

Ocena systemu poprawy mikroklimatu w szklarni

Jarosław Knaga , Kazimierz Rutkowski

1. Wprowadzenie

O efektach produkcji pod osłonami decydują czynniki biologiczne oraz techniczne. Czynniki techniczne pełnią rolę służebną czyli ich oddziaływanie i nastawy winny umożliwiać wzrost, plonowanie i wysoką jakość uprawianych roślin. Konstrukcja szklarni, techniczne wyposażenie obiektu oraz mikroklimat decydują o efektach produkcyjnych i ekonomicznych. Jak podaje Stachowiak (2009) w procesie sterowania mikroklimatem należy mieć na uwadze zarówno względy produkcyjne jak też nakłady energetyczne, których udział sięga 40 aż 50 % (Rutkowski).

Temperatura, wilgotność, światło oraz skład powietrza w układzie przestrzennym szklarni winny spełniać wymagania uprawianych roślin.

Rodzaj elementów grzejnych, ich rozmieszczenie oraz sterowanie mają zasadniczy wpływ na mikroklimat.

Forma przekazywania ciepła przez urządzenia grzewcze ich chwilowa temperatura, wydajność i pojemność elementów grzejnych jak też rozmieszczenie mają wpływ na temperaturę, ruch powietrza i wilgotność w strefie wegetacji roślin. Wydaje się zasadnym nadmienić, że przykładowo nowej generacji rury o przekroju gwiazdy spełniają szereg oczekiwań a ponadto osiągają na obwodzie zróżnicowaną temperaturę co umożliwia zróżnicowanie wielkości udziału formy przekazywania ciepła otaczającym roślinom (promieniowanie-konwekcja) (Knaga, Rutkowski). Należy pamiętać, że większy udział ciepła dostarczany w formie radiacji zapewnia wyższą temperaturę roślin względem otoczenia. Gwarantuje to lepszy rozwój roślin oraz zmniejsza ryzyko występowania chorób grzybowych. Należy pamiętać, że duża wilgotność to słaba ewaporacja a tym samym zmniejszony pobór składników pokarmowych przez rośliny. W szczególności należy mieć na uwadze godziny poranne w szklarni gdzie występuje niebezpieczeństwo pojawienia się rosy na uprawianych roślinach w szklarni. W celu ograniczenia wymienionych powyżej zagrożeń należy pamiętać, że winniśmy stosować w systemie grzewczym cienkie rury z możliwością stosowania zróżnicowania temperatur, które winny być umieszczone w dolnej strefie wegetacji roślin.

Analizując produkcję szklarniową w Polsce i nie tylko zauważa się, że większość uprawianych roślin wymaga większej uwagi w zakresie utrzymywania wilgotności w szklarni. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem tego problemu jest wietrzenie szklarni. Wiąże się to z dużymi stratami ciepła. Jest szereg rozwiązań bardziej lub mniej skutecznych o których podaje szereg autorów (.....) najczęściej wykorzystujących agregaty chłodnicze połączone z wymuszonym ruchem powietrza. Są to urządzenia których eksploatacja jest stosunkowo droga w szczególności w dużych obiektach. Stąd też poszukuje się nowych rozwiązań, które spełnią oczekiwania oraz ich eksploatacja i efektywność będzie zadawalająca. Ze względu na pożądany skład powietrza w strefie wegetacji roślin korzystnym efektem jest jeśli w dolnej strefie wegetacji roślin jest temperatura nieco wyższa niż w górnej strefie pod cieniówką (kurtyną). Wymieniany powyżej stan gwarantuje powolny ruch powietrza ku górze a tym samym obniżanie wilgotności z równomiernym zachowaniem przedłużonej obecności CO₂

