

## MAGAZYNOWANIE CIEPŁA W AKUMULATORZE KAMIENNYM\*

*Paweł Konopacki, Ryszard Hołownicki, Robert Sabat*  
*Zakład Agrotechnologii, Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach*

*Sławomir Kurpaska, Hubert Latała*  
*Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** Celem pracy było określenie efektywności akumulatora ciepła dodając ze złożem kamiennym, umieszczonego pod tunelem uprawowym o wymiarach 15 x 9 m. W badaniach, przeprowadzonych w dniach 13-19 X 2011r., wykorzystywano jedną z sekcji tego akumulatora o objętości kruszywa 12,69 m<sup>3</sup>. Przeprowadzono dwie sekwencje ładowania, doładowania następnego dnia i rozładowania najbliższej nocy. Podczas obu sekwencji średnie zmiany temperatury w przeliczeniu na jednostkę czasu były podobne i wyniosły 1,51-1,64 K·h<sup>-1</sup> podczas pierwotnego ładowania, 0,99-1,00 K·h<sup>-1</sup> podczas doładowywania i 0,48-0,58 K·h<sup>-1</sup> podczas rozładowywania. Średnie tempo wymiany ciepła wyniosło 26-28,1 MJ·h<sup>-1</sup> podczas pierwotnego ładowania i 8,2-9,9 MJ·h<sup>-1</sup> podczas rozładowywania. Średni samoczynny spadek temperatury, między zakończeniem ładowania jednego dnia a rozpoczęciem doładowywania kolejnego dnia, wyniósł 0,21-0,29 K·h<sup>-1</sup>. Uzyskane wstępne wyniki wskazują na duży potencjał energetyczny powstałej instalacji, ponieważ przy wykorzystaniu tylko jednej sekcji natężenie promieniowania słonecznego w październiku było wystarczające do ogrzanie nocą tunelu o powierzchni 135 m<sup>2</sup> o co najmniej 1,5°C.

**Słowa kluczowe:** akumulator ciepła stałego, tunel foliowy, magazynowanie ciepła, energia odnawialna

### Wstęp

Uprawa roślin ogrodniczych pod osłonami w Polsce jest ważnym działem produkcji rolniczej. Sama powierzchnia produkcji warzyw pod osłonami zwiększyła się dwukrotnie w latach 1995–2006. Rosnącemu popytowi na te produkty towarzyszy stały wzrost cen energii, która stanowi 50–60% kosztów produkcji w ogrzewanych szklarniach. Dlatego, obserwuje się coraz większe zainteresowanie produkcją warzyw w nieogrzewanych tune-

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

lach foliowych oraz technikami pozwalającymi ograniczyć zużycie tradycyjnych nośników energii w szklarniach. Pomimo, iż nowoczesne tunele foliowe są wyposażone w szereg rozwiązań technicznych (takich jak dwuwarstwowe pokrycie, czy kurtyny boczne i górne), które umożliwiają bardziej racjonalną gospodarkę energetyczną, to uwaga, zarówno naukowców jak i producentów, jest skierowana na wykorzystanie ciepła traconego podczas wietrzenia tuneli poprzez jej magazynowanie w akumulatorach ciepła.

