

Miroslaw ŻUKOWSKI

e-mail: m.zukowski@pb.edu.pl

Katedra Ciepłownictwa, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, Białystok

Modelowanie zjawisk wymiany ciepła i transportu masy w solarnym podgrzewaczu powietrza

Wstęp

W strategii rozwoju energetyki odnawialnej, opracowanej przez Ministerstwo Środowiska podzielono technologie wykorzystujące odnawialne źródła energii na trzy kategorie, a kryterium stanowiły rosnące koszty produkcji energii. W pierwszej grupie urządzeń znalazły się powietrzne kolektory słoneczne, które charakteryzowały się najniższym kosztem wytworzenia ciepła – porównywalnym do kosztów osiąganych w źródłach zasilanych paliwem konwencjonalnym.

Sprawność powietrznych kolektorów słonecznych jest jednak mniejsza niż kolektorów, w których czynnik roboczy stanowi ciecz. Jest to związane przede wszystkim z tym, że powietrze charakteryzuje się małą wartością przewodności i pojemności cieplnej oraz stosunkowo dużym oporem przejmowania ciepła. Wpływa to na zmniejszenie efektywności energetycznej tych urządzeń. Jednak na korzyść kolektorów powietrznych, w porównaniu do cieczowych, przemawia bardzo prosta konstrukcja, praktycznie bezawaryjna praca, niewrażliwość na przegrzanie i zamarzanie, a także w większości przypadków ponad dwukrotnie niższa cena.

Konstruktorzy kolektorów powietrznych używają różnych sposobów zwiększenia powierzchni wymiany ciepła w celu podwyższenia ich efektywności energetycznej. Jednym z nich jest zastosowanie różnych kształtów absorbera, np.: pofalowanego [Belusko *i in.*, 2005], wykonanego w postaci prostokątnych kanałów [Youcef-Ali *i Desmons*, 2006] lub o profilu w kształcie litery V [Tchinda, 2009]. Często do powierzchni absorbującej promieniowanie słoneczne przymocowywane są żebra o różnej konstrukcji [Ho *i in.*, 2011].

W celu zwiększenia sprawności solarnych podgrzewaczy powietrza można zastosować technikę strumieni uderzających w powierzchnię wymiany ciepła. W tym przypadku występuje zerwanie laminarnej warstwy przyściennej, co skutkuje znacznym zmniejszeniem oporu przewodzenia ciepła. Przykład zastosowania strumieni o kształcie osiowo-symetrycznym można znaleźć w pracy [Belusko *i in.*, 2008] dotyczącej kolektorów powietrznych zintegrowanych z konstrukcją dachu.

Autor niniejszej pracy opracował prototypową konstrukcję podgrzewacza powietrza, w której zastosował mikrostrumienie szczelinowe uderzające pod kątem prostym w płytę absorbera. Celem pracy jest oszacowanie dokładności opracowanego modelu zjawisk wymiany ciepła zachodzących w testowanym urządzeniu.

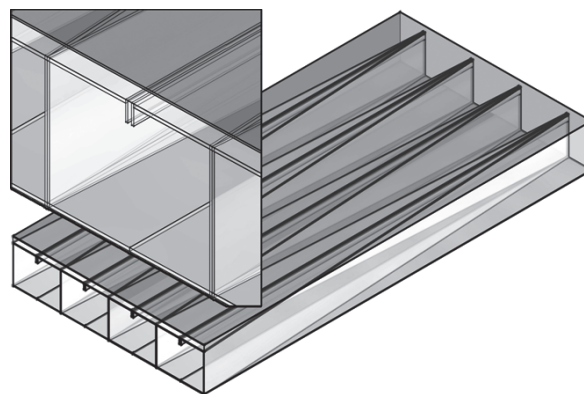
Opis konstrukcji kolektora powietrzego

Powtarzalny element konstrukcyjny mikrostrumieniowego powietrznego wymiennika ciepła składa się z dwóch kanałów: jeden doprowadza powietrze do dyszy generującej mikrostrumień, a drugi odprowadza powietrze, które uderzyło w powierzchnię absorbera. Oba kanały mają kształt graniastosłupa trójkątnego.