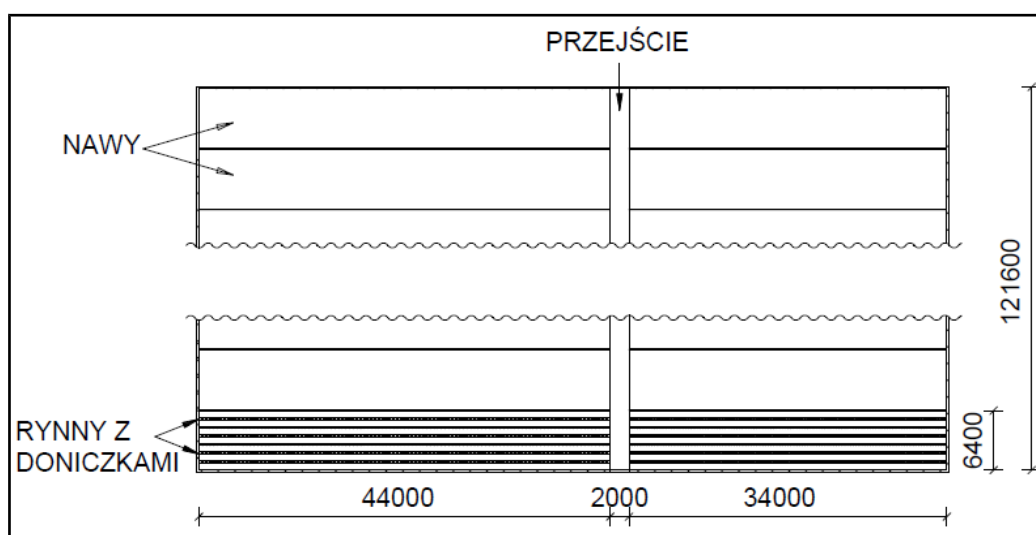
w strefie roślin. Każdy zwiększony ruch powietrza to większe straty ciepła oraz zmniejszona przyswajalność CO₂. W używanych systemach obniżania wilgotności powietrza w szklarniach wykorzystuje się przetłaczanie powietrza z górnej strefy do rękawa umieszczonego w dolnej strefie roślin (...). Powietrze czerpane z górnej strefy często bywa mieszane z powietrzem zewnętrznym. Równocześnie w tym okresie występują niskie temperatury zewnętrzne a wprowadzanie do szklarni zewnętrznego powietrza (domieszka powietrza zewnętrznego) powoduje większe straty ciepła w szklarni. W skrajnych przypadkach w celu obniżenia wilgotności w szklarni włacza się do rękawa powietrze wstępnie podgrzane poprzez rekuperatory (...).

2. Cel pracy

Celem prowadzonych badań jest ocena innowacyjnego systemu osuszająco - grzejącego zainstalowanego w szklarni produkcyjnej o powierzchni 1 ha. Oceną objęto parametr temperatury oraz wilgotności w wybranych strefach wysokościowych obiektu. Uzyskane wyniki pomiarów pozwolą ocenić badany system w układzie przestrzennym szklarni oraz w układzie czasowym. Ponadto oceną objęto efekty energetyczne innowacyjnego systemu.

3. Przedmiot badań

Badania zostały przeprowadzone w szklarni, w której prowadzona była intensywna uprawa truskawek. Obiekt badań położony jest w Kaliszu w województwie wielkopolskim. W szklarni znajdują się dwa arealy uprawowe o powierzchniach odpowiednio 4 608 m² i 5 120 m². Szklarnia zbudowana została w 2005 roku według dokumentacji holenderskiej o wysokości 4,25 m i szerokości nawy 6,4 m. Dach szklarni jest wykonany ze szkła pojedynczego (4 mm), zaś ściany ze szkła podwójnego (2 x 4 mm). Elementy łączące szyby wytworzone są z profili aluminiowych.



Rys. 1. Przekrój obiektu badań

Szklarnia podzielona jest na nawy, które zaznaczono na rysunku 1. Areal uprawowy obiektu badań (hali) jest oddzielony przejściem o szerokości 2 m. Długość lewej części szklarni wynosi 44 m, zaś prawej 34 m. W pierwszej hali jest 9 naw, a drugiej 10. Na każdej nawie jest umieszczone 6 rynien, na dłuższej części hali na rynnie znajduje się 110 doniczek z roślinami.



