

MAGAZYNOWANIE NADWYŻKI CIEPŁA Z TUNELU FOLIOWEGO W AKUMULATORZE ZE ZŁOŻEM KAMIENNYM*

*Sławomir Kurpaska, Hubert Latała, Kazimierz Rutkowski
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Ryszard Hołownicki, Paweł Konopacki, Jacek Nowak, Waldemar Treder
Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach*

Streszczenie. W pracy w oparciu o dostępną literaturę, scharakteryzowano kierunki badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych z zakresu ogrzewania szklarni z wykorzystaniem źródeł energii odnawialnej. Dla rozważanego systemu (tunel laboratoryjny wraz z akumulatorem ze złożem kamiennym) przedstawiono zależności wykorzystane do oszacowania ilości energii (magazynowanej w postaci ciepła) z wnętrza tunelu oraz do określenia wielkości akumulatora ciała stałego. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że potencjalna dobowo ilość ciepła do zmagazynowania dla analizowanych wartości warunków zewnętrznych mieściła się w granicach od $0,37 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ do blisko $1,72 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (odpowiednio dla dnia pochmurnego oraz dnia słonecznego). Obliczenia przeprowadzono zakładając, że temperatura wewnątrz obiektu nie przekracza 24°C zaś deficyt ciśnienia pary wodnej (jako różnica między aktualnym ciśnieniem a ciśnieniem w stanie nasycenia) będzie równy 4hPa . Dla uzyskanych wyników, w oparciu o największą wartość współczynnika determinacji; znaleziono zależność (określoną estymacją nieliniową metodą quasi-Newtona przy zachowanym współczynniku zbieżności $0,001$) ujmujące związek między ilością ciepła a temperaturą otoczenia i sumą energii promieniowania słonecznego. Po przeprowadzeniu analizy i badań weryfikacyjnych w warunkach laboratoryjnych, zaproponowano niezbędną powierzchnię i objętość złoża akumulatora.

Słowa kluczowe: energia odnawialna, akumulator ciała stałego, tunel foliowy

* Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Wstęp

W produkcji ogrodniczej pod osłonami istnieje wiele rozwiązań technicznych, których stosowanie prowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na ciepło. Na podstawie prac badawczych realizowanych w licznych ośrodkach naukowych można stwierdzić, że ta problematyka jest wszechstronnie analizowana. Wynika to z jednej strony z konieczności zmniejszenia kosztów produkcji a z drugiej obaw o zasoby źródeł paliw kopalnych oraz troski o środowisko przyrodnicze. W krajach UE obowiązujące uregulowania prawne narzucają konieczność zastępowania paliw kopalnych źródłami energii odnawialnej oraz zwrócenia uwagi na problematykę poszanowania energii (np. tzw. pakiet 3x20). Te zagadnienia w produkcji szklarniowej realizowane są przez komercyjne firmy które wprowadzają do wyposażenia obiektów ogrodniczych elementy energooszczędne, do których można zaliczyć: osłony o zwiększonej izolacyjności, optymalne sterowanie parametrami mikroklimatu wewnątrz obiektu, wieloobwodowe systemy grzewcze wraz ze zbiornikami buforowymi, ekrany ciepła, kurtyny boczne, energooszczędne nawadnianie, energooszczędne doświetlenia za pomocą diod LED, stosowanie układów kogeneracyjnych (równoczesne wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej), magazynowanie nadwyżek ciepła w akumulatorach energii.

