

MODELOWANIE STRATYFIKACJI CIEPŁA W ZASOBNIKACH CIEPŁA SŁONECZNYCH INSTALACJI GRZEWCZYCH

Dorota CHWIEDUK, Jarosław BIGORAJSKI, Michał CHWIEDUK

*Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej, MEiL
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa, e-mail: dchwied@itc.pw.edu.pl*

Streszczenie: Artykuł przedstawia rozważania dotyczące uwzględniania stratyfikacji ciepła w zasobnikach ciepła w analizach funkcjonowania słonecznych instalacji grzewczych. Opisano model działania instalacji słonecznej do podgrzewania c.w.u. i do ogrzewania pomieszczeń. Zaprezentowano wyniki symulacji numerycznej funkcjonowania różnych wybranych typów instalacji. Opisano wpływ występowania stratyfikacji ciepła w zasobnikach na pokrycie zapotrzebowania na ciepło.

Słowa kluczowe: energia słoneczna, magazynowanie ciepła, stratyfikacja ciepła

1. WPROWADZENIE

W zależności od funkcji danego systemu słonecznego jego konstrukcja może być mniej lub bardziej skomplikowana. Najbardziej powszechne i dojrzałe technologicznie są systemy do podgrzewania wody użytkowej, choć coraz częściej stosuje się instalacje wielofunkcyjne, w tym przede wszystkim instalacje do podgrzewania wody użytkowej i ogrzewania pomieszczeń, tzw. systemy typu combi. Przy zastosowaniach całorocznych w naszej strefie klimatycznej w pętli kolektorowej jako czynnik roboczy stosuje się mieszanek niezamarzającą (mieszanek glikolu i wody). Wymiennik ciepła, zainstalowany pomiędzy pętlą kolektorową a instalacją ciepłej wody, może być umiejscowiony bezpośrednio w zasobniku ciepła (tak jest z reguły) lub w zbiorniku buforowym, gdy system grzewczy wyposażony jest w dwa zasobniki ciepła. Czynnikiem magazynującym jest woda i magazynowanie odbywa się dzięki wykorzystaniu ciepła właściwego wody. Ma ono charakter krótkoterminowy (od jednego do kilku dni).

Obecnie w zależności od warunków nasłonecznienia, typu kolektorów oraz charakteru odbioru ciepła, przede wszystkim jego zmienności w czasie, stosuje się zasobniki o objętości 50-100 litrów na 1m² powierzchni czynnej kolektora słonecznego. Latem przy zbyt małej objętości

magazynowania, a zwłaszcza przy wysokim natężeniu promieniowania słonecznego i niewielkim odbiorze ciepła (lub w ogóle jego braku), temperatura czynnika w kolektorze, a w konsekwencji i w zasobniku ciepła wzrasta do maksymalnego dopuszczalnego poziomu (temperatura maksymalna wody w zasobniku może wynosić 92-93°C). Aby zapobiec dalszemu wzrostowi temperatury, w instalacjach z kolektorami płaskimi, można stosować nocą przepływ odwrotny. Kolektor płaski, będący swoistym wymiennikiem ciepła, nocą intensywnie oddaje ciepło do otoczenia o temperaturze znacznie niższej, niż temperatura czynnika roboczego w kolektorze. Można też stosować chłodnice bezpośrednio na dachach budynków (czynnik roboczy cyrkuluje pomiędzy kolektorami, a chłodnicą). Jednakże, takie rozwiązania oznaczają niepełne wykorzystanie dostępnego promieniowania słonecznego. Nadmiar ciepła może więc zasilać też inne instalacje grzewcze (np. wody w basenie, czy inne odbiorniki).

Magazynowanie ciepła może odbywać się w zasobniku z pełnym mieszaniem, w którym w dolnej części stosuje się tzw. mieszadełko. Jednakże w większości zasobników wykorzystywany jest efekt stratyfikacji – uwarstwienia ciepła. Polega on na tym, że w dolnej części zbiornika temperatura wody jest najniższa i wraz z wysokością zasobnika temperatura wody wzrasta. Jeżeli zasobnik służy do podgrzewania wody użytkowej, wtedy w górnej części zbiornika instalowany jest odpływ do odbiorcy, a w dolnej zasilanie zimną wodą wodociągową. Zjawisko uwarstwienia ciepła jest szczególnie korzystne, gdy wymagane jest ciepło do różnych potrzeb o różnym poziomie temperatury. W takim przypadku w zbiorniku może znajdować się kilka punktów odbioru ciepłej wody, przykładowo w części środkowej odbiór do zasilania układu niskotemperaturowego ogrzewania pomieszczeń (30–40°C), powyżej odbiór do zasilania obiegu c.w.u. (45–55°C), w górnej odbiór do

zasilania obiegu wysoko-temperaturowego (60–80°C) ogrzewania pomieszczeń.