Fot. 1. Częściowy widok nawy z rozmieszczeniem rynien uprawowych i elementów systemu klimatyzacji

Rynny uprawowe o szerokości 200 mm zawieszane są na wysokości 1,5 m nad podłożem. System ogrzewania stanowią dwa obwody, pierwszy z nich to dolne rury grzewcze (system na powierzchniowy) o średnicy 60 mm zaś drugi stanowią dwie pętle ogrzewania vegetacyjnego (na jedną nawę = sześć rynien uprawowych) co stanowi tzw. układ aktywny. Rury grzejne ogrzewania dolnego połączone są w kształcie litery U tak że po jednej stronie znajduje się kolektor zasilający i powrotny. Na każdą nawę przypada po 12 rur grzejnych ogrzewania dolnego, oraz cztery rury grzejne ogrzewania vegetacyjnego. Ponadto pod każdą rurą znajduje się rękaw ogrzewania powietrznego stanowiący element półpasywny (fot.1). Rozciągnięty rękaw foliowy ma średnicę 0,6 m, w którym w górnej części wycięto otwory celem swobodnego odprowadzenia powietrza. Sam rękaw pełni rolę tylko i wyłącznie elementu rozprowadzenia powietrza podczas ogrzewania bądź osuszania obiektu w zależności od parametrów mikroklimatu. Pełny schemat elementów układu powietrznego pełniącego rolę osuszacza powietrza w szklarni i układu akumulacji ciepła został przedstawiony na schemacie (rys. 2). Podstawowymi elementami badanego układu osuszająco magazynującego ciepło jest czerpnia wykonana z rury PP o średnicy 160 mm, dmuchawa (łączna ich ilość na szklarni wynosi 114 na jedną stronę), element osuszająco - magazynujący (wykonany z rury PP o średnicy 160 mm), zbiornik na skropliny i opisany wcześniej rękaw rozprowadzający

uzdatnione powietrze. Rura osuszająco –magazynująca jest ułożona na głębokości 0,7 m poniżej poziomu szklarni z 1% spadkiem w kierunku zbiornika kondensatu. Elementem wymuszającym obieg powietrza w badanym układzie jest dmuchawa o mocy znamionowej 145 W i wydajności nominalnej 1000 m³/h.



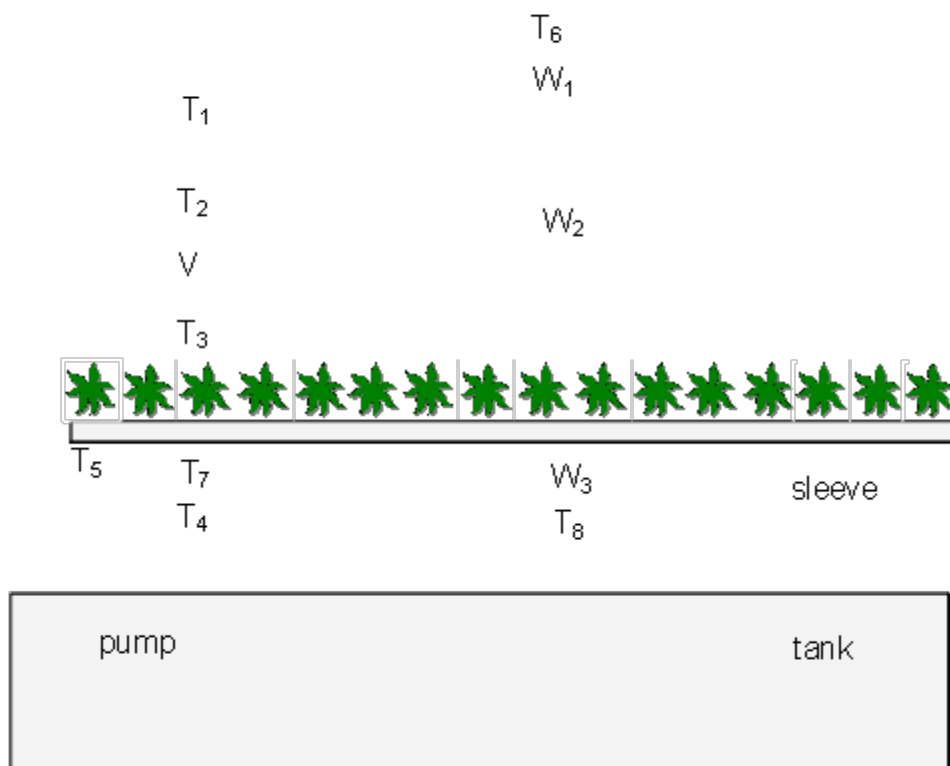
Rys. 2. Rozmieszczenie elementów powietrznego układu grzewczo - osuszającego

