

Stanisław Gil, Wojciech Bialik, Piotr Mocek ¹

Modelowanie numeryczne konstrukcji zasobnika ciepła

Abstract. Numerical optimization of construction battery heat to cooperate the solar collector. Renewable energy efficiency is dependent on the solution of problems of its collection and transmission, and thus the choice of optimal battery construction. In this work focuses on numerical optimization of selected design of thermal energy storage for use with solar collector. Ideas of the authors is to develop a concept relatively easy to make and cheap battery underfloor heating.

1) Stanisław Gil, Wojciech Bialik, Piotr Mocek, Politechnika Śląska Zespół Energetyki Procesowej, Katedra Metalurgii, Katowice.

1. Wprowadzenie

Wymagania dotyczące ochrony środowiska, rosnąca świadomość ekologiczna społeczeństwa, a także coraz mniejsze zasoby naturalnych paliw kopalnych spowodowały wzrost zainteresowania zastosowaniem odnawialnych źródeł energii. Na rynku pojawiają się coraz bardziej zaawansowane technicznie urządzenia i systemy energetyczne do produkcji energii cieplnej i elektrycznej z odnawialnych źródeł energii oraz technologie do produkcji biopaliw pierwszej i drugiej generacji (np. DME) [1-5].

Idea budownictwa energooszczędnego wymusza na środowisku naukowym i otoczeniu technicznym opracowywanie coraz nowszych materiałów budowlanych oraz układów do pozyskiwania i gromadzenia energii cieplnej celem jej efektywnego wykorzystania. Zastosowanie w budynkach mieszkalnych zintegrowanego układu kolektorów słonecznych z pompą ciepła i akumulatorem energii cieplnej w układach ciepłej wody użytkowej i centralnego ogrzewania, nie jest rozwiązaniem nowym. Istnieją liczne prace naukowe na temat tego typu systemów grzewczych, których nie sposób wszystkich przytoczyć w powyższej publikacji [6-13].

Istotnym problemem w pozyskaniu stałego natężenia strumienia energii słonecznej jest jego zależność od pór roku i przypadkowy charakter pogody. Naturalnym krokiem więc wydaje się być magazynowanie energii cieplnej. Lecz pojawiają się następne problemy natury technicznej jak: dopasowanie wydajności źródła energii do zmiennego zapotrzebowania na energię, efektywne gromadzenie energii oraz optymalizacja procesu jej przekazywania [3]. Większość sposobów akumulacji energii cieplnej opiera się na wykorzystaniu właściwości cieplnych materii (pojemność i przewodnictwo cieplne, entalpia przemiany fazowej) oraz na efekcie cieplnym reakcji chemicznych. Akumulatory ciepła można podzielić na cztery grupy: zbiorniki wodne, materiały zmieniające fazę, reakcje termochemiczne oraz podziemne zbiorniki (jaskinie, warstwy wodonośne i otwory wiercone w ziemi). Każdy z tych akumulatorów ma swoje wady i zalety [2, 3, 10].

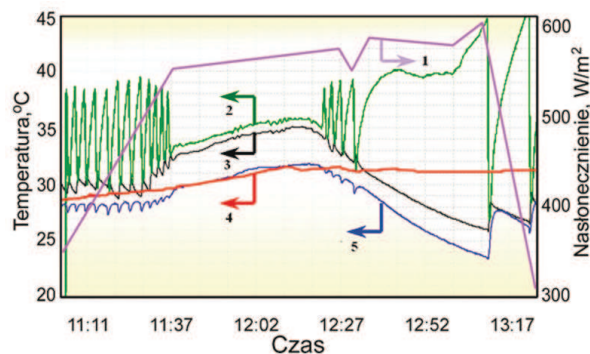
Efektywność wykorzystania energii odnawialnej jest zależna od rozwiązania problemów z jej gromadzeniem i przesyłem, a tym samym z wyborem optymalnego akumulatora. W powyższej pracy skupiono się na optymalizacji numerycznej konstrukcji wytypowanych akumulatorów energii cieplnej do współpracy z kolektorem słonecznym. Ideą autorów jest opracowanie wstępnej koncepcji stosunkowo prostego w wykonaniu i taniego podpodłogowego akumulatora ciepła.