Oprócz istniejących komercyjnych rozwiązań, przed nauką stoją wyzwania związane ze wskazywaniem kierunków rozwoju rozwiązań technicznych minimalizujących zużycie paliw kopalnych wraz z podaniem wytycznych dla rozwiązań które znajdą zastosowanie w praktyce. Stąd, w wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania obejmujących problematykę energetyczną. Poniżej przedstawiono niektóre z tych działań i pokrótce omówiono uzyskane wyniki badań. I tak Garcia i in. [1998] przeanalizowali opłacalność stosowania urządzeń energetyki odnawialnej (pompa ciepła, kolektory słoneczne). Na podstawie przeprowadzonej analizy określili rekomendowane obszary geograficzne (do analizy wybrano cztery obszary o zróżnicowanej szerokości geograficznej) w Europie do stosowania tych urządzeń w praktyce ogrodniczej. Santamouris i in. [1994] dokonali syntetycznego przeglądu rozwiązań wykorzystujących pasywne ogrzewanie szklarni wraz określeniem uzyskanych efektów energetycznych. Do systemów pasywnego wykorzystania energii promieniowania słonecznego zaliczyli: magazynowanie ciepła w akumulatorach cieczowych, w akumulatorach wykorzystujących ciepło przejścia fazowego materiałów (PCM), magazynowanie ciepła w złożu akumulatora kamiennego oraz stosowanie innych rozwiązań minimalizujących zużycie paliw kopalnych (np. polewanie osłony wodą podgrzaną w wyniku bezpośredniej absorpcji promieniowania słonecznego, podgrzewanie powietrza w wymiennikach przepływowych i kierowanie go do wnętrza szklarni). W efekcie przeanalizowano przydatność wymienionych systemów w aspekcie ich lokalizacji w rejonach o zróżnicowanej szerokości geograficznej. Chinese i in. [2005] przeprowadzili procedurę optymalizacji w celu oceny techniczno-ekonomicznej systemu w którym uzyskane ciepło w wyniku fermentacji odpadów poprodukcyjnych ze szklarni przekazywane było do ogrzewania podłoża w szklarni. Autorzy stwierdzili przydatność analizowanego systemu wskazując równocześnie potencjalne korzyści (głównie obniżkę kosztów produkcji) dla jego użytkowników. W analizie jako kryterium optymalizacyjne przyjęli koszty energii i opłat z tytułu emisji do atmosfery substancji szkodliwych z równoczesnym uwzględnieniem rekomendowanej temperatury czynnika grzewczego. Ozenger i Hepbasli [2005] analizowali efektywność energetyczną i sprawność energetyczną w systemie, w którym ciepło przenoszone przez sprężarkową pompę grzewczą współpracującą z przepływowymi

pionowymi wymiennikami ciepła kierowane było do ogrzewania szklarni. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzili przydatność tego systemu do ogrzewania analizowanego obiektu. Bayer i in. [2012] dokonali analizy wykorzystania sprężarkowych pomp ciepła w Europie, stwierdzając że te urządzenia energetyki odnawialnej, chociaż do napędu wykorzystuje energię elektryczną może być stosowane w krajach w których kładziony jest silny nacisk na redukcję emisji do atmosfery CO₂. Hepbasli [2011] przeprowadził analizę wykorzystania trzech systemów do ogrzewania szklarni, a mianowicie: układu biwalentnego (ciepła woda podgrzana w kolektorach i gromadzona w zbiorniku akumulacyjnym stanowiąca dolne źródło ciepła w pompie grzewczej), kotła zasilanego biomasą drzewną oraz kotła zasilanego gazem ziemnym. Wykonana analiza obejmowała określenie wielkości strat ciepła z rozbiorem na: system wytwarzania, przesyłu, strat ciepła przez osłonę w szklarni o zróżnicowanej powierzchni. Na bazie przeprowadzonej analizy rekomendowano poszczególne źródła ciepła do ogrzewania szklarni. Panwi i in. [2011] przedstawili przegląd modeli wykorzystywanych do opisu zjawisk: ogrzewania, chłodzenia i wentylacji w szklarniach. Benli i in. [2009] analizowali efekty energetyczne w systemie, w którym złożo akumulatora (jako PCM zastosowano chlorek wapnia o temperaturze topnienia 29°C) wykorzystane było do magazynowania energii promieniowania słonecznego, a podgrzane powietrze w procesie topnienia służyło do ogrzewania szklarni. Autorzy określili efekty energetyczne oraz czas w którym ciepło z akumulatora zaspakajało zapotrzebowanie ciepła badanej szklarni. Nitnas i in. [2011] analizowali efektywność systemu, w którym zastosowano dwa przewody: w jednym z nich znajdowała się woda- podgrzana w wyniku bezpośredniej konwersji promieniowania słonecznego zaś bezpośrednio nad tym przewodem przez przewody perforowane przepływało powietrze zasysane z wnętrza szklarni. W wyniku badań porównawczych (w odniesieniu do szklarni standardowej) określili oszczędności w zużyciu energii oraz rekomendowali ten system do szerszego stosowania w produkcji. Kondili i Kaldellis [2006] opracowali optymalizacyjny model w którym uwzględniono wykorzystanie energii geotermalnej oraz słonecznej do ogrzewania szklarni. W analizie uwzględnili odległość odbiornika ciepła oraz określili roczne wykorzystanie takiego systemu. Bascetincelik i in. [1999] przeprowadzili analizę efektywności energetycznej i egzenergetycznej dla systemu magazynowania ciepła w akumulatorze wykorzystującym ciepło przejścia fazowego (parafina). Ciepło z akumulatora wykorzystywano do ogrzewania laboratoryjnej szklarni. Ghosal i Tiwari [2004] opracowali i zweryfikowali model matematyczny do analizy zagadnień cieplnych w szklarni, w której ogrzewano strefę roślin za pomocą przewodów polietylenowych zasilanych ciepłą wodą z ujęcia geotermalnego. Określili również rozkład temperatury wokół roślin stwierdzając w konkluzji przydatność takiego systemu do produkcji szklarniowej. Ozturk i Bascetincelik [2003] analizowali wskaźniki efektywności energetycznej dla systemu, w którym ciepłe powietrze (podgrzane w kolektorach powietrznych) magazynowane było w akumulatorze kamiennym a w cyklu rozładowywania kierowano go do wnętrza laboratoryjnej szklarni. Autorzy określili również wydajność systemu oraz wskazali przesłanki do szerokiego wykorzystania w produkcji szklarniowej. Ghosal i in. [2005] opracowali modele matematyczne i przeprowadzili badania eksperymentalne dla dwóch akumulatorów: powietrznego oraz gruntowego. W akumulatorze powietrznym wykorzystali pasywne nagrzewanie powietrza (pojemniki pokryte szkłem a z wnętrza nagrzane powietrze kierowano do szklarni) zaś w drugim zastosowano akumulator gruntowy, wewnątrz którego umieszczono system rur perforowanych. W konkluzji stwierdzono zwiększoną efektywność odzysku energii z akumulatora gruntowego. Ozenger i Ozenger [2010] badali efekty energetyczne przepo-

