

Wyzwania techniczne w optymalizacji wydajności wielkopowierzchniowych instalacji solarnych BigSolar współpracujących z magazynami ciepła

Adrian Pason 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Niezależnych, Kraków

Streszczenie: Transformacja ciepłownictwa jest jednym z kluczowych tematów dotyczących całości transformacji energetycznej w Polsce. Zgodnie z założeniami opracowywanej obecnie strategii rozwoju ciepłownictwa w Polsce głównym kierunkiem zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w ciepłownictwie powinno być ciepło systemowe, które jak dotąd z odnawialnych źródeł energii w praktyce nie korzysta lub korzysta w bardzo ograniczonym zakresie. W pracy omówiono istotę instalacji wielkopowierzchniowych kolektorów słonecznych oraz sezonowych magazynów ciepła zintegrowanych z miejskim systemem ciepłowniczym, wskazując możliwe rozwiązania jako stabilne źródła OZE do wykorzystania w procesie transformacji energetycznej.

Jednocześnie zaprezentowano koncepcję zwiększenia sprawności wytwarzania ciepła w samym absorberze dzięki wykorzystaniu elementów kształtujących przepływ nośnika ciepła.

Słowa kluczowe: kolektory słoneczne, magazyn ciepła, absorber, ciepłownictwo systemowe, transformacja energetyki, nowe materiały dla OZE

TECHNICAL CHALLENGES IN OPTIMIZING THE EFFICIENCY OF BIGSOLAR LARGE-AREA SOLAR INSTALLATIONS COOPERATING WITH HEAT STORAGE

Abstract: The transformation of the heating sector in Poland is one of the key topics concerning the entire energy transformation in Poland. According to the assumptions of the currently developed strategy for the development of heating in Poland, the main direction of increasing the share of renewable energy in heating should be system heat, which so far does not use renewable energy sources in practice or uses it to a very limited extent.

The paper discusses the implementation technologies for the installation of large-area solar collectors and seasonal heat stores integral with the municipal heating system, indicating possible solutions as stable sources of renewable energy sources to be used in the energy transformation process. At the same time, it was indicated how the efficiency of heat generation in the absorber itself can be increased.

Keywords: solar collectors, heat storage, absorber, district heating, energy transformation, new materials for renewable energy

https://doi.org/10.7494/978-83-66727-83-0_6

1. Wprowadzenie

Jako kraj i członek Wspólnoty Europejskiej stoimy przed wielkim wyzwaniem. Zgodnie z krajowymi i europejskimi celami ochrony klimatu dostawy ciepła do 2050 roku powinny być realizowane w sposób neutralny dla klimatu. Celem artykułu jest zaprezentowanie koncepcji i technologii wdrożenia instalacji kolektorów słonecznych zintegrowanych z miejskim systemem ciepłowniczym z jednoczesnym wskazaniem, jakim wyzwaniom muszą sprostać termiczne kolektory słoneczne.

Z uwagi na istniejącą infrastrukturę i konieczność przejścia na bardziej ekonomiczne dostawy ciepła potencjał wykazuje transformacja źródeł pozyskiwania ciepła w miejskich przedsiębiorstwach ciepłowniczych z konwencjonalnych na odnawialne.

Z technicznego punktu widzenia, oprócz instalacji kolektorów słonecznych, wykorzystanie magazynów ciepła w lokalnym systemie ciepłowniczym jest w pełni uzasadnione zarówno ze względu na większe bezpieczeństwo funkcjonowania systemu i ograniczenie kosztów eksploatacji oraz pozyskiwania ciepła. Ponadto włączenie instalacji kolektorów słonecznych do zasilania miejskich sieci ciepłych pozwala na:

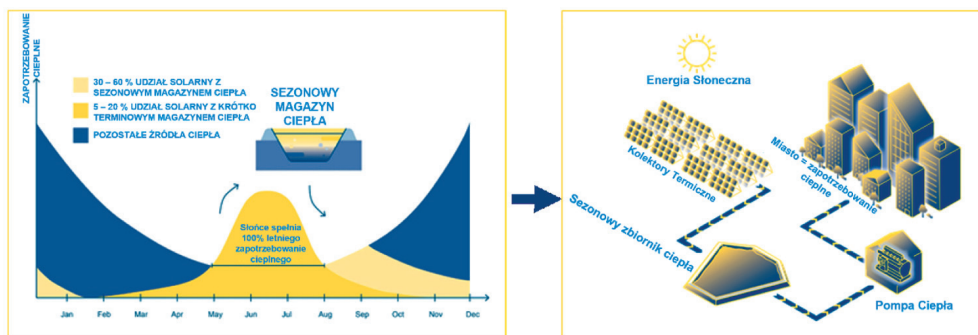
- eliminację emisji szkodliwych substancji pochodzących ze spalania paliw kopalnych do atmosfery w miesiącach letnich,
- znaczne ograniczenie lub całkowitą eliminację emisji szkodliwych substancji pochodzących ze spalania paliw kopalnych do atmosfery w pozostałej części roku,
- zwiększenie udziału energii odnawialnej i znaczne ograniczenie emisji CO₂, co umożliwi osiągnięcie lokalnych oraz krajowych celów klimatycznych,
- zastępowanie paliw kopalnych w instalacjach kogeneracyjnych, w których latem nie ma produkcji ciepła lub produkcja ta nie jest opłacalna.

Dzięki odpowiedniemu zwymiarowaniu sezonowy magazyn ciepła może również gromadzić nadwyżkę wytworzonego ciepła do wykorzystania w późniejszym okresie (jesień, zima). Zarówno sezonowy magazyn ciepła, jak i powiązana z nim instalacja wielkopowierzchniowych kolektorów słonecznych muszą być dostatecznie duże. Wielkopowierzchniowe kolektory słoneczne można instalować na otwartej przestrzeni lub wbudować w powierzchnie dachowe budynków. Do tego celu można wykorzystać różne typy kolektorów słonecznych: kolektory płaskie czy próżniowe o powierzchni wahającej się od 500 m² do nawet 150 000 m². Koszt produkcji ciepła w takich instalacjach wynosi mniej niż 50 euro za megawatogodzinę i, co najważniejsze, jest niezmienny przez cały okres użytkowania instalacji solarnej (średnio ok. 20–25 lat).

W literaturze znaleźć można przykłady monitorowania parametrów pracy wielkoskalowych instalacji solarnych zintegrowanych z siecią ciepłowniczą. W szczególności na przykład w pracy Noussana i in. (2017) znaleźć można wyniki monitorowania kilku

Obecnie oczekuje się, aby wielkoskalowe instalacje solarne skojarzone z sezonowym zasobnikiem ciepła oraz często zintegrowane z siecią ciepłowniczą miały możliwie wysoką sprawność, którą generalnie osiągnąć można przez redukcję strat cieplnych kolektora i zmiany konstrukcyjne. W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję zastosowania elementów kształtujących przepływ wykonanych jako lokalne przetłoczenia rury absorbera, stanowiących czynnik modyfikujący miejscowo przepływ medium w kolektorach wielkopowierzchniowych, co pozwala prognozować wzrost sprawności kolektora.

Za wielkoskalową instalację kolektorów słonecznych uznaje się instalację o powierzchni co najmniej 500 m². Instalacja OZE zaspokaja około 50% zapotrzebowania na energię cieplną, a dzięki sprzężeniu z konwencjonalnym źródłem ciepła – kotłownią gazową, możliwe jest zaspokojenie pozostałych 50% zapotrzebowania. Wizualizację typowej instalacji tego typu przedstawiono na rysunku 1.