2. Eksperymenty

W obecnej fazie projektu wykonano wstępną serię pomiarów na rzeczywistym obiekcie założonym z kolektorów słonecznych i zasobnika c.w.u. Zestaw

pomiarowy składał się z termometrów rezystancyjnych Pt 100 kl. 1/10 DIN B firmy Ampero Thermo-EST sprzężonych z radiowym układem transmisji danych firmy LS Elektronik współpracującym z komputerowym programem wizualizacji danych pomiarowych. Pomiarów natężenia przepływu mediów w obiegu dokonano rotametrami z odpowiednio dobranymi zakresami przepływu. Poniżej na rys. 1 przedstawiono fragment rejestrowanych danych przebiegu temperatur w instalacji solarnej w godzinach 11.00-13.00 (11.04.2010) oraz wykres nasłonecznienia dla centrum Katowic.

Krzywa (1) charakteryzuje przebieg nasłonecznienia, które wzrastając, w okolicach godziny 13. osiąga swoje maksimum (ok. 600 Wm^{-2}), a następnie gwałtownie maleje. Temperatura medium obiegowego w kolektorze (2) w okresie gwałtownego wzrostu nasłonecznienia (godz. 11.00-14.00) oscyluje osiągając maksimum 39.50°C . Jest to związane z ustawieniem sterownika instalacji solarnej, w którym próg włączenia pompy $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ (pomiędzy temperaturą kolektora, a temperaturą wody w zasobniku). Gdy wartość nasłonecznienia osiągnęła ok. 550 Wm^{-2} , sterownik układu tak modułował wydajnością pompy, aby wydłużyć okres jej włączenia przy zachowaniu $\Delta T > \Delta T_{\text{min}}$. Pojawiające się zachmurzenie ok. godz. 12.30 wywołało ponowną okresową pracę pompy. Krzywe (3) i (4) przedstawiają przebieg temperatury na wlocie i wylocie z węzownicy układu solarnego zbiornika c.w.u. Krzywa (4) natomiast opisuje zmianę temperatury wody w zasobniku. W okolicach godz. 12.15 można zauważyć spadek temperatury wody w zasobniku, co było spowodowane chwilowym poborem ciepłej wody przez użytkowników i napływem zimnej o temperaturze ok. 7°C .



Rys. 1. *Temperatury w instalacji solarnej i wykres nasłonecznienia.*

Powyższe pomiary temperatur i natężenia przepływu posłużyły jako dane wejściowe do modelowania numerycznego optymalnego rozwiązania parametrów i konstrukcji akumulatora ciepła w domowej instalacji solarnej.

3. Modelowanie numeryczne zasobnika ciepła

Obliczenia prowadzone były w programie „Fluent 6.2”, który pozwala na wyznaczenie parametrów przepływowych w postaci przestrzennych lub powierzchniowych rozkładów wielkości fizycznych zdefiniowanych w równaniach zachowania, hipotezach domykających i równaniach stanu. Podziały numeryczne zastosowane w procedurach programu opierają się na metodzie bilansów elementarnych, zwanej też metodą objętości skończonych. Metoda ta zbudowana została w oparciu o uniwersalne postaci równań algebraicznych, przekształconych z równań różniczkowych, sporządzonych dla elementarnych wymiarów powierzchniowych lub objętościowych i (w przypadku obliczeń stanów nieustalonych) elementarnego kroku czasowego. Podział numeryczny rozpoczyna się od analizy rozpatrywanego elementu lub kształtu. W tabelicy 1 przedstawiono podstawowe geometryczne parametry analizowanego akumulatora.

Tablica 1. *Geometryczne parametry akumulatora ciepła*

Parametr	Wartość
Szerokość/długość/wysokość, mm	1200
Powierzchnia rur po stronie czynnika grzewczego, m ²	3
Powierzchnia rur po stronie czynnika chłodzącego, m ²	3
Średnica rur, mm	16 x 2
Grubość izolacji termicznej, mm	100
Odległość wiązek rurowych od ściany zewnętrznej, mm	100
Masa wypełnienia, kg	
	m ₁ 3393
	m ₂ 848
	m ₃ 5047
Współczynnik wyrównania temperatury wypełnienia, m ² /s	
	a ₁ 10 ⁵ 0.0764
	a ₂ 10 ⁵ 0.369
	a ₃ 10 ⁵ 2.01