Na schemacie (rys. 2) przedstawiono przekrój poprzeczny nawy oraz rozmieszczenie elementów systemu osuszającego i magazynującego ciepło. Osuszacz ma za zadanie wychwycić i usunąć nadmiar wody zgromadzony w powietrzu. Ciepłe o podwyższonej wilgotności powietrze znajdujące się w górnej strefie szklarni jest zasysane przez wentylator, który kieruje je rurociągiem na chłodniejszy zespół kondensatora w postaci rury ułożonej w gruncie. Po przekroczeniu punktu rosy następuje wykroplenie się nadmiaru pary wodnej, odwilżone powietrze jest wyprowadzane przez rękaw pod rynny uprawowe, natomiast skropliny odprowadzone są do zbiornika kondensatu. Powietrze przepływając przez kondensator oddaje ciepło które jest krótkotrwale magazynowane w gruncie podłoża szklarni. Zgromadzone ciepło w kondensatorze z ochłodzonego powietrza i kondensacji pary wodnej jest wykorzystane do wspomaganie ogrzewania zasadniczego szklarni.

4. Metodyka badań

W produkcji szklarniowej okres jesienno zimowy cechuje się największym zapotrzebowaniem na ciepło, przy stosunkowo dużych różnicach temperatur w przedziale doby. Stąd ocenę innowacyjnego systemu do osuszania powietrza i wspomaganie ogrzewania szklarni prowadzono w okresie od 10-11-2017 do 23-03-2018r. Utrzymanie odpowiednich wartości temperatury i wilgotności jest bardzo istotne ponieważ stworzony mikroklimat powinien zapewnić roślinom optymalne warunki rozwoju, przy jak najefektywniejszym wykorzystaniu urządzeń energetycznych i przy jak najmniejszym zużyciu ciepła i materiałów pomocniczych (środków ochrony roślin), (Rutkowski 2010).

Badania zostały wykonane na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym do tego celu stanowisku, którego zasadniczym elementem jest karta pomiarowa wyposażona w 32 kanały analogowe, o rozdzielczości przetwornika cyfrowego 12 bitów. Ponadto system pomiarowy był wyposażony w jednostkę akwizycji danych, oraz czujniki temperatury i wilgotności odpowiednio w klasie 1. Rejestrowane w czasie rzeczywistym wartości temperatury i wilgotności były z interwałem wynoszącym 30 sekund, tak aby można było również prowadzić analizy dynamiczne tych parametrów. Na schemacie (rys. 3) przedstawiono rozmieszczenie przestrzenne poszczególnych czujników temperatury i wilgotności. Pomiary tych parametrów były realizowane w dwóch płaszczyznach tj. w połowie długości nawy i na końcu nawy, co po części było podyktowane koniecznością bezpiecznego i długotrwałego rozmieszczenia czujników, nie powodując utrudnień przy wykonywaniu bieżących prac w obiekcie.



Rys. 3. Rozmieszczenie elementów układu pomiarowego: T₁-temp. nad cieniówką, T₆-temp. nad cieniówką w środku hali, T₂-temp. na wysokości 3m, T₃-temp. rośliny, T₄-temp. podłoża w szklarni, T₅-temp. otoczenia, T₇-temp. w rękawie, T₈-temp. w rękawie środek, W₁-wilgotność nad cieniówką, W₂- wilgotność roślin, W₃- wilgotność w rękawie

Analizę parametrów pracy przedmiotowego systemu przeprowadzono w oparciu o przeciętny profil doby wyznaczony z uśrednionych wartości bezpośrednio zarejestrowanych do interwału 5-cio minutowego. Pięciomiesięczny okres badań zastał podzielony na przedziały od 2 do 4 tygodni dla których to wyznaczono profil dobowy, przy czym siedmiotygodniowy czas zimowego przechłodzenia plantacji (spoczynku w uprawie truskawek) został potraktowany jako jeden okres badawczy.

Na podstawie opracowanych parametrów profilu dobowego wyznaczono wartość mocy oddawaną przez przedmiotowy układ do szklarni z zależności (1):

$$Q' = \dot{m} \cdot c_{pw} \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdzie:

\dot{m} - masowe natężenie przepływającego powietrza przez system,

ΔT - różnica temperatur powietrza zasysanego z górnej strefy szklarni i w środku rękawa,

c_{pw} - ciepło właściwe powietrza wilgotnego.