Do kanałów zasilających wpływa powietrze z rozdzielacza wlotowego. W poziomej płycie rozdzielającej znajduje się wąska dysza o przekroju prostokątnym. W niej formuje się szczelinowy mikrostrumień powietrza, który uderza w powierzchnię wymiany ciepła i ogrzewając się lub ochładzając przepływa kanałami do rozdzielacza powrotnego. Ten rodzaj konstrukcji zapewnia, że na całej długości wymiennika występują równomierne straty ciśnienia. Jest to bardzo ważne ze względu na konieczność uzyskania tej samej prędkości mikrostrumienia wypływającego z dyszy.

Zaproponowane urządzenie może służyć do konwersji energii promieniowania słonecznego na ciepło, jako element chłodzenia paneli fo-

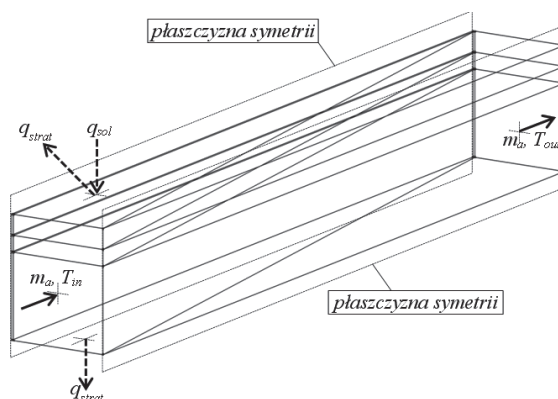
tovoltaicznych lub jako typowy wymiennik ciepła, w którym po drugiej stronie powierzchni wymiany ciepła, jako czynnik roboczy może być gaz lub ciecz. W zależności od wymaganej charakterystyki wymiennika element powtarzalny można łączyć równoległe lub szeregowo. Na rys. 1 pokazano przykładowe wykonanie urządzenia przy równoległym połączeniu kanałów.



Rys. 1. Prototypowy mikrostrumieniowy podgrzewacz powietrza

Opis modelu CFD kolektora powietrzego

W celu opracowania optymalnej konstrukcji prototypu wymiennika ciepła jako narzędzie badawcze zastosowano symulacje komputerowe. Sporządzono trójwymiarowe modele urządzenia w środowisku oprogramowania *Fluent v. 14.0.0* (pakiet *ANSYS Academic Research CFD*). Szkic modelowanego obszaru przepływu, będący elementem powtarzalnym, zaprezentowano na rys. 2.



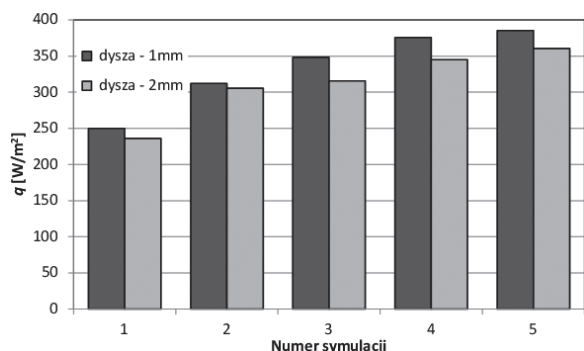
Rys. 2. Szkic modelowanego obszaru przepływu elementu powtarzalnego

Geometrię modeli oraz siatki obliczeniowe wygenerowano za pomocą preprocesora *Academic GAMBIT v. 2.4*. Siatka obliczeniowa, którą pokryto obszar przepływu składała się z 2 848 089 punktów węzłowych w przypadku dyszy o szerokości 1 mm oraz 3 121 999 punktów dla dyszy o szerokości 2 mm. Zastosowano model turbulencji $\kappa-\epsilon$ z opcją SST, który jest często zalecany do analizy wymiany ciepła i transportu masy zachodzących w rejonie uderzenia mikrostrumienia [Park *i in.*, 2003]. Warunkiem granicznym na powierzchni absorbującej promieniowanie cieplne była stała wartość gęstości strumienia ciepła deklarowana przy użyciu modelu *Solar Ray Tracing Algorithm* [Tan *i Chen*, 2010], która była równa 450 W/m^2 oraz 900 W/m^2 .