nowego wymiennika ciepła zlokalizowanego we wnętrzu gruntu. Powietrze z wnętrza szklarni było przetłaczane przez ten wymiennik i kierowane w cyklu zamkniętym do wnętrza. Określili również minimalne temperatury otaczającego powietrza przy których system można stosować w szklarni produkcyjnej. Benli [2011] określił efektywność współpracy pompy ciepła wykorzystanej do ogrzewania szklarni. (dolne źródło stanowiły poziome gruntowe wymienniki). Czynnik obiegowy z górnego źródła pompy przepływał przez akumulator z wypełnionym materiałem podlegającym przemianie fazowej. W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że badany system cechuje się akceptowalną wartością współczynnika COP.

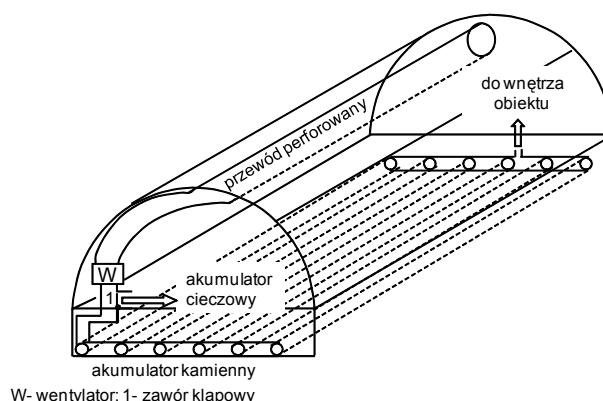
Z zakresu analizy efektów energetycznych przeprowadzone badania magazynowania ciepła w krajowych warunkach [Kurpaska, Latała 2010] wykazały że badany system (magazynowanie w akumulatorze glebowym i cieczowym) można z powodzeniem stosować w produkcji szklarniowej.

Z przedstawionego przeglądu niektórych prac badawczych wynika jednoznacznie, że problematyka wykorzystania odnawialnych źródeł energii jest intensywnym obszarem badań w wielu ośrodkach naukowych.

Stąd głównym celem pracy jest przeprowadzenie analizy dla systemu w którym nadwyżka energii z wnętrza obiektu może być magazynowana w złożu kamiennym.