W zbiorniku magazynującym umieszczone są często dwie wężownice. Do dolnej dostarczana jest woda o niższej temperaturze, np. z obiegu kolektorów słonecznych, do górnej woda o wyższej temperaturze, np. z kotła gazowego lub na paliwo stałe. Bardziej efektywnym rozwiązaniem, szczególnie przy wykorzystaniu energii słonecznej jest zastosowanie dwóch zbiorników magazynujących. Jeden pełni funkcję zasobnika buforowego, w którym magazynowana woda jest podgrzana ciepłem pochodzącym z konwersji fototermicznej. Drugi jest zasobnikiem wyposażonym w dodatkowe, z reguły konwencjonalne źródło ciepła, w którym w razie potrzeby występuje dalsze podgrzewanie wody do wymaganej temperatury. W ten sposób pozyskana energia promieniowania słonecznego może być w pełni wykorzystana i działanie instalacji słonecznej nie jest zakłócone, w sposób pośredni, dogrzewem ze źródła pomocniczego (szczytowego). W dowolnym zbiorniku wykorzystuje się efekt stratyfikacji ciepła.

Dostępne w literaturze rzeczywiste pomiary wpływu stratyfikacji na uzyski energii z słonecznych instalacji grzewczych wskazują na wzrost tych uzysków w wysokości 5-15% w stosunku do systemów z zasobnikami z pełnym mieszaniem. Autorzy podają wartości otrzymanych wzrostów uzysków w zakresie: 10% Davis i Bartera [4], 5-15% Sharp i Loehreke [6].

2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE FUNKCJONOWANIA SŁONECZNEJ INSTALACJI GRZEWczej

W ramach realizowanego w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej jednego z zadań projektu (POIG.01.01.02-10-106/09-01,PT7, T3), stworzony został program symulacyjny funkcjonowania słonecznych instalacji grzewczych w warunkach krajowych. Energia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnie dowolnie usytuowane (kolektora) jest wyznaczana z zależności Liu-Jordana [5], opisującej promieniowanie rozproszone jako izotropowe. Całkowite godzinowe napromienowanie I_c powierzchni dowolnie usytuowanej jest sumą składowej promieniowania bezpośredniego I_b , rozproszonego I_d i odbitego I_o , skorygowanych współczynnikami korekcji R , z których dwa ostatnie zależą jedynie od pochylenia powierzchni (ostatni zawiera też refleksyjność ρ_o podłoża). Natomiast współczynnik korekcji promieniowania bezpośredniego jest zmienny w czasie i jest funkcją parametrów astronomiczno – sferycznych wzajemnego położenia Ziemi i Słońca [2]. Napromienowanie godzinowe wynosi:

$$I_c(t) = I_b(t)R_b(t) + I_d(t)R_d + (I_b(t) + I_d(t))\rho_o R_o \quad (1)$$

Jako dane wejściowe sum godzinnych promieniowania słonecznego wykorzystano średnie wieloletnie promieniowania całkowitego i rozproszonego dla 19 miast polskich [7] (stąd też zaczerpnięto dane o temperaturach powietrza zewnętrznego T_a). Energię użyteczną kolektora Q_u można wyznaczyć z równania Hotella – Whiliera – Blissa. Postać tego równania uwzględniająca sprawność optyczną kolektora oraz współczynniki strat ciepła jest następująca [5]:

$$Q_u = A_c \left[\eta_o G_\beta - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 \right] \quad (2)$$

\dot{Q}_u - moc użyteczna kolektorów słonecznych, W;

A_c - powierzchnia apertury kolektorów słonecznych, m²;

η_o - sprawność optyczna;

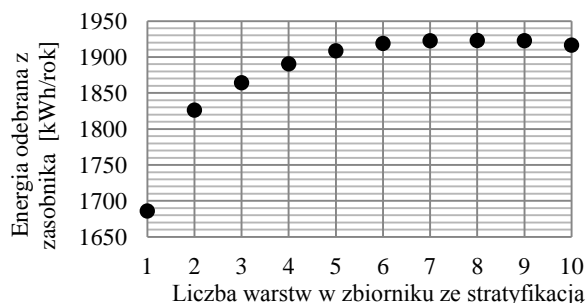
a_1 - współczynnik strat ciepła, W/(m²K);

a_2 - wsp. strat ciepła zależny od temperatury, W/(m²K²);

G_β - całkowite natężenie promieniowania sł., W/m²;

T_m - średnia temperatura czynnika w kolektorze, K.