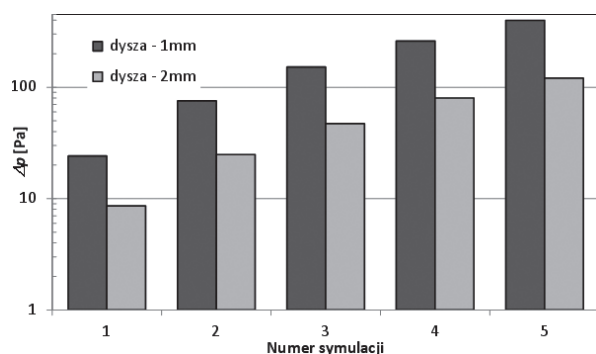
Wyniki symulacji

W pracy przedstawiono jedynie wybrane wyniki obliczeń. Zakres prezentowanych poniżej rezultatów symulacji obejmował zmianę wartości strumienia masy powietrza m_a , zawierających się w przedziale od 0,001 do 0,005 kg/s (skok 0,001 kg/s), co odpowiadało prędkościom wypływu mikrostrumienia od 2,4 do 13,4 m/s (szczelina: 2 mm) oraz od 4,6 do 24 m/s (szczelina: 1 mm). Przyjęto stałą temperaturę nawiewanego powietrza i otoczenia $T_{in} = 20^\circ\text{C}$. Gęstość strumienia promieniowania słonecznego q_{sol} wynosiła 450 W/m^2 .

Na rys. 3 i 4 zaprezentowano wybrane wyniki pięciu serii obliczeniowych. Numery symulacji odpowiadają kolejnym wartościom strumienia masy powietrza: 0,001; 0,002; 0,003; 0,004; 0,005 kg/s.



Rys. 3. Gęstość strumienia ciepła przekazywana z absorbera do powietrza przepływającego przez wymiennik

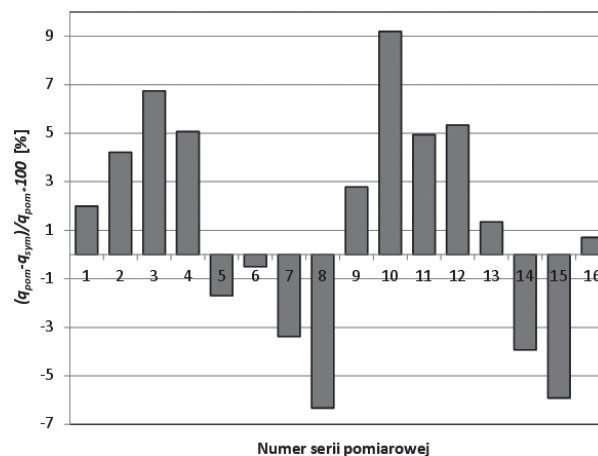


Rys. 4. Spadek ciśnienia występujący przy przepływie powietrza przez wymiennik

Analiza powyższych wykresów pokazuje, że zastosowanie dyszy o szerokości 1 mm jest efektywniejsze energetycznie w porównaniu do użycia dwa razy szerszej szczeliny. Różnica w ilości konwertowanej energii promieniowania na ciepło wynosi średnio ponad 6%. Wyższa sprawność cieplna urządzenia z 1 mm dyszą wynika z większych prędkości mikrostrumienia, a tym samym większych wartości współczynników przejmowania ciepła po wewnętrznej stronie absorbera. Jednak jest to okupione wzrostem strat ciśnienia o ponad 60%. Po uwzględnieniu różnicy w zużyciu energii elektrycznej napędzającej wentylator, odpowiadającej obu przypadkom, zastosowanie węższej dyszy okazało się nadal bardziej efektywnym rozwiązaniem. Ze względu na ograniczony zakres publikacji nie zostały poruszone zagadnienie związane między innymi z wpływem wymiarów kanałów i odległości dyszy od absorbera na charakterystykę cieplną i przepływową urządzenia.