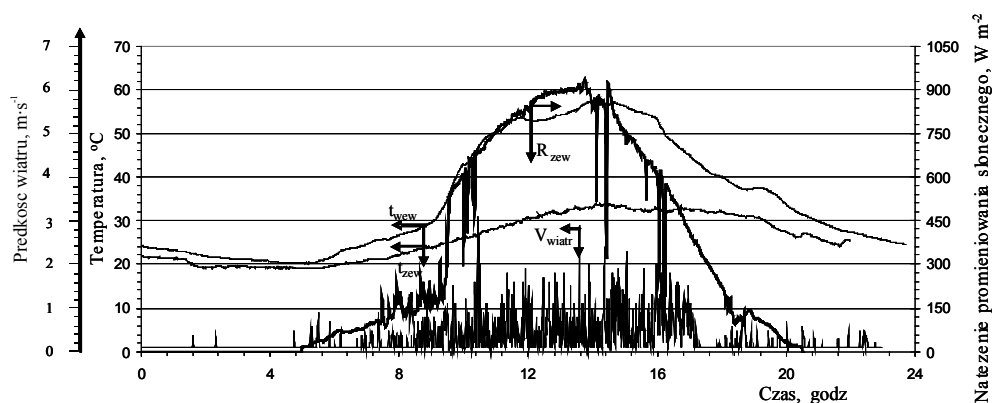
Material i metoda

Przedmiotem rozważań jest system którego schemat przedstawiono na rys. 1. Idea pracy prezentowanego systemu polega na zasysaniu ciepłego powietrza z wnętrza obiegu oraz zatłaczaniu do akumulatorów energii. Jako akumulatory energii wybrano dwa, mianowicie akumulator ze złożem kamiennym oraz akumulator cieczowy. Priorytetem procesu magazynowania ciepła jest proces magazynowania ciepła w akumulatorze kamiennym, tzn. z chwilą uzyskania rekomendowanej temperatury w złożu, zawór klapowy (1) zostanie tak przesterowany, aby kierował podgrzane powietrze do wnętrza akumulatora cieczowego. Problemem do rozwiązania jest oszacowanie potencjalnych ilości ciepła do pozyskania z wnętrza obiektu oraz dobór pojemności akumulatora kamiennego.

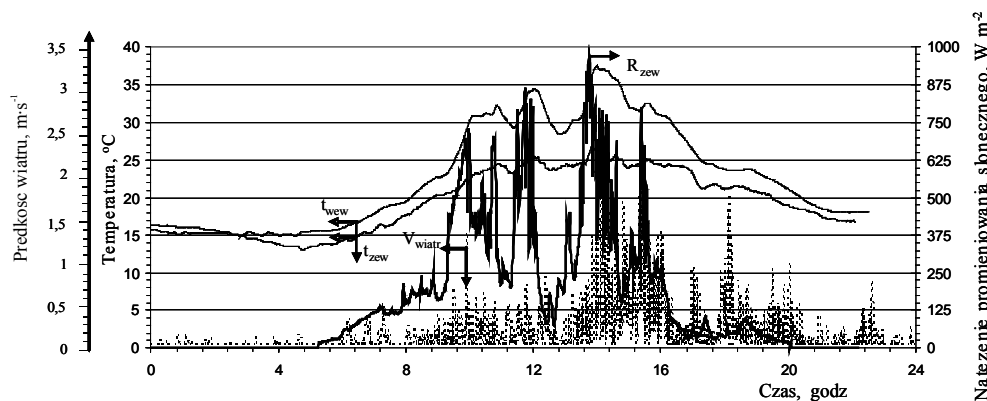


Rys. 1. Schemat analizowanego systemu magazynowania ciepła w tunelu foliowym
Fig. 1. Schematic representation of the analysed heat storing system in a plastic tunnel

Podczas pracy sytemu, możliwe są dwa okresy, które charakteryzują się zróżnicowanym natężeniem promieniowania słonecznego. Promieniowanie to docierając do wnętrza obiektu powoduje wzrost temperatury wewnętrznej znacznie przekraczające wartości akceptowalne przez rośliny. Na rys. 2a i 2b przedstawiono przykładowe okresy o zróżnicowanej temperaturze wewnątrz tunelu laboratoryjnego zlokalizowanego w obiektach UR w Krakowie (obiekt bez roślin).



Rys. 2a. Przebieg zmierzonych parametrów klimatu podczas słonecznego dnia
 Fig. 2a. Course of the measured parameters of climate during a sunny day



Rys. 2b. Przebieg zmierzonych parametrów klimatu podczas dnia pochmurnego
 Fig. 2b. Course of the measured parameters of climate during a cloudy day

Jak widać, w prezentowanych okresach, istnieją przedziały czasowe w których temperatura wewnątrz obiektu przekracza optymalne temperatury dla uprawianych roślin.

Potencjalną ilość ciepła którą można zmagazynować w akumulatorach w tych przedziałach czasowych (Q_{ob}), dla różniczkowego czasu $d\tau$, obliczono z zależności:

$$dQ_{ob} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} F_{ob} \cdot \chi_{ob} \cdot \rho_p \cdot (i_{wew} - i^*) d\tau \quad (1)$$

gdzie:

- F_{ob} – powierzchnia tunelu [m^2],
- χ – wskaźnik kubatury obiektu (liczony jako: $\chi = \pi \cdot r / 4$) [m],
- ρ_p – gęstość powietrza [$kg \cdot m^{-3}$],
- i_{wew}, i^* – odpowiednio entalpia powietrza (i_{wew}) oraz entalpia dla optymalnych parametrów mikroklimatu wewnątrz obiektu (i^*) [$kJ \cdot kg^{-1}$].