Energia użyteczna jest przekazywana do zbiornika magazynującego. Do analizy zjawiska magazynowania ciepła wykorzystano model wielosekcyjny zasobnika [5]. Zbiornik został podzielony na N warstw, każda o takiej samej temperaturze w danej warstwie. Przeprowadzono symulację dla różnej liczby warstw od 1 do 10.



Rys. 1. Energia odebrana z zasobnika w zależności od ilości sekcji w modelu zasobnika

Fig. 1. Energy used from storage tank according to number of layers in storage tank model

Na rysunku 1 zaprezentowano ilość energii odebranej z zasobnika o pojemności 200 l zasilanego instalacją kolektorów słonecznych, w zależności od przyjętej w modelu liczby warstw zbiornika, rysunek otrzymano na podstawie symulacji. Liczba warstw równa 1 oznacza, że w zbiorniku nie występuje stratyfikacja (zbiornik z pełnym mieszaniem). Im większa liczba warstw, tym gradient temperatur w zasobniku jest bardziej widoczny. Zwiększanie liczby warstw powyżej 3, powoduje wydłużenie czasu obliczeń. W rzeczywistym zasobniku można uzyskać znaczną różnicę temperatur pomiędzy dolnymi i górnymi warstwami, wtedy gdy stosowane są specjalne rozwiązania i bardzo małe przepływy, aby nie dopuścić do mieszania czynnika w zasobniku.

W przyjętym modelu zasobnik podzielony został na 3 części. W przypadku podziału zasobnika na większą liczbę warstw, konieczna jest zmiana kroku czasowego obliczeń. Związane jest to z możliwością wystąpienia w danym kroku czasowym przepływów przekraczających pojemność danej warstwy, co powoduje wystąpienie błędów przy zastosowanym modelu zasobnika. Bilans energetyczny dla i-tej warstwy zbiornika magazynującego został określony następująco (i-numer danej warstwy):

$$m_i c_w \frac{dT_{s,i}}{dt} = \dot{Q}_K + \dot{Q}_L - \dot{Q}_{str} + \dot{Q}_M \quad (3)$$

\dot{Q}_K - strumień ciepła z kolektora słonecznego, W;

\dot{Q}_L - strumień ciepła powracający z pętli c.o., W;

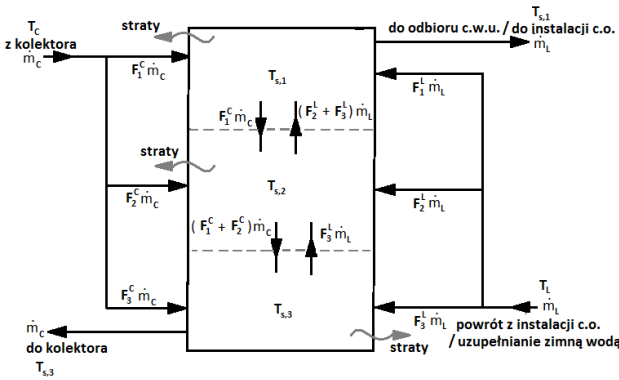
\dot{Q}_{str} - strumień ciepła tracony do otoczenia, W;

\dot{Q}_M - str. ciepła przepływający z sąsiednich warstw, W;

c_w - ciepło właściwe wody, J/kg·K;

$T_{s,i}$ - temperatura wody i-tej warstwy w zasobniku, K.

Do zapisania szczegółowego bilansu energetycznego niezbędne było zdefiniowanie funkcji kontrolnej kolektora słonecznego F_i^C oraz funkcji kontrolnej powrotu odbioru F_i^L . Funkcja kontrolna kolektora słonecznego określa numer warstwy w zasobniku, do której wpływa czynnik opuszczający kolektor słoneczny. Funkcja kontrolna powrotu odbioru określa numer warstwy w zasobniku, do której wpływa czynnik powracający z instalacji ogrzewania pomieszczeń lub uzupełnienie zimną wodą. Funkcje te przyjmują wartości 0 lub 1 w zależności od temperatur w poszczególnych warstwach.