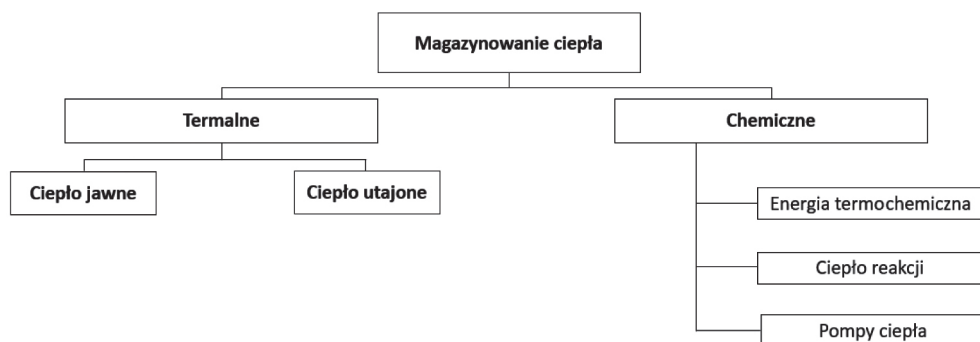


Rys. 1. Wizualizacja typowej lokalnej sieci ciepłowniczej wykorzystującej wielkoskalową instalację kolektorów wielkopowierzchniowych i sezonowy zasobnik ciepła

W lokalnych sieciach ciepłowniczych wyróżnić można następujące podstawowe elementy funkcjonalne instalacji:

- źródło ciepła OZE – wielkoskalowa instalacja kolektorów wielkopowierzchniowych,
- tradycyjne źródło ciepła – elektrociepłownia lub lokalna kotłownia z kotłem gazowym, olejowym lub innym alternatywnym źródłem szczytowym,
- sezonowy zasobnik ciepła,
- wymienniki ciepła,
- system transportu nośników ciepła,
- armatura,
- instalacja AKPiA z elementami regulującymi / sterującymi,
- odbiorniki ciepła u konsumentów.

Działanie zasobnika ciepła może się opierać na różnych prawach fizyki i chemii. Najprostszym rozwiązaniem jest wykorzystanie nośnika ciepła o względnie dużej wartości ciepła właściwego. Inną możliwością jest wykorzystanie przemian fazowych w materiale jako akumulatora energii. Można również zamienić energię cieplną na inny rodzaj energii, na przykład energię kinetyczną lub potencjalną. Na rysunku 2 pokazano możliwości magazynowania ciepła według klasyfikacji zaproponowanej przez Sarbu i Sebarchievicię (2018).



Rys. 2. Schemat ukazujący różne możliwości magazynowania ciepła

Źródło: opracowanie własne na podstawie Sarbu i Sebarchievici (2018)

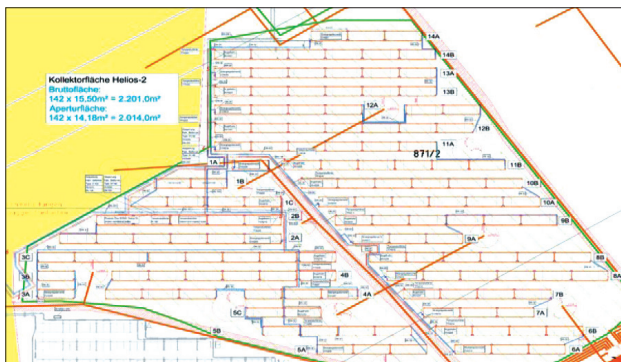
Z technicznego, ekologicznego i ekonomicznego punktu widzenia w przypadku instalacji wielkoskalowych optymalnym rozwiązaniem sezonowego zasobnika ciepła jest wykorzystanie zbiornika z wodą. Energię cieplną można gromadzić w sezonowych zasobnikach z wodą na cztery różne sposoby. Pierwszy z nich to odpowiednio izolowany termicznie i wytrzymały mechanicznie zasobnik umieszczony nad poziomem gruntu lub zbiornik zagłębiony w terenie (wpływa to na koszty izolacji). Do magazynowania

ciepła można też wykorzystywać warstwy wodonośne lub wykonywać odwierty. Omawiane zasobniki najczęściej klasyfikujemy w zależności od zastosowanych rozwiązań technicznych: BTES – odwiertowe magazyny ciepła, ATES – magazyn energii warstwy wodonośnej, PTES – magazyn energii w zbiorniku ziemnym, TTES – magazyn energii w zasobniku stalowym. Szersze omówienie tych rozwiązań znaleźć można m.in. w pracy Dahasha i in. (2019).

Na podstawie profilu obciążenia sieci ciepłowniczej (nierzadko z uwzględnieniem dostępnego wolnego terenu) obliczana jest wielkość i moc instalacji solarnej oraz dobiera się wielkość sezonowego zasobnika ciepła. Na ogół zasobniki takie mają objętość od kilku tysięcy metrów sześciennych (zasobniki stalowe) do kilkudziesięciu tysięcy metrów sześciennych (magazyny i zbiorniki ziemne).

Ponad 96% wielkoskalowych instalacji solarnych wykorzystuje kolektory płaskie. Tylko około 4% pracujących instalacji opiera się na zastosowaniu kolektorów próżniowych. Dominującym rozwiązaniem przeznaczonym do zastosowania w wielkoskalowych instalacjach kolektorów słonecznych są wielomodułowe kolektory wielkopowierzchniowe. Największe produkowane kolektory wielkopowierzchniowe mogą mieć powierzchnię brutto wynoszącą 24 m^2 , co odpowiada powierzchni absorbera ponad 22 m^2 . Takie rozwiązania techniczne przeznaczone są jednak do wąskiej grupy projektów. Większość producentów wyspecjalizowanych w kolektorach wielkopowierzchniowych preferuje rozwiązania o powierzchni $8\text{--}16 \text{ m}^2$.

Specyfika wielkoskalowej instalacji wielkopowierzchniowych kolektorów solarnych obejmuje układ połączeń poszczególnych kolektorów z uwzględnieniem strat ciepła i oporów przepływu powstających w takiej instalacji. Schemat połączeń przykładowej instalacji wielkoskalowej ukazano na rysunku 3.



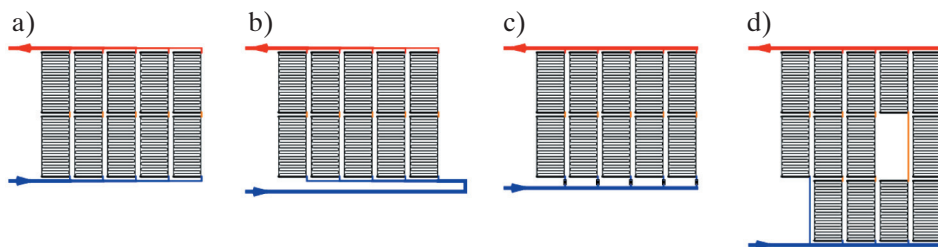
Rys. 3. Schemat instalacji wielkoskalowej kolektorów wielkopowierzchniowych

Przedstawiona na rysunku 3 instalacja ma ponad 6000 m^2 powierzchni. Podzielona została na trzy sekcje, przy czym każda sekcja zawiera 2100 m^2 kolektorów wielkopowierzchniowych o powierzchni około $12,6 \text{ m}^2$ każdy. Instalacja pracuje na mieszaninie

