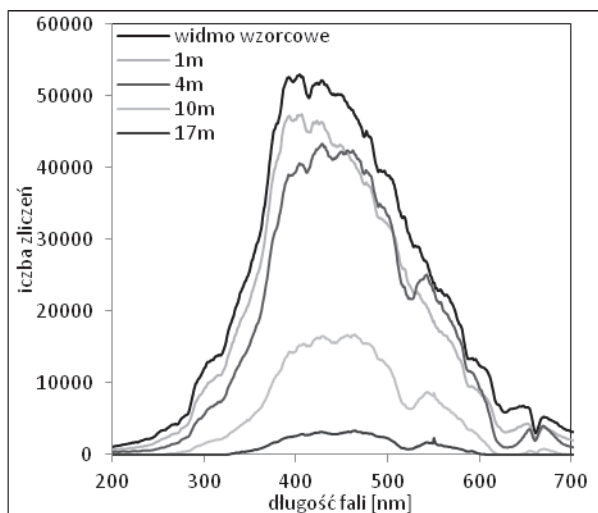
W porównaniu z widmem oryginalnym dla dnia słonecznego, charakterystyka dla dnia pochmurnego (rys. 7) jest nieco inna – występuje niewielkie przesunięcie w kierunku fal dłuższych. Widać również osłabienie promieniowania w niektórych punktach pomiarowych. Możliwym powodem takiego efektu jest fakt, iż rozproszone przez chmury promieniowanie ma większą zawartość barw niebieskawych, a mniejszą czerwonych.

Powstałe w charakterystyce widm promieniowania odbitego od koncentratora zniekształcenia są bardzo niewielkie. Oznacza to, że światło odbite od koncentratora może być przesyłane do pomieszczeń za pomocą układu światłowodów i będzie przyjazne dla oka ludzkiego.

WIDMA ŚWIATŁA TRANSMITOWANEGO PRZEZ ŚWIATŁOWÓD

Elementem instalacji powodującym istotniejsze zniekształcenie charakterystyki widmowej jest medium transmitujące tj. światłowód. Widmo światła transmitowanego zmienia się w zależności od długości użytego światłowodu. W celu zbadania tej cechy do analizy transmisji światła dziennego użyto włókna światłowodowego o średnicy 0,85 mm i wybranych długościach: 1, 4, 10 i 17 m, a powstałe charakterystyki widmowe porównano z widmem wzorcowym. Wyniki zaprezentowane zostały na wykresach (rys. 8 i 9).

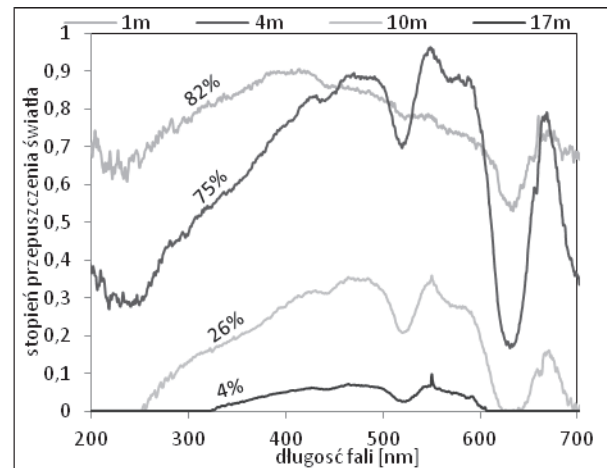
Przeprowadzone pomiary pozwoliły wyznaczyć właściwości transmisji światła przez światłowody, tj. stopień przepuszczania światła w zależności od długości fali oraz całkowity współczynnik przepuszczania światła przez światłowód. Rys. 8 przedstawia nieznormalizowane charakterystyki widmowe, gdzie na osi rzędnych przedstawiona została liczba zliczeń poszczególnych fal w danym przedziale długości.



Rys. 8. Oryginalne (nieznormalizowane) widma światła po przejściu przez światłowód dla wybranych długości (światło nieskoncentrowane)

Na wykresie (rys. 8) jest wyraźnie widoczne, że ilość światła zmniejsza się z długością użytego światłowodu. Stopień przepuszczania światła w funkcji długości fali dla wybranych długości światłowodu przedstawiono na wykresie (rys. 9). Widoczne jest, że dla długości do ok. 5 m strata światła jest względnie niewielka – przechodzi ok. 70% światła wprowadzanego do światłowodu. Natomiast dla większych długości – ok. 10 m, ta strata stanowi praktycznie 3/4 wprowadzanego światła. Dla długości 17 m tylko 4% światła zos-

tało przepuszczone przez światłowód. Przeprowadzona analiza i otrzymane wyniki pozwalają wywnioskować, że dla tego typu światłowodu użyteczna długość to ok. 5 m. Długości między 5 a 10 m są jeszcze możliwe do stosowania, natomiast światłowody o długościach rzędu 15 m stanowią granicę transportu użytecznych (w celach oświetleniowych) ilości światła.