Rys. 2. Schemat działania modelu trójsekcyjnego stratyfikacji w zbiorniku magazynującym, wg [5]

Fig. 2. Three-node stratified liquid storage tank model, ref. [5]

Strumień masy przepływający z dolnej warstwy ku górnej lub odwrotnie jest uzależniony od strumienia masy przepływającego przez kolektor, strumienia masy, który wraca z instalacji odbierającej ciepło oraz od dwóch funkcji kontrolnych. W obliczeniach zdefiniowano dodatkowo sumaryczny strumień masy \dot{m}_m . Sumaryczny strumień masy \dot{m}_m reprezentuje przepływ masy z warstwy (i-1) do warstwy i. Sumaryczny strumień masy został zdefiniowany następująco:

$$\dot{m}_{m,i} = \dot{m}_c \sum_{j=1}^{N-1} F_j^C - \dot{m}_L \sum_{j=1}^N F_j^L \quad (4)$$

\dot{m}_c - strumień masy przepływający z górnej warstwy w kierunku dolnej, kg/s;

\dot{m}_L - strumień masy przepływający z dolnej warstwy w kierunku górnej, kg/s.

Na rysunku 2 przedstawiony został schemat działania zbiornika magazynującego ze stratyfikacją. Opisane wielkości przepływów oraz funkcji kontrolnych dla poszczególnych warstw zostały na nim przedstawione. Czynniki robocze powracający z kolektora słonecznego w zależności od temperatury T_c wpływa do odpowiedniej warstwy zbiornika magazynującego:

gdy $T_c \geq T_{s,1}$ czynnik trafia do warstwy nr 1;

gdy $T_c < T_{s,1} \wedge T_c \geq T_{s,2}$ czynnik trafia do warstwy nr 2;

gdy $T_c < T_{s,2}$ czynnik trafia do warstwy nr 3.

Czynnik, który wpływa do kolektora słonecznego jest zawsze pobierany z najniższej warstwy (najniższa temperatura magazynowania). Woda, która wpływa do instalacji c.w.u. lub c.o. jest pobierana z najwyższej warstwy (najwyższa temperatura magazynowania). Natomiast woda powracająca z instalacji c.o. lub woda uzupełniająca instalację c.w.u. jest kierowana do odpowiedniej warstwy w zależności od temperatury T_L :

gdy $T_L \leq T_{s,3}$ czynnik trafia do warstwy nr 3;

gdy $T_L > T_{s,3} \wedge T_L < T_{s,1}$ czynnik trafia do warstwy nr 2;

gdy $T_L \geq T_{s,1}$ czynnik trafia do warstwy nr 1.

Równanie 3, rozwinięto rozpisując odpowiednie strumienie ciepła wpływające i wypływające z danych warstw zasobnika, ma ono następującą postać:

$$m_i c_w \frac{dT_{s,i}}{dt} = F_i^C m_c c_g (T_c - T_{s,i}) + F_i^L m_L c_w (T_{Lr} - T_{s,i}) + U_s A_z (T_{wew} - T_{s,i}^r) + \begin{cases} \dot{m}_{m,i} c_w (T_{s,i-1} - T_{s,i}) & \text{jeżeli } \dot{m}_{m,i} > 0 \\ \dot{m}_{m,i+1} c_w (T_{s,i} - T_{s,i+1}) & \text{jeżeli } \dot{m}_{m,i+1} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

m_i - masa wody znajdującej się w i-tej warstwie, kg;

U_s - wsp. strat ciepła przez obudowę zbiornika, W/m²K;

$A_{z,i}$ - powierzchnia obudowy i-tej warstwy zbiornika, m²;

T_{wew} - temperatura w pomieszczeniu ze zbiornikiem, K;

T_{Lr} - temp. wody wracającej z instalacji ogrzewania lub zimnej wody wodociągowej dla instalacji c.w.u., K.

Równanie (5) rozwiązano metodą różnic skończonych ze stałym krokiem czasowym $\Delta\tau$. W zapisie różnicowym równanie przekształca się do następującej postaci:

$$T_{s,i}^{\tau+\Delta\tau} = T_{s,i}^{\tau} + \frac{\Delta\tau}{m_i c_w} \left[F_i^C m_c c_g (T_c - T_{s,i}^{\tau}) + F_i^L m_L c_w (T_{Lr} - T_{s,i}^{\tau}) + U_s A_z (T_{wew} - T_{s,i}^{\tau}) + \begin{cases} \dot{m}_{m,i} c_w (T_{s,i-1}^{\tau} - T_{s,i}^{\tau}) & \text{jeżeli } \dot{m}_{m,i} > 0 \\ \dot{m}_{m,i+1} c_w (T_{s,i}^{\tau} - T_{s,i+1}^{\tau}) & \text{jeżeli } \dot{m}_{m,i+1} < 0 \end{cases} \right] \quad (6)$$

Opisany model wykorzystany został do symulacji działania instalacji kolektorów słonecznych ze zbiornikiem ze stratyfikacją do potrzeb c.w.u. oraz c.o.