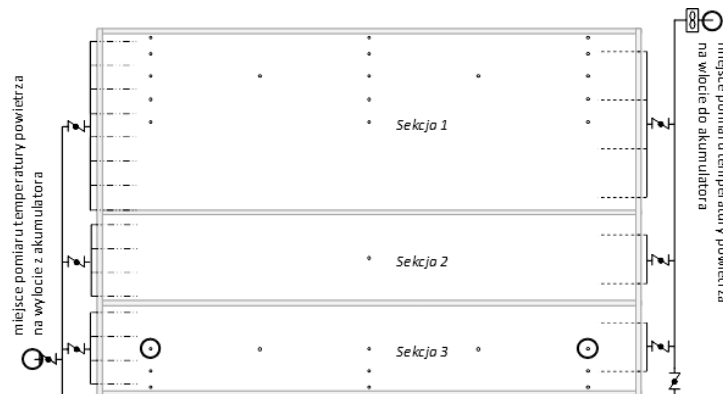
## Przegląd literatury i cel badań

Badania nad wykorzystaniem różnych rodzajów akumulatorów ciepła w produkcji ogrodniczej pod osłonami są prowadzone od ponad 30 lat [Nash i Williamson 1978; Huang i in. 1981; Jaffrin i Cadier 1982]. Jednak większość tych badań była i jest wykonywana w skali laboratoryjnej i rzadko osiąga skalę pełnowymiarowej szklarni czy tunelu foliowego [Sethi i Sharma 2008]. Popularnym typem akumulatorów ciepła są akumulatory, w których jako złoże wykorzystuje się glebę, piasek, beton, cegły oraz kamienie: żwir, kruszywo magmowe lub otoczaki [Alkilani i in. 2011]. Badania nad tymi akumulatorami, zintegrowanymi z pełnowymiarowym tunelem foliowym (czyli o powierzchni co najmniej 120 m<sup>2</sup>), obejmowały do tej pory powierzchnię od 240 m<sup>2</sup> [Bouhdgar i Boulbing 1990] do 2850 m<sup>2</sup> [Bricault 1982] i zakres całkowitej pojemności cieplnej złoża w postaci żwiru od 14440 kJ·K<sup>-1</sup> do 145440 kJ·K<sup>-1</sup> [tamże]. W obiekcie Bricault'a [1982] jednostkowa pojemność cieplna była stosunkowo mała i wynosiła tylko 51,03 kJ·K<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>, co wydaje się zbyt małą wielkością do zastosowań w produkcji towarowej. Akumulator żwirowy zbudowany przez Fotiades'a [1987] przy tunelach o powierzchni 300 m<sup>2</sup> cechował się jednostkową pojemnością cieplną 177,6 kJ·K<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>, podczas gdy Kavin i Kurtan [1987] zbudowali, przy tunelu o powierzchni 100 m<sup>2</sup>, akumulator ceglany o jednostkowej pojemności cieplnej aż 489,6 kJ·K<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>. Badania krajowe przeprowadzone przez Kurpaskę i in. [2012] na potrzeby projektu HortiEnergia wykazały, że w polskich warunkach klimatycznych przy zastosowaniu złoża kamiennego (a konkretnie tłucznia porfirowego o frakcji 31,5-63 mm) najbardziej odpowiedni byłby akumulator o objętości kamienia 0,441 m<sup>3</sup> na każdy 1 m<sup>2</sup> powierzchni tunelu (a po odliczeniu pojemności przewodów powietrznych 0,434 m<sup>3</sup> tłucznia na każdy 1 m<sup>2</sup> powierzchni tunelu). Oznacza to, że jednostkowa pojemność cieplna powinna wynosić 561,7 kJ·K<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>. Koncepcję takiego akumulatora opisali Hołownicki i in. [2012]. Zbudowany według tych założeń kamienny akumulator ciepła ma najwyższą jednostkową pojemność cieplną spośród znanych dotąd instalacji. Celem badań było określenie ilości ciepła, jaką można zgromadzić w ciągu jednego dnia roboczego, skutku energetycznego doładowywania akumulatora następnego dnia oraz ilości ciepła jaką można oddać z akumulatora w nocy, w ciągu 5-6 godzin.

## Metodyka

Badania przeprowadzono w Instytucie Ogrodnictwa w Skierniewicach, wykorzystując akumulator ciepła umieszczony pod tunelem foliowym o wymiarach 15x9 m. W celu zapewnienia mikroklimatu, właściwego dla użytkowania komercyjnego, na całej powierzchni tunelu uprawiano pomidory.