Przy czym ciepło właściwe powietrza wilgotnego zostało wyznaczone z zależności (2):

$$c_{pw} = c_{ps} + c_{pp} \cdot x \quad (2)$$

gdzie:

c_{ps} - ciepło właściwe suchego powietrza dla warunków panujących w obiekcie,

c_{pp} - ciepło właściwe pary wodnej,

x - bieżąca zawartość wilgoci w powietrzu.

Istotnym parametrem pracy omawianego systemu jest strumień wykroplonej pary wodnej, który został wyznaczony z zależności (3):

$$\dot{m}_w = \dot{m} \cdot (x_1 - x_2) \quad (3)$$

gdzie:

\dot{m} - masowe natężenie przepływającego powietrza przez system

x_1 - zawartość wilgoci w powietrzu zasysanym,

x_2 - zawartość wilgoci w powietrzu opuszczającym rękaw.

Na potrzeby określenie efektywności energetycznej przedmiotowego systemu zdefiniowano współczynnik wykorzystania energii elektrycznej (4):

$$E_E = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \cdot \Delta t}{\sum_1^n P_{m,i} \cdot \Delta t} \quad (4)$$

gdzie:

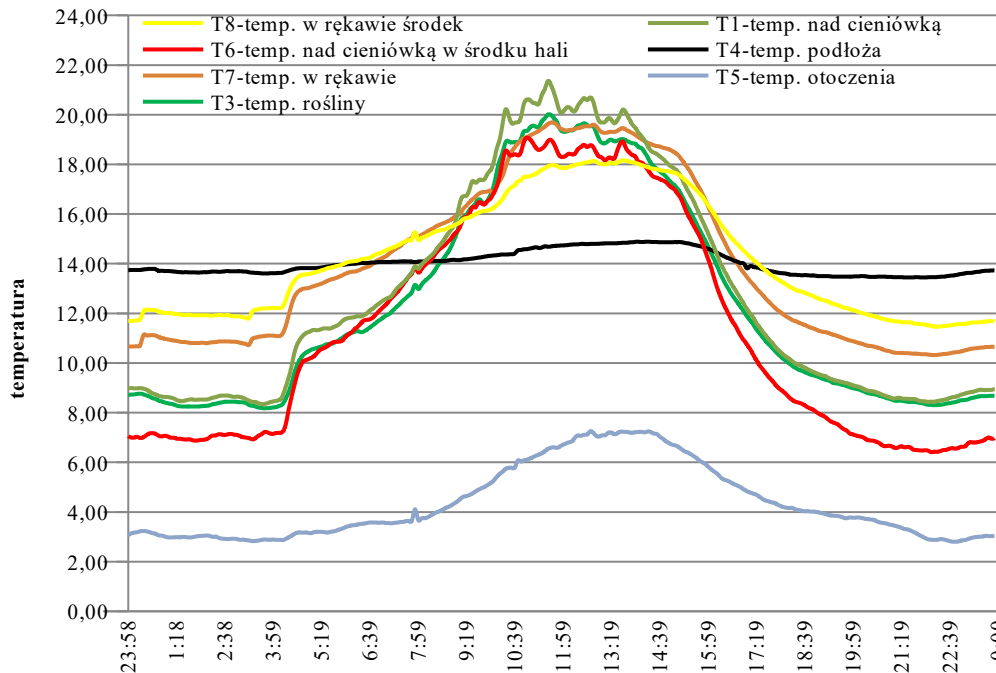
P_m - średnia moc pobierana przez wentylator,

\dot{Q}_i - średnia moc oddawana przez układ.