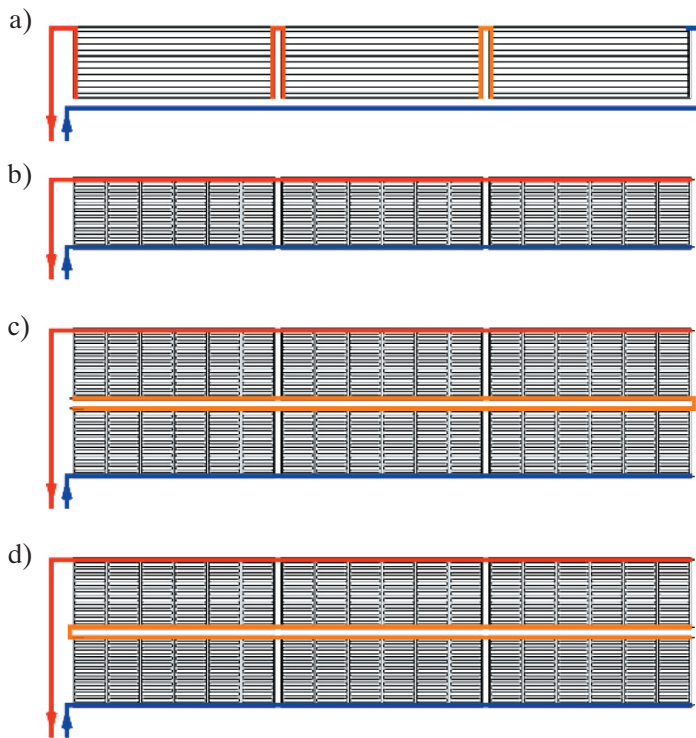
wody i glikolu przy znamionowych parametrach: temperatura medium na wejściu 50–55°C, temperatura medium na wyjściu 90–110°C. Przepływ medium wynosi w zależności od nasłonecznienia około 16–60 m³/h. Rysunek 3 dobrze ilustruje stopień złożoności instalacji. Szczególnego znaczenia nabiera zapewnienie właściwego przepływu medium przez składowe kolektory oraz uwzględnienie indukowanych temperaturą zmian parametrów fizykochemicznych tego medium. Medium przepływając przez długie odcinki instalacji, nagrzewa się, co powoduje deregulację, utratę równowagi instalacji. Dodatkowo długie odcinki instalacji, zwłaszcza wymienniki kolektorów wykonane z rur o względnie małych średnicach, generują znaczne opory przepływu i tym samym spadki ciśnienia w instalacji. W efekcie zjawiska mające drugorzędne znaczenie w małych, domowych instalacjach w instalacjach wielkoskalowych stają się kluczowe.

Istotne jest zaprojektowanie instalacji oraz konstrukcji i materiałów składowych kolektorów wielkopowierzchniowych, które zminimalizują opisane powyżej niekorzystne zjawiska. Z tego powodu w praktyce stosowane mogą być różne warianty połączeń kolektorów wielkopowierzchniowych w grupy.

Właściwy przepływ medium w instalacji wielkoskalowej jest limitowany m.in. oporami przepływu, które zależą od konstrukcji kolektora wielkopowierzchniowego, zastosowanych połączeń oraz lokalnych elementów stanowiących opory przepływu. W związku z tym preferowane są systemy umożliwiające w pewnym zakresie samoregulację, tzw. pętle w układzie Tichelmanna. Możliwe są również alternatywne układy połączeń. Standardem jest zastosowanie w rozpatrywanych instalacjach zmiennych średnic rur zbiorczych, co ogranicza w pewnym stopniu opory przepływu (Bavaa i in. 2016). Przegląd różnych układów połączeń kolektorów wielkopowierzchniowych przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Szczególnie istotny przy wyborze układu połączenia jest rodzaj wymiennika ciepła absorbera wielkopowierzchniowego. Inne rozwiązania są przeznaczone do wymienników meandrowych, a inne do harfowych. W niektórych przypadkach konieczna jest dodatkowa kompensacja oporów przepływu przez zastosowanie odpowiednich zaworów równoważących przepływ.



Rys. 4. Różne warianty połączeń kolektorów wielkopowierzchniowych w instalacjach wielkoskalowych: a) układ z dostosowanym rozmiarem rur zbiorczych; b) układ Tichelmanna z dostosowanym rozmiarem rur zbiorczych; c) instalacja z zaworami regulacyjnymi; d) instalacja z dodatkowymi rurami kompensacyjnymi

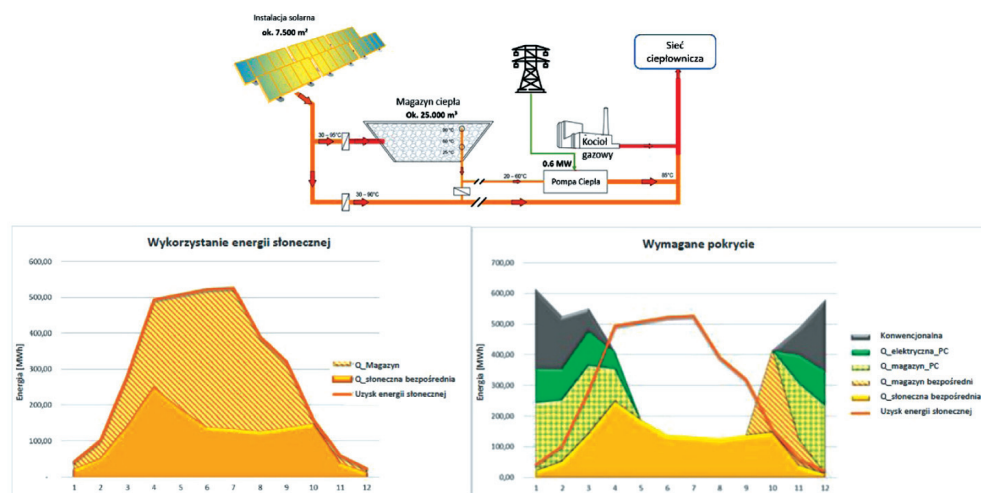


Rys. 5. Różne warianty połączeń kolektorów wielkopowierzchniowych w zależności od rozwiązania wymiennika absorbera: a) układ szeregowy z absorberami harfowymi; b) układ równoległy z absorberami meandrycznymi; c), d) układ szeregowo-równoległy

Przedstawiony na rysunku 6 schemat instalacji wielkoskalowej kolektorów wielkopowierzchniowych z zasobnikiem ciepła oraz zainstalowaną sprężarkową pompą ciepła ukazuje łączną ilość wygenerowanej energii z pola kolektorów słonecznych, całkowity uzysk energii słonecznej, udział poszczególnych źródeł ciepła w całorocznej produkcji energii, jak również straty ciepła w poszczególnych elementach instalacji. W przypadku orurowania pola kolektorów oraz rur transportujących medium do wymiennika starty te nie są duże i wynoszą poniżej 1% wygenerowanej energii. Natomiast straty w zasobniku są bardziej znaczące, wynoszą od kilku do nawet kilkunastu procent w zależności od rodzaju i sposobu magazynowania energii (mniejsze w zbiornikach stalowych, większe w przypadku ziemnych magazynów energii). Największe straty występują w części dystrybucyjnej sieci ciepłej, która kieruje ciepło do miejsca jego konsumpcji (jest to instalacja na cele przemysłowe, a więc instalacja kompaktowa – w rzeczywistej instalacji rozdzielającej ciepło do poszczególnych budynków starty byłyby większe). Powyższe aspekty wpływają na zakres temperatur pracy poszczególnych elementów instalacji oraz samych kolektorów wielkopowierzchniowych.

Funkcjonowanie instalacji wielkoskalowej wielkopowierzchniowych kolektorów słonecznych produkującej energię ciepłą na potrzeby bytowe powinno spełniać standardy dotyczące instalacji CO i CWU:

- temperatura zasilania czynnika grzewczego: 75°C ,
- temperatura powrotu czynnika grzewczego: 55°C ,
- temperatura w pomieszczeniu: 20°C ,
- temperatura ciepłej wody: 55°C .