3. SYMULACJA FUNKCJONOWANIA SŁONECZNEJ INSTALACJI GRZEWCZEJ ZE ZBIORNIKIEM MAGAZYNUJĄCYM WYKORZYSTUJĄCYM STRATYFIKACJĘ

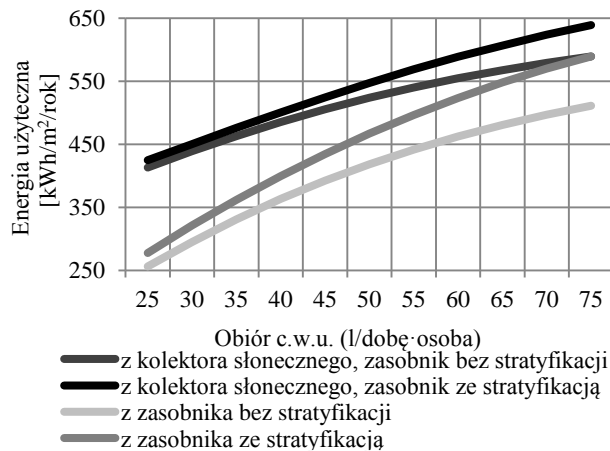
3.1. Instalacja c.w.u.

Do symulacji działania instalacji wykorzystano dane godzinowe napromieniowania na powierzchnię poziomą oraz godzinowe temperatury powietrza zewnętrznego. Obliczenia napromieniowania na powierzchnię dowolnie usytuowaną wykonano z godzinowym krokiem czasowym. Inny krok czasowy zastosowano w przypadku magazynowania ciepła w zasobniku, równanie (6) rozwiązano z minutowym krokiem czasowym. Symulacje funkcjonowania instalacji słonecznej przeprowadzono dla przykładowego typu kolektora o następujących parametrach: sprawność optyczna 0,83; liniowy współczynnik strat ciepła $a_1=3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$; współczynnik strat ciepła zależny od temperatury $a_2=0,009 \text{ W/m}^2\text{K}^2$. W celu porównania instalacji z zasobnikiem, w którym występuje stratyfikacja z instalacją z zasobnikiem z pełnym mieszanym wykonano szereg symulacji.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki symulacji działania instalacji kolektorów słonecznych o powierzchni 4 m^2 współpracującej z zasobnikiem o pojemności 300 l. Zapotrzebowanie na energię wynika z liczby odbiorców (4 osoby), jednostkowego odbioru c.w.u. oraz wymaganej temperatury wody (45°C). Temperatura wody uzupełniającej zasobnik przyjęto na poziomie 10°C . Na rysunku 3 widoczna jest zależność energii użytecznej z 1 m^2 kolektora słonecznego oraz energii odebranej z zasobnika przy zmianie zapotrzebowania na c.w.u. dla dwóch zasobników, z lub bez stratyfikacji. Uzysk jednostkowy z kolektora słonecznego oznacza ilość energii dostarczoną z 1 m^2 kolektora do zasobnika w ciągu całego roku. Natomiast uzysk jednostkowy z zasobnika oznacza ilość energii jaka została odebrana w danym roku na potrzeby c.w.u. przypadająca na 1 m^2 kolektora słonecznego. Wartość ta jest niższa od uzysku z kolektora ponieważ uwzględnia straty ciepła z zasobnika.

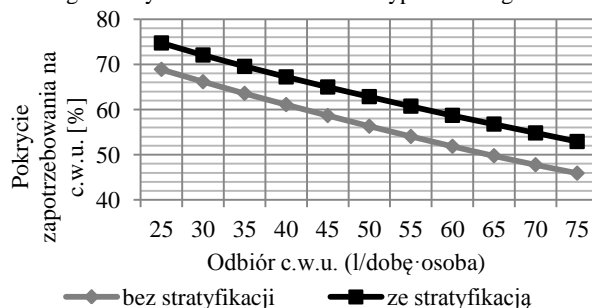
Występowanie stratyfikacji zapewnia wyższy uzysk z kolektora słonecznego, który jest wyższy o kilkanaście do kilkudziesięciu kWh z 1 m^2 kolektora słonecznego w ciągu roku. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na energię rośnie różnica w uzyskach pomiędzy instalacją z zasobnikiem ze stratyfikacją ciepła, a zasobnikiem standardowym. Różnica ta jest bardziej widoczna przy porównaniu energii jaka została odebrana z instalacji na potrzeby c.w.u. Przy wykorzystaniu zasobnika ze stratyfikacją ciepła pokrycie

zapotrzebowania na c.w.u. jest średnio o 7% wyższe. Otrzymane wyniki zobrazowane zostały na rysunku 4, który przedstawia zmiany zużycia ciepła na potrzeby c.w.u. przez instalację kolektorów słonecznych wraz ze zmianą zapotrzebowania na ciepło.