Do opisu zmian temperatury w złożu ciała stałego zastosowano równanie [Pluta, 2003]:

$$\rho_z \cdot c_z (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_z}{\partial \tau} = h_v (T_p - T_z) \quad (2)$$

Objętościowy współczynnik przejmowania ciepła (h_v) obliczono z zależności:

$$h_v = 650 \left(\frac{m_p}{A_z \cdot h \cdot D_z} \right)^3 \quad (3)$$

Dysponując zmianą temperatury w złożu (T_z) w rozpatrywanym czasie $d\tau$ określono ilość zmagazynowanego ciepła w akumulatorze (Q_z) jako:

$$dQ_z = m_p \cdot c_p \cdot (T_p - T_z) \cdot d\tau \quad (4)$$

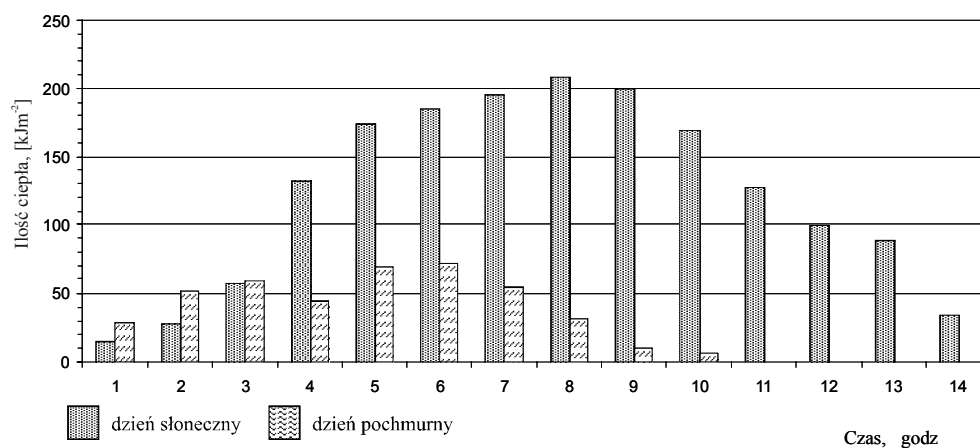
gdzie:

- ρ_z – gęstość usypowa złoża [$kg \cdot m^{-3}$],
- c_z – ciepło właściwe złoża [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
- ε – porowatość złoża [-],
- T_z – temperatura złoża [$^{\circ}C$],
- T_p – temperatura zatłaczanego powietrza [$^{\circ}C$],
- h_v – objętościowy współczynnik przejmowania ciepła [$W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$],
- m_p – strumień zatłaczanego powietrza [$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$],
- c_p – ciepło właściwe zatłaczanego powietrza [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],
- A_z – pole przekroju poprzecznego akumulatora [m^2],
- h – wysokość warstwy akumulatora [m],
- D_z – zastępcza średnica kamieni [m],
- τ – czas ładowania akumulatora [s].

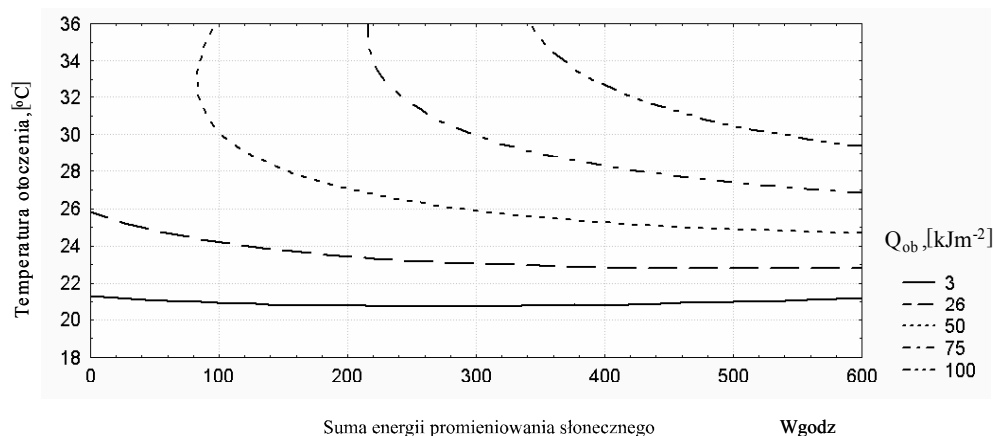
Niezbędne zależności do określenia entalpii wilgotnego powietrza (z uwzględnieniem deficytu ciśnienia pary wodnej) obliczono z wykorzystaniem standardowych zależności psychrometrycznych.