Rys. 6. Przykład schematu instalacji wielkoskalowej opartej na kolektorach wielkopowierzchniowych produkującej energię na potrzeby miejskiej sieci ciepłowniczej oraz roczna produkcja energii z zastosowanych źródeł

W celu zapewnienia oczekiwanych temperatur w urządzeniach odbiorczych korzystne byłoby uzyskanie jak najwyższej temperatury medium w kolektorze. Temperatura ta powinna umożliwiać właściwą pracę wymienników ciepła oraz uwzględniać straty w poszczególnych elementach instalacji. Dlatego inaczej niż w przypadku typowych, małych instalacji płaskich kolektorów słonecznych przeznaczonych do zaspokojenia zapotrzebowania na energię użytkową do przygotowania CWU instalacja wielkoskalowa z wielkopowierzchniowymi kolektorami będzie pracować przy temperaturach medium rzędu $80\text{--}100^{\circ}\text{C}$. Z uwagi na standardy sieci ciepłej jest to niezbędne, jednak równocześnie jest to niekorzystne dla sprawności kolektora.

3. Sprawność wielkopowierzchniowych kolektorów słonecznych

Sprawność kolektora określa się jako proporcję pomiędzy ilością energii promieniowania słonecznego padającej na absorber kolektora a ilością energii cieplnej prze-

kazanej przez wymiennik ciepła absorbera do medium. Sprawność kolektora zależy od jego konstrukcji, parametrów fizycznych materiałów płyty absorbera (szczególnie warstwy wysokoselektywnej), technologii wymiennika absorbera, transmitancji szyby i strat na poszczególnych przegrodach kolektora, ale również zależy od czynników zewnętrznych: prędkości wiatru, natężenia promieniowania słonecznego czy temperatury otoczenia. Ponadto na sprawność kolektora wpływ mają także współrzędne geograficzne, a także warunki pracy instalacji solarnej – przepływ medium przez wymiennik absorbera, jego rodzaj i temperatura oraz ułożenie kolektora w przestrzeni.

Straty energii dzieli się na dwie grupy:

- 1) straty optyczne – zależne od właściwości fizycznych szyby i absorbera,
- 2) straty ciepłe – zależne m.in. od temperatury medium oraz temperatury otoczenia.

W praktyce im niższe jest natężenie promieniowania słonecznego padającego na absorber lub im większa jest różnica pomiędzy temperaturą otoczenia a temperaturą medium wymiennika absorbera wielkopowierzchniowego kolektora, tym niższa jest sprawność.

W celu unifikacji badań i analiz sprawności kolektorów do opisu sprawności przyjęto stosować równanie aproksymujące wyniki badań empirycznych kolektora. Równanie to posiada ogólną postać:

$$\eta = \eta_0 - \frac{a\Delta T}{S_s^g} - \frac{a_2\Delta T^2}{S_s^g} \quad (1)$$

gdzie:

ΔT – różnica pomiędzy temperaturą medium (T_m) wymiennika absorbera a temperaturą otoczenia (T_o), $\Delta T = T_m - T_o$,

η – sprawność kolektora,

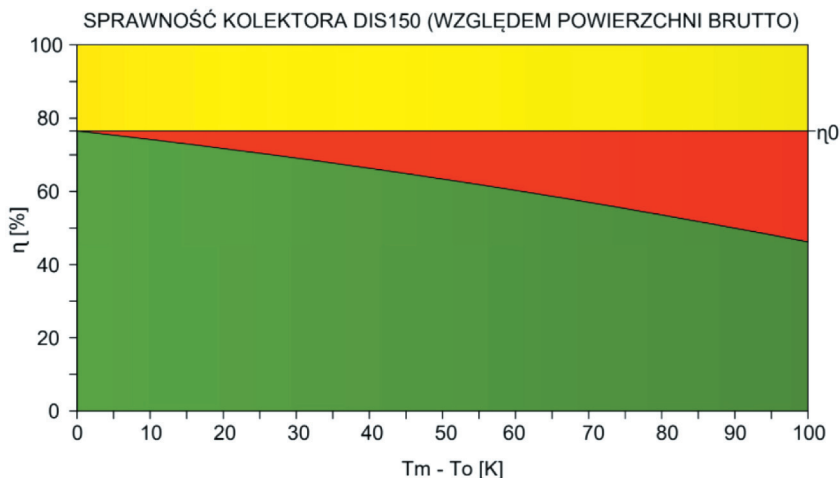
η_0 – sprawność optyczna kolektora,

S_s^g – natężenie promieniowania słonecznego,

a_1, a_2 – parametry równania charakterystyczne dla konstrukcji kolektora.

Na rysunku 7 przedstawiona została zależność sprawności kolektora w funkcji różnicy pomiędzy temperaturą medium i temperaturą otoczenia.

Parametr η_0 opisuje sprawność optyczną kolektora wielkopowierzchniowego: im większa jest jego wartość, tym większa jest sprawność kolektora. Wartość η_0 zależna jest od parametrów fizycznych szyby, liczby szyb oraz parametrów absorbera – odpowiada maksymalnej teoretycznej sprawności kolektora. Z matematycznego punktu widzenia jest to punkt przecięcia z osią rzędnych krzywej opisującej sprawność kolektora.



Rys. 7. Sprawność kolektora wielkopowierzchniowego.

Objaśnienia: kolor zielony – wygenerowana w kolektorze energia użyteczna, kolor żółty – straty optyczne, kolor czerwony – straty ciepłe, linia oddzielająca pola czerwone i zielone – zależność sprawności kolektora od różnicy temperatury medium i temperatury otoczenia przy określonym natężeniu promieniowania słonecznego

Parametr a_1 odpowiada kątowi nachylenia krzywej opisującej zależność sprawności od różnicy temperatur. Obrazuje rzeczywisty spadek sprawności wraz ze wzrostem różnicy temperatur pomiędzy medium a otoczeniem. Im niższa jest jego wartość, tym większa jest sprawność kolektora. Natomiast parametr a_2 jest składową nieliniowości sprawności kolektora wielkopowierzchniowego w funkcji różnicy temperatur. Nieliniowość na ogół nie jest duża, jednak ma wpływ na sprawność kolektora. Im wyższa jest wartość parametru a_2 , tym bardziej maleje sprawność kolektora wraz ze wzrostem różnicy temperatury.

Analiza kierunków rozwoju energetyki solarnej w odniesieniu do instalacji wielkoskalowych pozwala na wyszczególnienie trzech głównych kierunków działania w celu zwiększenia sprawności kolektora wielkopowierzchniowego:

- 1) zastosowanie nowych materiałów (nowy gatunek szkła solarnego, powłoki antyrefleksyjne, nowy rodzaj wysokoselektywnych powłok absorpcyjnych, materiały absorbera o wysokiej przewodności cieplnej, nowy rodzaj nośnika ciepła);
- 2) wprowadzenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych kolektora;
- 3) wprowadzenie rozwiązań technicznych absorbera i wymiennika polegających na zwiększeniu wydajności układu.

Dominującym kierunkiem rozwoju instalacji wielkoskalowych mającym na celu poprawę sprawności kolektorów słonecznych jest opracowywanie nowych wariantów konstrukcyjnych absorberów i wymienników ciepła. Testowane są m.in. układy kon-

wencjonalne – płaski absorber z połączonymi rurami wymiennika oraz wymienniki typu *roll-bond*, będące dwuwarstwowymi blachami kanalikowymi. Technologia *roll-bond*, w przypadku wielkoskalowej instalacji solarnej, wiąże się jednak ze zwiększonymi oporami przepływu, względnie niskim zakresem dopuszczalnych ciśnień roboczych oraz trudnościami z uzyskaniem powtarzalnej i wysokiej jakości warstwy wysokoselektywnej na absorberze po walcowaniu. Wyniki badań porównawczych dla obu typów wymienników znaleźć można m.in. w pracy Del Cola i in. (2013). Absorbery wykonane w technologii *roll-bond* osiągają jednak o około 10% wyższą sprawność niż rozwiązanie konwencjonalne.