Poniżej przedstawiono najważniejsze równania bilansowe wykorzystywane w symulacji. Równania te w postaci zdyskretyzowanej dla każdej z elementarnych komórek (na jakie podzielona została przestrzeń akumulatora ciepła) wykorzystywane są w programie Fluent. Równania podstawowe bazują na zasadach zachowania masy, pędu i energii. Bilans masowy dla wody w rurkach przedstawia równanie ciągłości

$$\rho \cdot \operatorname{div}(\vec{w}) = 0, \quad (1)$$

gdzie: ρ - gęstość, kg m^{-3} ; \vec{w} - wektor prędkości, m s^{-1} ; t - czas, s. Bilans pędu zaś dla tego zagadnienia można zapisać zależnością

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \vec{w}(\vec{\nabla} \cdot \vec{w}) = \frac{\vec{\nabla}(\eta \vec{\nabla} \cdot \vec{w}) - \vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g}, \quad (2)$$

gdzie: η - dynamiczny współczynnik lepkości, Pa s ; p - ciśnienie statyczne w płynie, Pa ; g - przyspieszenie ziemskie, m s^{-2} . Rozkłady temperatury T w wypełnieniu o współczynniku wyrównania temperatury a pozwala określić równanie energii w postaci

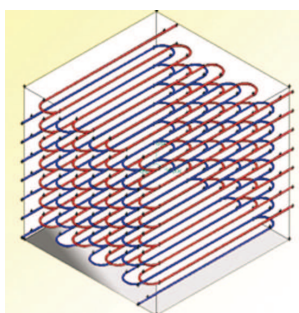
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T. \quad (3)$$

Bilans energii strugi określono za pomocą zależności

$$\frac{\partial i}{\partial t} + \vec{w}(\vec{\nabla} i) - \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left[-\lambda \vec{\nabla} T - \eta \vec{\nabla} \left(\frac{w^2}{2} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

gdzie: λ - współczynnik przewodzenia ciepła, W(mK)^{-1} ; i - entalpia właściwa fizyczna wody, J kg^{-1} . Wartości współczynnika przewodzenia ciepła i lepkości w funkcji temperatury zostały określone na podstawie dostępnych danych tablicowych.

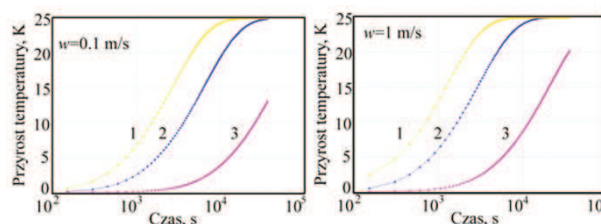
Rysunek 2 przedstawia rzut izometryczny wypełnienia akumulatora, którego dane konstrukcyjne przedstawiono w tabelicy 1.



Rys. 2. Rzut izometryczny wypełnienia.

Warunki brzegowe przyjęte do obliczeń to: prędkość i temperatura wody na dopływie oraz strumień strat ciepłych na ściankach urządzenia (przyjęty jako 5% strumienia energii płynu na dopływie). Początkowa temperatura wypełnienia w każdym obliczeniowym przypadku wynosiła 7°C. Przepływ wody w rurkach był laminarny, a warunki przenoszenia energii pomiędzy płynem, ścianką i wypełnieniem wyznaczone były w oparciu o standardowe procedury określania współczynnika wnikania z grubości warstwy przyściennej. W obliczeniach przyjęto równy rozdział wody w każdej z rurek.

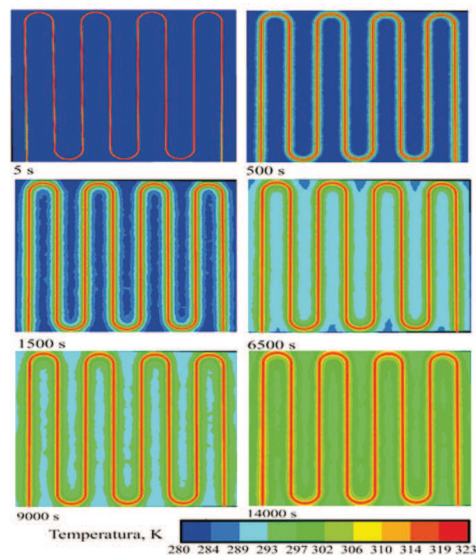
Program badań numerycznych obejmował analizę dynamiki procesu nagrzewania dla trzech rodzajów wypełnień o różnych współczynnikach wyrównywania temperatury α . Wyznaczano reakcję na skokowe podniesieni temperatury płynu na dopływie o 25°C. Na rysunku 3 zamieszczono przebieg zmian czasowych średniej temperatury akumulatora (liczonej jako stosunek energii zakumulowanej odniesiony do iloczynu masy wypełnienia i jego pojemności cieplnej). Dynamika ta określana była dla strumieni objętościowych wody wynoszących od $4 \cdot 10^{-2}$ - $4 \cdot 10^{-1}$ m³h⁻¹. Z obliczeń wynika, że największą szybkość gromadzenia energii cieplnej ma akumulator z wypełnieniem betonu i żwiru, natomiast najmniejszą z karborundu.