Wyniki i dyskusja

Na podstawie zaprezentowanych na rys. 2a i 2b przebiegów zmian temperatury wewnątrz badanego tunelu określono godzinowe ilości ciepła możliwe do zmagazynowania. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 3. Jak widać, w podczas całego dnia (dla analizowanych wartości warunków zewnętrznych), całkowita suma ilości zmagazynowanego ciepła zmienia się od $0,37\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ do blisko $1,72\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (odpowiednio dla dnia pochmurnego oraz dnia słonecznego).



Rys. 3. Potencjalne ilości ciepła do zmagazynowania w tunelu foliowym
Fig. 3. Potential heat amounts for storing in a foil tunnel



Rys. 4. Zmiany ilości ciepła możliwego do zmagazynowania ciepła w funkcji zmiennych niezależnych
Fig. 4. Changes of heat amount for storing heat as a function of independent variables

Obliczenia przeprowadzono zakładając, że temperatura wewnątrz obiektu nie przekracza 24°C zaś deficyt ciśnienia pary wodnej (jako różnica między aktualnym ciśnieniem a ciśnieniem w stanie nasycenia) równym 4 hPa.

Na rys. 4 przedstawiono graficzny przebieg potencjalnej ilości zmagazynowanego ciepła w funkcji zmiennych niezależnych (temperatura otoczenia, suma energii promieniowania słonecznego).

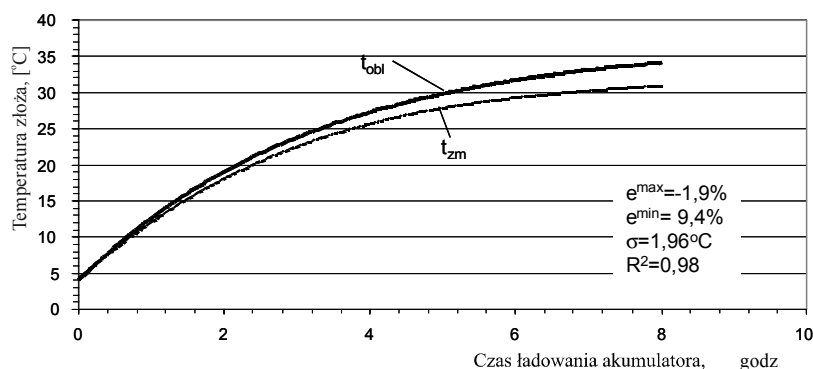
Dla uzyskanych wyników, znalezione równanie ujmujące ten związek (postać modelu potęgowego wybrano w oparciu o największą wartość współczynnika determinacji; zależność ta została określona estymacją nieliniową metodą quasi-Newtona przy zachowanym współczynniku zbieżności 0,001) przyjmuje postać:

$$Q_{ob} = 2,78E - 5 \cdot t_{ot}^{4,18} + 0,00158 \cdot \left(\sum R_{zew} \right)^{-1,69} ; R^2=0,97$$

W zakresie stosowania: $20,8 \leq t_{ot} \leq 33,5^\circ\text{C}$; $19,1 \leq \Sigma R_{zew} \leq 452 \text{ Wgodz}$

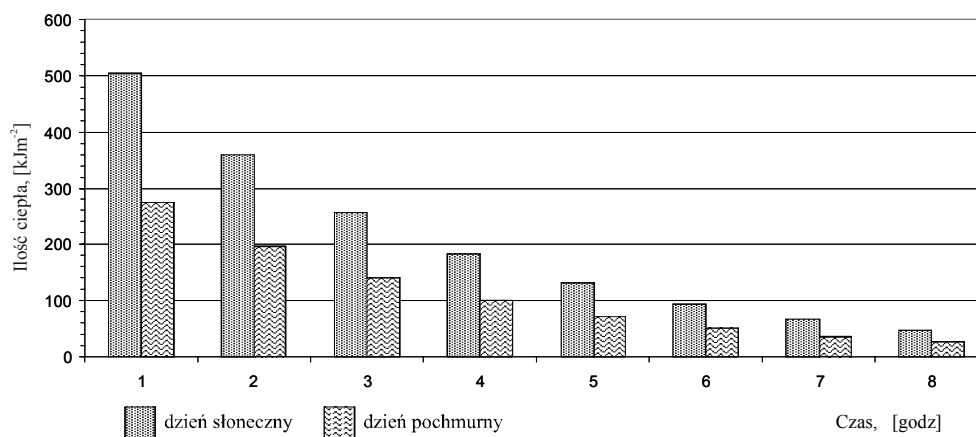
Obliczenia związane z akumulatorem kamiennym wykonano dla następujących wartości zmiennych decyzyjnych: $\rho_z=1600$; $c_z=1,6$; $\epsilon=0,3$; $m_p=0,017$; $h=0,7$; $D_z=0,029$. Badania weryfikacyjne procesu magazynowania ciepła przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, w kanale o wymiarach 1x 2 m (odpowiednio szerokość x długość) wypełnionym kamieniem (porfir w zakresie wymiarów 30-63 mm) o grubości warstwy 0,7m. Zatłaczanie powietrza do złoża kamieni realizowano za pomocą przewodu perforowanego który umieszczono na dnie kanału w jego osi symetrii. W kanale zamontowano na zróżnicowanych głębokościach i odległościach od osi przewodu (siatka przestrzenna o wymiarze 0,2m) punkty pomiarowe (rezystancyjne czujniki PT1000).