Obiecujące pod względem zwiększenia sprawności kolektora mogą być zabiegi mające na celu zmianę charakteru przepływu medium wewnątrz rur wymiennika. Osiągnięcie takiego efektu możliwe jest dzięki zastosowaniu dodatkowych elementów usprawniających wymianę ciepła o charakterze konwekcyjnym, czyli specjalnie zoptymalizowanych wkładek kształtujących przepływ, umieszczanych wewnątrz rur wymiennika absorbera.

Problematyka sprawności kolektorów wykorzystujących dodatkowe elementy kształtujące wewnętrzny przepływ medium w rurze, a w szerszym ujęciu – zagadnienie wymiany ciepła w wymiennikach z wewnętrznym żebrowaniem rur, ma znaczącą reprezentację w literaturze.

Bilen i in. (2009) badał warunki wymiany ciepła i opory przepływu w rurach wewnętrznie żebrowanych o różnych konfiguracjach geometrycznych użebrowania (okrągłe, trapezowe, prostokątne) i wykazał ponad 50-procentowy wzrost transferu ciepła w warunkach przepływu turbulentnego. W pracy tej zestawiono również wyniki badań z danymi znanymi z literatury. O aktualności tego zagadnienia świadczyć może m.in. praca Bhattacharyy i in. (2021), w której zaprezentowano wyniki badań własnych autorów oraz szeroki wykaz źródeł literaturowych o wykorzystaniu różnych rozwiązań elementów kształtujących przepływ w rurze (m.in. skręcane lub spiralowane wkładki z taśmy, spirale z drutów, wzdłużne aktywatory turbulencji, przeszkody poprzeczne o różnej geometrii), czy publikacja Elsayeda i in. (2021), w której zaproponowano model projektowania elementów kształtujących przepływ w sposób umożliwiający maksymalizację wymiany ciepła. Z kolei praca Jamsheda (2021) uwzględniła w znacznym stopniu również aspekty oporów przepływu przez rury z różnymi elementami kształtującymi.

W kolektorach słonecznych elementy kształtujące przepływ wewnątrz rury (określane często mianem wkładek – *inserts*) podzielić można na następujące kategorie: elementy porowate, elementy okrągłe, elementy żebrowane, elementy spiralne oraz elementy pozostałych typów. W odniesieniu do kolektorów słonecznych wyniki badań empirycznych potwierdzające korzystny wpływ różnych wkładek kształtujących opublikowali m.in. Balaji i in. (2017) oraz García i in. (2013). Autorzy pierwszej z wymienionych publikacji badali wpływ ułożonych wewnątrz rury wzdłuż jej osi wkładek kształtujących przepływ medium. Wkładki te sklasyfikowane jako rurowe i prętowe

ulokowano przy ścianie wewnętrznej rury równomiernie na obwodzie, tak aby odwzorować jej wewnętrzne wzdłużne żebrowanie. Po zastosowaniu wkładek kształtujących przepływ zaobserwowano korzystny wzrost liczby Nusselta oraz znaczący wzrost sprawności wymiany ciepła (o ok. 10%), nieznacznie zależny w badanym zakresie od prędkości przepływu (Balaji i in. 2017). Alternatywnym rozwiązaniem analizowanym przez drugi zespół badaczy (García i in. 2013) było zastosowanie spiralnej wkładki prętowej (kształt sprężyny) umieszczonej wewnątrz rury. Zanotowano korzystny wzrost wartości parametru η_0 i zmniejszenie wartości parametru a_1 (por. równanie (1)). Najnowsze prace dotyczące wykorzystania elementów kształtujących przepływy wewnątrz rur kolektora opublikowali m.in. Mane i in. (2021), którzy dokonali przeglądu czynników determinujących sprawność kolektorów, czy Sharma i in. (2021), którzy przedstawili syntezę dotychczasowego stanu wiedzy o rodzajach i wpływie elementów kształtujących przepływ stosowanych w kolektorach parabolicznych.

4. Symulacja metodą elementów skończonych (MES) turbulencji w przepływie medium przez rurę wymiennika prototypowego kolektora wielkopowierzchniowego wokół elementów kształtujących przepływ

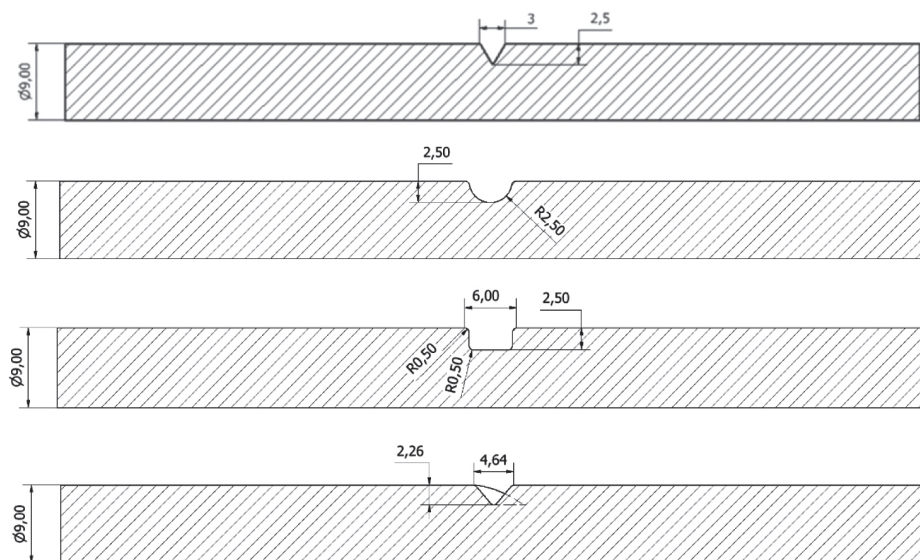
Inspiracją do opracowania prototypowego kolektora wielkopowierzchniowego była chęć sprostania oczekiwaniom użytkowników instalacji wielkoskalowej kolektorów wielkopowierzchniowych z zasobnikiem ciepła dotyczącym ciągłego ulepszania sprawności kolektorów. Udało się to osiągnąć dzięki opracowaniu nowej konstrukcji kolektora i nowych materiałów, przy uwzględnieniu spodziewanego korzystnego efektu elementów kształtujących przepływ.