Na bazie symulacji CFD autor wykonał prototyp mikrostrumieniowego podgrzewacza powietrza z dyszą o szerokości 1 mm i przeprowadził szereg badań laboratoryjnych, w różnych warunkach eksploatacyjnych [Żukowski, 2013]. W celu dalszego doskonalenia zaproponowanej konstrukcji oraz opracowania innych zastosowań urządzenia postanowiono zweryfikować dokładność przeprowadzonych symulacji numerycznych. W tym celu porównano wyniki 16 serii pomiarowych q_{pom} (zmieniano wartości $m_a = 0,001; 0,002; 0,003; 0,004 \text{ kg/s}$, $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ i 25°C oraz $q_{sol} = 450$ i 900 W/m^2), z rezultatami obliczeń komputerowych q_{sym} gęstości strumienia ciepła absorbowanego przez powietrze przepływające przez wymiennik.

Jak można zauważyć na rys. 5, symulacje CFD okazały się dokładnym narzędziem badawczym, gdyż różnica wartości nie przekraczała 10%. W przypadku tego rodzaju zastosowań inżynierskich można mówić o stosunkowo dużej dokładności.



Rys. 5. Porównanie wyników pomiarów i symulacji CFD

Podsumowanie i wnioski

W pracy zaprezentowano prototyp solarnego podgrzewacza powietrza wykorzystującego w swej budowie technikę mikrostrumieni uderzających w powierzchnię wymiany ciepła. W celu opracowania konstrukcji prototypu i ograniczenia zakresów badań doświadczalnych zastosowano symulacje CFD.

Wyniki obliczeń oraz eksperymentów potwierdziły, że testowane urządzenie jest rozwiązaniem efektywnym pod względem energetycznym. Jego sprawność cieplna, definiowana jako stosunek energii konwertowanej na ciepło do całkowitej energii promieniowania padającej na absorber, mieściła się w granicach od 60% do około 90%. Należy nadmienić, że badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, czyli nie występował wpływ wiatru na straty ciepła.

Porównanie rezultatów obliczeń numerycznych oraz wyników eksperymentu świadczy o stosunkowo dużej dokładności wykonanych symulacji zjawisk wymiany ciepła z zastosowaniem algorytmów komputerowej mechaniki płynów.

LITERATURA

- Belusko M., Saman W., Bruno F., 2005. *Analysis of a roof integrated solar air collector* [in:] Proceedings of the ISES Solar World Congress 2005: Bringing Water to the World. Orlando, Florida, USA, August 6-12, 2005, 400-405
- Belusko M., Saman W., Bruno F., 2008. Performance of jet impingement in unglazed air collectors. *Solar Energy*, **82**, 389-398. DOI: 10.1016/j.solener.2007.10.005
- Ho C.-D., Yeh H.-M., Chen T.-C., 2011. Collector efficiency of upward-type double-pass solar air heaters with fins attached. *Int. Com. Heat Mass Transfer*, **38**, 49-56. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.09.015
- Park T.H. et al., 2003. Streamline upwind numerical simulation of two-dimensional confined impinging slot jets. *Heat Mass Trans.*, **46**, 251-262. DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00270-3
- Tchinda R., 2009. A review of the mathematical models for predicting solar air heaters systems. *Ren. Sust. Energy Rev.*, **13**, 1734-1759. DOI: 10.1016/j.rser.2009.01.008
- Tan T., Chen Y., 2010. Review of study on solid particle solar receivers. *Ren. Sust. Energy Rev.*, **14**, 265-276. DOI: 10.1016/j.rser.2009.05.012
- Youcef-Ali S., Desmons J.Y., 2006. Numerical and experimental study of a solar equipped with offset rectangular plate fin absorber plate. *Renewable Energy*, **31**, 2063-2075. DOI: 10.1016/j.renene.2005.10.008
- Żukowski M., 2013. Heat transfer performance of a confined single slot jet of air impinging on a flat surface. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **57**, 484-490. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.069

Praca była finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy N N523 615539: „Badania wymiennika ciepła opartego o mikrostrumienie uderzające w powierzchnię wymiany ciepła”.