5. Analiza wyników badań

Wstępną analizę przedmiotowego systemu przeprowadzono w okresie od 10-11-2017 do 24-11-2018. Okres ten obejmował intensywną uprawę truskawek. W oparciu o zarejestrowane parametry temperatur (rys. 4) i wilgotności (rys. 6) sporządzono wykresy

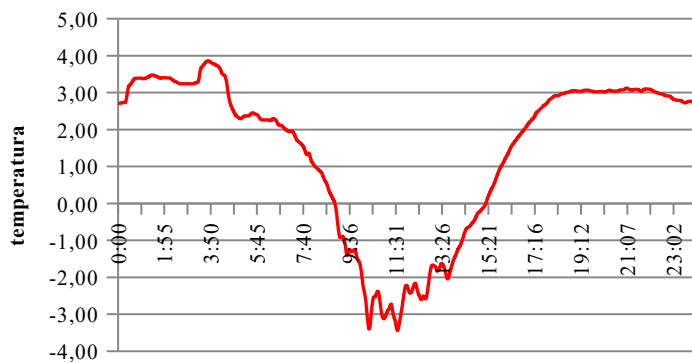
zgodnie z przyjętą metodyką i przeprowadzono analizę w przedziale dobowym wyznaczając przeciętne wartości w interwale 5 min.



Rys. 4. Przebieg zmian temperatury dla klimatu w szklarni i charakterystycznych punktach półpasywnego systemu grzejno-chłodzącego

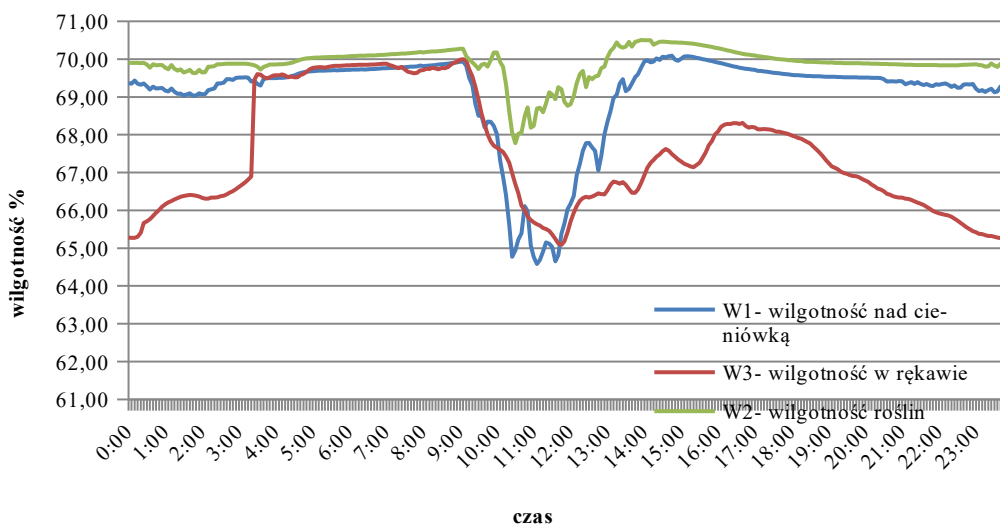
Na wykresie (rys. 4), dobowym przebiegu zmian temperatury w obiekcie szklarniowym i badanym systemie można wyróżnić dwa okresy pierwszy z nich jest oznaczony jako „grzanie”, a drugi odpowiednio „chłodzenie”.

Wyznaczanie czasowe (czas rozpoczęcia i okres trwania) wymienionych okresów było zdefiniowane przez producenta który brał pod uwagę efekty energetyczne przedsięwzięcia. Albowiem przyjęte okresy cechowały się korzystną ceną pobieranej energii elektrycznej. Pierwszy okres „grzania” rozpoczyna się o godz. 3¹⁰ i kończy o 8⁰⁰, gdy różnica temperatur pomiędzy powietrzem opuszczającym rękaw a zasysanym była na poziomie około 1 °C (rys. 5). Po włączeniu półpasywnego systemu grzejno-chłodzącego w pierwszej godzinie jego pracy następuje nieznaczny wzrost różnicy temperatur dT_1 (0,5 °C), poczym następuje gwałtowny spadek tej różnicy będący efektem włącznie ogrzewania zasadniczego co na wykresie (rys. 4) jest zaznaczone gwałtownym wzrostem wszystkich temperatur w szklarni oprócz temperatury podłoga (T).