Akumulator został wypełniony tłuczniem porfirowym o frakcji 31,5-63 mm, który został podzielony na trzy sekcje o szerokościach złoża 3,5 m (sekcja 1) oraz 1,7 m (sekcje 2 i 3). Złoże każdej sekcji ma długość 11 m oraz głębokość 0,7 m. Na dnie sekcji 1. zainstalowano 4, a na dnie sekcji 2. i 3. po 2 rury perforowane o średnicy 110 mm, doprowadzające powietrze do złoża. Natomiast na górze sekcji 1. zainstalowano 8, a na dnie sekcji 2 i 3 po 4 rury perforowane o średnicy 75 mm do odprowadzania powietrza ze złoża. Po odliczeniu objętości tych rur objętość kruszywa porfirowego w sekcji 3 wynosi 12,69 m<sup>3</sup>, a szacunkowa masa 20,3 ton.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia czujników temperatury w akumulatorze

Fig. 1. Schematic representation of temperature sensors distribution in an accumulator

W każdej sekcji zainstalowano pionowo rury perforowane w celu wprowadzania do złoża czujników temperatury. Zostały one rozmieszczone w odległościach 2,15 m od siebie oraz w odległości 1,2 m, od każdego końca złoża. Wyjątkiem jest sekcja 2. w której zainstalowano tylko jedną rurę inspekcyjną na środku złoża. Czujniki temperatury (T) umieszczono w złożu kamiennym, w przygotowanych rurach na początku i na końcu 1. i 3. sekcji akumulatora oraz między roślinami na wysokości 1,5 m, a także na zewnątrz tunelu na wysokości ok. 0,5 m (rys. 1). Pomiary rozpoczęto przy użyciu rejestratorów temperatury Testo 177-T3 (o dokładności  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ), które stopniowo wymieniano na czujniki PT1000 (o dokładności  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ). Wskazania Testo 177-T3 zostały skalibrowane względem PT1000. W celu porównania zmian temperatur, podczas różnych okresów ładowania i rozładowywania akumulatora, wprowadzono wskaźnik zmian temperatury opisujący średnią zmianę temperatury w przeciągu 1 godziny pracy akumulatora, obliczany z równania:

$$I_{\Delta T} = \frac{|T_{kz} - T_{pz}|}{\tau} \quad (1)$$

gdzie:

$T_{kz}, T_{pz}$  – temperatury końcowa i początkowa złoża [K],  
 $\tau$  – czas pracy wentylatora.

Badania rozpoczęto w drugiej dekadzie października więc ze względu na relatywnie niski poziom natężenia promieniowania słonecznego o tej porze roku, cykle ładowania akumulatora wykonywano w dni słoneczne 13, 14, 17 i 18 października na sekcji 3 (małej) akumulatora.

Ilości ciepła zgromadzonego podczas ładowania i oddanego podczas rozładowywania akumulatora obliczono z zależności:

$$Q = V_z \cdot \rho_z \cdot c_z \cdot |T_{kz} - T_{pz}| \quad (2)$$

gdzie:

- $V_z$  – objętość kamieni w złożu (wynosząca 12,69 m<sup>3</sup>),
- $\rho_z$  – gęstość usypowa złoża (założona 1600 kg·m<sup>-3</sup>),
- $c_z$  – ciepło właściwe porfiru (wykorzystano skrajne, przytaczane w literaturze wartości 774,2 J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> [Lau 2007] oraz 920 J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> [Mueller i inni 2010]),
- $T_{kz}, T_{pz}$  – temperatury końcowa i początkowa złoża [K].

## Wyniki i omówienie

Badania trwały od 13 do 19 października 2011 r. (Tabela 1) i obejmowały dwie sekwencje ładowania, doładowania następnego dnia i rozładowania najbliższej nocy.