Rys. 3. Energia użyteczna z kolektorów słonecznych oraz z zasobnika w zależności od jego rodzaju oraz w zależności od wielkości dziennego odbioru c.w.u.

Fig. 3. Energy used from solar collector and storage tank according to daily hot water demand and type of storage tank



Rys. 4. Zmiana pokrycia zapotrzebowania na c.w.u. przez instalację kolektorów słonecznych przy zmianie odbioru c.w.u. oraz przy zastosowaniu różnych zasobników

Fig. 4. Head demand cover change according to daily hot water demand and type of storage tank

Przedstawione wyniki dotyczą jedynie pokrycia zapotrzebowania na c.w.u. przez instalację kolektorów słonecznych. Analizując pracę zasobnika ze stratyfikacją w takim systemie, rozwarstwienie temperaturowe wynika z kierowania gorącego czynnika z kolektorów słonecznych do odpowiedniej warstwy. Odbiór ciepła na potrzeby c.w.u. odbywa się zawsze z najwyższej warstwy, natomiast uzupełnianie wodą zimną oraz zasilanie kolektorów słonecznych odbywa się zawsze z warstwy najniższej. Wynika to z budowy zasobnika oraz z przyjętej temperatury wody zasilającej, która równa jest minimalnej temperaturze, jaka może występować w zasobniku. W przypadku instalacji pokrywającej również zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania budynku, stratyfikacja ciepła w zasobniku powodowana jest również różną

temperaturą powrotu z instalacji c.o. Czynniki powracający do zasobnika, w zależności od jego temperatury, tj. od zastosowanego systemu ogrzewania, kierowany jest do odpowiedniej warstwy zasobnika.

3.2. Instalacja ogrzewania pomieszczeń i c.w.u.

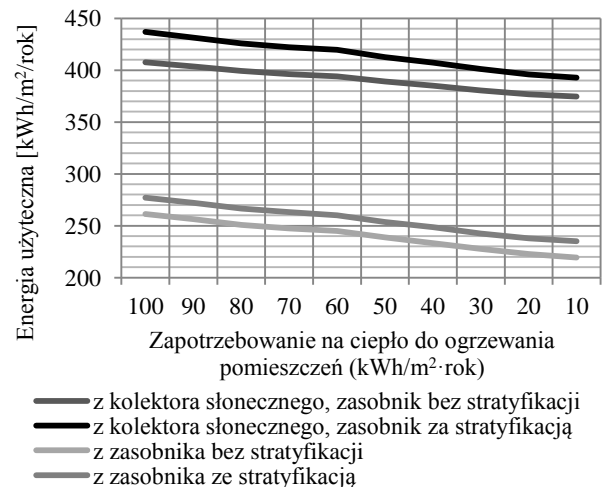
Na rysunkach 5 oraz 6 przedstawiono wyniki symulacji działania instalacji kolektorów słonecznych o powierzchni 10 m² współpracujących z zasobnikiem o pojemności 700 l, który pokrywa zapotrzebowanie na c.w.u. oraz c.o.. Założono stałe dzienne zapotrzebowania na c.w.u. wynoszące 29300 kJ. Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania wynika z jednostkowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania oraz z powierzchni budynku, którą przyjęto jako 150 m². Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania wyznaczono z metody stopniogodzin, uwzględniając zmianę temperatury powietrza.

Na rysunku 5 przedstawiono zależność energii użytecznej z 1 m² powierzchni kolektora słonecznego oraz energii odebranej z zasobnika przy zmianie zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku. Podobnie, jak w przypadku pokrycia zapotrzebowania na c.w.u., zasobnik ze stratyfikacją pozwala zapewnić wyższe uzyski zarówno z samych kolektorów słonecznych, jak i pozwala wykorzystać większą ilość energii. Różnice pomiędzy energią wykorzystaną z dwóch zasobników wynoszą około 15 kWh/m² kolektora słonecznego i są praktycznie stałe dla różnych wartości zapotrzebowania na c.o. Relatywnie niskie wartości uzysków jednostkowych (220-280 kWh/m²·rok) związane są z ograniczonym odbiorem ciepła w okresie letnim.