Przy zastosowaniu metody elementów skończonych przeprowadzono symulacje numeryczne przepływu medium przez rurę wymiennika prototypowego kolektora wielkopowierzchniowego. Symulacje numeryczne wykonano w programie ANSYS Workbench 19.0. Platforma ta wyposażona jest w specjalny moduł do badania przepływów cieczy – Fluid Flow (FLUENT). W pierwszej kolejności wydzielono trzy sekcje modelu: Inlet – wlot nośnika ciepła do rury absorbera, Body – rura absorbera, Outlet – wylot czynnika roboczego. Następnie na zaimportowane z systemu CAD geometrie nałożono siatkę w podprogramie ANSYS Meshing. Podczas symulacji założono warunki izotermiczne (stała temperatura płynu 80°C determinująca jego właściwości fizyczne). Do analiz przyjęto, że nośnikiem ciepła będzie płyn solarny stanowiący mieszaninę glikolu polipropylenowego i wody w proporcji 1:1 o następujących właściwościach: gęstość 0,99 g/cm³; lepkość 1,0 mm²/s; ciepło właściwe 3,8 kJ/(kg·K); przewodność cieplna 0,46 W/(m·K). Przyjęto przepływ znamionowy na poziomie 100 dm³/h przez wymiennik i 600 dm³/h przez rurę zbiorczą (równoległe połączenie wymienników meandrowych) w typowych warunkach roboczych kolektora wielkopowierzchniowego, co przekłada się na zało-

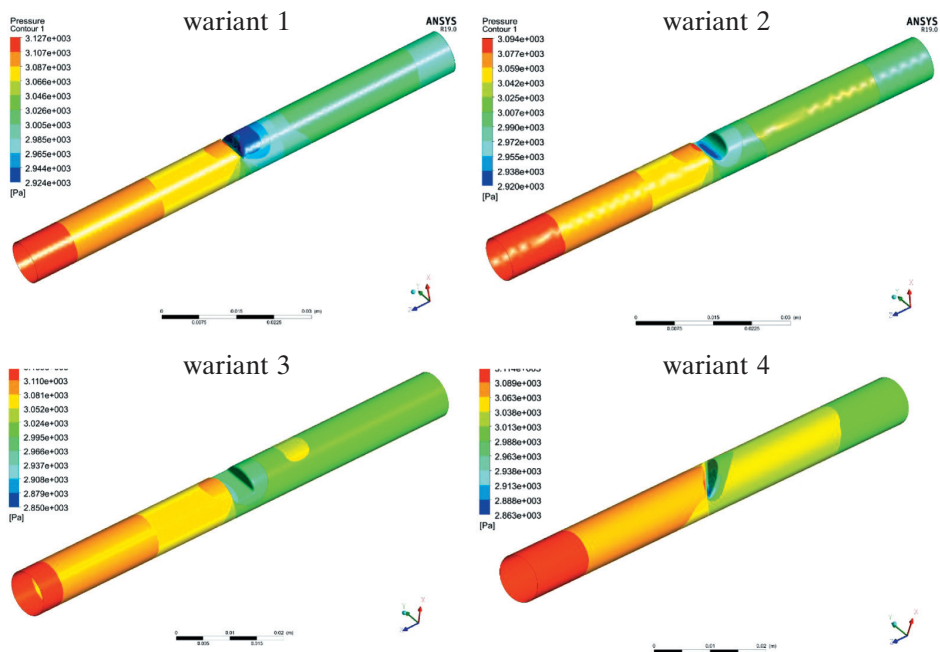
żoną stałą prędkość ruchu cząstek medium nośnika ciepła na wejściu do rur wynoszącą 0,44 m/s – daje to liczbę Reynoldsa na poziomie $4 \cdot 10^3$ dla przyjętej w symulacji średnicy wewnętrznej rury wymiennika 9 mm.

W badaniach symulacyjnych wykorzystano własne, autorskie koncepcje elementów kształtujących przepływ. Elementy te byłyby znacznie prostszym i tańszym rozwiązaniem w produkcji seryjnej kolektorów wielkopowierzchniowych w porównaniu z rozwiązaniami znanymi z literatury. Mogą być one wykonywane metodami lokalnego kształtowania plastycznego rur. Analizowano cztery podstawowe warianty przetłoczeń rury: klinowy – poprzeczny względem osi rury, półokrągły – poprzeczny względem osi rury, trapezowy – poprzeczny względem osi rury oraz klinowy – ukośny względem osi rury. Pierwsze trzy warianty cechują się różnym kształtem elementu kształtującego przepływ, przy czym ich głębokość jest stała i wynosi 2,5 mm, szerokość elementu w wariantach 2 i 3 jest taka sama (5 mm). Ostatni z wariantów cechuje się odmiennym ułożeniem elementu względem strugi płynu i niższą głębokością przetłoczenia. Symulacje obejmowały m.in. ocenę rozkładu ciśnienia, prędkości i wektorów ruchu cząstek nośnika ciepła w okolicach elementu kształtującego przepływ. Do odczytania wyników uzyskanych z przeprowadzonych symulacji numerycznych wykorzystano narzędzie ANSYS CFD-Post.

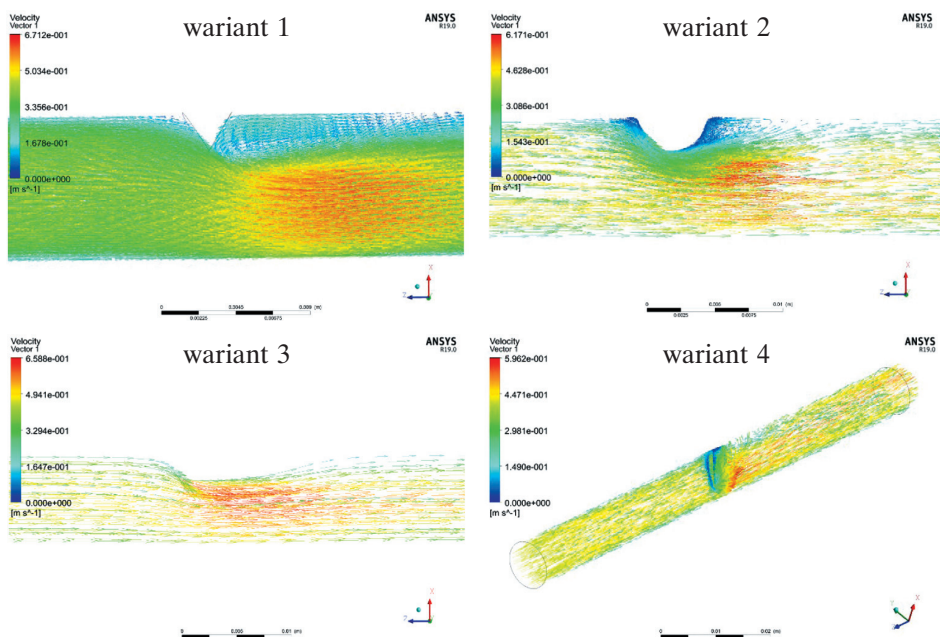
Kształty i wymiary badanych elementów kształtujących przepływ oraz wyniki symulacji komputerowych ukazano na rysunkach 8–11.



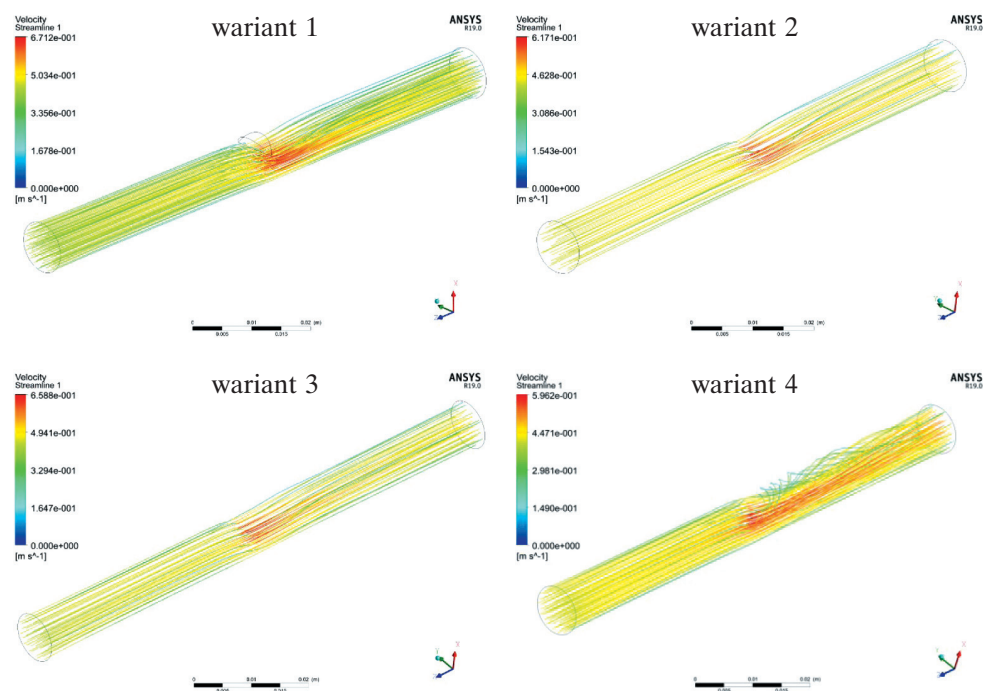
Rys. 8. Wymiary (kolejno, począwszy d góry): rura z klinowym poprzecznym elementem kształtującym przepływ – wariant 1; rura z półokrągłym poprzecznym elementem kształtującym przepływ – wariant 2; rura z trapezowym poprzecznym elementem kształtującym przepływ – wariant 3; rura z klinowym ukośnym elementem kształtującym przepływ – wariant 4