Tabela. 1. Rejestr przebiegu testów

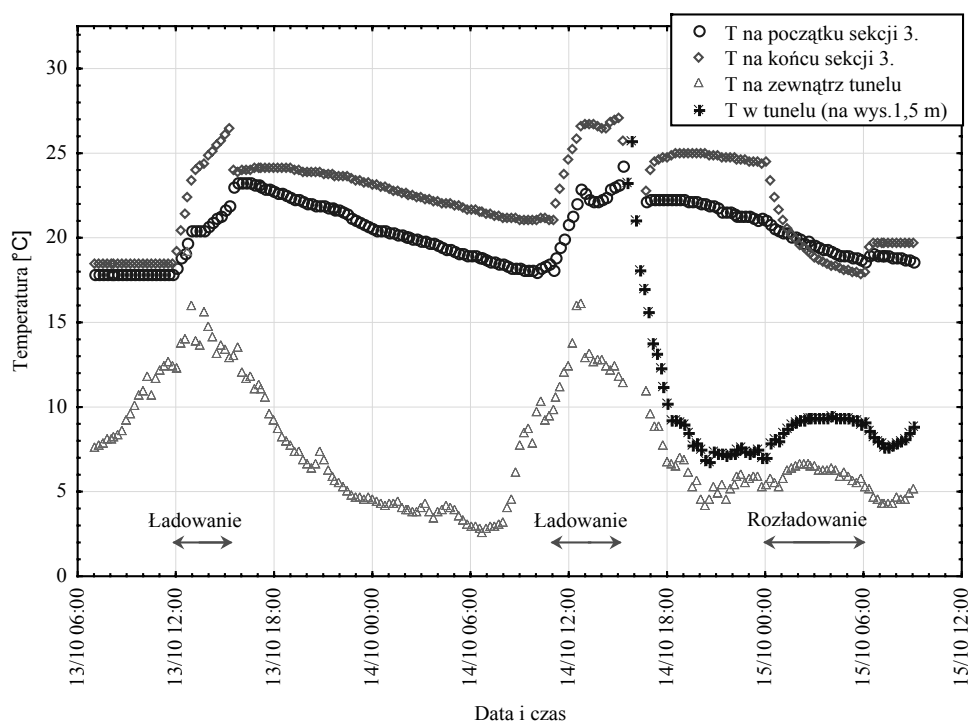
Table. 1. Record of tests

| Data      | Od godz. | Do godz. | Opis pracy akumulatora |
|-----------|----------|----------|------------------------|
| 13 X 2011 | 11:55    | 15:20    | ładowanie sekcji 3     |
| 14 X 2011 | 11:00    | 15:05    | ładowanie sekcji 3     |
| 15 X 2011 | 0:00     | 6:00     | rozładowanie sekcji 3  |
| 17 X 2011 | 9:47     | 16:17    | ładowanie sekcji 3     |
| 18 X 2011 | 10:17    | 14:50    | ładowanie sekcji 3     |
| 19 X 2011 | 3:00     | 8:35     | rozładowanie sekcji 3  |

Analiza zmian temperatury złoża w czasie pierwszej sekwencji ładowania i rozładowania (rys. 2) ujawniła nierówny przepływ powietrza przez złożo. Zarejestrowano wyższy przyrost temperatury podczas ładowania 13 X oraz widoczny spadek temperatury podczas rozładowywania 15 X w końcowej części złoża, w porównaniu do początkowej części złoża, co wskazuje na dużą dysproporcję przepływu powietrza pomiędzy początkową i końcową częściami złoża. Również zmiany temperatury zarejestrowane po wyłączeniu wentylatora wskazują, że temperatura przepływającego powietrza nie jest ekwiwalentna z temperaturą kruszywa w złożu (nagłe skoki temperatur) oraz, że w pobliżu czujnika mogą się znajdować obszary kruszywa o wyższej temperaturze, powodujące stopniowe wyrównywanie temperatur nawet przez 2-3 godziny po wyłączeniu wentylatora. Dlatego do obliczania ilości ciepła zakumulowanego podczas ładowania i oddanego podczas rozładowania wykorzystano wartości końcowe zarejestrowane po zakończeniu wyrównywania tempera-

tur w pobliżu czujników a nie wartości temperatur zarejestrowane przy wyłączeniu wentylatora. Przykładowo, temperatura powietrza w końcowej części złoża w dniu 13 X po wyłączeniu wentylatora spadła (rys. 2) z 26,4°C do 23,9°C, lecz później (po około 1,5 godziny) wzrosła do wartości 24,2°C. I ta wartość została użyta w obliczeniach, których wyniki zamieszczono w Tabeli 2.

Przebieg zmian temperatury podczas drugiej sekwencji ładowania i rozładowania sekcji 3. akumulatora (rys. 3) potwierdził wcześniejsze obserwacje. Zmiany temperatur w końcowej części złoża były większe niż w części początkowej, a po wyłączeniu wentylatora następowało powolne wyrównanie temperatur powietrza i kruszywa w złożu w pobliżu czujników.