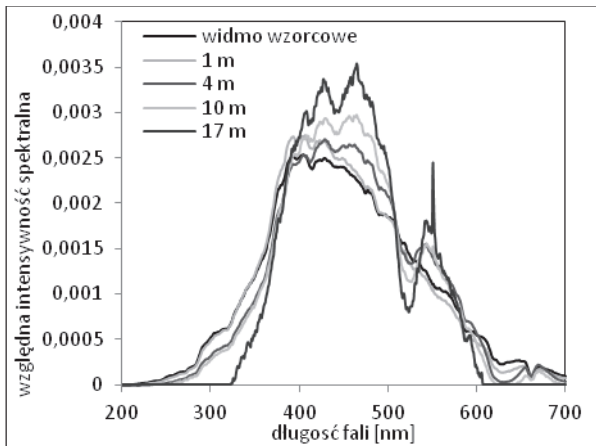


Rys. 9. Stopień przepuszczania światła po przejściu przez światłowód w funkcji długości fali dla wybranych długości światłowodu (światła nieskoncentrowanego)

Wyniki przytoczone na rys. 9 wyraźnie wskazują, że wraz z długością rośnie zniekształcenie światła. Słabo przepuszczane staje się światło ultrafioletowe, jednak nie ma to znaczenia dla celów oświetleniowych. Dla zakresu widzialnego 380-780 nm nieco lepiej przepuszczane jest światło niebieskie i zielone niż żółte czy czerwone. Dość silne tłumienie zaobserwowano dla fali o długości ok. 630 nm, odpowiada to światłu pomarańczowemu, tłumienie to obejmuje jednak niewielki zakres długości fali, więc nie ma istotnego znaczenia. Istotną cechą jest to, że dla długości światłowodu powyżej 10 m obserwuje się odcięcie światła czerwonego, co będzie skutkowało tym, że światło po wyjściu ze światłowodu będzie sprawiało wrażenie światła zimnego, o odcieniu nieco bardziej niebieskawym niż światło słoneczne.

W kolejnym etapie przeprowadzono analizę powstałych na skutek transmisji światła zniekształceń. W tym celu wykonano normalizację widma przedstawionego na wykresie (rys. 10). Krok ten pozwolił sprawdzić, jakie jest ograniczenie transmisji ze względu na zniekształcenie widma. Wykres prezentuje widma znormalizowane, na których widoczne są zauważalne zniekształcenia dla światłowodu o długości 10 m oraz silniejsze dla światłowodu 17-metrowego.

Pomimo widocznych zniekształceń, widmo nadal ma charakter widma światła słonecznego i jest ciągle. Dla fal od długości ok. 600 nm zaobserwować można absorpcję, jednakże nie jest to istotne zniekształcenie. Analiza rys. 10 potwierdza, że dobre parametry światła dla transmisji na odległość do 10 m i zadowalające do maksymalnie zbadanej 17 m.



Rys. 10. Znormalizowane widmo światła po przejściu przez światłowód dla wybranych długości (światło nieskoncentrowane)

WNIOSKI

Szereg wykonanych pomiarów dostarczył istotnej wiedzy pod kątem budowy układu doświetlania pomieszczeń. Przeanalizowano m.in. wpływ usytuowania głowicy względem koncentratora, efekty związane ze zmianą położenia koncentratora wskutek śledzenia położenia słońca oraz szereg relacji zachodzących podczas transmisji promieniowania światłowodem, w tym m.in. zniekształcenie widma światła. W badaniach uzyskano znaczne wzmocnienie światła, co świadczy na korzyść stosowania urządzenia koncentrującego promieniowanie słoneczne. Ponadto, dowiedziono, że światło z układu koncentratora ma parametry bardzo zbliżone do światła dziennego, o ile do przesyłu użyte zostaną kable światłowodowe nie dłuższe niż 10 m – zwłaszcza ze względu na duże straty ilościowe w transmisji.

Podziękowania

Serdeczne podziękowania dla mgr inż. Krzysztofa Sornka, inż. Franciszka Włodarza oraz Konrada Chojnackiego za pomoc przy budowie stanowiska pomiarowego, a także za pomoc w pomiarach

Praca finansowana z działalności statutowej Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego WEiP AGH.

SPIS SYMBOLI

d	odległość światłowodu od czujnika natężenia oświetlenia	m
ϕ_1	strumień świetlny dla światła emitowanego przez końcówkę światłowodu znajdującego się w ciemni	lm
ϕ_2	strumień świetlny dla światła zewnętrznego padającego na głowicę światłowodową	lm
I_{1sr}	średnie natężenie oświetlenia mierzone w ciemni	lux
I_{2sr}	średnie natężenie oświetlenia mierzone na zewnątrz	lux
S	pole powierzchni kabla światłowodowego	m ²

LITERATURA CYTOWANA

- Filipowicz M., Wajss P., Tomski M., Szubel M., Sornek K., Bożek E., Gastoł M., 2012, *Wykorzystanie skoncentrowanego promieniowania słonecznego w warunkach polskich*, Rynek Instalacyjny 12/2012, s. 30-32
- Kandilli C., Ulgen K., Hepbasli A., 2008, *Exergetic assessment of transmission concentrated solar energy*, Energy and Buildings 40, s. 1505-1512
- Kischkoweit-Lopin M., 2002, *An overview of daylighting systems*, Solar Energy Vol. 73, No 2, s. 77-82
- Mori K., 1985, *Photoautotrophic bioreactor using visible solar rays condensed by fresnel lenses and transmitted*, Biotechnol Bioeng Symp, s. 31-44
- Muhs J., Earl D., 2001, *Full-spectrum solar energy systems for use in commercial building*, Proceedings of the 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference ASME
- Nakamura T., Case J. A., Jack D. A., Cuello J. L., 1999, *Optical waveguide solar plant lighting system for life support in space*, Proceedings of the 29th International Conference on Environmental Systems, PA: ICES/SAE
- Ono E., Cuello J. L., 2004, *Design parameters of solar concentrating systems*, Energy 29, s. 1651-1657