Na rysunku 6 przedstawiono udział pokrycia całkowitego zapotrzebowania na c.w.u. i c.o. przez instalacje kolektorów słonecznych przy zastosowaniu różnych zasobników oraz przy zamianie zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania w budynku. Jak wynika z rysunku 6 różnice pomiędzy dwoma rodzajami zasobników są niewielkie rzędu 1-3 punktów procentowych, jednak zapotrzebowanie na ciepło jest w tym przypadku znacznie większe. Różnica pomiędzy instalacją działającą z zasobnikiem ze stratyfikacją, a zasobnikiem bez stratyfikacji wynosi około 160 kWh/rok i praktycznie nie zależy od wartości zapotrzebowania na ciepło w budynku. Sytuacja taka spowodowana jest przez:

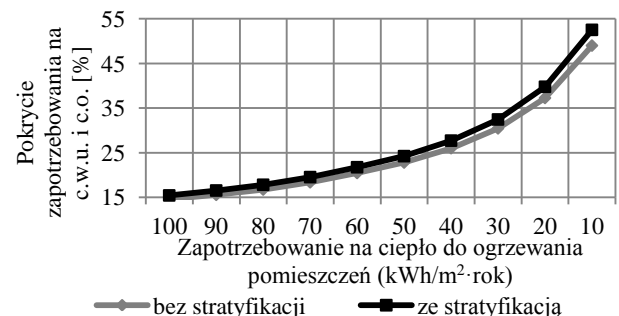
- niewielki odbiór ciepła w okresie letnim i pokrycie zapotrzebowania przez obie instalacje w 100%;
- dużym zapotrzebowaniem na ciepło w okresie zimowym i niewielką ilością ciepła dostarczaną przez kolektory słoneczne, co skutkuje szybkim wykorzystaniem większości pozyskiwanej energii.

W okresie przejściowym, w którym instalacja pozyskuje dużo energii oraz występuje duże zapotrzebowanie na ciepło, stratyfikacja pozwala uzyskać większe (niż latem) wykorzystanie dostępnej energii.



Rys. 5. Energia użyteczna z kolektorów słonecznych oraz z zasobnika w zależności od jego rodzaju oraz w zależności od wielkości jednostkowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania

Fig. 5. Energy used from solar collector and storage tank according to space heating demand in building and type of storage tank

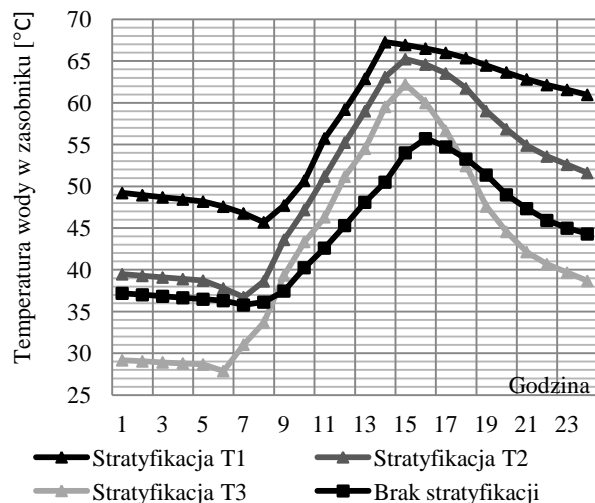


Rys. 6. Zmiana pokrycia zapotrzebowania na ciepło w budynku (c.w.u. oraz c.o.) przez instalację kolektorów słonecznych przy zmianie zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania oraz przy zastosowaniu różnych typów zasobników

Fig. 6. Head demand cover change according to space heating demand in building and type of storage tank

Pozytywny efekt występowania stratyfikacji w zasobniku widoczny jest na wykresie dziennego przebiegu temperatur w zasobniku. Na rysunku 7 przedstawiony został przykładowy dobowy przebieg temperatur magazynowania w obu wariantach. W przypadku wariantu zbiornika ze stratyfikacją przedstawiono, przebieg temperatur dla każdej z trzech sekcji zbiornika. Wykres ten uzyskano przy założeniach identycznych jak w przypadku rysunków 3 i 4. W przypadku zbiornika ze stratyfikacją widać znaczne rozwarstwienie termiczne. Różnice temperatur pomiędzy najniższą a najwyższą temperaturą sięga kilkunastu stopni. Różnica ta zmniejsza się, gdy zaczyna funkcjonować kolektory słoneczne (godzina 9). Z kolei, gdy kolektory słoneczne przestają dostarczać ciepło do zasobnika (godzina 17), różnice temperatur pomiędzy warstwami

rosną, wynika to z intensywniejszego odbioru ciepła w tym okresie.