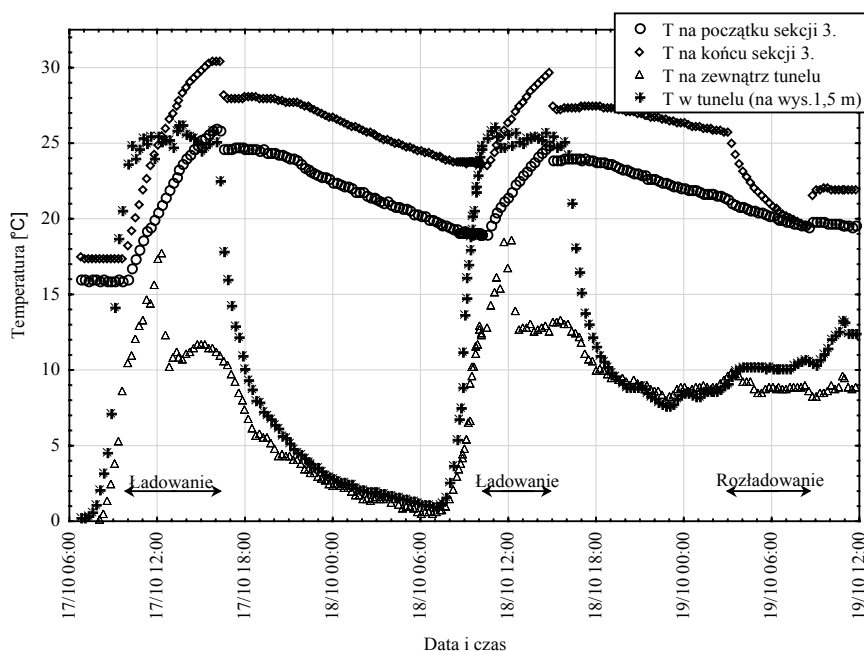
Rys. 2. Zmiany temperatur powietrza w złożu sekcji 3. akumulatora i poza nim podczas ładowania 13 X i 14 X 2011 oraz rozładowywania w nocy z 14 na 15 X 2011.

Fig. 2. Air temperature changes in a bed of the 3rd section of an accumulator and outside it during charging on 13th and 14th October 2011 and during reloading at night of 14th and 15th October 2011.

Tabela. 2. Zmiany temperatur na początku i na końcu złoża akumulatora oraz ilość zakumulowanego i oddanego ciepła podczas pierwszej sekwencji ładowania, doładowywania i rozładowania sekcji 3. akumulatora w dniach 13-15 X 2011r.

Table. 2. Temperature changes at the beginning and at the end of the accumulator bed and amount of accumulated and returned heat during the first charging sequence, recharging and discharging of the 3rd section of the accumulator on 13-15 th October 2011.

| Ładowanie                                       |                    |                    | Doładowanie                                     |                    |                    | Rozładowanie                                    |                    |                    |
|-------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------------------|--------------------|--------------------|
| 13 X 2011                                       |                    |                    | 14 X 2011                                       |                    |                    | 15 X 2011                                       |                    |                    |
| temp. początk. [°C]                             | temp. końcowe [°C] | różnica temp. [°C] | temp. początk. [°C]                             | temp. końcowe [°C] | różnica temp. [°C] | temp. początk. [°C]                             | temp. końcowe [°C] | różnica temp. [°C] |
| 17,8                                            | 23,3               | 5,5                | 18,0                                            | 22,3               | 4,4                | 21,2                                            | 19,0               | 2,2                |
| 18,5                                            | 24,1               | 5,7                | 21,1                                            | 25,0               | 3,9                | 24,5                                            | 19,8               | 4,7                |
| średnia różnica temperatur [K]                  |                    | 5,6                | średnia różnica temperatur [K]                  |                    | 4,1                | średnia różnica temperatur [K]                  |                    | 3,5                |
| wskaźnik zmian temperatury [K·h <sup>-1</sup> ] |                    | 1,64               | wskaźnik zmian temperatury [K·h <sup>-1</sup> ] |                    | 1,00               | wskaźnik zmian temperatury [K·h <sup>-1</sup> ] |                    | 0,58               |
| ilość ciepła [MJ]                               |                    | 87,6 - 104,1       | ilość ciepła [MJ]                               |                    | 64,9 - 77,1        | ilość ciepła [MJ]                               |                    | 54,2-64,4          |



Rys. 3. Zmiany temperatur powietrza podczas drugiej sekwencji ładowania i rozładowywania złoża sekcji 3. w dniach 17-19 X 2011.