Rys. 5. Przebieg zmian różnicy temperatur pomiędzy powietrzem opuszczającym rękaw a zasysanym dT1

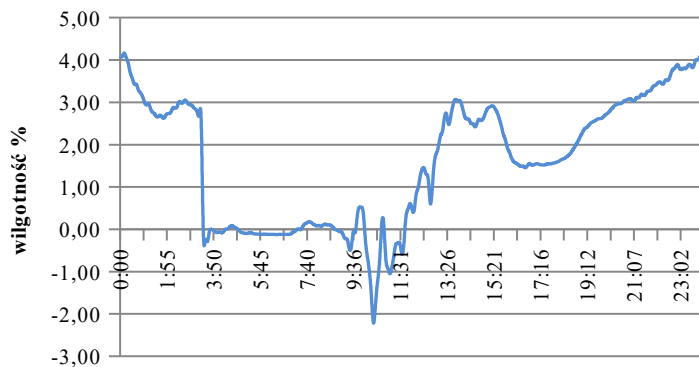
W końcowej fazie pierwszego okresu pracy przedmiotowego systemu badań (grzania) zauważa się bardziej stabilną pracę w czasie gdy różnica temperatur (dT1) spada dość wolno do wartości 2°C. Należy również zauważyć iż po włączeniu badanego systemu wilgotność powietrza opuszczającego rękaw ustala się na poziomie wilgotności powietrza zasysanego i taki stan utrzymuje się w całym pierwszym okresie „grzania” (rys. 6).



Rys. 6. Przebieg zmian wilgotności dla klimatu w szklarnia i w charakterystycznych punktach półpasywnego systemu grzejno-chłodzącego

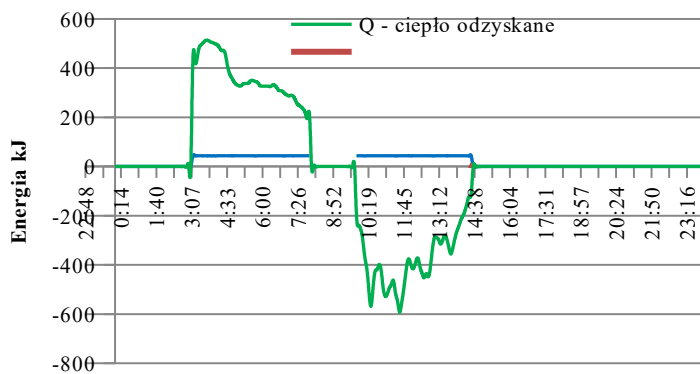
W drugim okresie pracy badanego systemu (chłodzenia) zachodzą bardziej złożone zjawiska co jest spowodowane włączeniem się układu wentylacji i grzania zasadniczego, których równoczesna praca pozwala na utrzymanie wilgotności na poziomie nie przekraczającym 70% co sprzyja intensywnej uprawie roślin. W tym okresie temperatura nad cieniówką jest najwyższa (T1) (rys. 4) i stan ten utrzymuje się aż do końca pracy przedmiotowego systemu co jest zjawiskiem bardzo korzystnym. Jednakże czasowe włączenie systemu grzejno-chłodzącego w tym przypadku o godz. 9⁵⁰ nie jest najlepszym rozwiązaniem co można zauważyć przy analizie wykresów (rys. 4 i 6), ponieważ wcześniej o godz. 9¹⁰ zostaje włączona wentylacja co spowodowało zmniejszenie wilgotności w szklarni.

Stąd też po włączeniu przedmiotowego systemu następuje dość gwałtowny spadek różnicy temperatury $dT1$ (rys. 5) do wartości $-3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale różnica wilgotności powietrza zasysanego z nad cieniówki i opuszczającego rękaw (dW1) jest nieznaczna (rys. 7), co daje podstawę do stwierdzenia iż w pierwszej części okresu „chłodzenia” (regeneracji akumulatora gruntowego) nie zachodzi efekt osuszenia i ten stan trwa do godz. 12¹⁵. Jest to spowodowane niewątpliwie wcześniejszym włączeniem wentylacji i jej wysterowaniem na tym etapie. Dopiero pełny efekt osuszania powietrza i regeneracji akumulatora zachodzi w drugiej części analizowanego okresu kiedy to różnica wilgotności ustala się na poziomie 2,5% (rys. 7), różnica temperatur $dT1$ zmierza do 0°C jest to spowodowane zmianą warunków zewnętrznych i powolnym spadkiem temperatury nad cieniówką T1 (rys. 4).