Rys. 9. Rozkład ciśnienia nośnika ciepła w prostym odcinku rury absorbera obrazujący opory przepływu wokół elementu kształtującego przepływ – warianty 1–4



Rys. 10. Widok wektorów prędkości cząstek nośnika ciepła w przekroju wzdłużnym rury w okolicach elementu kształtującego przepływ – warianty 1–4



Rys. 11. Rozpływ strugi cząstek nośnika ciepła w przekroju wzdłużnym rury w okolicach elementu kształtującego przepływ – warianty 1–4

Symulacje MES wpływu różnych wariantów elementu kształtującego przepływ na spadek ciśnienia medium oraz na zmianę prędkości ruchu jego cząstek dowiodły, że lokalna zmiana kształtu i przekroju poprzecznego rury traktowana może być jako źródło miejscowego oporu przepływu i czynnik modyfikujący lokalnie przepływ medium. Warto zauważyć, że warianty 1–3 powodują identyczne lokalne zmniejszenie przekroju poprzecznego kanału przepływu. Szacowany spadek ciśnienia na skutek zastosowania elementu kształtującego przepływ wynosi 2–4%. Największy lokalny spadek ciśnienia obserwuje się w wariantcie 3, co jest ściśle powiązane ze skokową redukcją przekroju. Warto zauważyć, że lokalne rozmiary obszarów zmniejszonego ciśnienia wokół elementu kształtującego przekrój są zbliżone w wariantach 1–3. Równocześnie element kształtujący przepływ znacząco wpływa na strukturę przepływu medium. Obserwuje się zwiększenie nierównomierności rozkładu prędkości cząstek medium w przekroju rury na długości czterech średnic wewnętrznych rury. Wartość maksymalna prędkości ruchu cząstek wyraźnie wzrasta i przekracza 0,6 m/s (dotyczy wariantów 1–3: zdecydowanie największy wzrost prędkości zanotowano w wariantcie 1, a najniższy w wariantcie 2, który jest najbardziej „opływowy”). Maksimum prędkości występuje za elementem kształtującym przepływ w środkowej części zredukowanego przekroju. Elementy kształtujące

przepływ wywołują również lokalne zmniejszenie się prędkości ruchu cząstek w górnej warstewce przysciennej przed i za elementem kształtującym, gdzie obserwowana prędkość spada poniżej 0,1 m/s. Zmniejszenie głębokości i ukośne ułożenie elementu kształtującego przepływ (wariant 4 vs. wariant 1) powoduje zmniejszenie lokalnego spadku ciśnienia oraz zmniejszenie ekstremum prędkości cząstek. Obszar małych prędkości ruchu przed i za elementem jest niewielki w porównaniu z innymi analizowanymi wariantami. Ponadto w ostatnim z badanych wariantów (wariant 4) zaobserwowano ukształtowanie się składowej rotacyjnej ruchu cząstek medium przy powierzchni wewnętrznej rury w wyniku wytworzenia się wiru na długości porównywalnej z trzema wewnętrznymi średnicami rury, co również istotnie modyfikuje stan warstwy przysciennej medium w rozpatrywanym obszarze. Dla intensyfikacji wymiany ciepła pomiędzy materiałem rury a medium oba te zjawiska są korzystne.

5. Rekomendacje względem prototypowego kolektora wielkopowierzchniowego

W wyniku przeprowadzonych symulacji oraz prac badawczo-rozwojowych zdecydowano się na zaprojektowanie i wykonanie absorbera o nowym kształcie, przeznaczonego do innowacyjnego kolektora wielkopowierzchniowego dla systemów magazynowania energii. Zdecydowano się na rozwiązanie w postaci rury z klinowym ukośnym elementem kształtującym przepływ (rys. 8 – wariant 4).

W prototypie zaprojektowano węzownice o rozstawie rur meandrycznych 107 mm i zastosowano promień gięcia 30 mm. Węzownica musi być płaska, mieć odpowiednie wymiary geometryczne i cechować się dokładnością wykonania oraz powtarzalnością kształtu, co zapewnia poprawne połączenie węzownicy z płytą absorbera metodą spawania laserowego nie tylko na prostym odcinku rur meandrycznych, ale przede wszystkim na łukach z zastosowanym małym promieniem gięcia 30 mm.

Układ hydrauliczny zawiera nowatorskie rozwiązania technologiczne w postaci elementów poprawiających wymianę ciepła w układzie wymiennik absorbera – nośnik ciepła. Ostatecznie elementy kształtujące przepływ rozmieszczono na prostych odcinkach węzownicy wykonanej z rury miedzianej o średnicy 10 mm i grubości ścianki 0,5 mm. Typowa chropowatość ścianki wewnętrznej rury wynosi $R_a = 0,1 \mu\text{m}$, $R_z = 2 \mu\text{m}$, co daje chropowatość względną rury (w rozumieniu diagramu Moody'ego) na poziomie około 0,003. Przy wartościach liczby Reynoldsa Re rzędu 10^3 – 10^4 przekłada się to na opory przepływu bardzo zbliżone do oporów występujących w tzw. rurze hydraulicznie gładkiej. Na każdym odcinku, w odległości od siebie wynoszącej 660 mm i odległości od zagięć rury wynoszącej 150 mm, znajdują się trzy elementy. Ułożone zostały po przeciwnej stronie w stosunku do powierzchni łączenia rury z absorberem.

Elementy kształtujące przepływ wykonano jako przetłoczenia, o kształcie przekroju poprzecznego zbliżonym do trójkąta równoramiennego. Są one wykonane pod pewnym skosem względem osi rury. Maksymalna głębokość przetłoczenia elementu kształtującego przepływ (mierzona względem wewnętrznej ścianki rury) wynosi 2,26 mm, a długość podstawy trójkąta (mierzona wzdłuż po powierzchni wewnętrznej i wzdłuż osi rury) jest zbliżona do połowy średnicy wewnętrznej rury. Kąt skoszenia elementu kształtującego względem osi rury wynosi 45° .

Ze względu na zmiany właściwości fizycznych nośnika ciepła i oczekiwane na podstawie obliczeń analitycznych przepływy medium przez kolektor jako całość oraz przez poszczególne wymienniki meandrowe na segmentach stwierdzono, że spodziewany zakres wartości liczby Reynoldsa odpowiadający przepływowi jest zmienny w zakresie od 10^3 do 10^4 . Zakres ten dotyczy przepływu laminarnego i turbulentnego, co ma istotny wpływ na opór przepływu limitujący spadek ciśnienia w prototypie kolektora. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu opór przepływu w prototypowym kolektorze wielkopowierzchniowym wzrasta, natomiast maleje wraz ze wzrostem temperatury nośnika ciepła. Istotny wpływ na opór przepływu wywiera zastosowany rodzaj nośnika.