Fig. 3. Air temperature changes during the second charging section and discharging of the bed of the 3rd section on 17-19th October 2011.

Doładowywanie złoża akumulatora jest istotne ze względu na straty ciepła ze złoża w okresie nocnym. Przy spadku temperatury otoczenia do blisko  $0^{\circ}\text{C}$  (w nocy z 17 na 18 X 2011) średnia temperatura w złożu sekcji 3. obniżyła się z  $26,4^{\circ}\text{C}$  do  $21,2^{\circ}\text{C}$  (Tabela 3). Jednak nawet kilkugodzinne doładowywanie złoża nie gwarantuje osiągnięcia wyższej temperatury złoża niż poprzedniego dnia. Po 4-godzinnym doładowywaniu w dniu 14 X średnia temperatura końcowa złoża była taka sama ( $23,7^{\circ}\text{C}$ ) jak osiągnięta 13 X, a po 4,5-godzinnym doładowywaniu złoża w dniu 18 X jego średnia temperatura wynosiła  $25,7^{\circ}\text{C}$  i była niższa o  $0,7^{\circ}\text{C}$  od średniej temperatury osiągniętej 17 X.

Tabela. 3. Zmiany temperatur na początku i na końcu złoża akumulatora oraz ilość zakumulowanego i oddanego ciepła podczas drugiej sekwencji ładowania, doładowywania i rozładowania sekcji 3. akumulatora w dniach 17-19 X 2011r.

Table. 3. Temperature changes in the beginning and it the end of the accumulator bed and amount of the accumulated and returned heat during the second charging sequence, recharging and discharging of the 3rd section of the accumulator on 17-19 th October 2011.

| Ładowanie                                                   |                                      |                                      | Doładowanie                                                 |                                      |                                      | Rozładowanie                                                |                                      |                                      |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 17 X 2011                                                   |                                      |                                      | 18 X 2011                                                   |                                      |                                      | 19 X 2011                                                   |                                      |                                      |
| temp. początk. [ $^{\circ}\text{C}$ ]                       | temp. końcowe [ $^{\circ}\text{C}$ ] | różnica temp. [ $^{\circ}\text{C}$ ] | temp. początk. [ $^{\circ}\text{C}$ ]                       | temp. końcowe [ $^{\circ}\text{C}$ ] | różnica temp. [ $^{\circ}\text{C}$ ] | temp. początk. [ $^{\circ}\text{C}$ ]                       | temp. końcowe [ $^{\circ}\text{C}$ ] | różnica temp. [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
| 17,4                                                        | 28,1                                 | 10,7                                 | 23,5                                                        | 27,4                                 | 3,9                                  | 25,8                                                        | 22,0                                 | 3,8                                  |
| 15,9                                                        | 24,8                                 | 9,0                                  | 18,9                                                        | 24,0                                 | 5,1                                  | 21,4                                                        | 19,9                                 | 1,6                                  |
| średnia różnica temperatur [K]                              |                                      | 9,8                                  | średnia różnica temperatur [K]                              |                                      | 4,5                                  | średnia różnica temperatur [K]                              |                                      | 2,7                                  |
| wskaźnik zmian temperatury [ $\text{K}\cdot\text{h}^{-1}$ ] |                                      | 1,51                                 | wskaźnik zmian temperatury [ $\text{K}\cdot\text{h}^{-1}$ ] |                                      | 0,99                                 | wskaźnik zmian temperatury [ $\text{K}\cdot\text{h}^{-1}$ ] |                                      | 0,48                                 |
| ilość ciepła [MJ]                                           |                                      | 154,4 - 183,5                        | ilość ciepła [MJ]                                           |                                      | 70,6 - 83,8                          | ilość ciepła [MJ]                                           |                                      | 41,9 - 49,8                          |