Rys. 7. Dobowy przebieg temperatur magazynowania 12.04
Fig. 7. Daily change of water temperature in storage tank 12.04

Na potrzeby c.w.u. wymagana jest temperatura wody 45°C. W przypadku zasobnika ze stratyfikacją temperatura w górnej części zasobnika przez cały czas przekracza tę temperaturę, dzięki temu nie jest konieczne dogrzewanie wody przez dodatkowe źródło ciepła. Przy braku stratyfikacji temperatura powyżej 45°C występuje w godz. 12-22. W pozostałych godzinach, jeśli występuje odbiór ciepła z zasobnika woda musi być dogrzewana.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki symulacji wskazują na pozytywny efekt występowania stratyfikacji w zasobniku. Dla przyjętych założeń zwiększenie wykorzystania energii promieniowania słonecznego na potrzeby c.w.u. wyniosło około 7%. Średni wzrost uzysków energii z instalacji z zasobnikiem ze stratyfikacją w stosunku do instalacji z zasobnikiem z pełnym mieszaniem wynosi około 10%. Wynik taki uzyskano dla średniego zapotrzebowania na ciepło do przygotowania c.w.u. Analizując cały analizowany zakres zapotrzebowania wzrost uzysków dla zasobnika ze stratyfikacją w stosunku do zasobnika z pełnym mieszaniem zmienił się w zakresie 8-15%. Wyniki symulacji dla instalacji kombi z zasobnikiem ze stratyfikacją wykazały zwiększenie pokrycia zapotrzebowania na ciepło o 1-3%. Odbiór ciepła z zasobnika instalacji w ciągu całego roku był o około 6,5% wyższy niż w przypadku instalacji z zasobnikiem z pełnym mieszaniem. Wynik ten jest niższy niż uzyskany dla instalacji pokrywającej jedynie zapotrzebowanie na c.w.u., głównie ze względu na przyjęte założenia odnośnie powierzchni kolektorów słonecznych oraz wielkości

zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania. Porównując otrzymane wyniki z wynikami rzeczywistymi dostępnymi w literaturze są one bardzo zbliżone (5-15%). Przewiduje się dalsze modyfikacje modelu z uwzględnieniem większej liczby warstw, podział magazynu na 3 części o takiej samej temperaturze, może powodować obniżenie wielkości ciepła odebranego z zasobnika w stosunku do wyników rzeczywistych. W typowych analizach stratyfikacji zasobnik dzielony jest na 10 części [1,3], co pozwala na uzyskanie większych gradientów temperatur w zasobniku. Przyjęty w obliczeniach model pomija wymianę ciepła pomiędzy kolejnymi warstwami płynu w zasobniku. Efektem takiego założenia jest powolne wyrównywanie się temperatur w zasobniku, przy braku dostarczania i odbierania ciepła, które jest związane jedynie z występowaniem strat ciepła do otoczenia z zasobnika. W przypadku braku strat ciepła, gradient temperatury w zasobniku nie maleje z czasem. Ze względu na zastosowany model nie ma możliwości badania wpływu kształtu zasobnika na uzyskiwaną stratyfikację ciepła. Zaprezentowany model pozwala uzyskać zadowalające wyniki przy relatywnie prostej i szybkiej symulacji działania słonecznych instalacji grzewczych.

MODELING OF HEAT STRATIFICATION IN STORAGE TANKS OF SOLAR HEATING SYSTEMS

Summary: The paper presents consideration of taking into account the heat stratification in storage tanks in analysis of solar heating systems operation. Model of DHW and space heating solar system have been described. Results of numerical simulation of different types of solar heating systems operation have been presented. Influence of the thermal stratification in storage tanks on the rate of heat supplied to a building has been described.

Literatura

- [1] Braun J. E., Klein S. A., Mitchell J. W., *Seasonal Storage of Energy in Solar Heating*, Solar Energy, Vol. 26, No. 5, pp. 403-411, 1981
- [2] Chwieduk D. *Energetyka słoneczna budynku*, ARKADY, 2011
- [3] Cristofari C., Notton G., Poggi P., Louche A., *Influence of the Flow Rate and the Tank Stratification Degree on the Performances of a Solar Flat-Plate Collector*, Int. Journal of Thermal Sciences, Vol. 42, No. 5, pp. 455-469, 2003
- [4] Davis E.S., Bartera R., *Stratification in Solar Water heater storage tanks*, Proc. on Solar energy storage sub-systems for heating and cooling of building, USA, 1975
- [5] Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., 1999
- [6] Sharp M.K., Loehreke R.I., *Stratified thermal storage in residential solar energy applications*, Energy No.3, pp. 106-113, 1979
- [7] www.mir.gov.pl