Ponieważ wymienniki meandrowe prototypowego kolektora wielkopowierzchniowego połączono równolegle, opory przepływu w całym kolektorze można traktować jako opory w pojedynczym wymienniku powiększone o opory występujące w rurze zbiorczej oraz rozgałęzieniach. Szacowany na podstawie obliczeń analitycznych według PN-76/M-34034:1976 spadek ciśnienia nośnika ciepła (mieszanina woda – glikol w stosunku 1:1) w kolektorze (bez elementów kształtujących przepływ) wynosi około 8 kPa w warunkach znamionowych – przy przepływie około $100 \text{ dm}^3/\text{h}$ przez wymiennik oraz około $600 \text{ dm}^3/\text{h}$ przez rurę zbiorczą. Różnica pomiędzy temperaturą absorbera a temperaturą otoczenia wynosi około 70°C , co odpowiada temperaturze medium 80°C i średniej temperaturze otoczenia 10°C . Spadek ciśnienia medium w głównej mierze wynika z oporów przepływu w wymienniku, bowiem opory w rurze zbiorczej i rozgałęzieniach są o rząd wielkości niższe. Opory przepływu medium przez wymiennik prototypowego kolektora wielkopowierzchniowego zależą głównie od liniowych oporów w odcinkach prostych meandra, a opory przepływu w łukach stanowią około 15% całych oporów przepływu w wymienniku.

W efekcie zastosowania elementów kształtujących przepływ zwiększone są spadki ciśnienia w prototypowym kolektorze wielkopowierzchniowym. Zastosowanie elementów kształtujących przepływ, które redukują go o 20%, w liczbie trzech na każdy metr wymiennika, powoduje spadek ciśnienia o około 9 kPa w warunkach znamionowych.

Oszacowana liczba Reynoldsa jest wprost proporcjonalna do prędkości ruchu medium o ustalonych właściwościach fizycznych. Szacuje się, że element kształtujący przepływ redukujący przekrój o 20% w okolicach elementu powoduje wzrost liczby Reynoldsa o 20%. Liczba Nusselta wzrasta o około 15%, tym samym zwiększając współczynnik wnikania ciepła o 16%, a co za tym idzie – zwiększając sprawność kolektora.

Analizując oczekiwany korzystny wpływ zastosowania elementów sterujących przepływem w zakresie wymiany ciepła w układzie rura – medium, należy stwierdzić, że występujący spadek ciśnienia jest akceptowalny. Wstępne testy prototypowego kolektora przeprowadzone na specjalnej instalacji badawczej w Energetyka Solarna Ensol Sp. z o.o. wykazały jego o około 6% wyższą sprawność w porównaniu z kolektorem referencyjnym (bez elementów kształtujących przepływ). Oryginalne rozwiązanie w postaci elementów kształtujących przepływ węzownicy kolektora wielkopowierzchniowego zgłoszono, jako własność intelektualną, do ochrony w Urzędzie Patentowym.

6. Podsumowanie

- Zintegrowanie instalacji wielkopowierzchniowych kolektorów słonecznych oraz sezonowych magazynów ciepła z miejskim systemem ciepłowniczym pozwala istotnie zwiększyć udział OZE w produkcji energii cieplnej przy zachowaniu niskiego kosztu produkcji oraz zapewnia większą stabilność energetyczną.
- Oczekiwane poziomy temperatury nośnika ciepła na wyjściu z takich instalacji są wyższe niż w klasycznych małopowierzchniowych instalacjach solarnych. Z tego powodu spodziewana sprawność kolektorów w instalacjach wielkoskalowych jest niższa. To z kolei stanowi inspirację do poszukiwania możliwości podwyższania sprawności kolektorów wielkopowierzchniowych.
- Zastosowanie dodatkowych elementów kształtujących przepływ wykonanych jako przetłoczenia skutkujące lokalną zmianą przekroju i kształtu rur węzownic kolektora skutkuje lokalną zmianą prędkości cząstek medium i pozwala zwiększyć wymianę ciepła między absorberem kolektora a medium.
- Dodatkowe elementy kształtujące przepływ wywołują lokalne zmiany przekroju i kształtu rur, co powoduje miejscowe opory przepływu skutkujące zwiększeniem spadku ciśnienia medium w kolektorze.
- Wstępne testy prototypowego kolektora wielkopowierzchniowego z elementami kształtującymi przepływ wykazały około 6-procentowy wzrost jego sprawności.

Literatura

- Balaji K., Iniyan S., Muthusamyswami V., 2017, *Experimental investigation on heat transfer and pumping power of forced circulation flat plate solar collector using heat transfer enhancer in absorber tube*, Applied Thermal Engineering, vol. 112, s. 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.074>.
- Bavaa F., Nielsen J.E., Knabl S., Brunger A., Furbo S., Fink C., 2016, *Results of IEA SHC Task 45: Large scale solar heating and cooling systems. Subtask A: "Collectors and collector loop"*, Energy Procedia, vol. 91, s. 546–555. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.197>.

- Bhattacharyya S., Vishwakarma K.D., Chakraborty S., Roy R., Issakhov A., Sharifpur M., 2021, *Turbulent Flow Heat Transfer through a Circular Tube with Novel Hybrid Grooved Tape Inserts: Thermohydraulic Analysis and Prediction by Applying Machine Learning Model*, Sustainability, vol. 13(6), 3068. <https://doi.org/10.3390/su1306306>.
- Bilen K., Cetin M., Gul H., Balta t., 2009, *The investigation of groove geometry effect on heat transfer for internally grooved tubes*, Applied Thermal Engineering, vol. 29(4), s. 753–761. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.04.008>.
- Dahash A., Ochs F., Bianch M.J., Streicher W., 2019, *Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems*, Applied Energy, vol. 239, s. 296–315. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.189>.
- Del Col D., Padovan A., Bortolato M., Dai Prè M., Zambolin E., 2013, *Thermal performance of flat plate solar collectors with sheet-and-tube and roll-bond absorbers*, Energy, vol. 58, s. 258–269. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.058>.
- Elsayed M.L., Abdelatif M.A., Ahmed S.A., Emeara M., Elwan W.M., 2021, *Thermal design evaluation of ribbed/grooved tubes: An entropy and exergy approach*, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 120, 105048. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105048>.
- García A., Herrero R., Pérez-García M.J., 2013, *Experimental study of heat transfer enhancement in a flat-plate solar water collector with wire-coil inserts*, Applied Thermal Engineering, vol. 61(2), s. 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.048>.
- Jamshed S., 2021, *Multidisciplinary Optimization in Helical Grooved Tubes for Heat Transfer Enhancement*, Engineering Science & Technology, vol. 2, no. 2, s. 172–186. <https://doi.org/10.37256/est.222021888>.
- Mane S.R., Kale R.W., 2021, *Investigation of Performance Parameters Affecting the Efficiency of Solar Water Heater: A Review*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 1091, 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1091/1/012021>.
- Noussan M., Jarre M., Degiorgis L., Poggio A., 2017, *Data Analysis of the Energy Performance of Large Scale Solar Collectors for District Heating*, Energy Procedia, vol. 134, s. 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.619>.
- PN-76/M-34034:1976, *Rurociągi – Zasady obliczeń strat ciśnienia*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- Sarbu I., Sebarchievici C., 2018, *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage*, Sustainability, vol. 10(1), 191. <https://doi.org/10.3390/su10010191>.
- Sharma M., Jilte R., 2021, *A review on passive methods for thermal performance enhancement in parabolic trough solar collectors*, International Journal of Energy Research, vol. 45(4), s. 4932–4966. <https://doi.org/10.1002/er.6212>.