Podczas doładowywania złoża wskaźnik zmian temperatury złoża był podobny w obu cyklach i wynosił około  $1,0 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ , podczas gdy wskaźnik zmian temperatury złoża podczas pierwotnego ładowania wynosił w obu cyklach co najmniej  $1,5 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ . Różnica ta wynika niewątpliwie z różnych gradientów temperatury pomiędzy powietrzem tłoczonym do złoża, a samych złożem, którego temperatura przy rozpoczęciu doładowywania była za każdym razem wyższa niż temperatura przy rozpoczynaniu pierwotnego ładowania. Podobnie wyższy wskaźnik zmian temperatury podczas rozładowywania złoża w pierwszym cyklu ( $0,58 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ ), w stosunku do tego wskaźnika w drugim cyklu ( $0,48 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ ), był niewątpliwie spowodowany niższą temperaturą w otoczeniu tuneli w nocy z 14 na 15 X 2011r.

Rozładowywanie akumulatora przez 5,5-6 godzin pozwoliło na odzyskanie ilości ciepła rzędu 45-60 MJ i spowodowało w tym czasie obniżenie średniej temperatury złoża o  $2,7\text{-}3,5^{\circ}\text{C}$ . Nie jest to wielkość duża, zważywszy na co najmniej 70 MJ zakumulowane podczas doładowywania złoża w dniach 14 i 18 X oraz odpowiednio 96 MJ i 169 MJ zakumulowane podczas pierwotnego ładowania złoża w dniach 13 i 17 X. Jednak, gdy weźmie się pod uwagę, że akumulator ma w założeniu pracować w cyklu dobowym, to uzyskane wyniki są zadowalające. Ilość ciepła zakumulowana podczas doładowywania jednej tylko sekcji akumulatora była wystarczająca do zniwelowania strat ciepła ze złoża

w pierwszej części nocy i następnie podgrzania powietrza wewnątrz całego tunelu o średnio  $1,5^{\circ}\text{C}$ , w stosunku do temperatury otoczenia. Oznacza to, że efektywność dobowego cyklu pracy akumulatora wyniosła od 59,4% (ciepło odzyskane 19 X w stosunku do ciepła zakumulowanego podczas doładowywania 18 X) do 83,5% (ciepło odzyskane 15 X w stosunku do ciepła zakumulowanego 14 X). Pozostałe 16,5-40,6% stanowią straty spowodowane wychładzaniem złoża i są niewątpliwie zależne od różnicy pomiędzy temperaturami złoża i otoczenia.

## Podsumowanie

Prezentowane dane stanowią wstępny etap badań wybudowanego w Skierniewicach akumulatora ciepła, jednak wyniki wskazują na duży potencjał energetyczny powstałej instalacji.

Natężenie promieniowania słonecznego w październiku było wystarczające do zakumulowania ciepła w ciągu dnia w sekcji o obj.  $12,69\text{ m}^3$  i ogrzanie nocą tunelu o powierzchni  $135\text{ m}^2$  o co najmniej  $1,5^{\circ}\text{C}$ .

Efektywność ładowania akumulatora zależy od temperatury złoża przed rozpoczęciem ładowania, a efektywność rozładowywania akumulatora zależy od długości okresu czasu pomiędzy ładowaniem i rozładowywaniem oraz od temperatury otoczenia, przed rozpoczęciem rozładowywania.

Ze względu na znaczne różnice między temperaturą powietrza przepływającego przez akumulator a temperaturą kruszywa w złożu, sterowanie pracą akumulatora wymagać będzie wprowadzenia korekty wskazań czujników temperatury umieszczonych między kamieniami, a w dalszej kolejności opracowania modelu opisującego dynamikę ładowania i rozładowywania złoża.