Rys. 7. Przebieg zmian różnicy wilgotności pomiędzy powietrzem zasysanym a opuszczającym rękaw-dW1

Analizę energetyczną przeprowadzono dla jednej jednostki (czerpnia, akumulator ciepła, rękaw foliowy) badanego systemu i rozpoczęto od obliczenia ilości energii odzyskanej z akumulatora gruntowego w okresie „grzania”, i ilości energii zgromadzonej w akumulatorze w okresie chłodzenia. Wyniki obliczeń w przyjętym interwale czasowym zostały przedstawione na wykresie (rys. 8). Można zauważyć iż najintensywniej rozładowywany i ładowany akumulator jest w pierwszej fazie każdego cyklu. Natomiast przebieg pobranej energii elektrycznej jest na niezmiennym poziomie (rys. 8) co wynika z stałej mocy zespołu napędowego wentylatora. Po scałkowaniu przedstawianych przebiegów energetycznych odpowiednio otrzymano; ilość energii elektrycznej pobranej przez jedną jednostkę w obu okresach wyniosła 1,4 kWh, ilość ciepła odebranego z akumulatora w okresie pierwszym to 5,8 kWh. Natomiast ilość ciepła zamagazynowanego w akumulatorze w cyklu drugim to 5,9 kWh, bez uwzględnienia ciepła kondensacji pary wodnej zawartej w powietrzu.



Rys. 7. Przebieg zmian ciepła w akumulatorze gruntowym oraz zużycia energii elektrycznej do pracy tego akumulatora

Zgodnie z zależnością (4) i w oparciu o wyznaczone parametry energetyczne obliczono współczynnik wykorzystania energii elektrycznej, który dla przeciętnego profilu dobowego wyniósł $E_E=4,18$, co jest wartością zadowalającą. Ponadto w drugim okresie z badanego systemu grzejno-chłodzącego odprowadzono teoretycznie 2,4 kg kondensatu, co w przeliczeniu na wartość ciepła kondensacji, daje dodatkowo 1,45 kWh energii zmagazynowanej w gruncie. Na tej podstawie po zsumowaniu ciepła kondensacji i ciepła odzyskanego z powietrza wilgotnego można stwierdzić iż teoretycznie w gruncie w okresie drugim zmagazynowano 7,36 kWh, co daje ogólną sprawność magazynowania ciepła w gruncie na poziomie 80%. Uzyskane wyniki na podstawie badań przedmiotowego systemu grzejno-chłodzącego zainstalowanego w szklarni napawają optymizmem, a w szczególności mając na uwadze w ostatnim czasie dość silny trend wzrostu cen węgla, który to w polskiej energetyce stanowi podstawowe źródło ciepła. Na prezentowanym etapie wstępnych badań nie analizowano efektu wynikającego ze zwiększonego zużycia ciepła w czasie wentylacji szklarni zmierzającej do zmniejszenia wilgotności powietrza. Efekt ten w pewnym zakresie może być osiągnięty poprzez zastosowanie objętego badaniami innowacyjnego systemu.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych wstępnych badań innowacyjnego półpasywnego systemu grzejno-chłodzącego zaimplementowanego w szklarni wspomagającego zasadniczy system ogrzewania można stwierdzić:

1. Przedmiotowy system wspomagający ogrzewanie zasadnicze pozwala na odzyskanie 5,8 kWh ciepła zakumulowanego w gruncie na jeden niezależny obwód zainstalowany pod rynną o długości 44m.
2. Sprawność naturalnego akumulatora gruntowego w cyklu dobowym, doby uśrednionej wynosi 80%.
3. Wyznaczony współczynnik wykorzystania energii elektrycznej, który dla przeciętnego profilu dobowego wynosi $E_E=4,18$, jest już na poziomie zadowalającym, ponieważ w badaniach nie uwzględniono tzw. ciepła znikniętego.

4. Należy drugi okres „chłodzący” skojarzyć z zasadniczym układem sterowania klimatem tak aby przed włączeniem wietrzników włączał się przedmiotowy system. Pozwoli to osiągnąć większą ilość zgromadzonej energii między innymi poprzez efektywniejsze osuszanie.
5. Teoretyczna ilość uzyskanego kondensatu z jednego obwodu systemu grzejno-chłodzącego o długości 44m wynosi 2,4 kg, a po zintegrowaniu systemu z komputerem klimatycznym powinna wzrosnąć co najmniej 50%.