Rys. 3. Dynamika zmian średniej temperatury w warstwie wypełnień: (1) beton i żwir; (2) żużel; (3) karborund.

Rysunek 4 ilustruje przykładowy przekrój przez akumulator w różnych stadiach nagrzewania. Prezentowane obliczenia prowadzone były przy prędkości wody w rurkach $w = 0.1$ ms⁻¹ i dla żużla jako materiału wypełnienia akumulatora. Widoczne są gradientowe mapy termiczne pozwalające określić równomierność nagrzewania wypełnienia. Rozłożenie przestrzennych gradientów termicznych jest silnie zależne od rozmieszczenie rurek wodnych.

W dalszym programie badawczym planowana jest optymalizacja rozkładów przestrzennych i materiałów wypełnień w celu znalezienia optimum kosztowo-funkcjonalnego urządzenia.



Rys. 4. Rozkłady temperatury w przekroju przez wypełnienie akumulatora.

4. Podsumowanie

Prezentowane rezultaty badań skupiają się na określeniu taniej i prostej w wykonaniu konstrukcji akumulatora ciepła do współpracy z instalacją solarną.

Metodami numerycznymi możliwe jest określenie optymalnych parametrów wypełnienia i doboru materiałów, jednakże musi ono być poprzedzone badaniami doświadczalnymi.

Z pośród rozpatrywanych materiałów wypełnienia największą szybkość gromadzenia energii cieplnej ma akumulator z wypełnieniem betonu i żwiru.

Efektywne wykorzystanie akumulatora jest przewidywane jako uzupełnienie instalacji solarnej w sytuacji nadmiaru energii płynu.

Rozłożenie przestrzennych gradientów termicznych jest silnie zależne od rozmieszczenia rurek wodnych.

Bibliografia:

1. Thirugnanasambandam M., Iniyar S., Goic R.; *A review of solar thermal technologies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010).
2. Bałys M.R., Buczek B.; *Akumulacja ciepła w monolitach węglowych dla magazynowania energii – rozważania modelowe*, *Polityka energetyczna* 12 (2009).
3. Wita A., Balcerzak A., Mirosław-Świątek D., *System grzewczy z gruntowym akumulatorem energii cieplnej - wyniki eksperymentów*, XIV Konferencja naukowa – metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych, Korbielów 2002.
4. Vaivudh S., Rakwichian W., Chindaruksa S., *Heat transfer of high thermal energy storage with heat exchanger for solar trough power plant*, *Energy Conversion and Management* 49 (2008).
5. Zheng D., Cao W., *Retrofitting for DME process by energy-flow framework diagram*, *Chemical Engineering and Processing* 46 (2007).
6. Schmidt T., Mangold D., Müller-Steinhagen H., *Central solar heating plants with seasonal storage in Germany*, *Solar Energy* 76 (2004).
7. Raab S., Mangold D., Müller-Steinhagen H., *Validation of a computer model for solar assisted district heating systems with seasonal hot water heat store*, *Solar Energy* 79 (2005).
8. Ming T., Liu W., Pan Y., Xu G., *Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics in solar chimney power plants with energy storage layer*, *Energy Conversion and Management* 49 (2008).
9. Pahud D., *Central solar heating plants with seasonal duct storage and short-term water storage: design guidelines obtained by dynamic system simulations*, *Solar Energy* 69 (2000) 495–509.
10. Ohga H., Mikoda K., *Energy performance of borehole thermal energy storage systems. Proceedings of Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro (2001).
11. Lin M.C., Chun L.J., Lee W.S., Chen S.L., *Thermal performance of a two-phase thermosyphon energy storage system*, *Solar Energy* 75 (2003).
12. Denholm P., Kulcinski G.L., *Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems*, *Energy Conversion and Management* 45 (2004).
13. Ragoonanan V., Davidson J.H., Homan K.O., Mantell S.C., *The benefit of dividing an indirect thermal storage into two compartments: Discharge experiments*, *Solar Energy* 80 (2006).