## Bibliografia

- Alkilani M.M., Sopian K., Alghoul M.A., Sohif M., Ruslan M.H.** (2011): Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1476-1490.
- Bouhdgar A., Boulbing A.** (1990): Rockbed as a heat storage material for greenhouse heating. W: Sayigh Reading, A. (red.): *Proceedings of Congress Energy and the Environment*. UK, London, 2325-2327.
- Bricault M.** (1982): Use of heat surplus from a greenhouse for soil heating. W: *Proceedings of the International Conference on Energex 82*. Regina, 564-568.
- Fotiades, I.** (1987): Use of solar energy for heating of greenhouses. W: von Zabeltitz C. (red.): *Energy Conservation and Renewable Energies for Greenhouse Heating*. REU Technical Series 3. FAO, ENEA, Roma, 28-35.
- Holownicki R., Konopacki P., Kurpaska S., Latała H., Treder W., Nowak J.** (2012): Magazynowanie nadwyżek ciepła w tunelach foliowych - koncepcja akumulatora kamiennego. *Inżynieria Rolnicza* 2(137), T. 1, 79-87.
- Huang B.K., Ozisik M.N., Toksoy M.** (1981): Development of greenhouse solar drying for farm crops and processed products. *AMA (Japan)*, 12(1), 47-52.

- Jaffrin A., Cadier P.** (1982): Latent heat storage applied to horticulture. *Solar Energy*, 28(4), 313-321.
- Kavin J., Kurtan S.** (1987): Utilization of solar energy in greenhouse. W: von Zabeltitz C. (red.): *Greenhouse Heating with Solar Energy*. REU Technical Series 1. FAO, ENEA, Roma, 178-185.
- Kurpaska S., Latała H., Rutkowski K., Hołownicki R., Konopacki P., Nowak J., Treder W.** (2012): Magazynowanie nadwyżki ciepła z tunelu foliowego w akumulatorze ciała stałego. *Inżynieria Rolnicza* 2(137) T. 1, 157-167.
- Lau P.** (2007): Forsmark site investigation. Drill holes KFM01A, KFM07A, and KFM08A. Specific heat capacity of rocks using calorimetric measurements. SKB P-07-19, Svensk Kärnbränslehantering AB, ISSN 1651-4416.
- Mueller W., Maćkowiak S., Siatkowski I.** (2010): System informatyczny do symulacji przepływu ciepła w kamiennym akumulatorze. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 55(2), 51-55.
- Nash R., Williamson J.** (1978): Greenhouse heating using solar energy. W: Bilgen E., Hollands K.G.T. (red.): *Proceedings of ISES Solar World Congress*. Hamburg, 64-69.
- Sethi V.P., Sharma S.K.** (2008): Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy*, 82(9), 832-859.

## HEAT STORAGE IN ROCK-BED ACCUMULATOR - PRELIMINARY RESULTS

**Abstract.** The aim of the presented study was preliminary evaluation of efficiency of heat storage in the rock-bed accumulator located below a commercial high plastic tunnel 15 x 9 m. The research was carried out between 13th October and 19th October 2011, and only one section of that accumulator containing 12.69 m<sup>3</sup> of rock (31.5-63 mm porphyry breakstone) was used. Two sequences of main charging, next day additional charging and very next night discharging were carried out. During both sequences the rates of temperature changes (mean change of temperature per time unit) were similar, and reached 1.51-1.64 K·h<sup>-1</sup> during main charging, 0.99-1.00 K·h<sup>-1</sup> during additional charging and 0.48-0.58 K·h<sup>-1</sup> during the night discharging. The spontaneous overnight decrease of temperature between the end of main charging and the next day beginning of additional charging was 0.21-0.29 K·h<sup>-1</sup>. The rates of heat exchange reached 26-28.1 MJ·h<sup>-1</sup> during main charging, 17-17.4 MJ·h<sup>-1</sup> during additional charging and 8.2-9.9 MJ·h<sup>-1</sup> during night discharging. These preliminary results indicate high energetic potential of constructed tunnel-accumulator system, as by means of only one accumulator section the cultivated tomato plants were heated during night by at least 1.5°C.

**Key words:** accumulator of a solid body, plastic tunnel, heat storing, renewable energy

### Adres do korespondencji:

Paweł Konopacki; e-mail: Pawel.Konopacki@inhort.pl  
Zakład Agrotechnologii  
Instytut Ogrodnictwa  
ul. Pomologiczna 18  
96-100 Skierniewice