Na rys. 5 przedstawiono przebieg zmian temperatury złoża (obliczony z równania 2 i 3) - t_{obl} wraz ze zmierzonymi wartościami (jako uśrednione z punktów pomiarowych) - t_{zm} . W trakcie eksperymentu temperatura początkowa złoża wynosiła 10°C, zaś temperatura zatłaczanego powietrza oscylowała (z odchyłkami $\pm 0,5\text{K}$) wokół 35°C. Można zauważyć, że wprowadzone do oceny mierniki błędów (błąd względny - e , pierwiastkowy średni błąd kwadratowy - σ).



Rys. 5. Przebieg zmierzonej i obliczonej temperatury złoża akumulatora
Fig. 5. Course of the measured and calculated temperature of the storage bed

przyjmują akceptowalne wyniki. Ponieważ uzyskane wyniki cechuje duża zbieżność z równania (4) obliczono ilości ciepła które są możliwe do zmagazynowania w analizowanym akumulatorze.



Rys. 6. Godzinowy przebieg ilości zmagazynowanego ciepła dla analizowanych dni
Fig. 6. Hourly course of heat amount stored for the analysed days

Porównując uzyskane wyniki z danymi przedstawionymi na rys. 3 można stwierdzić, że r rozpatrywanej konstrukcji akumulatora (obliczenia wykonano dla strumienia powietrza zatłaczanego do akumulatora na poziomie $0,009 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) podczas przyjętego do analizy czasu ładowania jest możliwe zmagazynowanie całej ilości ciepła dostępnego we wnętrzu obiektu. Widać równocześnie, że wraz z wydłużaniem się czasu magazynowania, godzinowa ilość zmagazynowanego ciepła w złożu akumulatora maleje. Wynika to z mniejszej różnicy temperatury między przepływającym powietrzem a temperaturą złoża. Po uwzględnieniu zmiennych parametrów otaczającego klimatu dla krajowych warunków meteorologicznych oraz czasowej ilości magazynowanego ciepła zdecydowano, że w tunelach doświadczalnych (IO w Skierniewicach oraz obiektach WIPiE UR w Krakowie) należy zbudować akumulator segmentowy (o grubości warstwy złoża $0,7 \text{ m}$) i jednostkowej powierzchni ok. $0,63 \text{ m}^2$ na m^2 powierzchni uprawy. Z przeprowadzonej analizy wynika również, że należy racjonalnie sterować procesem ładowania akumulatora, tzn. po odpowiednim czasie przełączać zawór kłapowy (rys. 1) w takie położenie, aby strumień powietrza z wnętrza obiektu zatłaczać do akumulatora cieczowego.

Wnioski

1. Całkowita suma jednostkowej ilości zmagazynowanego ciepła, w zależności od parametrów klimatu dla krajowych warunków meteorologicznych zmienia się od $0,43 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ do blisko $1,72 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (odpowiednio dla dnia pochmurnego oraz dnia słonecznego).

2. Godzinową ilość potencjalnego ciepła do zmagazynowania w akumulatorze opisuje model potęgowy w postaci:

$$Q_{ob} = 2,78E - 5 \cdot t_{ot}^{4,18} + 0,00158 \cdot \left(\frac{1}{\sum R_{zew}} \right)^{-1,69} ; R^2=0,97$$

3. W zakresie stosowania: $20,8 \leq t_{ot} \leq 33,5^\circ\text{C}$; $19,1 \leq \Sigma R_{zew} \leq 452 \text{ Wgodz}$
 4. Na podstawie przeprowadzonej analizy przyjęto, że powierzchnia akumulatora ciała stałego wynosić będzie $0,63 \text{ m}^2$ (przy grubości warstwy złoża $0,7 \text{ m}$) na m^2 powierzchni uprawy, zaś jego budowa będzie segmentowa.

