

Paulina DROŹDŹ*, Henryk G. SABINIAK

WPLYW BUDOWY ZASOBNIKÓW CIEPŁA NA ZJAWISKO STRATYFIKACJI TERMICZNEJ

Akumulowanie energii cieplnej jest procesem fizycznym. Magazynowanie ciepła głównie kojarzy się z akumulacją pary wodnej i gorącej wody. Może również dotyczyć systemów gromadzenia w zasobniku zimnej wody lub lodu. Magazynami ciepła mogą być jaskinie skalne, podziemne warstwy wodonośne, zbiorniki wodne, materiały zmieniające fazę skupienia [11]. Gromadzenie energii jest rezultatem rozbieżności czasowej między jej zapotrzebowaniem i produkcją. W pracy omówiono podstawowe parametry techniczne i eksploatacyjne mające wpływ na efektywność energetyczną akumulatorów ciepła.

1. ZASOBNIKI CIEPŁA

1.1. MAGAZYNOWANIE ENERGII CIEPLNEJ

Magazynowanie energii staje się konieczne, gdy czas jej wytwarzania nie pokrywa się z czasem wystąpienia zapotrzebowania na tą energię. Dotyczy to głównie energii elektrycznej, jak również pary i gorącej wody. Często potrzeba akumulacji wynika z potrzeby pokrycia szczytowego (chwilowego) zapotrzebowania na duży strumień nośnika energii. Akumulację ciepła stosuje się tam, gdzie właściwości urządzenia wytwórczego nie pozwalają na zapewnienie dostawy ciepła w każdej chwili, w dostatecznej ilości i odpowiedniej jakości. Urządzenia, w których magazynuje się ciepło noszą nazwę zasobników ciepła lub akumulatorów ciepła.

Zasobniki ciepła mogą służyć do wyrównywania obciążeń urządzeń wytwórczych produkujących energię cieplną i elektryczną przy zmiennym zapotrzebowaniu przez odbiorniki. Również mogą gromadzić nośnik energii, by następnie wydatkować go

* Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Al. Politechniki 6, Łódź, paulina.drozd@p.lodz.pl

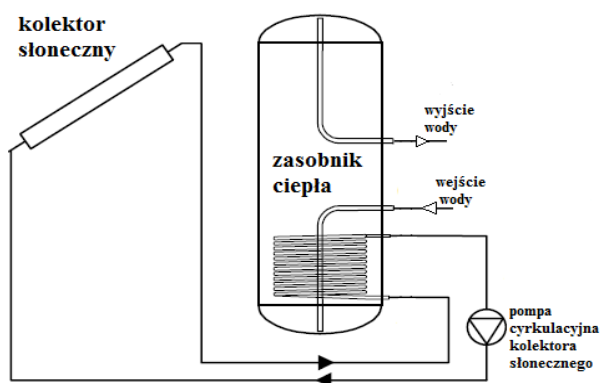
w czasie okresów wyłączenia urządzeń. Charakterystyczną cechą działania zasobników jest cykliczność ich pracy tzn. następujące po sobie kolejne fazy ładowania i rozładowania (rozładowanie i ładowanie może być w niektórych przypadkach rozdzielone fazą postoju zasobnika). Zasobniki magazynujące ciepło w okresie doby i do kilku dni nazywa się krótkoterminowymi, natomiast zasobniki długoterminowe wyrównują różnice w podaży i zapotrzebowaniu na energię w cyklu rocznym.

Zasobniki ciepła wykonuje się w postaci pionowych cylindrycznych zbiorników całkowicie wypełnionych wodą. Przeprowadzono także analizę możliwości wykorzystania zasobników o kształcie kulistym, umożliwiającym stosowanie wyższych wartości ciśnienia. Stwierdzono jednak, że zmieniający się kształt warstwy przyściennej w czasie ładowania i rozładowywania zasobnika o tym kształcie geometrycznym wpływał na pogorszenie sprawności działania zasobnika [1].

Woda jako czynnik termodynamiczny jest dobrym nośnikiem akumulującym energię cieplną, a przy tym tanim i powszechnym medium. Wykorzystuje się dużą pojemność cieplną wody i naturalny efekt wyporu wody w różnych temperaturach. Gorące strefy o niższej gęstości przemieszczają się do górnej części zbiornika, a zimne strefy o wyższej gęstości do dolnej.

Zasobniki ciepła można stosować w scentralizowanych źródłach ciepła, jakimi są elektrociepłownie miejskie produkujące energię cieplną i elektryczną w kogeneracji. W systemie ciepłowniczym zbiorniki są w niego włączone pośrednio lub bezpośrednio. Mogą one osiągać pojemność powyżej 10 000 m³ [10].

Wraz z rozwojem wykorzystania odnawialnych źródeł energii wśród indywidualnych odbiorców na znaczeniu przybierają zasobniki ciepłej wody włączone w układ kolektorów słonecznych (rys.1) . Zbiorniki mogą być poziome lub pionowe. W przeciwieństwie do akumulatorów ciepła w elektrociepłowniach, w układach kolektorów z zasobnikami ciepła, występują niejednolite temperatury zasilające wymienniki ciepła (węzownice).



Rys. 1. Zasobnik ciepła z węzownicą w układzie z kolektorem słonecznym [4]

W obu przypadkach pożądanym jest powstawanie zjawiska stratyfikacji termicznej zwiększające efektywność energetyczną zasobników ciepła.

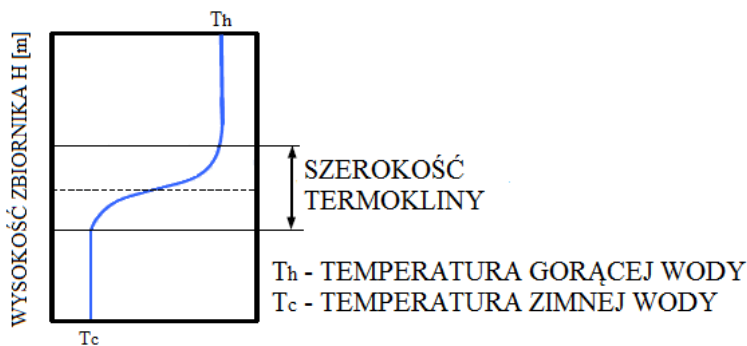
1.2. STRATYFIKACJA TERMICZNA

Samo zjawisko stratyfikacji polega na temperaturowym zróżnicowaniu ośrodka, co prowadzi do warstwowej struktury ośrodka, zaś wynika z gęstości wody gorącej i zimnej.

Idealny przypadek występuje wtedy, gdy gorące i zimne strefy są całkowicie odrębne i gradient temperatury termokliny jest nieskończony.

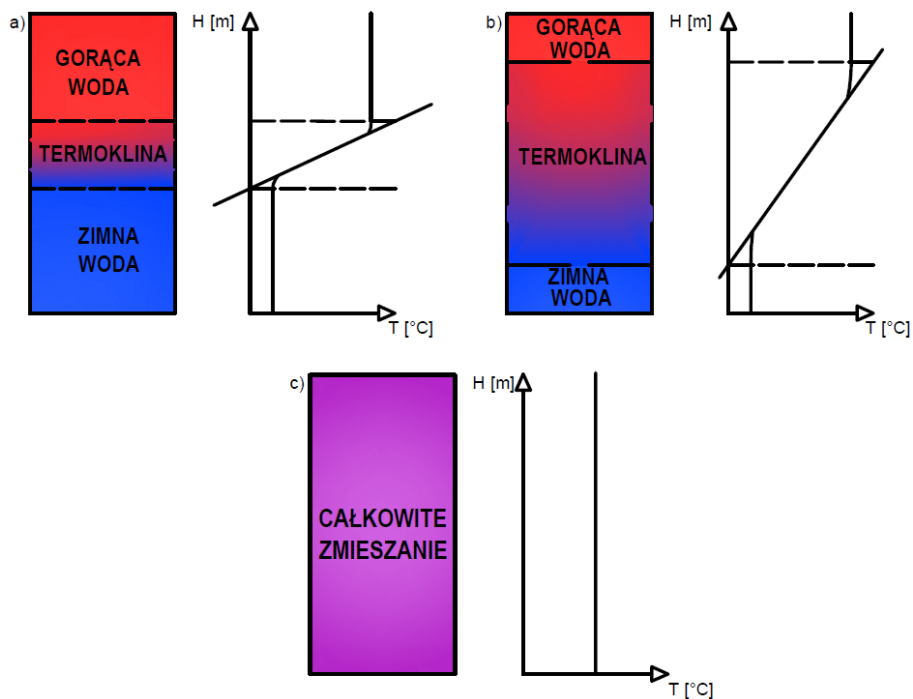
Woda gorąca, wypierana przez zimną wodę w dolnej części zbiornika, przemieszcza się do góry. Wytworzone warstwy wody zimnej i gorącej rozdziela warstwa pośrednia, w której następuje nagle zmiana temperatury magazynowanego czynnika, spowodowana intensywną wymianą ciepła między tymi warstwami (rys. 2). Grubość tej warstwy - termokliny powinna być możliwie jak najmniejsza. Celem jest zminimalizowanie procesu mieszania się zimnej i ciepłej wody.

Zespół zjawisk występujących w tym ośrodku płynnym ma złożony i zróżnicowany w czasie przebieg. Złożoność procesu polega na tym, że wymiana ciepła zależy od intensywności i natężenia zachodzących procesów, tj. intensywności mieszania się wód o różnych temperaturach w trakcie napełniania/oprózniania zbiornika, straty ciepła przez ściany zbiornika. Utrzymanie uwarstwienia wody w trakcie opróżniania zbiornika jest wskazane, aby przekazać największą ilość energii zmagazynowaną w poszczególnych warstwach wody.



Rys. 2. S-kształtna krzywa profilu

Z czasem, wskutek przebiegu złożonych procesów wymiany masy i energii (bez zaburzeń przepływowych) następuje całkowite ujednoczenie własności płynu (rys.3c), co całkowicie niszczy stratyfikację termiczną i powoduje jednolitą temperaturę w całej objętości zbiornika [2].



Rys. 3. Zróżnicowany poziom stratyfikacji termicznej w zasobniku ciepła z jednakową ilością zmagazynowanego ciepła: a) zbiornik z wysoką stratyfikacją termiczną, b) zbiornik z umiarkowaną stratyfikacją termiczną, c) zbiornik z jednolitą temperaturą [7]

1.3. TERMOKLINA

Stratyfikację w zasobniku ciepła charakteryzuje termoklina – strefa stromego gradientu temperatury rozdzielająca stref gorących i zimnych cieczy w zbiorniku. Grubość strefy termokliny jest wskaźnikiem prawidłowo zaprojektowanego zbiornika i powinna być możliwie jak najmniejsza, w celu zminimalizowania procesu mieszania się zimnej i ciepłej wody (rys.3a).

Głównym parametrem determinującym rolę termokliny w powstawaniu stratyfikacji jest smukłość zbiornika, czyli stosunek jego wysokości do średnicy - H/D , mający wpływ na samoistne wytworzenie się warstw wody o zróżnicowanej temperaturze [10].

1.4. SMUKŁOŚĆ ZBIORNIKA

Smukłość zbiornika na poziomie $H/D = 4$ pozwala na uzyskanie maksymalnej stratyfikacji termicznej. Inne badania sugerują optymalną smukłość zbiornika w granicach między 3 a 4 [6]. W pracy [6] autorzy wykazali, że grubość warstwy przejściowej wzrasta wraz ze wzrostem stosunku H/D , jednakże po przekroczeniu wartości $H/D = 4$ zaczyna maleć.

Wyższa smukłość zbiornika zapewnia wyższy stopień stratyfikacji, co zwiększa także pole powierzchni zbiornika. Wywołuje to wzrost strat ciepła do otoczenia, co zmniejsza efektywność magazynowania [6,10].

Stosunek wysokości do średnicy zbiornika oprócz czynników technicznych i ekonomicznych, wyraźnie warunkują w przypadku zasobników w elektrociepłowni także takie czynniki jak lokalna rzeźba terenu, ciśnienie w zasobniku ciepła i ciśnienie w sieci ciepłowniczej konieczne do przetłoczenia wody grzewczej do najwyższej położonego odbiorcy, ilość dostępnego miejsca na terenie elektrociepłowni [6].

1.5. RÓŻNICA TEMPERATUR WODY GORĄCEJ I ZIMNEJ

Im większa różnica temperatur pomiędzy wodą gorącą a zimną w zbiorniku, tym skuteczniej powstaje zjawisko stratyfikacji. Temperatura pracy dla zasobników bezciśnieniowych powinna wynosić poniżej $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odpowiednio do temperatury zasilania (bezpośrednio z bloków ciepłowniczych) temperatura zimnej wody wynosi około $40\text{-}55\text{ }^{\circ}\text{C}$. W przypadku zasobników ciepłej wody włączonych w układ kolektorów różnica temperatur jest odpowiednio niższa, w zależności od wielu czynników wpływających na wydajność kolektorów słonecznych, takich jak warunki atmosferyczne.

1.6. WLOT I WYLOT – PRĘDKOŚĆ PRZEPLYWU WODY

Rozpatrywano różne sposoby wprowadzania i odprowadzania wody ze zbiorników pod postacią dyfuzorów wlotowych i wylotowych w systemie kilku rur, zróżnicowanie kształtu rur doprowadzających, płaskich okrągłych talerzy i perforowanych talerzy, wprowadzanie ciepłej wody na różnych poziomach wysokości zbiornika [2, 8]. Wszystkie wymienione czynniki wpływają na rozkład temperatur w zbiorniku. Zastosowanie przegród może skutecznie zmniejszyć mieszanie się wód przy wlocie do zbiornika poprzez skierowanie płynu wpływającego. Dyfuzory są stosowane celem zmniejszenia szybkości i energii kinetycznej strumienia doprowadzanego do zasobnika ciepła. Przede wszystkim dążenie do utrzymania laminarnego przepływu wody, który nie dopuszcza do mieszania się wód o różnych temperaturach oraz umożliwia utrzymanie wąskiego pasma termokliny między nimi.

1.7. ŚCIANKI ZBIORNIKA - MATERIAL

Ze względów wytrzymałościowych i ekonomicznych zbiorniki zasobników ciepła wykonuje się ze stali, której współczynnik przewodzenia ciepła wynosi $\lambda = 50-60 \text{ W/(mK)}$. Ścianki zbiornika, charakteryzujące się dużym współczynnikiem przewodzenia ciepła, przyczyniają się to do tworzenia się gradientu temperatury w ich pobliżu. W zbiorniku aluminiowym ($\lambda = 206 \text{ W/(mK)}$) zanik stratyfikacji termicznej pojawił się w czasie dziesięciokrotnie krótszym w porównaniu z takim samym zbiornikiem, ale wykonanym ze szkła ($\lambda = 0,754 \text{ W/(mK)}$) [2].

Każdy zbiornik, aby uniknąć strat ciepła do otoczenia, powinien być odpowiednio zaizolowany termicznie. Przeważnie stosuje się wełnę mineralną o grubości od 5 cm, co prawie zupełnie pozwala na uniknięcie strat ciepła przez ścianki zbiornika do otoczenia.

1.8. PODSUMOWANIE

Niepożądane zaburzenia stratyfikacji termicznej w zasobnikach ciepła mogą nastąpić w wyniku:

- mieszania się wód podczas wprowadzania i odprowadzania wody ze zbiornika,
- przewodzenia ciepła i konwekcji swobodnej między gorącymi i zimnymi warstwami płynu wewnątrz zbiornika,
- mieszania podczas wlotu płynu do zbiornika,
- przewodzenie ciepła przez niedostatecznie zaizolowane ścianek zbiornika, powodujące nadmierne straty ciepła do otoczenia.

Na podstawie dostępnych rozważań i badań układów magazynujących ciepło stwierdzono, że stopień stratyfikacji termicznej zależy głównie od parametrów konstrukcyjnych zbiornika oraz od warunków eksploatacyjnych. Poprzez prawidłowo zaprojektowany kształt dyfuzorów wlotowych i wylotowych ze zbiornika, a także zachowania odpowiednich wartości dla parametrów charakteryzujących przepływ wody, można uniknąć strat energii w trakcie mieszania się wód o różnej temperaturze w zbiorniku zasobnika ciepła.

Zbędnej stracie ciepła przez ściany i podstawy zbiornika zasobnika ciepła można zapobiec stosując grubszą warstwę izolacji cieplnej. Zaizolowanie termiczne ścianek zbiornika od ich wewnętrznej strony, tworzące przegrodę wielowarstwową, może zmniejszyć straty ciepła do otoczenia. Warstwa zewnętrzna izolacji powinna być jak najbardziej szczelna.

LITERATURA

- [1] ALY S. L., EL-SHARKAWY A.I.: *Transient thermal analysis of spehercial liquid storage tank during charging*. Heat Reovery Systems &CHP, Vol. 10, No. 5/6. Pergamon Press, 1990.
- [2] SIUTA-OLCHA A., *Badania eksperymentalne i teoretyczne zasobnika cieplej wody ze stratyfikacją termiczną*, Polska Akademia Nauk Komitet Inżynierii Środowiska, Monografie Vol. 103, Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
- [3] IWAMOTO S., TAKAYAMA N., IMANO M., NAKAHARA N. *Numerical prediction of hot water flow and temperature distribution in thermal storage tank*, Kanagawa University.
- [4] WALUYO J., M AMIN A MAJID *Temperature Profile and Thermocline Thickness Evaluation of a Stratified Thermal Energy Storage Tank* International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol:10 No:01, February 2010, 7-12.
- [5] CRUICKSHANK C.A. *Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications*, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, June, 2009.
- [6] ZWIERZCHOWSKI R., KWESTARZ M., *Rola centralnych zasobników ciepła w miejskich systemach ciepłowniczych* VIII Forum Ciepłowników Polskich, str. 216-224. Międzyzdroje 13-15 września 2004.
- [7] CHAM Case Study *Flow in a Stratified Thermal Energy Storage Tank Demonstration example using Phoenics* 2012- May 2013.
- [8] BLANDIN D. *Thermal stratification in solar storage tanks* Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- [9] SABINIAK H.G., PIOTROWSKA P. *Akumulatory ciepła w miejskim systemie ciepłowniczym*. Instalacje 2(58) 2012. s. 6-9.
- [10] PIOTROWSKA P. *Akumulatory ciepła w zastosowaniu praktycznym*. Praca magisterska pod kierownictwem Prof. dr hab. inż. Henryka G. Sabiniaka, Politechnika Łódzka, czerwiec 2010.

ENERGY EFFICIENCY THERMAL STORAGE TANKS - ABSTRACT

Energy storage becomes necessary when the periods of its production does not coincide with the demand. Thermal storage tanks are used to solve that problem by storing heat water and its later effective use. Their efficiency increases if thermal stratification occurs within the storage tank. Stratification is important to maximise the amount of thermal energy that can be stored. It is essential to avoid mixing of waters with different temperatures. Desired thermocline depends on the design and operating conditions of the thermal storage tanks.