Bibliografia

- Bascetincelik A., Ozturk H.H., Paksoy H.O., Demirel Y.** (1999): Energetic and exergetic efficiency of latent heat storage system for greenhouse heating. *Renewable Energy*, 16(1-4), 691-694.
- Bayer P., Saner D., Rybach L., Blum P.** (2012): Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1256-1267.
- Benli H., Dumus A.** (2009): Performance analysis of a latent heat storage system with phase change material for new designed solar collectors in greenhouse heating. *Solar Energy*, 83 (12), 2109-2119.
- Benli H.** (2011): Energetic performance analysis of a ground-source heat pump system with latent heat storage for a greenhouse heating. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 581-589.
- Chinese D., Meneghetti A., Cardin G.** (2005): Waste-to-energy based greenhouse heating: exploring viability conditions through optimisation models. *Renewable Energy*, 30(10), 1573-1586.
- Garcia J.L., Plaza la S. D., Navas L.M., Benavente R. M., Luna L.** (1998): Evaluation of the Feasibility of Alternative Energy Sources for Greenhouse Heating. *J. agric. Engng Res.* 69, 107-114.
- Ghosal M.K., Tiwari G.N.** (2004): Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar Energy*, 76(5), 603-613.
- Ghosal M.K., Tiwari G.N., Das D.K., Pandey K.P.** (2005): Modeling and comparative thermal performance of ground air collector and earth air heat exchanger for heating greenhouse. *Energy and Buildings*, 37(6), 613-621.
- Hepbasli A.** (2011): A comparative investigation of various greenhouse heating options using exergy analysis method. *Applied Energy*, 88(12), 4411-4423.
- Kondili E., Kaldellis J.K.** (2006): Optimal design of geothermal-solar greenhouses for the minimisation of fossil fuel consumption. *Applied Thermal Engineering*, 26(8-9), 905-915.
- Kurpaska S., Latała H.** (2010): Energy analysis of heat surplus storage systems in plastic tunnels. *Renewable Energy*, 35 (12), 2656-2665, 2010.
- Ntinis G.K., Kougiaris P.G., Nikita-Martzopoulou Ch.** (2011): Experimental performance of a hybrid solar energy saving system in greenhouses. *Int. Agrophys.*, 25, 257-264.
- Ozgener O., Hepbasli A.** (2005): Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse heating system *Energy and Buildings*, 37(1), 101-110.
- Ozgener L., Ozgener O.** (2010): Energetic performance test of an underground air tunnel system for greenhouse heating. *Energy*, 35(10), 4079-4085.
- Ozturk H.H., Bascetincelik A.** (2003): Energy and exergy efficiency of a packed-bed heat storage unit for greenhouse heating. *Biosystems Engineering*, 86(2), 231-245.
- Panwai N.L., Kaushik S.C., Kothari S.** (2011): Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3934-3945.

Pluta Z. (2003): Słoneczne instalacje energetyczne. Oficyna Wydaw.. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, ISBN 83-7207-411-9.

Santamouris M., Balaras C.A., Dascalaki E., Vallindras M. (1994): Passive solar agricultural greenhouses: A worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. *Solar Energy*, 53(6), 511-426.

STORING HEAT SURPLUS FROM A PLASTIC TUNNEL IN A ROCK - BED STORAGE

Abstract. The work, basing on available literature describes directions of research carried out in different scientific centres concerning heating a greenhouse with renewable energy sources. For the system concerned (a laboratory tunnel along with a rock-bed storage) dependencies used to estimate the amount of energy (stored in the form of heat) from the inside of a tunnel and to determine the size of a solid body storage were presented. As a result of calculations, it was determined that potential daily amount of heat for storing for the analysed values of the external conditions was within limits ranging from $0.37\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ to almost $1.72\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (respectively for a cloudy day and a sunny day). Calculations were carried out assuming that the temperature inside the facility does not exceed 24°C while steam pressure deficiency (as a difference between actual pressure and pressure in a saturation point) will be equal to 4hPa . For the obtained results, on the basis of the highest value of the coefficient of determination a relation was found (determined by non-linear estimation by a quasi-Newton method while maintaining convergence coefficient 0.001) presenting a relation between the heat amount and the temperature of surroundings and the solar radiation energy sum. Upon carrying out an analysis and verification research in laboratory conditions, indispensable area and the volume of the storage bed was suggested.

Key words: renewable energy, solid body storage, plastic tunnel

Adres do korespondencji:

Sławomir Kurpaska; e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków