UNIWERSYTET ROLNICZY
IM. HUGONA KOŁŁĄTAJA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI
I ENERGETYKI

Krzysztof Grodny

WPŁYW WIELOOBWODOWEGO SYSTEMU GRZEWCZEGO NA WARUNKI MIKROKLIMATU WEWNĘTRZNEGO ORAZ ZUŻYCIE CIEPŁA W SZKLARNI

Praca doktorska napisana

pod kierunkiem

Prof. dr hab. inż. Kazimierza Rutkowskiego

KRAKÓW 2024

Streszczenie

Rozprawy doktorskiej: „Wpływ wieloobwodowego systemu grzewczego na warunki mikroklimatu wewnętrznego oraz zużycie ciepła w szklarni”

Początek pracy doktorskiej dotyczy produkcji szklarniowej w aspekcie efektów produkcyjnych a także nakładów energetycznych. Aspekty te zostały poparte najnowszymi osiągnieciami z dziedziny uprawy oraz wyposażenia szklarni. Rozprawa doktorska skupia się na analizie wpływu pracy trójobwodowego systemu grzewczego w szklarni na warunki mikroklimatu w niej panujące oraz zużycie ciepła. Postawiono w niej dwie hipotezy badawcze. Pierwsza dotyczyła możliwości sterowania ruchem powietrza wewnątrz szklarni poprzez odpowiednią kombinacją nastaw temperatur w systemach grzejnych. Druga hipoteza dotyczyła optymalizacji dostępności dwutlenku węgla dla roślin. Poprzez generowanie wymuszonego ruchu powietrza odpowiednią kombinacją nastaw działania systemu grzewczego, jesteśmy w stanie pozyskać asymetryczny rozkład temperatury w przekroju poprzecznym szklarni. Cel pracy zrealizowano w oparciu o wyniki badań wykonane w dwóch obiektach szklarniowych. Pierwszy z nich pełnił rolę laboratorium i stanowił obiekt badawczy. Drugi był obiektem rzeczywistym, w którym realizowana była produkcja towarowa pomidora i pełnił on rolę walidacyjną w stosunku do wygenerowanych charakterystyk w obiekcie badawczym. Praca ma charakter badawczy z możliwością aplikacji uzyskanych wyników w zakresie sterowania parametrami pracy sytemu grzewczego w zależności od wymaganych parametrów mikroklimatu w obiekcie szklarniowym. W głównej mierze ma to na celu poprawienie dobrostanu roślin, obniżenie energochłonności produkcji i ograniczenie szkodliwego oddziaływania na środowisko naturalne. Pierwszy etap pracy polegał na badaniu wpływu 8 kombinacji pracy systemu grzewczego na temperaturę oraz prędkość ruchu powietrza w szklarniowym obiekcie badawczym, w którym nie była realizowana uprawa roślin. Drugi etap pracy polegał na realizacji badań w sposób analogiczny lecz w obiekcie rzeczywistym, dla którego na podstawie analiz wykonanych dla obiektu badawczego wyodrębniono cztery kombinacje nastaw temperatur. Różne zestawienie nastaw temperatur stanowiły punkt wyjścia do różnicowania kombinacji doświadczenia. Ograniczenia w temperaturach pracy systemu grzewczego wynikały z reżimu technologicznego uprawianych roślin. W kolejnym etapie analizowano wpływ temperatury pracy systemu grzewczego na rozkład temperatury i prędkości ruchu powietrza w przekroju szklarni, obiektu badawczego i rzeczywistego. W oparciu o analizę korelacyjno-regresyjną wytypowano zmienne, mające istotny wpływ na analizowane parametry i opracowano stosowne modele regresji. Podsumowując, praca

doktorska dostarcza istotnych informacji na temat wpływu nastaw parametrów analizowanych systemów grzewczych tj. ogrzewania dolnego, podrynnowego i górnego na rozkład temperatur oraz prędkość ruchu powietrza w przekroju szklarni. Zaobserwowano, że intensywność pracy systemu grzewczego środkowego (podrynnowego), ma decydujący wpływ na prędkość ruchu powietrza w przestrzeni szklarni.

Słowa kluczowe: mikroklimat, ogrzewanie, system sterowania, szklarnia

Summary:

Doctoral Dissertation: "The Impact of a Multi-Circuit Heating System on Internal Microclimate Conditions and Heat Consumption in Greenhouses"

This doctoral thesis examines greenhouse production with a focus on production outcomes and energy inputs, supported by the latest advancements in cultivation and greenhouse technology. The dissertation investigates the effects of a three-circuit heating system on the microclimate conditions within a greenhouse and its heat consumption. Two research hypotheses were proposed. The first hypothesis explored the possibility of controlling air movement within the greenhouse by appropriately adjusting the temperature settings of the heating systems. The second hypothesis addressed the optimisation of carbon dioxide availability for plants. By inducing forced air movement through specific heating system configurations, an asymmetric temperature distribution across the greenhouse could be achieved. The research objectives were accomplished through studies conducted in two greenhouse facilities. The first facility served as a laboratory research site, while the second was a commercial tomato production greenhouse, validating the findings from the research facility. This dissertation is research-oriented, with potential applications for controlling heating system parameters to meet the desired microclimate conditions in greenhouse environments. The primary goals of this research are to enhance plant well-being, reduce energy consumption, and minimise environmental impact. The initial stage of the research involved assessing the impact of eight heating system combinations on temperature and airspeed in a plant-free research greenhouse. The subsequent stage replicated this research in a commercial greenhouse, using four temperature settings combinations derived from the research facility analyses. These varied temperature settings formed the basis for experimental differentiation, with operational temperature limitations dictated by the technological requirements of the cultivated plants. The study then analysed the influence of heating system operating temperatures on temperature distribution and air velocity in both the research and commercial greenhouse settings. Through correlation regression analysis, key variables impacting these parameters were identified, and appropriate regression models were developed. In conclusion, this doctoral thesis provides significant insights into how the parameter settings of the bottom, under-gutter, and top heating systems affect temperature distribution and air movement speed within a greenhouse. Notably, the intensity of the central (under-gutter) heating system was found to have a decisive impact on air movement speed within the greenhouse space.

Keywords: microclimate, heating, control system, greenhouse

Spis treści

Spis treści ..... - 5 -
1. Rozwój produkcji pod osłonami w Polsce oraz na świecie ..... - 7 -
1.1. Rys historyczny ..... - 7 -
1.2. Wymagania rynku oraz opłacalność produkcji ..... - 8 -
2. Przegląd literatury ..... - 9 -
2.1. Materiały konstrukcyjne ..... - 13 -
2.2. Materiały pokryciowe ..... - 14 -
2.2.1. Tworzywa sztuczne jako materiały pokryciowe w produkcji pod osłonami ..... - 17 -
2.3. Systemy ogrzewania szklarni i ich ocena ..... - 18 -
2.3.1. Rodzaje ogrzewania szklarni - 18 -
2.3.2. Elementy grzejne nowej generacji i ich rozmieszczenie - 22 -
3. Cel i zakres pracy ..... - 25 -
3.1. Cel pracy ..... - 25 -
3.2. Hipotezy badawcze ..... - 25 -
3.3. Zakres pracy ..... - 25 -
4. Przedmiot badań ..... - 27 -
4.1. Wybór obiektu badań ..... - 27 -
4.2. Obiekt szklarniowy badawczy (Kraków U.R.) ..... - 27 -
4.3. Obiekt szklarniowy rzeczywisty ..... - 29 -
4.4. Obiegi grzewcze systemu ogrzewania ..... - 30 -
4.5. Kotłownia ..... - 32 -
4.6. System dozowania dwutlenku węgla ..... - 32 -
4.7. System dokarmiania roślin ..... - 34 -
4.8. System wywietrzników ..... - 36 -
4.9. System zasłon cieniująco izolacyjnych ..... - 36 -
4.10. System doświetlania roślin ..... - 37 -
4.11. System wentylatorów ..... - 38 -
4.12. Dodatkowe wyposażenie szklarni ..... - 39 -
4.13. Komputerowy system sterująco pomiarowy ..... - 39 -
5. Metodyka pomiarów ..... - 42 -
5.1. Siatka pomiarowa ..... - 42 -

5.2 Charakterystyka czujnika temperatury ..... - 46 -
5.3 Charakterystyka przetwornika temperatury. ..... - 47 -
5.4 Charakterystyka czujnika prędkości ruchu powietrza ..... - 48 -
6. Metodyka obliczeń ..... - 50 -
7. Wyniki Badań ..... - 52 -
7.1. Analiza wstępna ..... - 52 -
7.2. Obiekt badawczy ..... - 53 -
7.2.1. Charakterystyka warunków meteorologicznych - 53 -
7.2.2. Charakterystyka temperatury powietrza w obiekcie badawczym - 56 -
7.2.3. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza w obiekcie badawczym - 70 -
7.2.4. Modelowanie prędkości ruchu powietrza w przekroju szklarni - 81 -
7.2.5. Analiza przestrzennej zmienności parametrów mikroklimatu w obiekcie badawczym - 83 -
7.3. Obiekt rzeczywisty ..... - 90 -
7.3.1. Charakterystyka temperatury powietrza w obiekcie rzeczywistym - 90 -
7.3.2. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym - 103 -
7.3.3. Modelowanie temperatury powietrza w przekroju poprzecznym szklarni - 112 -
7.3.4. Analiza przestrzennej zmienności parametrów mikroklimatu w przekroju szklarni - 123 -
8. Dyskusja i wnioski ..... - 127 -
9. Literatura ..... - 134 -
Spis rysunków ..... - 142 -
Spis tabel ..... - 146 -

6:5714691388

1. Rozwój produkcji pod osłonami w Polsce oraz na świecie

1.1. Rys historyczny

W Polsce intensywny rozwój budowy obiektów pod osłonami nastąpił w latach 1970-1985. Już w roku 1980 w Polsce było ponad 2000 ha szklarni. Budowane były głównie w obrębie kombinatów rolnych powstających przy większych aglomeracjach, które stanowiły rynek zbytu, oraz przez prywatnych ogrodników (Rutkowski 2008, Rutkowski 2014). Były to szklarnie wolnostojące produkowane przez polski przemysł oraz szklarnie zblokowane, które importowano z Bułgarii oraz byłego Związku Radzieckiego. Należy zaznaczyć, że ich wysokość nie przekraczała 2,5m, a asortyment uprawianych roślin ograniczał się głównie do pomidorów, ogórków i kwiatów (Rutkowski 2008, Cichoń 1979, Zabbeltiz 1991, Pokluda i in. 2011). W szklarniach prowadzona była uprawa w dwóch cyklach: wiosennym i jesiennym. Cykl wiosenny zaczynał się w styczniu, a kończył w czerwcu bądź w lipcu. Natomiast cykl jesienny zaczynał się w sierpniu, a kończył na początku listopada. W tej technologii wyeliminowano uprawę roślin w okresie, w którym panowały najmniej korzystne pod względem energetycznym warunki klimatyczne (listopad, grudzień oraz styczeń). Warto dodać, że były to obiekty z pojedynczym oszkleniem, cechujące się dużą nieszczelnością przez co charakteryzowała je duża energochłonność. W kolejnych latach wprowadzano modyfikacje, które pozwalały zmniejszać energochłonność obiektów, ale jednocześnie ograniczały dostęp światła - między innymi poprzez rozwój mikroorganizmów w przestrzeni podwójnej osłony. Należy zwrócić uwagę, że w tej technologii udział nakładów energetycznych zużywanych na wytworzenie ciepła w procesie produkcji - mimo wyłączenia z produkcji niekorzystnego okresu (3 zimowych miesięcy) - stanowił ponad 50% (Rutkowski 2010). Uprawa roślin w szklarniach prowadzona była na podłożu naturalnym, a średni plon roczny przy uprawie pomidora wynosił około 20kg·m^{-2} (Rutkowski 2014). Warto wspomnieć istniejące duże zagrożenie wystąpienia patogenów glebowych przy stosowanej metodzie uprawy (podłoże naturalne) skąd wynikała konieczność termicznej lub chemicznej dezynfekcji podłoża generująca jednocześnie dodatkowe koszty i zagrożenie dla środowiska (Czekalski 2010, Rutkowski 2002). Na przełomie XX i XXI wieku nastąpił znaczący postęp w produkcji pod osłonami, który pozwolił na wzrost plonu i ograniczenia kosztów produkcji. Obecnie nadal prowadzone są intensywne prace badawcze zmierzające do uzyskania wysokiej jakości i ilości plonu oraz niskiej szkodliwości dla środowiska (Jabłońska i Olewnicki 2011).

7:8284750671

1.2. Wymagania rynku oraz opłacalność produkcji

Postępująca globalizacja rynku pozwoliła na rozwój zaawansowanych kanałów dystrybucji przekładających się na duże możliwości importu produktów rolnych z krajów o korzystniejszych warunkach klimatycznych. Spowodowało to, że przez cały rok były i są dostępne na rynku świeże owoce i warzywa. Jednak świadomy konsument poszukuje produktów o specyficznych walorach jakościowych i smakowych, które najczęściej są charakterystyczne dla danego regionu. Producenci chcąc sprostać tym wymaganiom muszą stosować nisko energochłonne technologie, które jednocześnie pozwalają zachować regionalne walory smakowe produktu. Wymienione oczekiwania przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów produkcji wymuszają postęp w technologii upraw pod osłonami (Wilczyńska 2016, Krzesiński 2002, Kurpaska 2016). Nieustannie prowadzone są prace badawczo-wdrożeniowe, szczególnie dotyczące:

a) nowych rozwiązań w konstrukcji i wyposażenia szklarni,

b) oszczędności w systemach ogrzewania szklarni z uwzględnieniem wykorzystania ciepła odpadowego,

c) wykorzystania odnawialnych źródeł energii,

d) automatyzacji i robotyzacji procesów produkcyjnych,

e) nowych technologii uprawy,

f) doskonalenia procesów technologicznych,

g) nowych upraw i coraz lepszych odmian spełniających wymagania rynku (Libik i in. 1996, Wrzesiński 2005, Wilczyńska 2014, Wilczyńska i. in 2016, Rutkowski 2014, Rutkowski i in. 2009, 2010, Kosieradzki 2016, Kurpaska 2014, 2016, Puła 2014, 2016, Pokluda 2011, Klepacz-Baniak 2016).

8:7166079578

2. Przegląd literatury

Przyjmując wysokość konstrukcyjną szklarni za wyznacznik rozwoju produkcji szklarniowej, można zauważyć ogromny postęp na przestrzeni lat. Od lat 80 odnotowano ponad dwukrotny wzrost wysokości konstrukcyjnej szklarni - obecnie budowane są szklarnie sięgające 6 m w stosunku do tych o wysokości 2,5 m w latach 80. Elementy nośne konstrukcji współczesnej szklarni cechują się kilkukrotnie niższym współczynnikiem przenikania ciepła w stosunku do konstrukcji starszych, natomiast materiały pokryciowe posiadają modyfikowane powierzchnie, co znacząco wpływa na przenikalność ciepła i światła w obydwu kierunkach. Nowocześniejsze elementy konstrukcji i materiały znacznie ułatwiają sterowanie ciepłem w obiekcie oraz przyczyniają się do znacznych oszczędności energii. Dodatkowe wprowadzenie wewnątrz szklarni podwójnych kurtyn termoizolacyjnych również znacznie poprawia gospodarkę ciepłem i światłem. Według niektórych badań przestrzeń między kurtynami może być wykorzystywana w procesie osuszania powietrza (Rutkowski 2008, 2014, Tyl 2008). Szczególnie istotnym parametrem w produkcji pod osłonami jest mikroklimat, który jest wynikiem oddziaływania systemów: grzewczego, wietrzenia oraz elementów wyposażenia i sterowania szklarni (Grabarczyk 2016, Pedchenko 2015, Ertop i Atilgan 2017, Wachowicz 2011). Zróżnicowane temperatury w obiekcie, zależne są od warunków zewnętrznych, pory dnia oraz stadium rozwoju roślin. Pozwalają one utrzymać komfortowe warunki dla prowadzenia upraw a jednocześnie generować oszczędności ciepła wydatkowanego przez system grzewczy. Niezmiernie ważnym parametrem jest też wilgotność powietrza, która ma znaczący wpływ na rozwój oraz zdrowotność uprawianych roślin. Istnieje szereg rozwiązań pozwalających regulować poziom wilgotności w szklarniach, zarówno pośród systemów sterowania jak i dodatkowego wyposażenia obiektów (Rutkowski i Grodny 2014, Kiełt i Pisarev 2010, Kiełbasa i in. 2009). Kolejnym istotnym parametrem mikroklimatu pod osłonami jest ruch powietrza, jest on kluczowy dla roślin pod względem fizjologicznym i zdrowotnym, oraz ma znaczący wpływ na gospodarkę ciepłem. Obecnie w większości szklarni prowadzi się dokarmianie roślin CO_2 gdzie ruch powietrza decyduje o efektach produkcji w aspekcie fizjologicznym i energetycznym oraz w aspekcie ochrony środowiska. Szklarnia jest obiektem o małej bezwładności cieplnej, który w bardzo szybki sposób reaguje na zmianę warunków zewnętrznych, a co za tym idzie gwałtownie zmienia się zapotrzebowanie ciepła, którego raz może być nadmiar, a za chwilę ogromne zapotrzebowanie (Grabarczyk 2011, Henten 1994, Hobler 1986). Efekt szklarniowy w tych obiektach powinien być wykorzystany, a popyt na

9:1130919523

ciepło pokrywany zarówno z jego zgromadzonych wcześniej zapasów (pochodzących z wykorzystania efektu szklarniowego) jak i ze źródeł energii odnawialnej. Współczesny rozwój inżynierii materiałowej pozwala wykorzystywać w produkcji szklarniowej źródła energii, które wcześniej nie mogły być pozyskiwane (Kleiber 2012). Należy mieć świadomość, że obiekty pod osłonami użytkowane w cyklu zamkniętym to pokaźny „żarłok ciepła". Zastosowanie materiałów pokryciowych obiektów technologicznie związanych z produkcją szklarniową oraz części szklarni (na obecnym poziomie wiedzy) ogniwami fotowoltaicznymi połączonymi ze zbiornikami buforowymi może w znaczącym stopniu poprawić gospodarkę energetyczną (Kurpaska i Kiełbasa 2019, Tytko 2016). Ponadto ogromna ilość ciepła w obiektach szklarniowych dostępna jest bezpośrednio na miejscu w postaci efektu szklarniowego, który wykorzystuje się w systemach grzewczych. Warto nadmienić, że obecnie szereg obiektów szklarniowych znajdujących się w Polsce prowadzi zrównoważoną gospodarkę energetyczną również z wykorzystaniem magazynowanego ciepła (Rutkowski 2014, Kurpaska i in. 2003, Bredenbeck 1989, Bakker i in. 1995). Obecnie postęp techniczny w zakresie automatyzacji i robotyzacji pozwala na wyeliminowanie w dużym stopniu udziału człowieka z produkcji szklarniowej. Postęp w zakresie automatyzacji widoczny jest w obiektach ogrodniczych zarówno małych jak też dużych, natomiast robotyzacja wymagająca większych nakładów finansowych jest w pierwszej kolejności stosowana w większych gospodarstwach szklarniowych. Systemy automatycznej regulacji to: sterowanie układem grzewczym kotłowni, mikroklimatem w szklarni oraz procesem nawożenia czy nawadniania uprawianych roślin (Rutkowski i Grodny 2009, Atligan i in. 2019, Raczek i Wachowicz 2014). Najwyższą efektywność systemów automatyki uzyskuje się przy ich zastosowaniu w systemach grzewczych. Robotyzacja natomiast dotyczy najczęściej czynności wykonywanych przez personel tj.: siew, sadzenie, sortowanie sadzonek, transport wewnętrzny, sortowanie owoców i warzyw (Wysocka-Owczarek 2001, 2016).

W celu uzyskania plonu o wysokich właściwościach jakościowo-ilościowych, należy roślinom uprawnym zapewnić optymalne i jednorodne warunki do wzrostu i rozwoju. Wybór technologii uprawy jest funkcją wielu zmiennych z których najważniejsze to: jakość produktu, plon i energochłonność procesu produkcyjnego. Te trzy zagadnienia w ostatnim czasie stały się kluczowe przy tworzeniu nowych technologii produkcji pod osłonami (Oświęcimski 2007, Rutkowski, Wojciech 2009, Rutkowski i in. 2008, Salazar i in. 2014, Szafirowska 2010, Nawalny, Sokołowski 2019, Liberacki i in. 2017, D'Amico i in. 2023, Forkuor i in. 2022, Thomopoulos i in. 2024, Tawalbeh i in. 2023). Śledząc postęp w uprawach szklarniowych zaobserwowano, że pierwszą znaczącą modyfikacją

10:5233773427

technologiczną było zastosowanie jako podłoża materiału syntetycznego, a następnie dopracowanie systemów dokarmiania roślin (Krzesiński 2014, 2022, Kiełbasa i in. 2017). Pozwoliło to na uzyskanie jednorodnych warunków uprawy i eliminację chorób odglebowych. W późniejszym okresie następowały kolejne modyfikacje polegające na zmianie rodzaju podłoża oraz jego usytuowaniu w szklarni (Hanan 1998). Uprawa na rynnach umożliwiła różnorakie sposoby nawożenia, podgrzewania systemu korzeniowego oraz zastosowanie zamkniętego systemu (recyrkulacji) nawożenia (Gajc-Wolska i in. 2010, Salazar i in. 2014, Wysocka-Owczarek 2007, 2016). Dużą rolę odegrała przedłużona uprawa roślin w szklarniach, polegająca na wysadzaniu pomidorów końcem grudnia i ich uprawie do końca listopada następnego roku, dzięki takiej uprawie łodyga pomidora może osiągnąć kilkanaście metrów oraz mieć kilkanaście gron. Przedłużona uprawa to również znacząco niższe nakłady robocizny oraz znacznie wyższe plony, przekraczające nawet 60 $kg \cdot m^{-2}$ Technologia ta wymaga jednak wysokich szklarni, a to niestety wiąże się z wielkością strat cieplnych. Zarówno technologie uprawy w warunkach naturalnych jak i w obiektach pod osłonami bazują na wiedzy z zakresu procesów technologicznych. Znaczące tempo rozwoju technicznego w Polsce i na świecie pozwala na szybkie wdrażanie nowych technologii realizowanych przy pomocy ciągle doskonalonych procesów. Technika nawadniania uzupełniona płynnym nawożeniem oraz obserwacja zachodzących w roślinie procesów stanowiła w latach osiemdziesiątych przełomowy krok w produkcji szklarniowej (Kurpaska i in.1996, Kurpaska 2016, Kurkowski, Witkowski 2014, Knaga i in. 2019). W niedługim czasie okazało się jednak, że wymagania środowiskowe wymusiły, aby proces ten zmodernizować. W konsekwencji stworzono technologię z zamkniętym obiegiem dokarmiania roślin, która jest obecnie powszechnie stosowana w zakładach produkcji szklarniowej. Zalecenia związane z ochroną środowiska wymusiły na producentach stosowanie nowych technologii w procesach chemicznej ochrony roślin m.in. minimalizację substancji czynnej. Ponadto duża część środków chemicznych o znaczącej szkodliwości została wycofana z obiegu handlowego. Dzięki udoskonaleniom w zakresie klimatyzacji pozyskiwany jest produkt szklarniowy dobrej jakości i o wysokim plonie (w warunkach laboratoryjnych nawet 160 kg pomidorów z powierzchni 1 m^2) przy małej ilości zabiegów chemicznych. Z racji tego, że współczesne społeczeństwo wykazuje rosnące wymagania w zakresie asortymentu oraz jakości produktu producenci starają się dostarczyć na rynek produkt spełniający te oczekiwania, ale też po konkurencyjnej cenie – dlatego konieczne jest zachowanie możliwie niskich kosztów produkcji. Odpowiedź na potrzeby rynku jest możliwa dzięki zaawansowanej inżynierii genetycznej która, pozwala wyprodukować rośliny o pożądanych właściwościach sensoryczno-organoleptycznych. Dodatkowo rośliny

11:4741652395

takie są mniej wrażliwe na typowe choroby oraz bardziej tolerancyjne na stresy abiotyczne (Athunarachchi i in. 2021). Dotychczas w produkcji pod osłonami w ogrodnictwie polskim dominował pomidor i ogórek, ale obecnie często sięga się po rośliny cechujące się mniejszymi nakładami zapotrzebowania ciepła oraz charakteryzujące się krótszym okresem wegetacji, np. znaczący wzrost areału uprawy truskawek.

Znajomość procesów zachodzących w roślinie jest kluczowa w wyjaśnianiu szeregu zjawisk w niej zachodzących zarówno w warunkach naturalnych jak i pod osłonami. Należy mieć świadomość, że uprawa roślin w warunkach pod osłonami pozwala wyeliminować szereg negatywnych zjawisk pogodowych zmniejszających plon (np.; susza, nadmiar opadów, intensywna solaryzacja), co czyni taką produkcję łatwiejszą w porównaniu do uprawy w warunkach naturalnych. Minusem takiego rozwiązania są natomiast jednostkowe nakłady produkcyjne upraw pod osłonami, które są wielokrotnie wyższe w stosunku do upraw w warunkach naturalnych – wymusza to intensyfikację wysiłków zmierzających do polepszenia jakości plonu i zwiększenia wydajności produkcji. Analizując zmiany następujące w procesach uprawy pod osłonami można zauważyć szybki postęp w zakresie warunków uprawy, geometrii obiektów szklarniowych, wyposażenia technicznego oraz stopnia zaawansowania mechatronicznego (Barabasz 2016). Pozwala to stwierdzić, że w przypadku produkcji szklarniowej już został wdrożony system rolnictwa 4.0.

Z fizjologii roślin wynika, że głównymi czynnikami wzrostu poza podłożem są światło, temperatura, wilgotność powietrza oraz dostępność dwutlenku węgla. W ciągu cyklu produkcyjnego powinna istnieć możliwość sterowania tymi parametrami w obiekcie szklarniowym zależnie od pór roku i rodzaju uprawianej rośliny. Przedsiębiorca powinien mieć też możliwość doboru parametrów zależnie od tego jaki produkt końcowy chce otrzymać. Regulacja warunków panujących w szklarni pomaga zoptymalizować proces fotosyntezy będący kluczowym czynnikiem dla wzrostu i rozwoju rośliny. W uprawach pod osłonami dokładna znajomość procesu wzrostu rośliny oraz właściwe zastosowanie różnych techniczno–organizacyjnych rozwiązań produkcji umożliwia zwielokrotnienie plonu w stosunku do uprawy w warunkach naturalnych. Ogromną zaletą upraw pod osłonami jest możliwość dostosowania produkcji do popytu rynkowego i eliminacja sezonowości produkcji, która jest cechą charakterystyczną dla upraw polowych.

12:2194051541

2.1. Materiały konstrukcyjne

Pod względem konstrukcji szklarnie możemy podzielić na dwie grupy:

- **szklarnie wolnostojące** charakteryzujące się dużym nachyleniem dachu (30 stopni) które w naszych warunkach mogą być wykorzystywane okresowo. Kąt nachylenia dachu oraz odporność na obciążenia pozwala na wyłączenie obiektu z eksploatacji w okresie zimy (bez groźby uszkodzenia). Szerokość typoszeregu tych szklarni wynosi 3m i krotności tej wielkości, nawet do 18m (Pokluda i in. 2011, Zabeltitz 1991). Wysokość obiektu osiąga od 2,2 do 2,8m (mierzona na wysokość okapu) oraz od 7,1 aż do 11,66m (przy szczycie). Kształt dachu przy takiej konstrukcji (duży kąt pochylenia) uniemożliwia zachowanie jednorodnych warunków mikroklimatycznych wewnątrz obiektu (Rutkowski i Wojciech 2009). Taka konstrukcja szklarni utrudnia więc, a czasami uniemożliwia prowadzenie przedłużonej uprawy np.: pomidora, którego wzrost cechuje się znaczną długością łodyg.

- **szklarnie wielonawowe** to budowle o małym kącie nachylenia dachu i znacznie delikatniejszej konstrukcji. Obiekty te ze względu na mały kąt nachylenia dachu w okresie zimy przy większych opadach śniegu i wyłączeniu z użytkowania mogą ulec uszkodzeniu. Szklarnie holenderskie wielonawowe najczęściej spotykane w Polsce budowane są wg tzw. metody Venlo. Wielkością charakterystyczną tego typu szklarni jest jednostkowa szerokość nawy, która wynosi 3,2 m i krotność tej wielkości aż do 16 m. Wysokość ścian bocznych wynosi od 2 m (starsze szklarnie) do 5,9 m (w nowszych obiektach). Duża kubatura obiektu pozwala na utrzymanie jednorodnych warunków mikroklimatu, a dodatkowe wyposażenie korzystnie wpływa na zużycie ciepła (Rutkowski i Wojciech 2009, Wachowicz 2011).

Ogólnie można przyjąć, że szklarnie powinny się cechować lekką konstrukcją, zapewniającą ich użytkowanie przez okres od 15 do 20 lat (Bakker i inni 1995). Obecnie budowany obiekt szklarniowy powinien być dostosowany do zmiennych warunków klimatycznych i technologii produkcji. Szklarnie wyłączane okresowo muszą wytrzymywać obciążenia wynikające z opadów śniegu oraz oddziaływania wiatru, których sumaryczna wartość oddziaływania na powierzchnie ścian bocznych i dachu szklarni przekracza 250Pa, zaś w szklarniach, gdzie prowadzona jest uprawa w cyklu ciągłym i uprawiane są rośliny ciepłolubne ($t > 15^oC$) wytrzymałość na obciążenia może mieć wartość niższą, ale taką, aby obiekt wytrzymał oddziaływania o sile 150 Pa. Należy mieć na uwadze, że budowa szklarni stanowi konstrukcję nośną dla wszystkich elementów wyposażenia podstawowego i dodatkowego (instalacja grzewcza, kurtyny termiczne, systemy nawadniania, układy doświetlania). Konstrukcja nośna najczęściej wykonywana jest z profili stalowych, ocynkowanych, rzadziej aluminiowych. Ze względu na wielkość strat ciepła przez tworzące się tzw. mostki cieplne konstrukcja dachu jest wykonana z profili zamkniętych przykrytych

13:1102178893

po stronie zewnętrznej materiałem izolacyjnym. Materiał, z którego wykonane jest poszycie szklarni powinien cechować się szczelnością pozwalającą uzyskać poziom infiltracji mniejszy od jednej wymiany na godzinę (Kurpaska, 2008). Duża kubatura obiektu pozwala na łatwiejsze utrzymanie optymalnych warunków klimatycznych, co jest niezmiernie ważne w uprawie roślin. Należy mieć na uwadze, że duża powierzchnia osłony w stosunku do powierzchni uprawy powoduje zwiększenie zapotrzebowania na ciepło. Stąd wysokie wymagania co do wyposażenia szklarni w systemy ograniczające zużycie ciepła. Szczególną uwagę przy budowie szklarni zwraca się na używane materiały konstrukcyjne, dobiera się je tak aby nie ograniczały dostępu światła oraz cechowały się minimalnym pochłanianiem promieni słonecznych.

2.2. Materiały pokryciowe

Bardzo duży wpływ na efektywność produkcji szklarniowej mają cechy materiału pokryciowego. W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na przepuszczalność światła [Rutkowski i in. 2009], gdyż jest ona szczególnie istotna w okresie produkcji cechującym się małą ilością światła (jesień, zima, wczesna wiosna). O przydatności materiału pokryciowego decyduje przepuszczalność światła w zakresie długości fal świetlnych fotosyntetycznie czynnych oraz w zakresie promieniowania bliskiej podczerwieni (Grabarczyk 2010). Przepuszczalność promieniowania podczerwonego IR nie powinna przekraczać 3000nm, a nadfioletowego 400nm. Mimo tego, że obszary wybierane pod budowę szklarni powinny cechować się małym prawdopodobieństwem występowania gradu, to zawsze istnieje niebezpieczeństwo jego wystąpienia oraz wystąpienia innych zjawisk pogodowych mogących wpływać na konstrukcję np.: silnych wiatrów, opadów śniegu. Materiały pokryciowe powinny się więc charakteryzować odpornością na tego typu obciążenia. Jeśli obiekt użytkowany jest w okresie występowania niskich temperatur to materiał pokryciowy cechować powinien również niski współczynnik przewodzenia ciepła. Wielkość współczynnika przewodzenia jest najczęściej odwrotnie proporcjonalna do przepuszczalności światła, dlatego wybór materiału pokryciowego jest zawsze kompromisem między gatunkiem uprawianych roślin, aspektami energetycznymi i kosztami inwestycji. Ponadto przy wyborze materiału pokryciowego należy uwzględnić odporność na starzenie się materiału i zabrudzenia oraz jego odporność na działanie środków chemicznych. W produkcji szklarniowej bardzo ważnym zagadnieniem jest kondensacja pary wodnej po wewnętrznej stronie pokrycia szklarniowego - zjawisko to zmniejsza przepuszczalność światła, zwiększa przewodność cieplną, a spadające krople stanowią

14:8909509416

zagrożenie dla roślin pod względem zdrowotnym. Materiałem najczęściej stosowanym do pokrycia szklarni jest szkło ogrodnicze ciągnione, obustronnie gładkie. Jest to szkło o grubości 3,4 do 5,0mm, charakteryzujące się jednakową przepuszczalnością na całej powierzchni. W obiektach użytkowanych w okresie późnej wiosny (inspekty, belgijki) można spotkać gorsze gatunki szkła tzw. pozagatunkowe czy też inwentarskie. W celu uzyskania dużej jednorodności oświetlenia w obiekcie do pokrycia szklarni używane jest szkło ogrodnicze surowe. Cechą charakterystyczną tego szkła jest to, że jedna z powierzchni szkła jest gładka druga zaś chropowata. Chropowata powierzchnia szkła ułożona od wewnętrznej strony szklarni powoduje rozproszenie światła, minimalizując jego cieniowanie przez elementy konstrukcyjne szklarni oraz zwiększa dostęp światła do niżej położonych stref roślin (Eğilmez i Atılgan 2019). W latach 1980- 90 w szczególności w Niemczech oraz w Holandii zaczęto wykorzystywać jako materiał pokryciowy szklarni szkło zespolone (spawane lub montowane na uszczelkach). Zastosowanie tego typu szkła znacznie poprawiło bilans energetyczny szklarni (30%) (Rutkowski 2005) ale ograniczało dostęp światła do wnętrza szklarni, dlatego w krótkim czasie odstąpiono od takiego rozwiązania. W użytkowaniu pozostały tylko takie obiekty, w których zdecydowano się na uprawę roślin o mniejszych wymaganiach świetlnych, bądź które posłużyły tylko do przyśpieszenia uprawy (czyli te użytkowane późną wiosną). Krycie szklarni szkłem zespolonym w większości obiektów ograniczyło się do jego zastosowania tylko w ścianach bocznych (Rutkowski 2008). Przy zastosowaniu takiego rozwiązania udział światła wpadającego przez ściany boczne w ogólnym bilansie świetlnym jest stosunkowo niewielki, natomiast ulega poprawie całkowity bilans cieplny obiektu. W nowoczesnych obiektach szklarniowych funkcje szkła zespolonego przejęły przesuwne kurtyny, które spełniają oczekiwania w zakresie dostępu światła jak i ograniczają straty ciepła (Podymniak i Sprzaczka 2009). Mimo pojawienia się szeregu zastępczych materiałów pokryciowych, to wciąż szkło stanowi główny materiał pokryciowy szklarni. Zapewnia ono przede wszystkim trwałość i wytrzymałość konstrukcji oraz pozwala na zachowanie przez dłuższy okres użytkowania większości parametrów istotnych z punktu widzenia uprawy szklarniowej. Z czasem na rynku pojawiło się szkło dyfuzyjne, na bazie szkła sodowego typu „Fooat" lub nisko żelazowego „Low Iron". Cechą charakterystyczną tego szkła jest jego jedno lub dwustronne pokrycie warstwą tlenku metali, które są nanoszone w temperaturze około 600^{o}C. Światło przechodzące przez szkło dyfuzyjne podlega rozproszeniu przez co dociera nie tylko do górnych części roślin, ale i w miarę równomiernie do wnętrza obiektu szklarniowego (Runkle 2016). Przy zastosowaniu takiego materiału pokryciowego uzyskuje się w produkcji zwyżkę plonu 10 – 15 % oraz znacznie lepszą jakość produktu (Wilczyńska i Klepacz-

15:2602739682

Baniak 2016). Jest to wynik oddziaływania transmisji bezpośredniej oraz hemisferycznej światła. Transmisja hemisferyczna to wartości przechodzenia promieni słonecznych pod różnymi kątami w ciągu całego cyklu dobowego. Zastosowanie takiego materiału pozwala przedłużyć okres fotosyntetycznie czynny dla roślin w ciągu doby. Szkło dyfuzyjne posiada również wiele innych zalet (Szyperek 2013, Wilczyńska 2015):

- nie generuje cienia oświetlenia roślin na różnych wysokościach,
- powoduje równomierne doświetlenie owoców w ciągu okresu wegetacyjnego,
- zmniejsza stres roślin powodowany przez silne promieniowanie słoneczne,
- skraca o ponad połowę czas skraplania pary wodnej,
- posiada właściwości samoczyszczące oraz cechuje się większą wytrzymałością mechaniczną i obciążeniową.

Zastosowanie szkła dyfuzyjnego do pokrycia szklarniowego pozwala na wcześniejsze poranne wietrzenie szklarni w celu usunięcie tzw. „nocnej wilgotności". Obecnie na rynku funkcjonuje kilku producentów szkła dyfuzyjnego, którego parametry są do siebie zbliżone. Niektórzy z nich jednak oferują dostarczenie szkła o zadanym stopniu dyfuzji w zależności od stref klimatycznych w których powstaje obiekt oraz wymagań uprawianych gatunków roślin. W praktyce szklarniowej wyżej wymienione rozwiązanie nie jest stosowane powszechnie, wynika to z wielokierunkowości produkcji i związanych z nią wymagań, dlatego często stosuje się nakładanie powłoki dyfuzyjnej (specjalnego preparatu cieniującego) na materiał pokryciowy. Takie rozwiązanie pozwala na większą uniwersalność obiektów szklarniowych, ponieważ powłokę można łatwo usunąć i nałożyć kolejną o innych parametrach. O efektywności produkcji pod osłonami w okresie wczesnej wiosny oraz jesieni decyduje w głównej mierze ilość światła. Aby uzyskać większą przepuszczalność światła należy zmniejszyć ilość energii odbitej od powierzchni szkła, efekt ten można osiągnąć poprzez zastosowanie powłoki antyrefleksyjnej pozwalającej zwiększyć przepuszczalność światła do poziomu 97% (Wojcieszak i in. 2014). Szkło antyrefleksyjne zwiększa transmitancję hemisferyczną do 10% (czyli mierzoną dla kątów padania światła w zakresie od 0° do 90°). Kiedy słońce znajduje się nisko nad widnokręgiem to duża część światła ulega odbiciu od powierzchni szyby, dzięki zastosowaniu szkła antyrefleksyjnego można zjawisko to zminimalizować, co pozwoli na wcześniejsze rozpoczęcie procesu fotosyntezy przez rośliny uprawiane w szklarni oraz późniejsze jego zakończenie. Dodatkową zaletą powłoki antyrefleksyjnej jest zwiększenie ilości promieniowania ultrafioletowego docierającego do wnętrza szklarni, co pozytywnie wpływa na jakość i ilość plonu oraz kondycję zdrowotną uprawianych roślin. Efekt jest widoczny szczególnie wtedy, gdy zastosowane zostanie szkło nisko żelazowe. Wówczas powłoka antyrefleksyjna

16:8690354276

powoduje zwiększenie transmitancji w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni, a do szklarni dostarczana jest większa ilość energii co ma znaczący wpływ na zużycie ciepła. Kolejnym rozwiązaniem pozwalającym zmniejszać zużycie ciepła w obiektach szklarniowych jest stosowanie szkła pokryciowego z naniesioną warstwą, która jest nieprzepuszczalna dla promieniowania o długości fali powyżej 2200nm - w ten sposób zmniejszają się straty ciepła drogą promieniowania przez materiał pokryciowy szklarni (Grabarczyk 2010). Ten rodzaj pokrycia może być stosowany, kiedy w szklarni prowadzona jest uprawa roślin o mniejszych wymaganiach świetlnych bądź kiedy uprawa prowadzona jest w okresach o korzystniejszych warunkach solarnych. Stosowane powłoki o nazwie handlowej Agriplus oraz Hortiplus posiadają o około 9% mniejszą przepuszczalność światła w stosunku do typowego szkła.

2.2.1. Tworzywa sztuczne jako materiały pokryciowe w produkcji pod osłonami

W produkcji ogrodniczej oprócz typowych szklarni stosuje się obiekty służące do produkcji okresowej, szczególnie dotyczy to rozsad. Są to obiekty lekkiego typu zwane tunelami bądź też inspektami, gdzie jako materiał pokryciowy stosuje się najczęściej tworzywa sztuczne. Zaletą tworzyw sztucznych jest mała masa objętościowa, odporność na uderzenia oraz ich łatwość w montażu i demontażu. Główne zastosowanie tworzyw sztucznych do produkcji okresowej nie oznacza jednak, że nie stosuje się ich w obiektach użytkowanych w cyklu całorocznym, czyli szklarniach. W obiektach szklarniowych materiały te najczęściej wykorzystuje się jako ściany boczne oraz jako wietrzniki. Przy ocenie przydatności tworzyw sztucznych do zastosowania jako materiały pokryciowy istotne są następujące właściwości:

- całkowita przepuszczalność światła (widzialne, NIR UV),
- przepuszczalność promieniowania długofalowego (cieplnego) IR,
- trwałość pokrycia z jednoczesnym zachowaniem parametrów świetlnych oraz wytrzymałościowych,
- przepuszczalność pary wodnej,
- antykondensacyjna stabilność materiału (skraplanie pary na wewnętrznej stronie pokrycia).

Na rynku występuje szeroki wybór materiałów z tworzyw sztucznych (folii) spośród których można wybrać ten dostosowany do indywidualnych oczekiwań (tworzywa najczęściej oznaczane są kolorami). Najczęściej stosowane są folie polietylenowe PE lub

17:6840229475

z poliwinylochlorydu PCV. Te pierwsze występują w formie stabilizowanej i niestabilizowanej. Folie z PE niestabilizowane - użytkowane są krótkotrwale, ponieważ w wyniku oddziaływania promieni słonecznych (przede wszystkim UV) tracą przepuszczalność oraz stają się kruche. Częściej więc stosuje się folie PE stabilizowane, których trwałość wynosi nawet do 5 lat. W początkowym okresie użytkowania właściwości foli takie jak np. przepuszczalność światła zbliżone są do właściwości szkła (nawet współczynnik przepuszczalności może być 1-2% wyższy dla foli), jednak z czasem właściwości tych tworzyw sztucznych ulegają zmianie i np. folia stabilizowana PE po okresie 3 lat użytkowania traci między 5-7% przepuszczalności, a w kolejnych latach nieproporcjonalnie spada jeszcze bardziej (Pokluda 2011).

Znacznie częściej w obiektach szklarniowych wykorzystuje się poliwęglan (PC), który ma nieco mniejszą przenikalność światła, ale posiada korzystniejszy współczynnik przenikania ciepła (w zależności od ilości warstw). Najczęściej do pokrycia obiektów stosowany jest poliwęglan dwuwarstwowy. Przepuszczalność światła dla takiego materiału wynosi 79-80% (gdzie dla szkła jest równa 90%), zaś przewodność cieplna PC jest na poziomie $0{,}2 W \cdot mK^{-1}$ (dla szkła $0{,}8 W \cdot mK^{-1}$). Dużo lepsze właściwości pod względem przepuszczalności światła ma polimetakrylan PMMA, materiał ten zachowuje też lepiej swoje właściwości w trakcie eksploatacji, a ponadto przepuszcza więcej promieni UV. Pod względem właściwości cieplnych PMMA jest zbliżone do PC. Dla poprawy trwałości PMMA na zewnętrzną stronę płyt nakładana jest warstwa ochronna (UV filtr). Przy zastosowaniu płyt wielowarstwowych należy mieć na uwadze, że wilgoć z powietrza może przedostawać się do wnętrza komórek materiału, i powinna istnieć możliwość jej odparowania. Taka gromadząca się w komórkach wilgoć może ograniczać przepuszczalność światła oraz negatywnie wpływać na właściwości izolacyjne pokrycia.

2.3. Systemy ogrzewania szklarni i ich ocena

2.3.1. Rodzaje ogrzewania szklarni

Materiały osłonowe stosowane do pokrycia szklarni cechują się dużym współczynnikiem przenikania ciepła, dlatego w polskich warunkach klimatycznych szczególną uwagę zwraca się na projektowanie systemów grzewczych. Projekt systemu grzewczego powinien uwzględniać zarówno aspekty uprawowe jak i koszty eksploatacji. W ostatnich kilkudziesięciu latach nastąpiły ogromne zmiany w mechatronice systemów grzewczych i ich budowie, które uwzględniają wyżej wymienione aspekty [Rutkowski 2006]. Nowe rozwiązania konstrukcyjne obiektów szklarniowych pozwoliły wprowadzić

18:1831166342

nowoczesne technologie uprawy, które jednocześnie wymusiły postęp w systemach sterowania mikroklimatem. Ze względu na niską bezwładność cieplną szklarni oraz szybkość zmian czynników zewnętrznych, takich jak: temperatura, wilgotność, nasłonecznienie i wiatr konieczne było zastosowanie rozwiązań, które pozwoliłyby łatwo i szybko zmieniać warunki panujące w obiektach szklarniowych. Zastosowanie w szklarniach całych systemów regulacji i monitorowania mikroklimatu pozwala na utrzymanie stabilnych parametrów otoczenia nawet w ekstremalnych warunkach pogodowych. Możliwość prowadzenia produkcji w okresach o niesprzyjających warunkach atmosferycznych jest warunkowana zastosowaniem systemów grzewczych szybko reagujących na zachodzące zmiany temperatury zewnętrznej. Wyprodukowanie ciepła w niektórych obiektach stanowi nawet 60% wszystkich nakładów energetycznych (Rutkowski 2006) co znacząco wpływa na koszty produkcji, a co za tym idzie rynkową cenę produktu. Aby jak najbardziej optymalizować proces produkcji i poprawiać jej efektywność producenci zmuszeni są do minimalizowania zużycia energii poprzez stosowanie nowoczesnych, a zarazem energooszczędnych systemów grzewczych. Analizując oddziaływanie systemu grzewczego na aspekty fizjologiczne rozwoju roślin należy pamiętać, że ich wymagania zmieniają się na poszczególnych etapach ich wzrostu. Aby umożliwić optymalny rozwój roślin w początkowej fazie są one umieszczane w obiektach o warunkach mikroklimatycznych jakich rośliny potrzebują w danym momencie. Warunki te można później zmienić lub przenieść rośliny od obiektów docelowych, o innych niż początkowe, parametrach mikroklimatu. System grzewczy musi więc pozwalać na płynną zmianę temperatury, która ma kluczowy wpływ na stworzenie odpowiednich warunków mikroklimatycznych. Wszystko po to, aby roślina płynnie przechodziła z pierwszej fazy rozwoju do kolejnych - faza wzrostu, faza kwitnienia i faza wiązania owoców. Należy zaznaczyć, że fazy te mogą występować równocześnie na jednej roślinie, ale na różnych wysokościach jej łodygi, co wymusza stworzenie zróżnicowanych warunków klimatycznych w przestrzeni poprzecznej szklarni. Według Krzesińskiego (2014) zarówno w nocy, jak i w dzień, korzenie, łodygi, kwiaty i owoce oddychają, wydalając CO_2. Dlatego im większe rośliny i liczba owoców, tym niższa powinna być temperatura zapewniana przez system grzewczy, aby roślina optymalnie się rozwijała. Aby określić prawidłowo parametry nastawienia systemu grzewczego, które pozwolą osiągnąć odpowiednią temperaturę na poszczególnych etapach rozwoju uprawianych roślin konieczne jest wykonanie pomiarów ilości pobieranego i wydalanego CO_2 dla całych roślin (Libik i in. 1996). Dążenie do spełnienia tak skomplikowanych wymagań mikroklimatycznych powoduje stosowanie w systemach grzewczych różnorodnych rozwiązań technicznych:

19:4347950432

- ogrzewanie przez konwekcję za pomocą nagrzewnic powietrza oraz konwektorów,
- ogrzewania przez promieniowanie realizowane poprzez ogrzewanie rurowe,
- oraz ogrzewanie przez przewodzenie, czyli ogrzewanie gruntowe.

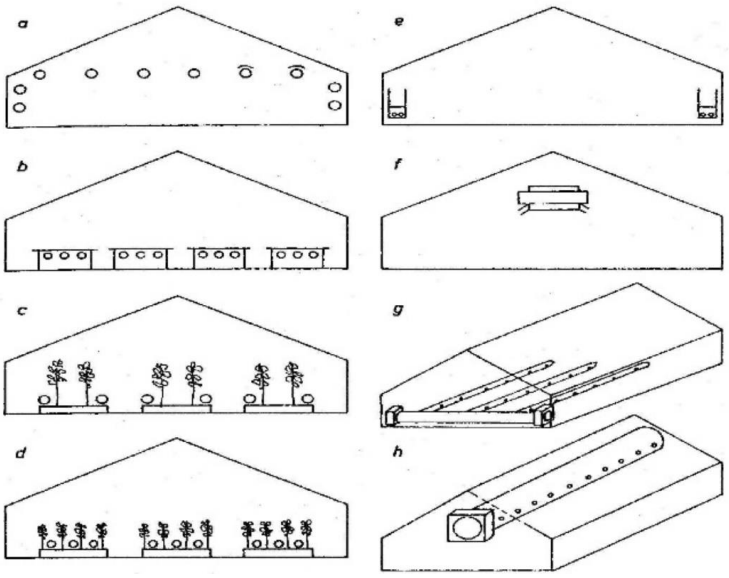
W zależności od wymagań systemu oraz dostępności mediów energetycznych wymienione wyżej rozwiązania występują w różnej kombinacji. Aby lepiej zrozumieć istotę problemu należy przyjrzeć się najważniejszym czynnikom wpływającym na wielkość strat ciepła. Należą do nich:

- ilość przegród zewnętrznych oraz zastosowany materiał pokryciowy szklarni,
- szczelność szklarni,
- różnica temperatur na zewnątrz i wewnątrz szklarni,
- wysokość obiektu,
- sposób osłonięcia szklarni od silnych wiatrów,
- położenie przegród szklarni w stosunku do stron świata ze względu na czynniki klimatyczne (nasłonecznienie, prędkość i kierunek wiatru),
- wilgotność względna powietrza na zewnątrz szklarni,
- sposób ogrzewania - ciągły lub z przerwami,
- rozmieszczenie elementów grzejnych.

Nie bez znaczenia jest też rozmieszczenia elementów grzejnych w różnych systemach ogrzewania (rys. 1). Analizując ich rozmieszczenie w szklarni w aspekcie energetycznym stwierdzono, że im niżej i równomierniej są rozłożone rury grzewcze w szklani tym niższy jest ogólny współczynnik przenikania ciepła, który decyduje o wielkości strat ciepła (różnice sięgają nawet 40%).

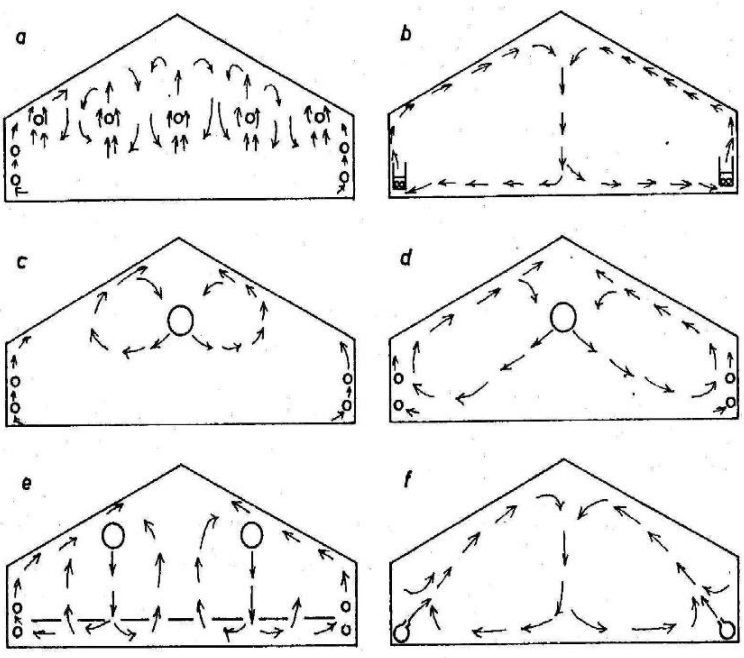
Biorąc pod uwagę recyrkulację powietrza (rys. 2) w aspekcie rozmieszczenia elementów grzejnych stwierdzono brak precyzyjnych wytycznych w tym obszarze, zarówno pod względem samych elementów konstrukcyjnych jak i algorytmów sterowania systemami grzewczymi, co wynika najprawdopodobniej z braku przeprowadzonych w tym zakresie doświadczeń. Wyżej wymieniony problem dotyczący wymiany ciepła odnosi się zarówno do badań teoretycznych jak i doświadczalnych, jest to zagadnienie bardzo złożone i dotychczas jednoznacznie nie określone.

20:6123115505



Rysunek 1. Schematy różnych systemów ogrzewania:
a – ogrzewanie rurowe górne i boczne, b - ogrzewanie rurowe pod stołowe, c – ogrzewanie rurowe dolne, d – ogrzewanie przygruntowe (wegetacyjne), e – ogrzewanie konwekcyjne, f - ogrzewanie powietrzne sufitowe, g – ogrzewanie powietrzne za pomocą rękawa z folii umieszczonego na powierzchni gruntu, h – ogrzewanie powietrzne za pomocą rękawa z folii umieszczonego pod dachem.

Źródło: Zabeltitz 1991



Rysunek 2. Ruch powietrza w różnych systemach grzewczych:
a – ogrzewanie rurowe, b- konwektory, c- nagrzewani powietrza z rękawa z folii – przepływ wymuszony za pomocą wentylatora, d - nagrzewnica powietrza z rękawem z folii – wentylator o dużym spiętrzeniu, e - nagrzewnica z rękawem z folii – nadmuch do szklarni ku dołowi, f - strumieniowe ogrzewanie powietrza

Źródło: Zabeltitz 1991

21:4606652689

Ocena systemów grzewczych w szklarni była przedmiotem badań wielu autorów (Cichoń 1979, Ghosal i in. 2004, Kurpaska 1996, Kurpaska 2003, Rutkowski 2005, Rutkowski 2006, Pabis 2019), co prowadziło do nowych rozwiązań w zakresie ogrzewania obiektów, zmian konstrukcyjnych i optymalizacji warunków mikroklimatycznych w obiektach pod osłonami. Złożoność zagadnienia wynika z współzależności czynników pogodowych, technicznych i biologicznych. Istotną rolę odgrywa naturalna konwekcja powietrza i innych gazów otaczających rośliny, szczególnie w obiektach zamkniętych. Konwekcja naturalna jest podstawowym mechanizmem transportu ciepła wpływającym na rozkład temperatur, a także na strukturę stężeń gazów w tym pary wodnej i dwutlenku węgla, co bezpośrednio wpływa na rozwój roślin i plonowanie. Obwody grzewcze powinny mieć niezależną regulację temperatury jak też posiadać możliwie **niską pojemność zładu grzewczego i szerokie pasmo wydajności.** Nowoczesny obiekt szklarniowy powinien mieć elastyczną wydajność systemów grzewczych, dlatego stosuje się zbiorniki buforowe będące magazynem ciepła, które wykorzystuje się w okresach szybko zmieniających się warunków atmosferycznych. Takie rozwiązanie pozwala zminimalizować nakłady energetyczne wynikające z dużego chwilowego zapotrzebowania na ciepło i tym samym ograniczyć konieczności znacznego przewymiarowania zładu grzewczego, który przy zastosowaniu zbiornika buforowego może być znacznie mniejszy i charakteryzuje się wysoką sprawnością.

2.3.2. Elementy grzejne nowej generacji i ich rozmieszczenie

W ostatnim czasie w ofercie rynkowej pojawiły się elementy grzejne, których przekrój poprzeczny ma kształt gwiazdy. Rozwiązanie to zostało opatentowane i zastosowane w przedsiębiorstwie produkcji szklarniowej pomidorów przez pomysłodawcę rur grzejnych o takim kształcie - Andrzeja Walczaka. Przeprowadzona weryfikacja tego rozwiązania oraz analiza wielokryterialna potwierdziła dużą sprawność przedmiotowych rur (Rutkowski i in. 2014, Knaga i in. 2019).

Geometria rury (rys. 3) powoduje, że objętość cieczy grzewczej może być dwu lub trzykrotnie mniejsza niż gdyby zastosowano rury o przekroju okrągłym, przy czym powierzchnia osłony zostaje bez zmian. Rury grzewcze mogą być wykonane ze stali lub tworzywa sztucznego.

22:6868355988

Rysunek 3. Geometria rur Walczaka

Dane techniczne przewodów grzewczych w kształcie gwiazdy (tab. 1) wyznaczono na podstawie obliczeniowych wartości zastępczych rur wykonanych z polipropylenu o przekroju okrągłym, i wykazano, że rury te charakteryzuje:

1. Bardzo duża obliczeniowa powierzchnia grzewcza jednego metra bieżącego przewodu 1450cm^2·mb^{-1}. Porównując ten parametr do rury o przekroju okrągłym o takiej pojemności wodnej (868cm^2·mb^{-1}) powierzchnia przedmiotowego przewodu jest większa o 70 %.
2. Ponad dwukrotnie (2,1) mniejsza pojemność wodna w odniesieniu do obliczeniowej rury okrągłej, o identycznej powierzchni grzewczej.
3. Obliczeniowa jednostkowa wydajność cieplna przy zasilaniu 30℃ wynosi 28,2W·mb^1, natomiast przy zasilaniu 60 ℃ - 54,5 W·mb^{-1}.
4. Dwukrotnie mniejsza masa napełnionego przewodu grzejnego. Przewody grzejne wykonane z polipropylenu oraz polietylenu posiadają mniejszą jednostkową masę oraz są dwukrotnie tańsze.

Tabela 1. Parametry geometryczne rury PP-R

Opis wielkości geometrycznej	**Wartości**
Średnica zewnętrzna mierzona po obrysie gwiazdki.	40,2 ±0,1 mm
Minimalna średnica mierzona po zewnętrznej stronie gwiazdki	27,7 ±0,1mm
Grubość ścianki przewodu grzejnego	3,25 ±0,1 mm
Jednostkowa masa własna przewodu grzewczego.	410 g·mb^{-1}
Jednostkowa objętość materiału przewodu grzewczego	455 cm^3·mb^{-1}
Jednostkowa pojemność wodna przewodu grzewczego	0,490 dm^3·mb^{-1}
Jednostkowa masa przewodu grzewczego z wodą o tem. 45^{O}C	906 g·mb^{-1}
Jednostkowa powierzchnia zewnętrzna przewodu grzewczego (gwiazdki)	1450 cm^2·mb^{-1}

Źródło: Rutkowski 2014, Knaga i in. 2019

Ponadto kształt rury Walczaka powoduje duże zróżnicowanie prędkości cieczy grzewczej w przekroju elementu grzejnego, co przekłada się na zróżnicowanie temperatury w obwodzie rury, a co za tym idzie większy udział ciepła przekazywanego drogą promieniowania. Taka forma przekazywania ciepła znacząco wpływa na efektywność

23:1019339349

produkcji oraz ogranicza zapotrzebowanie środków ochrony roślin. Kolejną zaletą rur Walczaka jest specyficzny ruch powietrza wokół rury grzewczej wynikający z rozkładu temperatur powierzchni grzejnej. Efekt ten ogranicza kondensacje pary wodnej na częściach rośliny, a tym samym poprawia proces asymilacji oraz znacznie ogranicza występowanie chorób grzybowych. Po analizie działania zmodyfikowanych systemów grzewczych (zmodyfikowanie poprzez zamianę rur tradycyjnych na rury Walczaka) stwierdzono znacznie lepsze efekty produkcyjne. Działania te mają charakter wielokierunkowy i dotyczyły: efektywności produkcji, jakości produktu, oszczędności w zużyciu energii oraz oszczędności w zużyciu środków ochrony roślin. Kilkukrotnie mniejsza objętość czynnika grzewczego w przedmiotowych rurach pozwala na zmniejszenie całkowitej objętości zładu i szybką zmianę wydajności grzewczej rur oraz dopasowanie temperatury do zmiennych warunków zewnętrznych, co eliminuje w dużej mierze efekt przegrzewania szklarni. Zastosowanie rur o przekroju gwiazdy w systemach grzewczych obiektów, które wymagają zróżnicowanej wydajności pozwala na efektywne zastosowanie predykcyjnej metody sterowania warunkami panującymi w szklarni. Rury Walczaka wykonane z tworzyw sztucznych (polipropylenu oraz polietylenu) pozwalają na ich stosowanie do ogrzewania wegetacyjnego, gdzie stosuje się niższe temperatury, roślina ma bezpośredni kontakt z elementami grzejnymi. Zaletą rur z tworzyw sztucznych jest brak występowania na nich korozji oraz mniejszy koszt ich instalacji, wadą natomiast jest fakt, że w czasie montażu potrzebna jest większa ilość zawieszek w strefie wegetacji roślin niż w przypadku zastosowania rur stalowych. Bez względu jednak na zastosowaną technologię systemy ogrzewania powinny spełniać następujące wymagania:

- zapewniać w razie konieczności równomierny rozkład temperatur, a w obszarze wegetacji roślin asymetryczny jej rozkład,
- posiadać dobre właściwości regulacyjne; optymalna temperatura powinna być utrzymywana nawet przy szybko zmieniających się warunkach zewnętrznych,
- zapewniać możliwie małe zużycie ciepła.

Z racji tego, że w pewnym zakresie jest możliwe celowe kształtowanie przebiegu konwekcji naturalnej, można ograniczać konwekcję wymuszoną systemem wentylatorów. Można na przykład odpowiednio rozmieścić stałe elementy grzewcze, a dodatkowo stosować elementy ruchome. Inną możliwością jest optymalizowanie stref aktywnego zasilania CO_2 dla wykorzystania transportu konwekcyjnego. Wykorzystanie właściwości konwekcji naturalnej jest jednym z kierunków poszukiwań obniżki kosztów produkcji pod osłonami.

24:1081942860

3. Cel i zakres pracy

3.1. Cel pracy

Celem pracy było określenie relacji między temperaturą czynnika grzewczego w elementach systemu ogrzewania szklarni, a rozkładem temperatury i ruchu powietrza w przekroju poprzecznym szklarni.

3.2. Hipotezy badawcze

I. Istnieje możliwość sterowania ruchem powietrza wewnątrz szklarni odpowiednią kombinacją temperatur w systemach grzejnych, powodując optymalizację dostępności dwutlenku węgla do roślin.
II. Wymuszony ruch powietrza odpowiednią kombinacją działania systemu grzejnego pozwala na asymetryczny rozkład temperatury w przekroju poprzecznym szklarni.

3.3. Zakres pracy

Zakres pracy obejmował badania przeprowadzone w dwóch obiektach szklarniowych, gdzie jeden pełnił rolę laboratorium (w nim przeprowadzono badania szczegółowe) a drugi był szklarniowym obiektem rzeczywistym (w którym odbywała się towarowa produkcja warzyw), służył do weryfikacji zidentyfikowanych charakterystyk. Należy zaznaczyć, że systemy grzejne obydwu szklarni były zbliżone zarówno pod względem usytuowania elementów grzejnych, jak też możliwości sterowania temperaturą czynnika grzejnego w każdym z nich.

Pierwszy etap eksperymentu przeprowadzono w modelowym obiekcie szklarniowym, gdzie wykonano szczegółowe pomiary temperatury i ruchu powietrza w różnej konfiguracji nastaw temperatury czynnika grzewczego i struktury wykorzystania elementów systemu grzewczego szklarni. Pomiar ruchu i temperatury powietrza wykonano w siatce punktów w układzie poprzecznym szklarni. Badania prowadzono w 24 godzinnych interwałach czasowych przez 14 kolejnych dni, co pozwoliło poprawnie wyekstrahować warunki brzegowe istotnych dla eksperymentu parametrów eksploatacyjnych szklarni. W cyklu pomiarowym uwzględniono długość dnia i nocy.

25:1393615408

Drugi etap badań tzw. eksploatacyjnych przeprowadzono w rzeczywistym obiekcie szklarniowym w czasie cyklu produkcyjnego pomidora. Należy zaznaczyć, że warunki mikroklimatyczne na zewnętrz obiektu szklarniowego były zbliżone do warunków zewnętrznych obiektu modelowego, w których przeprowadzano badania szczegółowe. System grzewczy zastosowany w szklarni pozwalał na bezpośrednią implementację struktury nastaw temperatury czynnika grzewczego w elementach systemu grzewczego. W przedmiotowym obiekcie dokonano walidacji kombinacji nastaw systemu grzejnego szklarni w czasie trwania cyklu produkcyjnego. Walidacja ta pozwoliła na uzyskanie modelowego rozkładu temperatury i ruchu powietrza w układzie poprzecznym szklarni.

26:1950875956

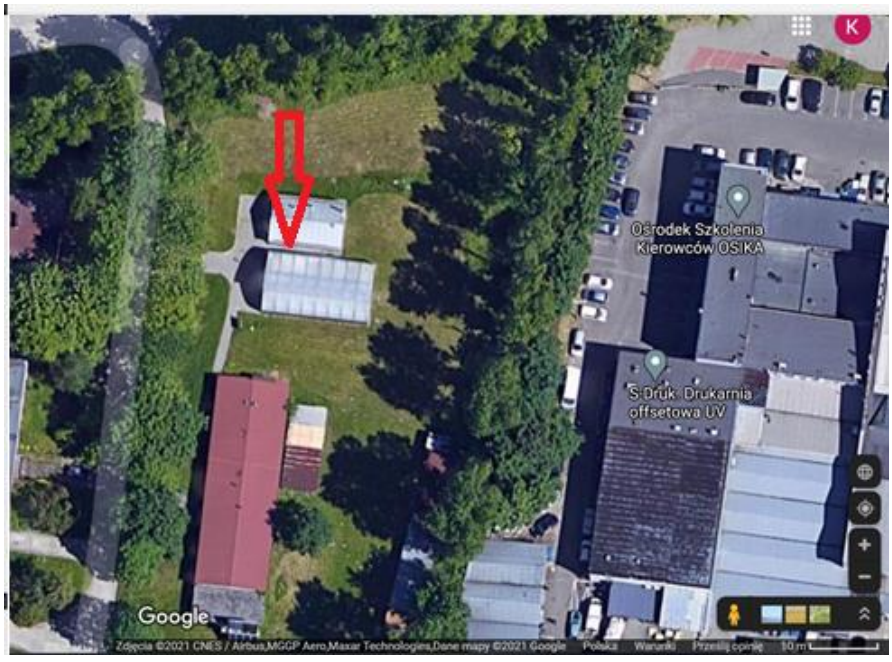
4. Przedmiot badań

4.1. Wybór obiektu badań

Wybór lokalizacji obiektów szklarniowych był podyktowany wymaganiami metodycznymi związanymi ze strukturą badań, w której jeden obiekt szklarniowy pełnił rolę laboratorium i stanowił obiekt badawczy, natomiast drugi obiekt szklarniowy będący obiektem rzeczywistym pełnił rolę walidacyjną w stosunku do wygenerowanych charakterystyk w obiekcie badawczym. Usytuowanie obydwu obiektów w przestrzeni było takie same, czyli w kierunku wschód-zachód, co pozwalało wyeliminować czynnik usytuowania obiektu w dalszej analizie.

4.2. Obiekt szklarniowy badawczy (Kraków U.R.)

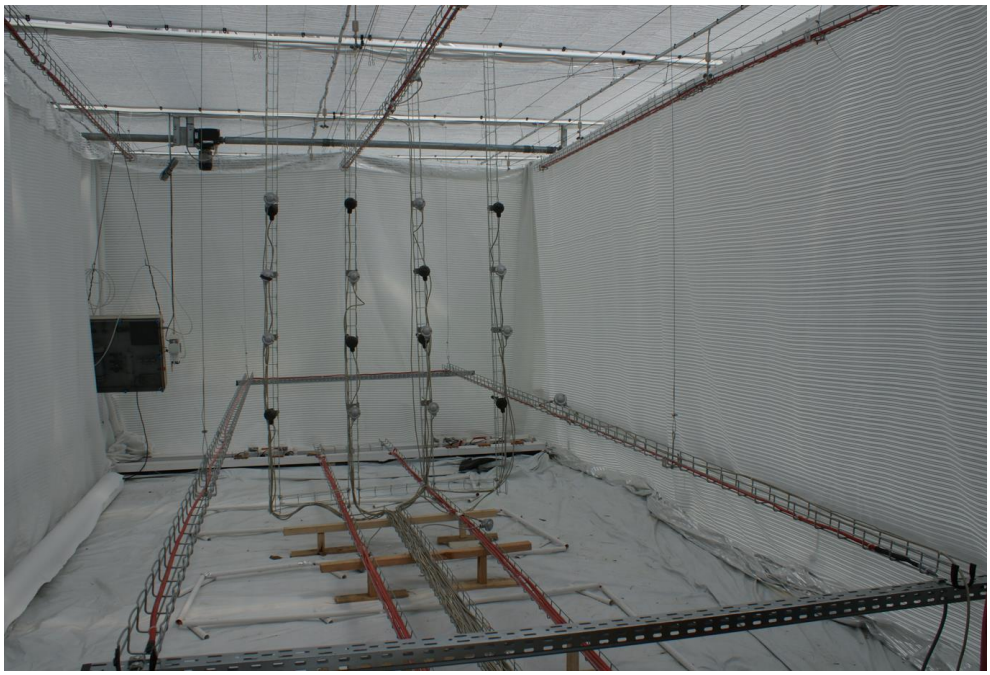
Objęty badaniami obiekt szklarniowy (badawczy) znajduje się na terenie Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie przy ulicy Balickiej. Jego usytuowanie przedstawiono na rzucie satelitarnym (rys. 4). Obiekt ten charakteryzuje się parametrami zbliżonymi do obiektu rzeczywistego.



Rysunek 4. Widok obiektu badawczego UR Kraków

27:9177316314

W obiekcie badawczym na potrzeby badań został zainstalowany system grzewczy identyczny jak w obiekcie rzeczywistym. Ilość obiegów grzewczych i ich usytuowanie (rys. 5) zostało odwzorowane tak aby odzwierciedlało warunki panujące w szklarni produkcyjnej.



Rysunek 5. Widok systemu grzewczego i siatki pomiarowej w obiekcie badawczym URK

Do symulowania obiegów grzewczych wykorzystano elektryczne przewody grzejne, których sterowanie realizowane było poprzez zaprojektowany w tym celu system grzewczy. Do komunikacji, parametryzacji i archiwizacji danych służyła dedykowana stacja robocza. W celu eliminacji wpływu warunków zewnętrznych wewnątrz obiektu wyodrębniono obszar, który odseparowano od reszty pomieszczenia przez zastosowanie specjalnych kurtyn. Wielkość wydzielonej kubatury pomieszczenia była identyczna jak kubatura nawy w obiekcie walidacyjnym. Wewnątrz zainstalowano kratę pomiarową z zamontowanymi czujnikami temperatur i ruchu powietrza. W obiekcie tym występują trzy obiegi grzewcze, przygruntowy, pod rynnowy oraz górny.

28:7267353565

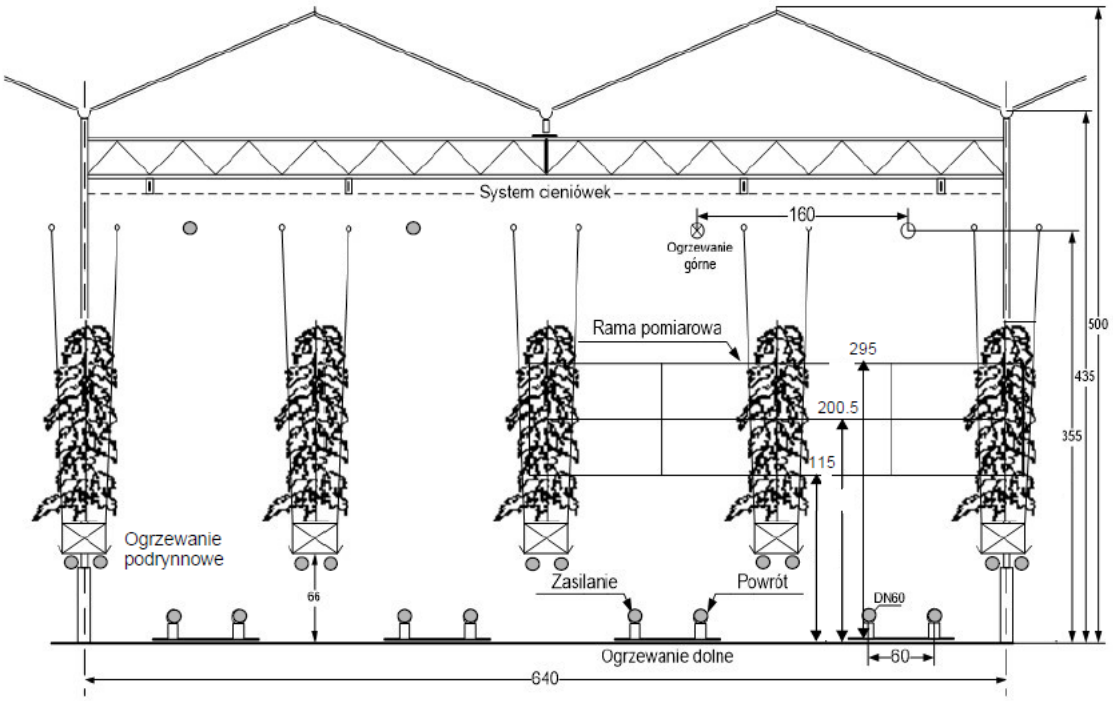
4.3. Obiekt szklarniowy rzeczywisty

Badania walidacyjne zostały przeprowadzone w nowoczesnym obiekcie szklarniowym typu Venlo oddanym do eksploatacji w 2007 roku o powierzchni 4600m^2. Obiekt ten stanowi integralną część gospodarstwa produkcyjnego o łącznej powierzchni 2,5ha i usytuowany jest w miejscowości Filipowice. Lokalizacje i orientacje obiektu przedstawiono na rysunku (rys. 6). Jego orientacja przestrzenna jest taka sama jak obiektu badawczego.

Rysunek 6. Obiekt szklarniowy rzeczywisty

Konstrukcja szklarni wykonana jest z ocynkowanych elementów stalowych łączonych specjalnym systemem uszczelnień. Osłony boczne szklarni wykonane są z podwójnego szkła ułożonego na profilach aluminiowych, za pomocą uszczelnień gumowych, natomiast dach szklarni wykonany jest ze szkła pojedynczego. Całość konstrukcji zapewnia małą przenikalność cieplną obiektu. Długość szklarni wynosi 80m, szerokość szklarni 57,5m, wysokość szklarni do szczytu 5m, wysokość do okapu 4,35m, a szerokość nawy 6,4m. Schemat przekroju poprzecznego jednej z wielu naw szklarni przedstawiono na rysunku (rys. 7).

29:3092189860



Rysunek 7. Schemat przekroju poprzecznego jednej z naw w obikcie rzeczywistym

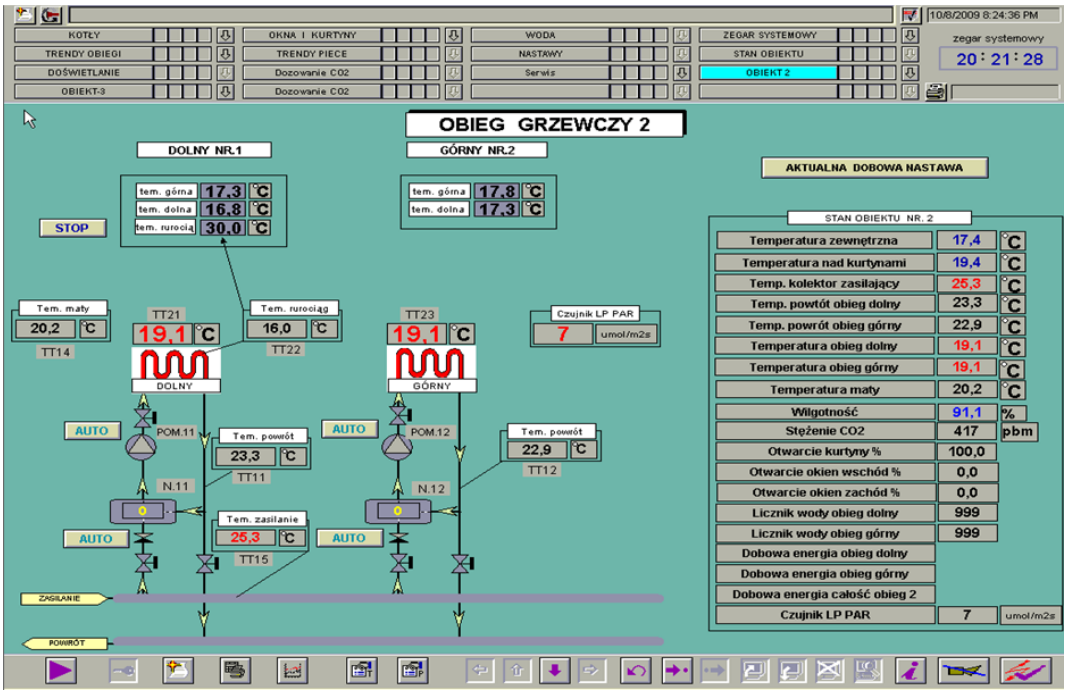
W badanym obiekcie znajdują się trzy systemy grzewcze tj.: przygruntowy, pod rynnowy oraz górny. System ogrzewania jest zbieżny z obiektem badawczym URK. Szklarnia jest wyposażona w system czujników umożliwiający pomiar: temperatury, wilgotności, zawartości CO_2 i solaryzacji. System sterowania pozwala na automatyczne sterowanie mikroklimatem. Sterowanie odbywa się poprzez regulację temperatury czynnika grzewczego w systemach grzewczych, oraz poprzez ilość dozowanego dwutlenku węgla. Ciepła woda do systemu grzewczego dostarczana jest poprzez system kotłów. W obiekcie znajdują się trzy kotły pracujące niezależnie (równolegle) uruchamiane w zależności od zapotrzebowania szklarni na ciepło. Kotły produkują ciepłą wodę utrzymując zadaną temperaturę w głównym zasobniku wody. Wysokość temperatury w zasobniku jest uzależniona od temperatury zewnętrznej z uwzględnieniem warunków pogodowych (solaryzacja, wiatr). Zadaniem bufora jest zapewnienie odpowiedniej ilości energii przy chwilowym dużym zapotrzebowaniu szklarni na ciepło. Drugą ważną funkcją bufora jest zapewnienie stabilnej ciągłej pracy kotłów np.: przyjęcie nadmiaru energii podczas procesu wyłączenia kotła i jej magazynowania.

4.4. Obiegi grzewcze systemu ogrzewania

W obiekcie tym wykorzystano układy zaworów mieszających, współpracujących z pompami obiegowymi. Na rysunku 8 zwizualizowano system z dwoma obiegami

30:6628511691

grzewczymi. Zadaniem zaworu mieszającego jest zapewnienie odpowiedniej temperatury wody w obiegu grzewczym. W zależności od zapotrzebowania zawór odpowiednio zmienia swój stan zmniejszając lub zwiększając ilość dostarczanej ciepłej wody do układu grzewczego. Zadaniem pompy obiegowej jest równomierna dystrybucja ciepła w obiegu grzewczym.



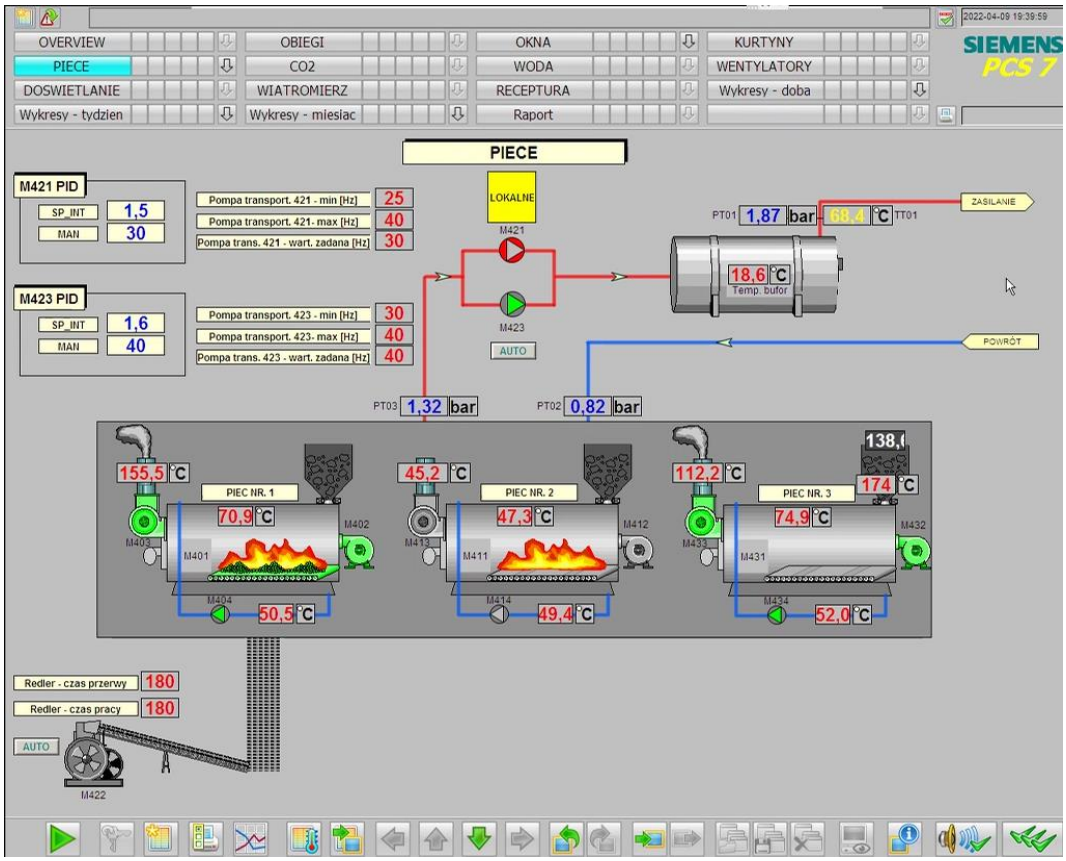
Rysunek 8. Przykładowa maska technologiczna z systemem sterowania ogrzewaniem

Układ grzewczy sterowany jest temperaturą powietrza w szklarni. W przypadku przygruntowego obiegu grzewczego czujnik umieszczony jest na wysokości 0,5m od podłoża, natomiast w przypadku górnego obiegu grzewczego czujnik umieszczony jest na wysokości 4m od podłoża. Czujnik dla obiegu pod rynnowego znajduje się nad rynną z roślinami. Całością systemu grzewczego steruje sterownik PLC S7 300 firmy Siemens. Zaprogramowane w sterowniku algorytmy uwzględniają temperaturę na zewnątrz szklarni, temperaturę wewnątrz szklarni, temperaturę wody w buforze, temperaturę zasilania obiegów grzewczych, temperaturę na powrocie obiegu grzewczego, stan kurtyn i wywietrzników oraz bezwładność cieplną szklarni. System sterowania umożliwia tworzenie „receptur" dla danej uprawy. Tworzenie receptur jest możliwe z poziomu użytkownika, które są łatwo edytowalne i zapisywane w bazie danych. W recepturach istnieje możliwość kształtowania temperatury w obiekcie w dwugodzinnych przedziałach czasowych co jest często wykorzystywane do nocnego obniżenia temperatury w szklarni.

31:4803346302

4.5. Kotłownia

Kotłownia w badanym obiekcie zapewnia ciepło dla trzech obiektów szklarniowych gospodarstwa ogrodniczego. Kotłownia składa się z trzech kotłów opalanych miałem węglowym, z których jeden ma możliwość pracy na paliwie gazowym. Kotłownia w obiekcie wraz z upływem czasu przeszła kilka modernizacji od pojedynczego kotła sterowanego ręcznie (pracującego z jednym obiektem szklarniowym), do obecnego układu systemu kotłów (rys. 9). Trzy kotły o mocy 1MW każdy jest wyposażony w układy falownikowe do płynnej regulacji wydajności wraz z automatycznym podajnikiem miału, tworząc w pełni zautomatyzowany system produkcji ciepła. System ten wraz z buforem zapewnia ciepło dla nowo powstałych obiektów szklarniowych w gospodarstwie.



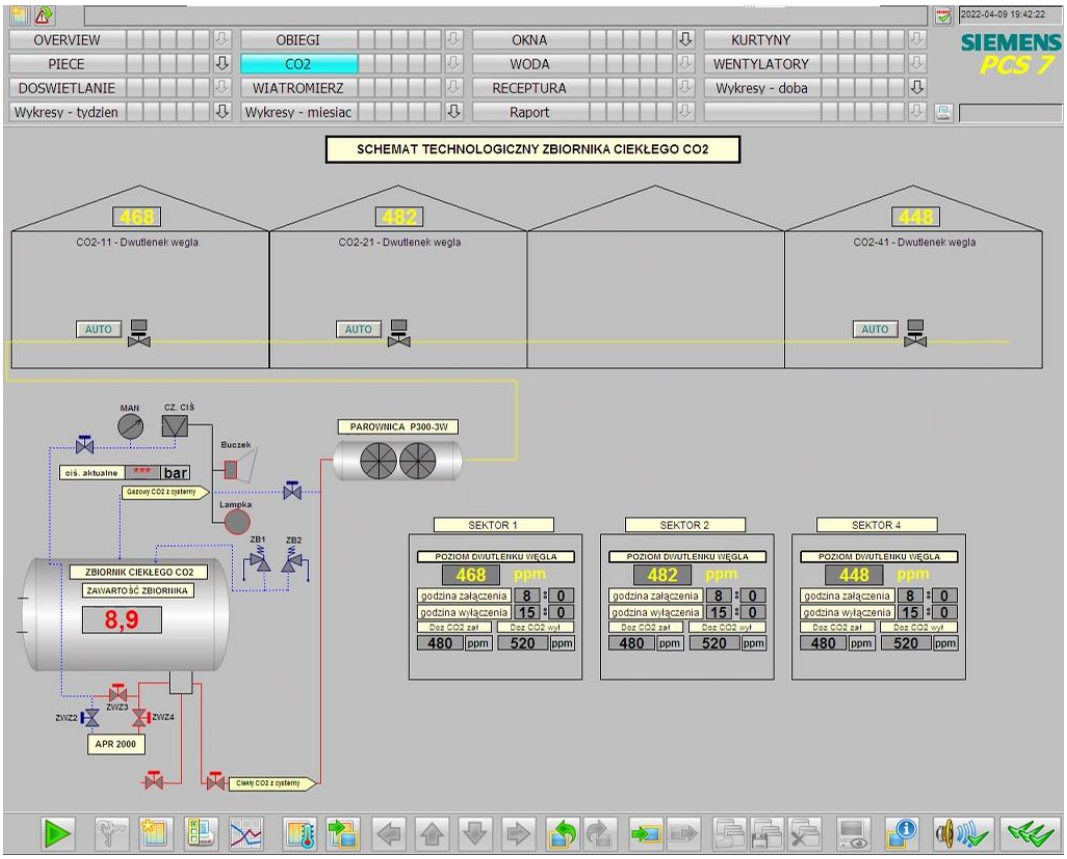
Rysunek 9. Maska technologiczna - kotłownia

4.6. System dozowania dwutlenku węgla

W badanym obiekcie funkcjonuje automatyczny system dokarmiania roślin dwutlenkiem węgla. Układ dozowania zbudowany jest ze zbiornika z ciekłym CO_2 (rys. 10). Do pomiaru ilości CO_2 w zbiorniku wykorzystywany jest przetwornik różnicy ciśnień. Na podstawie jego wskazań z uwzględnieniem geometrii zbiornika wyliczana jest zawartość

32:2744707201

CO_2 w kilogramach. Ciekły dwutlenek węgla dostarczany jest do układu parownic, gdzie po podgrzaniu otrzymywany jest gaz. Po zredukowaniu ciśnienia dwutlenek węgla jest dostarczany do instalacji dozującej. Instalacja dozująca wykonana jest z specjalnych przewodów rozmieszczonych w przestrzeni szklarni pomiędzy roślinami.



Rysunek 10. Maska technologiczna systemu dokramiania roślin dwutlenkiem węgla

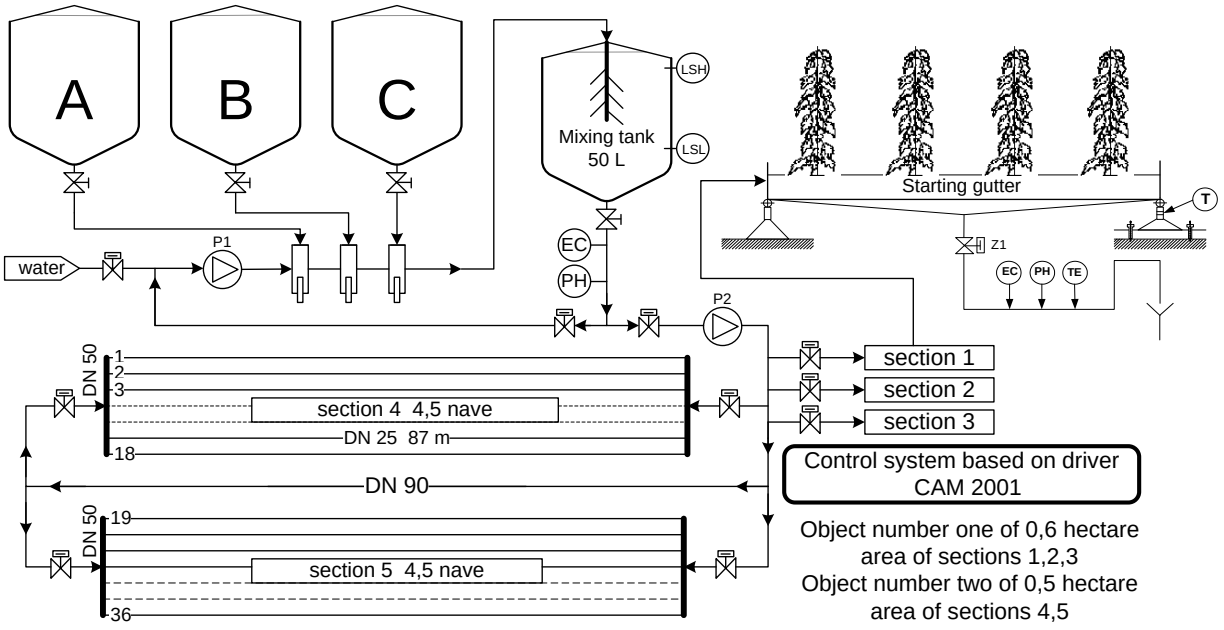
Dozowanie dwutlenku węgla odbywa się poprzez otwarcie elektrozaworów dozujących w poszczególnych sekcjach szklarni. Elektrozawory sterowane są z komputerowego systemu sterowania, w zależności od zadanego stężenia w poszczególnych sekcjach. Do pomiaru stężenia dwutlenku węgla wykorzystywane są czujniki typu EE820 o zakresie pomiarowym 0-2000ppm, co odpowiada sygnałowi elektrycznemu 4-20mA. Czujniki działają na zasadzie NDIR, czyli niedyspersyjnej absorpcji podczerwieni. W czujniku znajduje się nadajnik światła podczerwonego o długości fali 4,3 mikrometra (długość fali dobrana do absorpcji dwutlenku węgla) i odbiornik. Światło przechodzące prze czujnik jest absorbowane przez CO_2 im większe stężenie tym mniej promieniowania dociera do odbiornika.

33:4622610272

4.7. System dokarmiania roślin

System dokarmiania roślin wykorzystuje sterownik mikroprocesorowy wraz z układami wejścia-wyjścia, który realizuje instrukcje i algorytmy generowane w oparciu o mierzone wartości w czasie rzeczywistym. Ilość podawanej pożywki w systemie dokarmiania roślin w szklarniach zależy od stadium rozwojowego rośliny, warunków solarnych oraz ilości dostarczanego dwutlenku węgla. Ustalenie dawki dokonuje się na podstawie rzeczywistego poboru pożywki przez wybraną grupę roślin tworzących matę startową. Ilość podawanej pożywki jest nieco wyższa od zapotrzebowania roślin, jest to standardowe działanie wynikające z budowy systemu dokarmiania.

Udział procentowy tzw. przelewu w przedmiotowej szklarni nie przekracza 10%. System dokarmiania roślin oparty jest o standardowe rozwiązania (rys. 11), w którym wykorzystuje się system automatycznego dozowania środków pokarmowych do pożywki oraz matę startową, a następnie gotowa pożywka wtłaczana jest kolejno do poszczególnych sekcji.

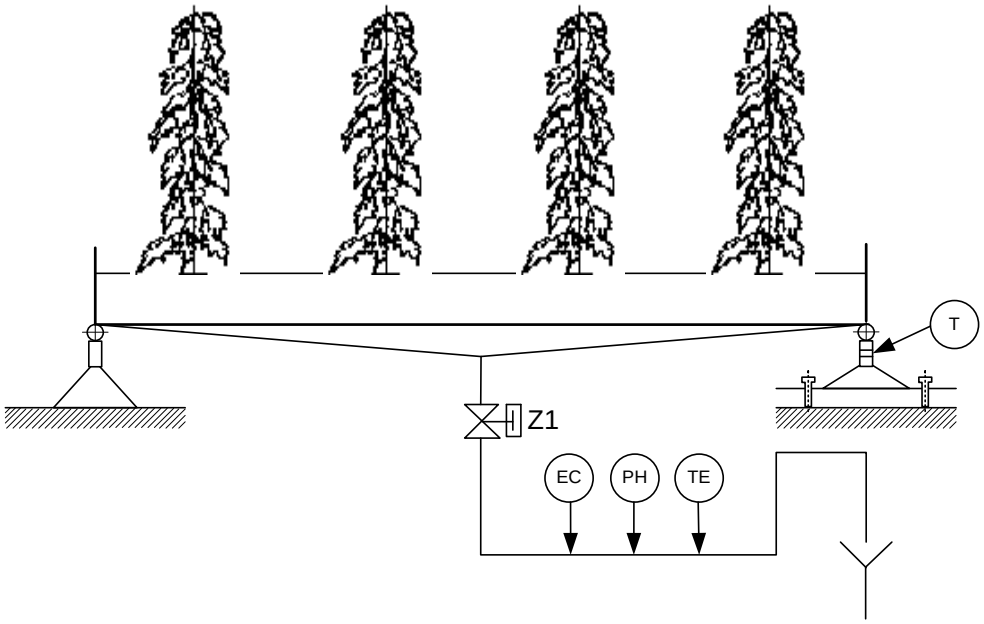


Rysunek 11. Schemat ideowy systemu dokarmiania roslin

Jednym z najważniejszych elementów sytemu dokarmiania roślin jest mata startowa (rys. 12). Zadaniem maty startowej jest określenie ilości dawki pożywki dozowanej przez system dokarmiania roślin na podstawie rzeczywistego wykorzystania pożywki przez rośliny tworzące matę startową. Rzeczywiste wykorzystanie pożywki sygnalizowane jest poprzez tensometryczny układ pomiarowy mierzący masę wykorzystanej pożywki z

34:3294833516

uwzględnieniem parametrów fizykochemicznych maty: **EC**- pomiar przewodności elektrycznej (konduktancji), **PH**- pomiar kwasowości, **TE**- temperatura maty startowej.



Rysunek 12. Schemat ideowy działania maty startowej

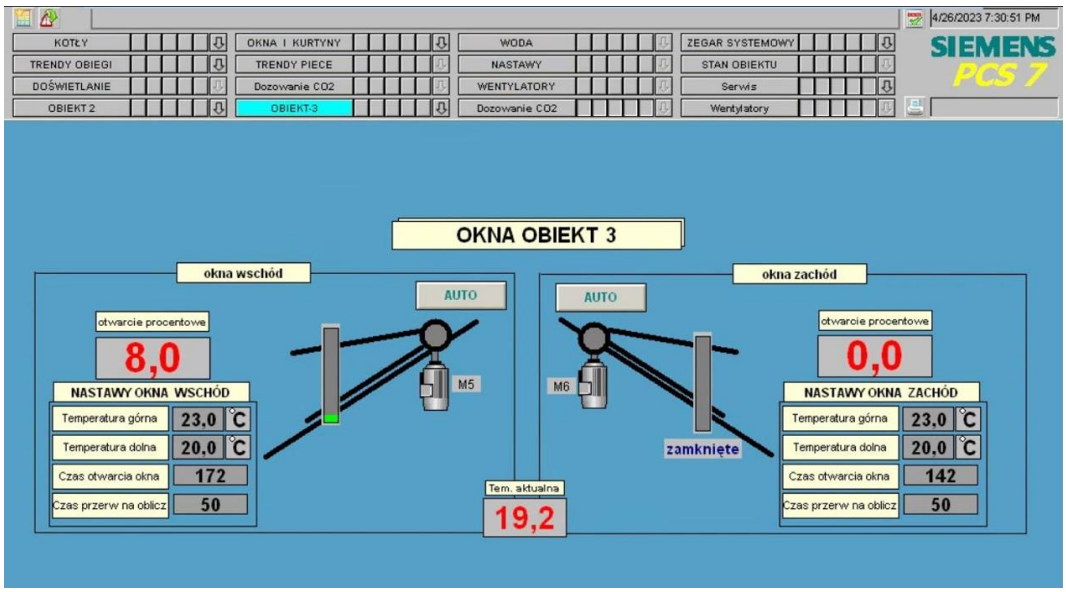
Ilość pożywki dozowanej jest definiowana na podstawie pomiaru masy. Po rozpoczęciu procesu dozowania pożywki system doprowadza do pełnego nasycenia maty pożywką. Odbywa się to za pomocą kilkukrotnego dozowania pożywki (jednorazowa ilość dozowania jest określana w sterowniku np.: 150ml) do chwili uzyskania zadanego przelewu wyrażonego w % definiowanej dawki np.: 20% (czyli dla 150ml 20% przelewu to 30ml). Proces uzyskania pełnego nasycenia maty odbywa się w sposób następujący:

1. System dozuje zadaną dawkę w ml do pojedynczej rośliny np: 150ml.
2. Po dozowaniu dawki otwiera się na określony czas elektrozawór Z1. Jeśli po zamknięciu zaworu Z1 masa maty nie spadnie o wartość przelewu np: 30ml system wróci do kolejnego dozowania aż uzyska spadek masy odpowiadający wartości zdeklarowanego przelewu w %. Kolejne cykle odbywają się po przelaniu wszystkich sekcji podłączonych do systemu dokarmiania. Należy zaznaczyć, że tylko jedna sekcja (wzorcowa) jest podłączona do maty startowej, a kolejne są odwzorowaniem sekcji wzorcowej. Po uzyskaniu pełnego zadanego przelewu system przechodzi do normalnej pracy, czyli masa, przy której jest uzyskany zadany przelew jest przyjęta jako punkt referencyjny pełnego nasycenia maty.
3. Kiedy wartość masy maty startowej spadnie o wartość zadanej jednorazowej dawki do podlewania (ml) system rozpocznie kolejne dozowanie pożywki.

35:1691710134

4.8. System wywietrzników

W obiekcie funkcjonuje system wywietrzników, który ma możliwość sterowania ręcznego lub automatycznego. Jego schemat przedstawiono poniżej (rys. 13) Automatyczny system wywietrzników działa w zależności od zadanej temperatury i wilgotności w zadanym interwale czasowym. Odpowiednia ilość wymiany powietrza w szklarni pozwala utrzymać zadaną wilgotność oraz chronić rośliny przed przegrzaniem.

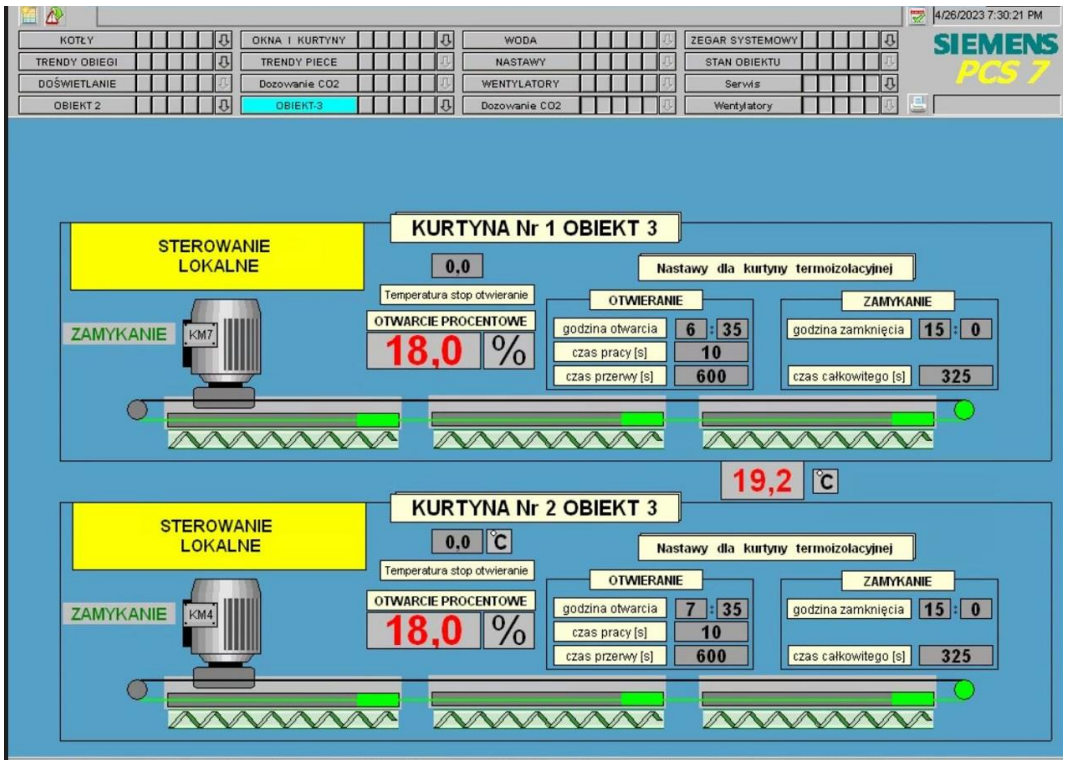


Rysunek 13. Maska technologiczna systemu wywietrzników

4.9. System zasłon cieniująco izolacyjnych

W obiekcie funkcjonuje system zasłon cieniująco termoizolacyjnych, których zadaniem jest izolacja i cieniowanie uprawy. Kurtyny izolują wnętrze szklarni od otoczenia po zachodzie słońca, natomiast w czasie wysokiego nasłonecznienia chronią roślin przed nadmiernym promieniowaniem słonecznym. System ten (rys. 14) jest sterowany automatycznie lub ręcznie. W nastawach można wpisać godzinę otwarcia i zamknięcia jak również ustawić sekwencję otwierania z kontrolą temperatury w szklarni. Oprogramowanie zapobiega zbyt szybkiemu otwarciu zasłon, które może spowodować gwałtowne zmiany temperatury w obiekcie.

36:7444859105

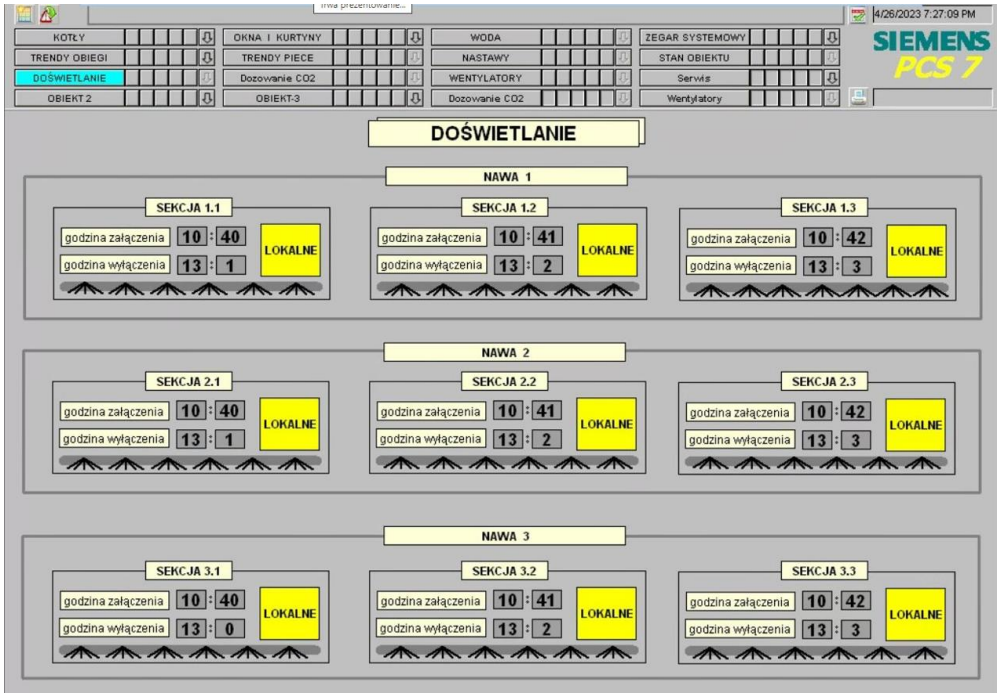


Rysunek 14. System zasłon cieniująco izolacyjnych

4.10. System doświetlania roślin

Obiekt został wyposażony w system doświetlania roślin. System ten służy uzupełnieniu niedoboru światła naturalnego światłem sztucznym w celu stymulowania wzrostu roślin. Wykorzystanie takiego systemu poprawia warunki uprawy oraz zwiększa plon. System ten (rys. 15) jest zintegrowany z układem automatyki i recepturami, co pozwala na dowolne automatyczne sterowanie lampami. W obiekcie tym wykorzystywane są lamy asymilacyjne HID (High Intensity Discharge (wyładowanie o dużej intensywności). Lampy te są lampami o szerokim spektrum światła, dlatego mogą być stosowane we wszystkich rodzajach upraw. Wadą tych lamp jest to, że wytwarzają również światło, które nie jest absorbowane przez rośliny i część energii jest tracona. Dlatego obecnie coraz częściej stosuje się źródła światła LED, których spektrum promieniowana jest światłem asymilacyjnym. Lampy te można dobierać pod konkretną uprawę zwiększając ich efektywność. Lamy LED praktycznie nie emitują ciepła przez co można je zamontować bliżej roślin.

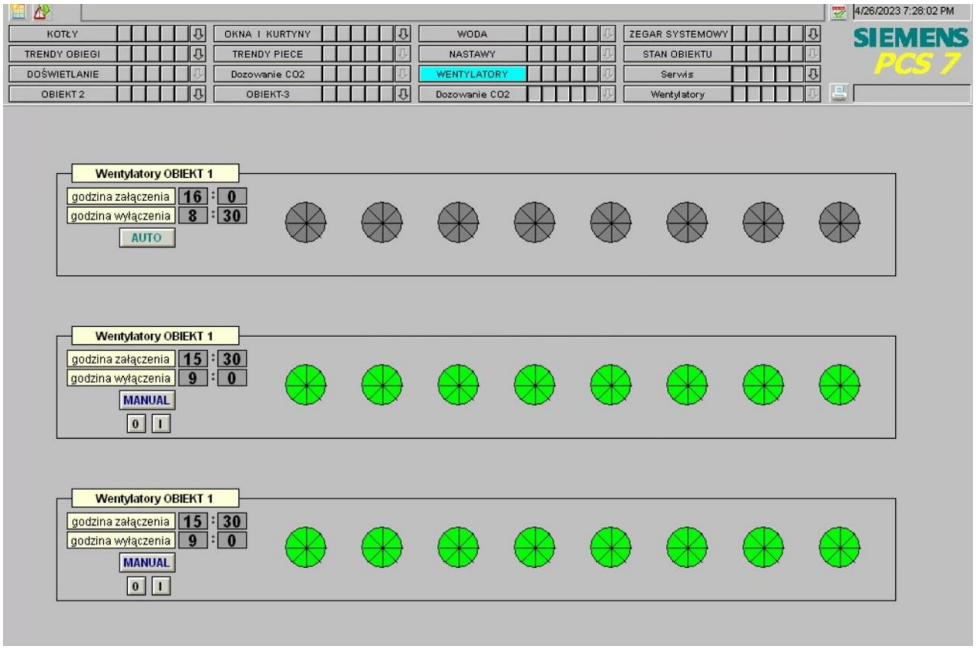
37:7093029022



Rysunek 15. System doświtlania roślin

4.11. System wentylatorów

Obiekt szklarniowy wyposażony jest w system wentylatorów, których zadaniem jest wytworzenie odpowiedniego ruchu powietrza w szklarni. System wentylatorów (rys. 16) pozwala stabilizować warunki cieplne, wilgotność i stężenie dwutlenku węgla w przestrzeni szklarni. Utrzymanie odpowiedniej wilgotności pozwala zmniejszyć ryzyko występowania chorób grzybowych, co powoduje zmniejszenie kosztów zabiegów ochronny roślin.



Rysunek 16. System wentylatorów

38:1214215067

4.12. Dodatkowe wyposażenie szklarni

W rzeczywistym obiekcie szklarniowym do pomiarów wykorzystuje się czujniki temperatury, wilgotności, zawartości CO_2, zewnętrzną stacje meteo z pomiarem kierunku i siły wiatru. Nowatorskim rozwiązaniem jest zastosowania czujnika LP PAR (Photosynthetically Active Radiation) (rys. 17). Czujnik ten mierzy strumień fotonów promieniowania aktywnego fotosyntetycznie w paśmie 400-700nm, ($\mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$). Czujnik zamontowany jest nad kurtynami, a jego wskazania dostarczają informacji o rzeczywistym promieniowaniu oddziałującym na rośliny z uwzględnieniem wpływu rodzaju i stanu pokrycia szklarni.

Rysunek 17. Czujnik promieniowania LP PAR

4.13. Komputerowy system sterująco pomiarowy

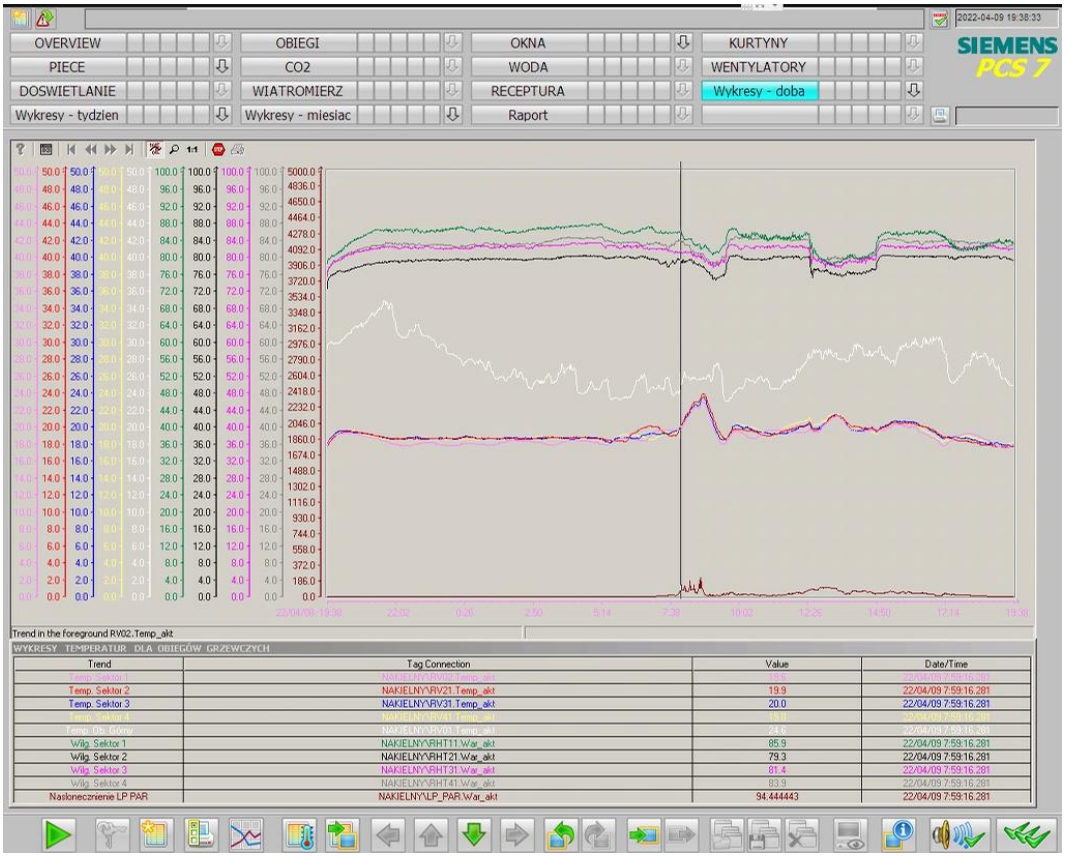
System sterowania i archiwizacji danych został oparty o sterownik PLC (Programmable Logic Controllers) serii S7300 firmy Siemens, który pod kontrolą systemu operacyjnego czasu rzeczywistego realizuje następujące funkcje:

- zbiera wyniki pomiarów za pośrednictwem modułów wejściowych z czujników temperatury i prędkości ruchu powietrza,
- transmituje dane za pomocą łącza komunikacyjnego do systemu wizualizacji i archiwizacji danych,
- realizuje program aplikacyjny na podstawie przyjętych parametrów i uzyskanych danych o przebiegu pomiarów,

39:6431259232

- generuje sygnały sterujące i alarmowe z wynikami obliczeń i poprzez moduły wyjściowe przekazuje je do urządzeń wykonawczych,
- realizuje funkcje diagnostyki programowej i sprzętowej.

Podstawowym zadaniem sterownika jest wykonywanie **autorskiego programu aplikacyjnego** specjalnie napisanego do potrzeb badań realizowanej pracy doktorskiej. Do realizacji archiwizacji danych pomiarowych zastosowano system WinCC wersja 6.0 firmy Siemens. WinCC jest to system SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), jego głównym zadaniem jest nadzór nad procesem zbierania danych, alarmowania, archiwizacji i wizualizacji danych pozyskanych z czujników. Na rysunku 18 przedstawiono charakterystyki danych pomiarowych zebranych z 24 godzinnego interwału czasowego.



Rysunek 18. Przykładowe dobowe zarchiwizowane parametry w szklarni

Win CC jest jednym z systemów IHMI (Integrated Human Machine Interface), który integruje oprogramowanie sterujące urządzeniami z procesem automatyzacji. System WinCC łączy nowoczesną architekturę aplikacji Windows z prostotą graficznego programu projektującego. WinCC udostępnia wszystkie niezbędne składniki służące do rozwiązywania zadań z dziedziny nadzoru, sterowania archiwizacji procesów. Otoczenie projektowe WinCC umożliwia:

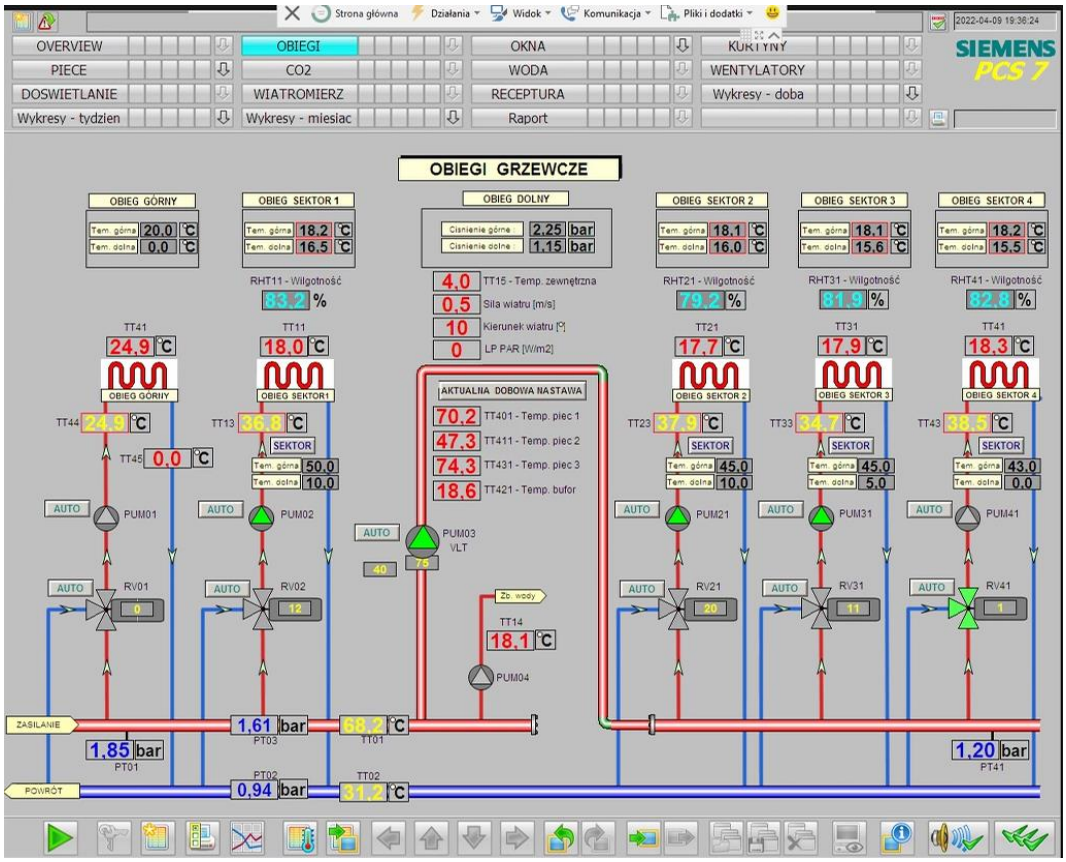
- tworzenie obrazów graficznych,

40:7863114987

- archiwizacje danych i zdarzeń z datą i czasem na bazie danych SQL,
- tworzenie raportów do przygotowania sprawozdań,
- zarządzanie danymi z obiektu,
- interaktywne połączenie człowieka z obiektem.

Interfejs użytkownika jest podzielony na trzy obszary. Dwa przypisane są na stałe to jest górny i dolny oraz obszar środkowy, który jest obszarem prezentującym aktualny stan obiektu (różne maski technologiczne do wyboru).

Wybór poszczególnych masek technologicznych dokonywany jest za pomocą „przycisków" znajdujących się w górnym obszarze ekranu. Dolny pasek zadań jest zbiorem „przycisków" systemowych. Program jest osadzony w systemie Windows i posiada wszystkie jego własności, dlatego obsługa jest intuicyjna. Przykładowa maską technologiczną z badanego obiektu przedstawiono poniżej (rys. 19).



Rysunek 19. Przykładowa maska technologiczna z rzeczywistego obiektu

41:4591513174

5. Metodyka pomiarów

5.1. Siatka pomiarowa

Do wykonania badań pomiarów w obiektach szklarniowych zaprojektowano siatkę pomiarową wyposażoną w czujniki temperatury i czujniki prędkości ruchu powietrza. Siatka pomiarowa (rys. 20) montowana była w obiekcie badawczym w układzie poprzecznym płaszczyzny przecinającej nawę.

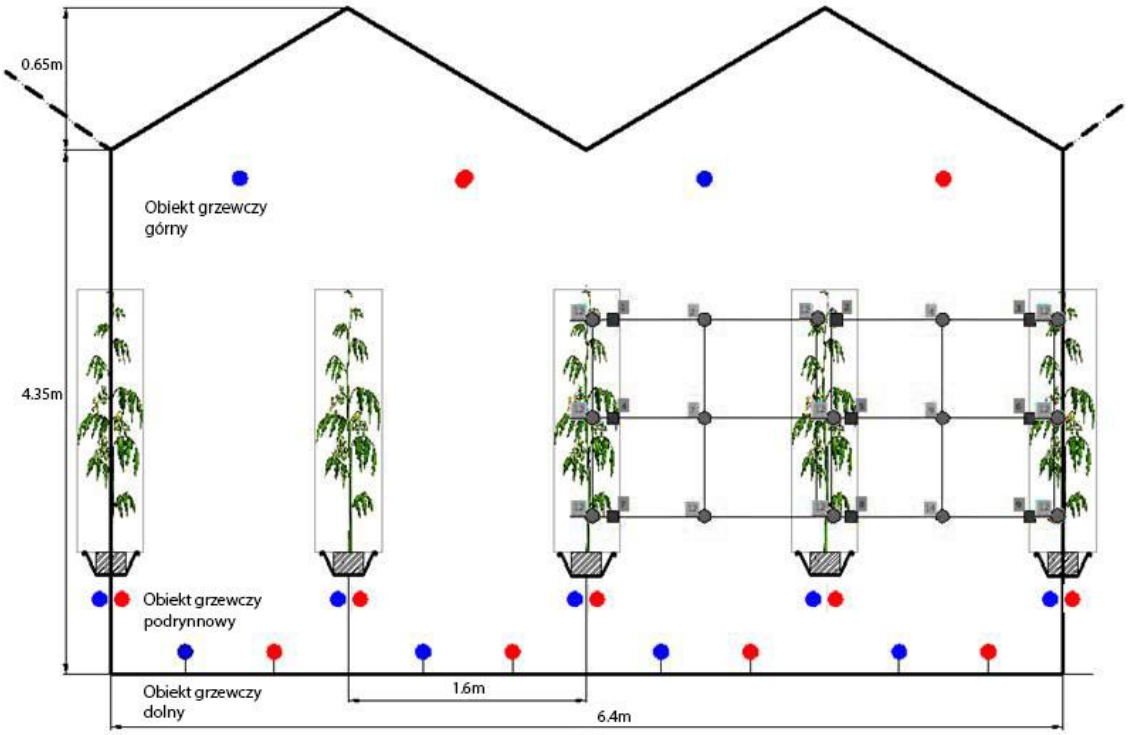
Rysunek 20. Rozmieszczenie elementów pomiarowych w obiekcie doświadczalnym

Usytuowanie siatki pomiarowej w obiekcie rzeczywistym przedstawiono na rysunku (rys. 21). Siatkę pomiarową w obiekcie doświadczalnym stanowiły czujniki rozmieszczone na trzech wysokościach. Pierwszy rząd czujników usytuowano na wysokości 1,15m od podłoża szklarni, drugi rząd czujników na wysokości 1,6m, natomiast trzeci rząd czujników

42:1726996165

usytuowano na wysokości 2,05m. Siatkę pomiarową w obiekcie rzeczywistym stanowiły czujniki rozmieszczone na trzech wysokościach. Pierwszy rząd czujników usytuowano na wysokości 1,15m od podłoża szklarni, drugi rząd czujników na wysokości 2,05m, natomiast trzeci rząd czujników usytuowano na wysokości 2,95m.

Pomiar rozkładu temperatur i prędkości ruchu powietrza realizowano w tym samym interwale czasowym.



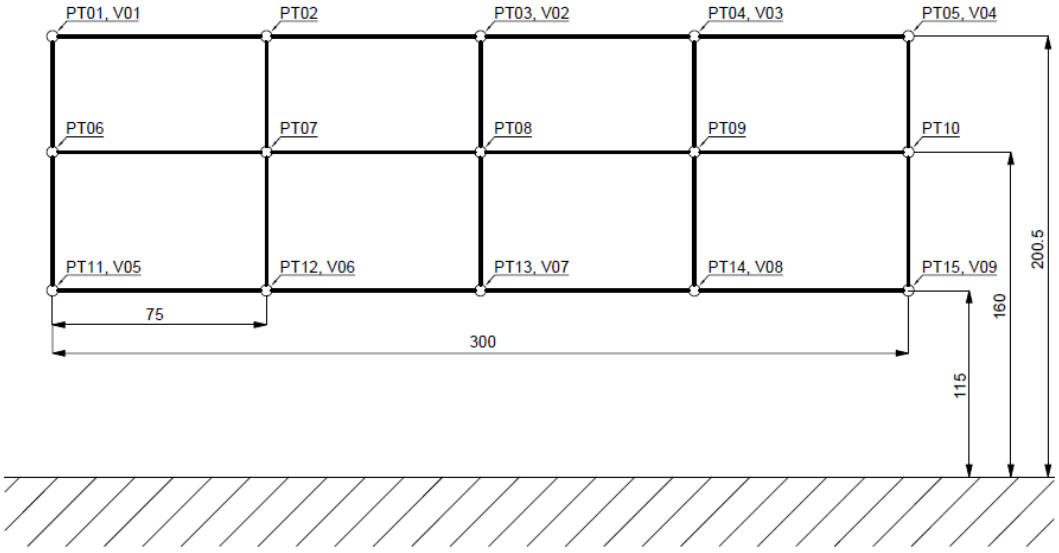
Rysunek 21. Usytuowanie siatki pomiarowej w przekroju nawy

Konstrukcja nośna siatki pomiarowej umożliwiała łatwy montaż czujników, jak również jej relokacje w inne miejsce. Czujniki za pomocą specjalnych przewodów pomiarowych posiadających ekran eliminujący zakłócenia były podłączone do kart wejściowych sytemu archiwizacji danych procesowych.

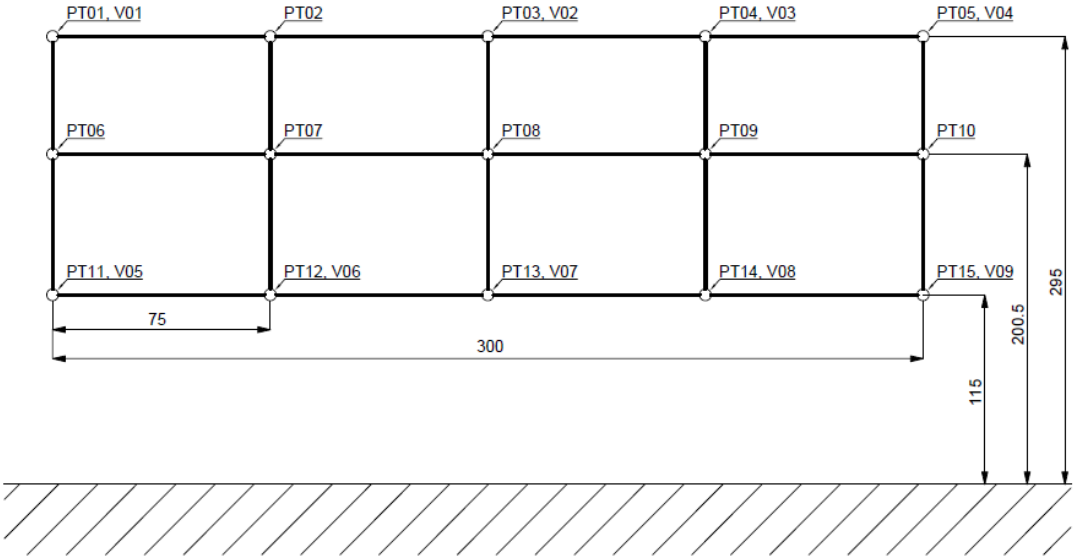
Oznaczenia „PT" na siatce pomiarowej (rys. 22) to pomiar temperatury, oznaczenia „V" to pomiar prędkości ruchu powietrza. System archiwizacji i wizualizacji został zaprojektowany i wykonany na potrzeby realizacji niniejszej pracy doktorskiej. Zarchiwizowane dane z systemu można w łatwy sposób eksportować i transferować do innych formatów liczbowych lub bezpośrednio do ogólnie dostępnych programów statystycznych. Zapis danych jest możliwy z dużą częstotliwością (od 500ms), co pozwala analizować chwilowe zmiany mierzonych wielkości w obiekcie badawczym. Na ekranie komputera zwizualizowano siatkę pomiarową systemu wizualizacji i archiwizacji w celu łatwiejszej interpretacji danych.

43:1781994306

a)



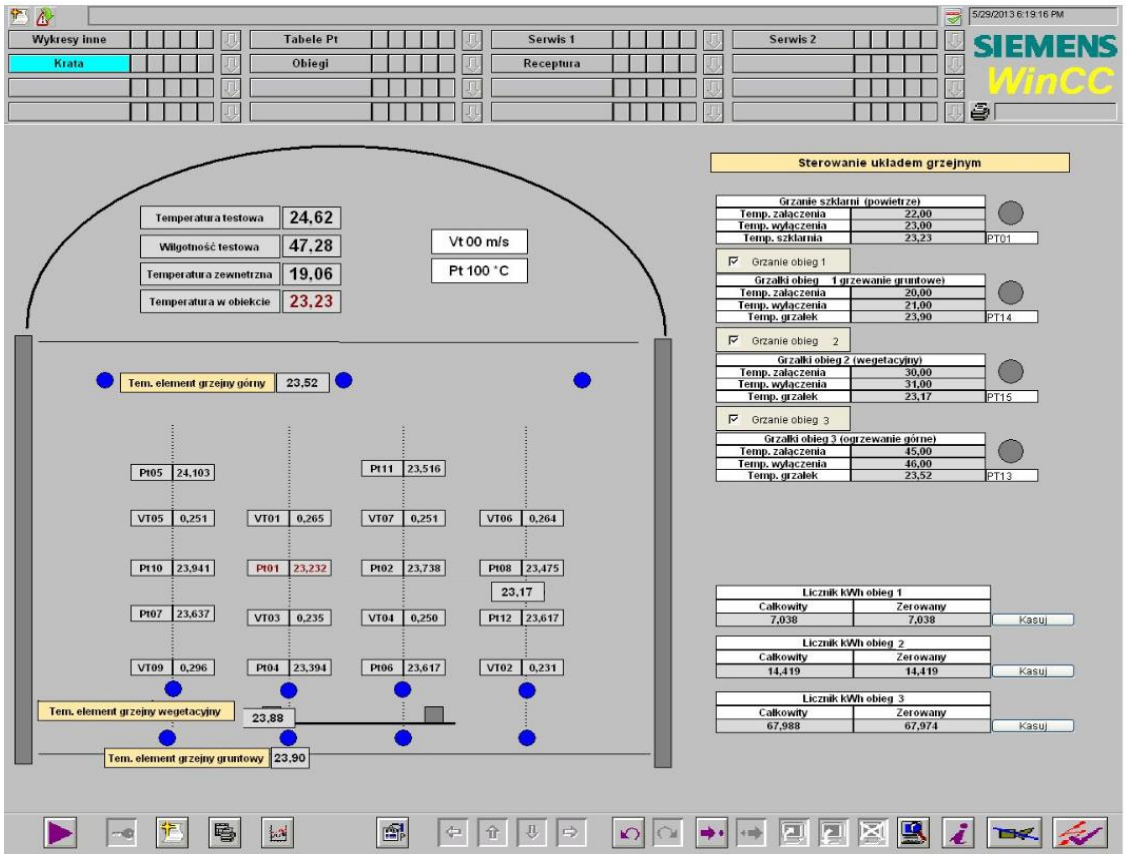
b)



Rysunek 22. Schemat ideowy siatki pomiarowej obiekt: a) doświadczalny, b) rzeczywisty

Na masce technologicznej dodatkowo odwzorowane są inne parametry: temperatura w szklarni, temperatura zewnętrzna, wilgotność, wartości zadane parametrów obwodów grzejnych, liczniki energii (rys. 23).

44:1045782789



Rysunek 23. Maska technologiczna obrazująca wartosci pomiarowe

System wizualizacji i archiwizacji danych oparty był o sterownik Siemensa S7300 i komputer panelowy, wykorzystywany jako system wizualizacji i archiwizacji danych (rys. 24) Zastosowana analogowa karta pomiarowa przetwarza wartości analogowe z dokładnością dwunastobitową, czyli wartość prądu 0-20mA jest reprezentowana przez liczbę od 0 do 32000.

a) *b)*

Rysunek 24. Komputer archiwizacji danych a) obiekt rzeczywisty, b) obiekt badawczy URK

45:8879987580

5.2 Charakterystyka czujnika temperatury

Do pomiaru temperatury zastosowano platynowy czujnik rezystancyjny Pt100 wykonany w klasie A z pełną kompensacją o liniowej charakterystyce firmy Baumer.

Dopuszczalne odchyłki dla platynowych czujników rezystancyjnych (rys. 25) zostały zawarte w polskiej normie PN-EN60751:2009. Norma ta rozróżnia dwie klasy dokładności: A oraz klasę dokładności B. Obecnie podstawową klasą dokładności w jakiej wykonywane są platynowe czujniki temperatury jest klasa B. Klasa dokładności A jest dokładniejsza, ale aby była zachowana czujnik należy podłączyć 3 lub 4 przewodowym systemem kompensacji temperatury.

Rysunek 25. Czujnik tempertury o bardzo małej bezwładności dedykowany do pomiarów gazowych

W obiekcie zastosowano przetwornik temperatury Flex Top zamontowany bezpośrednio w główce pomiarowej czujnika PT 100, w celu ograniczenia błędów pomiarowych wynikających z długości przewodów (rys. 26). Dla takiego rozwiązania długość linii pomiarowej jest pomijalna. Zaletą zastosowanego czujnika jest bardzo mała bezwładność temperaturowa wynikająca z jego budowy. Zastosowany czujnik jest dedykowany do pomiarów gazowych.

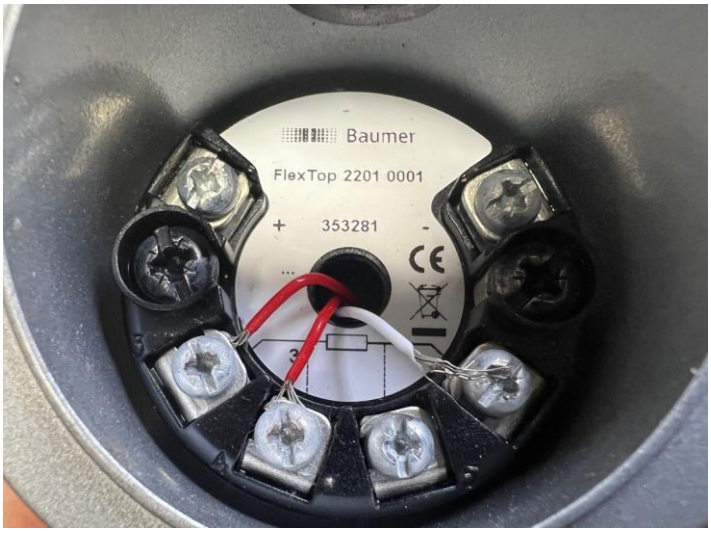
Rysunek 26. Widok czujnika temperatury zamontowanego na siatce pomiarowej - obiekt badawczy URK

46:9288040634

5.3 Charakterystyka przetwornika temperatury.

Zastosowany przetwornik temperatury to przetwornik FlexTop 2201 firmy Baumer. Posiada on wyjście analogowe 4-20mA służące do komunikacji z systemem sterownikowym.

Przetwornik ten (rys. 27) jest dedykowany wyłącznie dla platynowych czujników Pt100. Jego podstawowe dane techniczne zestawiono w tabeli nr.2.



Rysunek 27. Przetwornik temperatury FlexTop 2201

Tabela 2. Dane techniczne przetwornika temperatury

Parametr	**Opis wielkości**
Typ wejścia	Pt100
Wejściowy zakres pomiarowy Pt100	-200 + 850ºC
Rozdzielczość	14 bit wejście, 12 bit wyjście
Dokładność	± 0,25ºC, ± 0,1%
Zasilanie	8…35V DC
Temperatura pracy	-40…+85ºC
Stopień ochrony	IP 40
Montaż głowicowy DIN typu B	

Zasilanie elektryczne przetwornika wykonane jest bezpośrednio z pętli prądowej. Przetwornik może współpracować z czujnikami 2, 3, 4 przewodowymi. Posiada możliwość wprowadzenia ręcznej lub automatycznej kompensacji rezystancji przewodów. Dodatkowo za pomocą dedykowanego programatora można skonfigurować następujące parametry przetwornika: zakres temperatury, jednostka pomiaru, ilość przewodów czujnika, kompensację rezystancji przewodów (czujnik 2-przewodowy), tłumienie, offset, granice (górną i dolną) sygnału wyjściowego, sygnał wyjściowy przy zwarciu czujnika, nadać

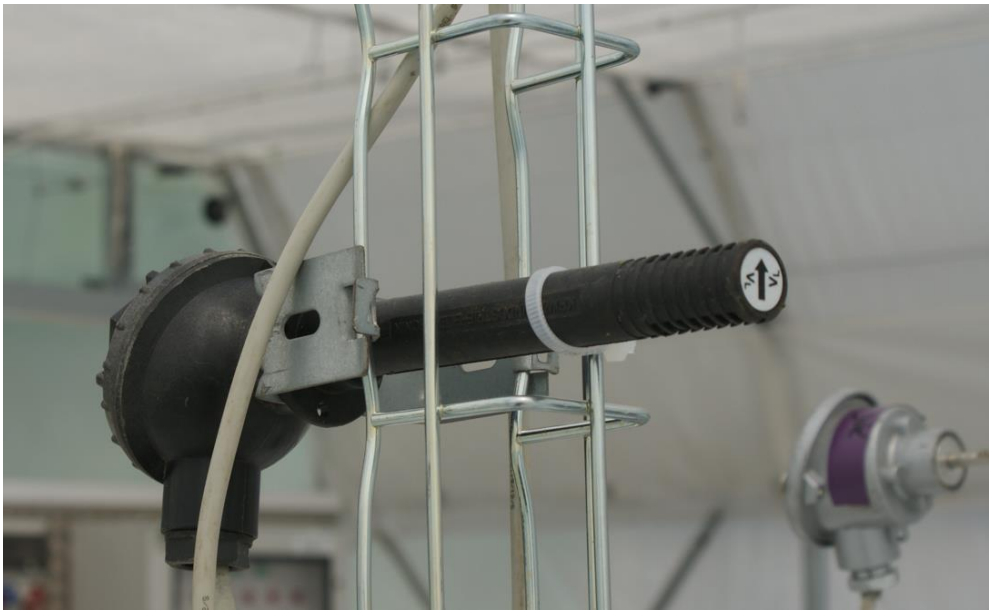
47:6786795604

nazwę, symbol. Układ elektroniczny przetwornika FlexTop 2201 wypełniony jest żelem silikonowym, dzięki czemu może on być stosowany w środowiskach o dużej wilgotności. Przetwornik FlexTop 2201 jest dostosowany do montażu w głowicy pomiarowej DIN typu B, posiada centryczny otwór 6 mm służący do szybkiej wymiany czujnika. Mocowanie przetwornika z wykorzystaniem sprężynowych podkładek umożliwia mu poprawną pracę w warunkach dużych wibracji.

5.4 Charakterystyka czujnika prędkości ruchu powietrza

Do pomiaru ruchu (prędkości) powietrza zastosowano liniowy przetwornik prędkości powietrza INT512 (Linear air flow sensor) firmy KRIWAN o zakresie pomiarowym 0,2-1m·s^{-1}.

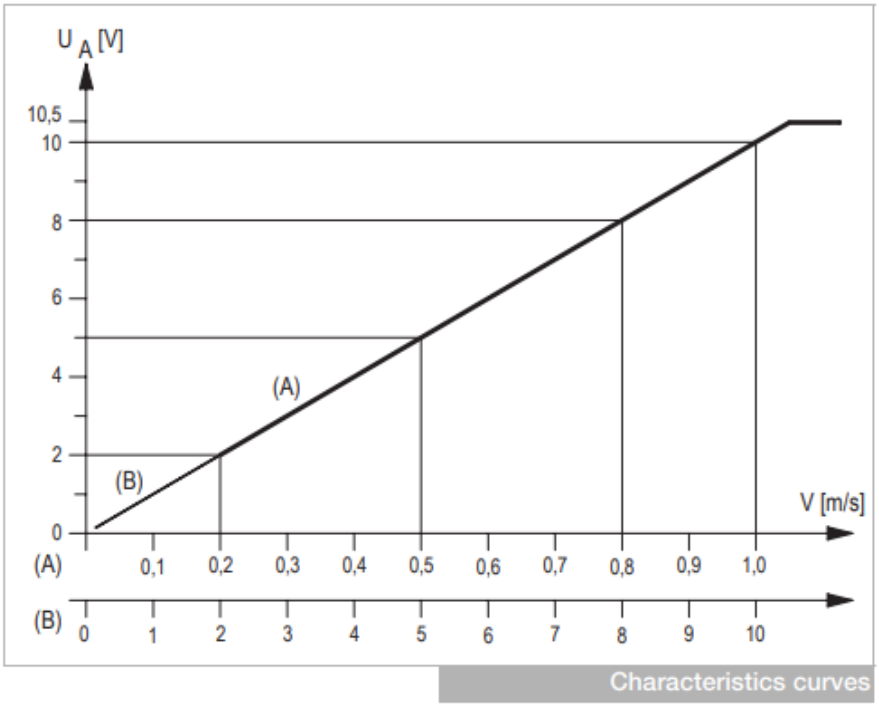
Pomiar prędkości powietrza odbywa się metodą kalorymetryczną. Przetwornik posiada wyjście 0-10V proporcjonalne do zakresu pomiarowego i zakończony jest złączem zaciskowym, do którego podłączono specjalny ekranowany kabel (zgodnie z zaleceniami producenta) do komunikacji z systemem sterownikowym. Przetwornik mierzy ruch powietrza w systemie kierunkowym (zgodnie ze strzałką na czujniku) (rys.28).



Rysunek 28. Czujnik prędkości ruchu powietrza INT 512

Przy takiej metodzie pomiaru producent podaje liniową charakterystykę (rys. 29). Na rysunku przedstawiono zależność między prędkością ruchu powietrza, a generowanym napięciem wyjściowym przez czujnik prędkości. W badaniach mierzona była prędkość ruchu powietrza w płaszczyźnie pionowej szklarni na kierunku od podłoża do szczytu.

48:1072717848



Rysunek 29. Charakterystyka czujnika INT 512 (producent: Kriwan)

Źródło: https:/www.kriwan.com

Podstawowe dane techniczne przetwornika przepływu - INT 512 zestawiono w tabeli poniżej (tab. 3)

Tabela 3. Podstawowe dane techniczne czujnika INT 512

Parametry czujnika	**Jednostka**
Zakres pomiarowy	0,2…1 $m \cdot s^{-1}$
Dokładność (w warunkach 5...45°C oraz 1013hPa)	+/- 0,03$m \cdot s^{-1}$ 5% wartości pomiaru
Sygnał wyjściowy	0…10V DC (max 11V)
Napięcie zasilania	AC 50-60Hz ±10%

Źródło: https:/www.kriwan.com

49:1036401104

6. Metodyka obliczeń

Kombinacje nastaw temperatur systemu grzewczego w obiekcie badawczym, stanowiące punkt wyjścia do różnicowania kombinacji doświadczenia przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry kombinacji doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Temp zał. grzania	Temp wył grzania	Temp zał. obieg I	Temp wył obieg I	Temp zał. obieg II	Temp wył obieg II	Temp zał. obieg III	Temp wył obieg III
A	22	23	40	41	40	41	40	41
B	22	23	15	16	40	41	40	41
C	22	23	20	21	50	51	30	31
D	22	23	25	26	50	51	30	31
E	22	23	20	21	55	56	30	31
F	22	23	20	21	60	61	30	31
G	22	23	20	21	50	51	30	31
H	22	23	20	21	40	41	30	31

Analizując kombinację doświadczenia „A” należy zaznaczyć, że elementem różnicującym ją w stosunku do kombinacji „B” jest temperatura załączania i wyłączania grzania oraz obiegów grzewczych numer I. Natomiast w stosunku do kombinacji „C” elementem różnicującym jest włączanie i wyłączanie obiegów grzewczych I, II. Identyczne zróżnicowanie kombinacji „A” występuje w stosunku do pozostałych kombinacji doświadczenia.

W obiekcie rzeczywistym wyodrębniono cztery kombinacje nastaw temperatur, które stanowiły punkt wyjścia do różnicowania kombinacji doświadczenia. Dane przedstawiono w tabeli 5. Liczba nastaw wynikała z reżimu technologicznego uprawianych roślin.

Tabela 5. Parametry kombinacji doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Temp zał. grzania	Temp wył grzania	Temp zał. obieg I	Temp wył obieg I	Temp zał. obieg II	Temp wył obieg II	Temp zał. obieg III	Temp wył obieg III
a	22	23	40	41	40	41	40	41
b	22	23	20	21	50	51	30	31
c	22	23	25	26	50	51	30	31
d	22	23	20	21	60	61	30	31

50:1083608266

Analizując kombinację doświadczenia „a” należy zaznaczyć, że elementem różnicującym ją w stosunku do kombinacji „b” jest temperatura załączania i wyłączania obiegów grzewczych numer 1 (podobnie jak w obiekcie badawczym). Natomiast w stosunku do kombinacji „c” elementem różnicującym jest włączanie i wyłączanie obiegów grzewczych 1,2,3.

W celu potwierdzenia lub odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym badanego parametru, wyniki badań poddane zostały testowi Kołmogorowa-Smirnowa. Następnie wyliczono wybrane podstawowe statystyki opisowe [*PN-ISO 3534-1*], istotne ze względu na opisywane zjawiska (Namysłowska-Wilczyńska 2006, Grabarczyk 2016, Zawadzki 2005). Z kolei posługując się rachunkiem korelacyjno-regresyjnym dla wybranych wielkości wyznaczono zależności funkcyjne. W przypadku analizy różnic pomiędzy wybranymi wartościami wykorzystano analizę wariancji z testem Duncana. Aby uzyskać z góry założoną dokładność wyników wyznaczono niezbędną liczbę powtórzeń pomiaru danego parametru w obrębie danej próby (Greń 1982). Założony poziom istotności w przypadku całego wnioskowania statystycznego wynosił $\alpha=0,05$. Do obliczeń wykorzystano pakiet statystyczny Statistica 13 oraz MS Office Excel (Analysis ToolPak-VBA).

51:2101870692

7. Wyniki Badań

7.1. Analiza wstępna

Przed przystąpieniem do analiz wpływu poszczególnych kombinacji parametrów pracy systemu grzewczego w obiekcie sprawdzono, czy szeregi czasowe opisujące zmiany temperatury, prędkość ruchu powietrza oraz pozostałe analizowane zmienne charakteryzują się rozkładem normalnym.

Ocenę normalności rozkładu przeprowadzono na podstawie testu Kołmogorowa-Smirnowa oraz test W Shapiro Wilka (do 2 tys. obserwacji). W badaniu postawiono hipotezę zerową H_0 głoszącą, że rozkład zmiennej jest normalny. Odrzucenie hipotezy zerowej jest równoznaczne z przyjęciem hipotezy H_1, że rozkład zmiennej jest różny od rozkładu normalnego. W badaniu poziomem istotności (α), przy którym wyliczona wartość testującej statystyki powoduje odrzucenie hipotezy zerowej była na poziomie 0,05. Jeśli $\alpha > p$ (gdzie p jest wartością prawdopodobieństwa testowego), to na poziomie istotności α należy odrzucić hipotezę zerową. W przeciwnym wypadku, czyli gdy $\alpha < p$, na poziomie istotności α nie ma podstaw do odrzucenie hipotezy zerowej.

H_0: rozkład badanej cechy w populacji jest rozkładem normalnym,

H_1: rozkład badanej cechy w populacji jest różny od rozkładu normalnego,

jeżeli $p \leq \alpha \Rightarrow$ odrzucamy H_0 przyjmując H_1,

jeżeli $p > \alpha \Rightarrow$ nie ma podstaw odrzucić H_0.

Z przeprowadzonej analizy w programie Statistica 13.1 wynika, że dla wszystkich analizowanych zmiennych brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 dla przyjętego poziomu istotności.

W dalszej części pracy oceniano wpływ zastosowanych w badaniu kombinacji parametrów pracy systemu grzewczego na temperaturę oraz prędkość przepływu powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych. W badaniu poszukiwano statystycznie istotnych różnic pomiędzy mierzonymi parametrami w poszczególnych punktach pomiarowych. Do oceny różnic pomiędzy wszystkimi możliwymi parami wyznaczonych wartości średnich wykorzystano test post-hoc Duncana. W badaniu postawiono hipotezę zerową H_0 głoszącą, że porównywane parami średnie są sobie równe. Odrzucenie hipotezy zerowej jest równoznaczne z przyjęciem hipotezy H_1, różnicującej porównywane wartości średnie. W badaniu poziomem istotności (α), przy którym wyliczona wartość testującej statystyki powoduje odrzucenie hipotezy zerowej była na poziomie 0,05. Jeśli $\alpha > p$ (gdzie p jest

52:1126588420

wartością prawdopodobieństwa testowego), to na poziomie istotności α należy odrzucić hipotezę zerową. W przeciwnym wypadku, czyli gdy α < p, na poziomie istotności α nie ma podstaw do odrzucenie hipotezy zerowej.

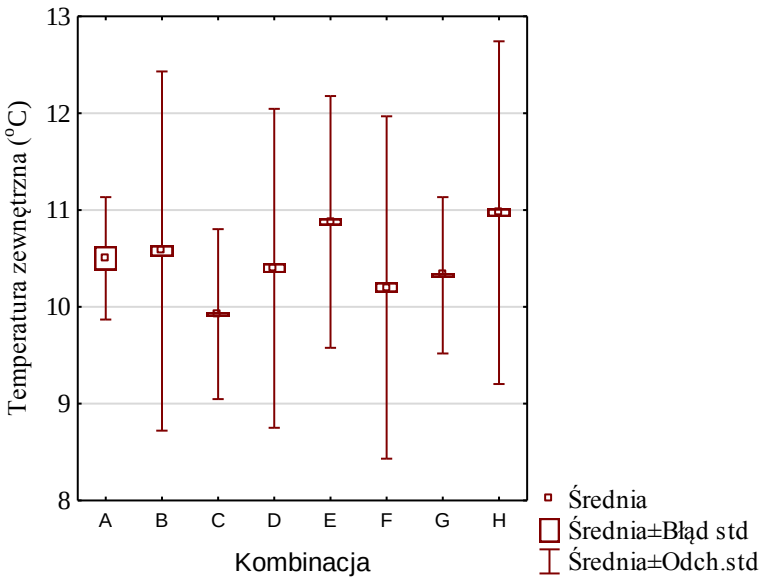
7.2. Obiekt badawczy

Zidentyfikowane kombinacje doświadczenia w szklarni badawczej usytuowanej w Krakowie omówiono szczegółowo w poprzednim rozdziale i przedstawiono w tabeli 4. Przed przystąpieniem do omawiania szczegółowych wyników badań zarejestrowanych w poszczególnych punktach siatki pomiarowej wewnątrz szklarni, dokonano analizy zewnętrznych warunków meteorologicznych mających wpływ na obiekt badania.

7.2.1. Charakterystyka warunków meteorologicznych

W celu ograniczenia wpływu zmian warunków zewnętrznych na uzyskiwane wyniki do dalszych analiz wybrano tylko okresy charakteryzujące się porównywalnym zakresem zmian takich parametrów jak: temperatura zewnętrzna, natężenie promieniowania słonecznego i prędkość wiatru. Wymagano by okres brany do analizy trwał nieprzerwanie przez minimum 5 godzin. Na rysunku (rys. 30) przedstawiono charakterystykę zmian temperatury zewnętrznej w czasie realizacji eksperymentu w obiekcie badawczym (Kraków) dla poszczególnych kombinacji pracy systemu grzewczego. Temperatura zewnętrzna zmieniała się w przedziale od 7,3^{o}C do 15,1^{o}C przyjmując wartość średnią w całym okresie na poziomie 10,5^{o}C. Analizując wyniki badań dla poszczególnych wariantów nastaw pracy systemu ogrzewania widzimy, że średnie temperatury oscylują w wąskim przedziale od 9,9^{o}C dla wariantu C do 11,0^{o}C dla H. Najmniejszą zmienność temperatury zewnętrznej rejestrowano dla wariantu A, C i G, w których odchylenie standardowe było na poziomie ok. 0,5^{o}C. Dla pozostałych wariantów występowało nieznacznie większe zróżnicowanie zmian temperatury, dla którego odchylenie standardowe wzrosło do prawie 2^{o}C. Pomimo występujących różnic można uznać, że ich wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów jest pomijalny, a potencjalne zmiany temperatur i prędkości ruchu powietrza w obszarze pomiarowym będą następstwem wyłącznie pracy systemu grzewczego.

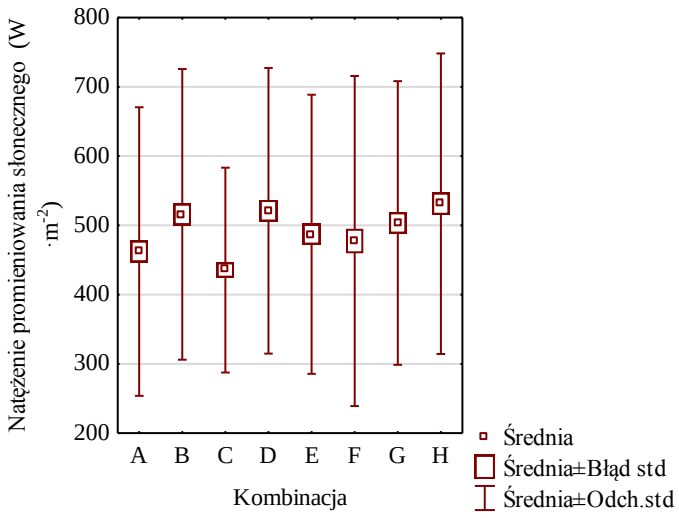
53:3807991376



Rysunek 30. Charakterystyka temperatury zewnętrznej przy obiekcie badawczym

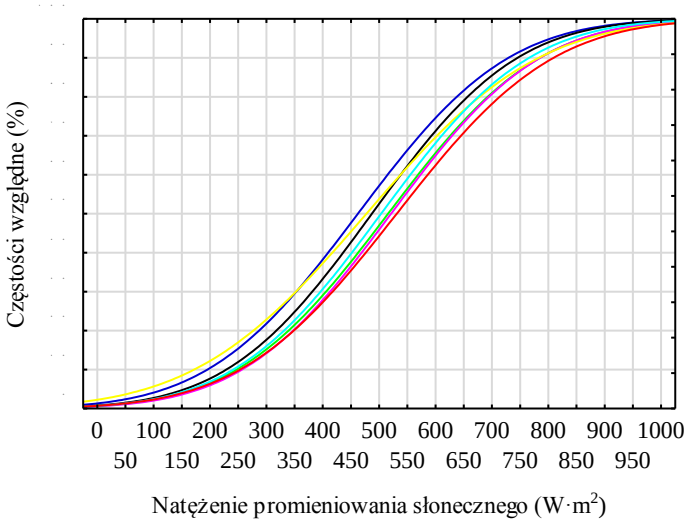
Drugim z parametrów mającym wpływ na warunki mikroklimatu w obiekcie szklarniowym jest natężenie promieniowania słonecznego. W okresie objętym analizą widzimy znacznie większą dynamikę zmian tego parametru w czasie badania. Ilość docierającej energii promieniowania słonecznego do powierzchni ziemi jest bowiem uzależniona zarówno od danych kalendarzowych jak i od warunków meteorologicznych. Występuje więc cykliczność zarówno dobowa jak i roczna, którą można przewidywać z wysoka dokładności. Duży wpływ ma również zachmurzenie, które powoduje ograniczenie ilości energii docierającej, powodując zarówno odbicie jak i rozproszenie promieniowania słonecznego. W czasie badania średnie natężenie promieniowania słonecznego oscylowała w przedziale od 435W·m^{-2} (kombinacja (C) do 531W·m^{-2} (kombinacja H). Zmienność natężenia promieniowania słonecznego mierzona odchyleniem standardowym była na poziomie od 150W·m^{-2} do 200W·m^{-2}. Zgodnie z oczekiwaniami zmiany natężenia promieniowania słonecznego były skorelowanie z temperaturą powietrza zewnętrznego (rys. 31).

54:9442581880



Rysunek 31. Charakterystyka natężenia promieniowania słonecznego przy obiekcie badawczym

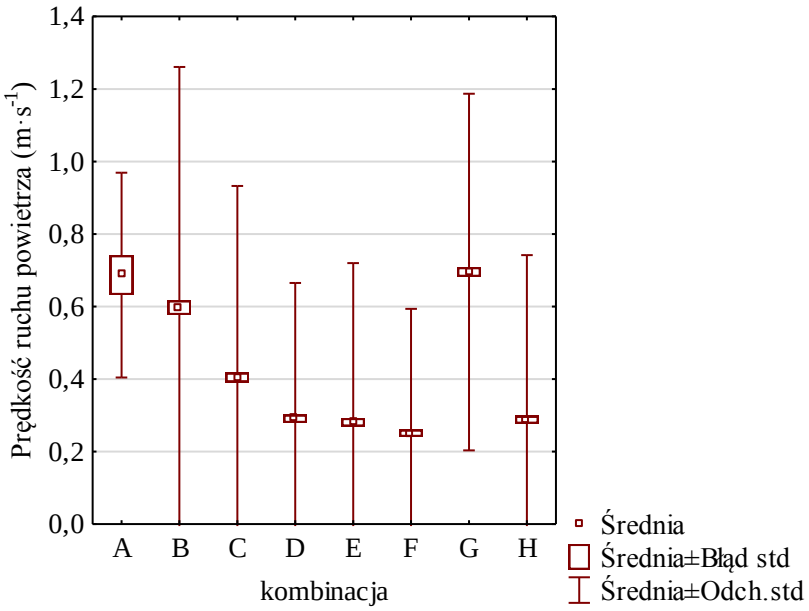
Wartość średnia nie w pełni oddaje przebieg zmian wielkości natężenia promieniowania słonecznego w okresie realizacji badań. W celu pełniejszej charakterystyki zmian tego czynnika opracowano dystrybuanty empiryczne, które przedstawiono na rysunku (rys. 32). Widzimy, że dla wszystkich analizowanych okresów udział promieniowania o wartościach do 200W·m^{-2} (dominujący udział promieniowania rozproszonego) jest na poziomie ok. 7 do 12%. Natomiast obserwacje o wysokich wartościach wskaźnika na poziomie powyżej 800W·m^{-2} (dominujący udział promieniowania bezpośredniego) występują w ok 5% obserwacji. Przebieg dystrybuant empirycznych jest zbliżony, co potwierdza występowania porównywalnych warunków pod względem natężenia promieniowania słonecznego w dniach, dla których przeprowadzano eksperyment.



Rysunek 32. Dydtrybuanty empiryczne natężenia promieniowania słonecznego przy obiekcie badawczym dla poszczególnych kombinacji pracy systemu grzewczego

55:2719207465

Na rysunku (rys. 33) przedstawiono charakterystykę zmienności prędkości ruchu mas powietrza w otoczeniu obiektu, w którym realizowano badania. Wyznaczone wartości średnie zmieniały się w przedziale od 0,25 - 0,28m·s^{-1} dla kombinacji D-F do 0,6-0,69m·s^{-1} dla A, B i G. Spośród analizowanych czynników zewnętrznych prędkość przepływu powietrza zewnętrznego charakteryzowała się największą zmiennością, lecz jej wpływ na wyniki pomiarów również można uznać za pomijalny. Różnica pomiędzy wartościami skrajnymi wynosiła bowiem mniej niż 0,5m·s^{-1}, a dodatkowo osłona tunelu eliminuje jego odziaływanie.



Rysunek 33. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza w obiekcie badawczym

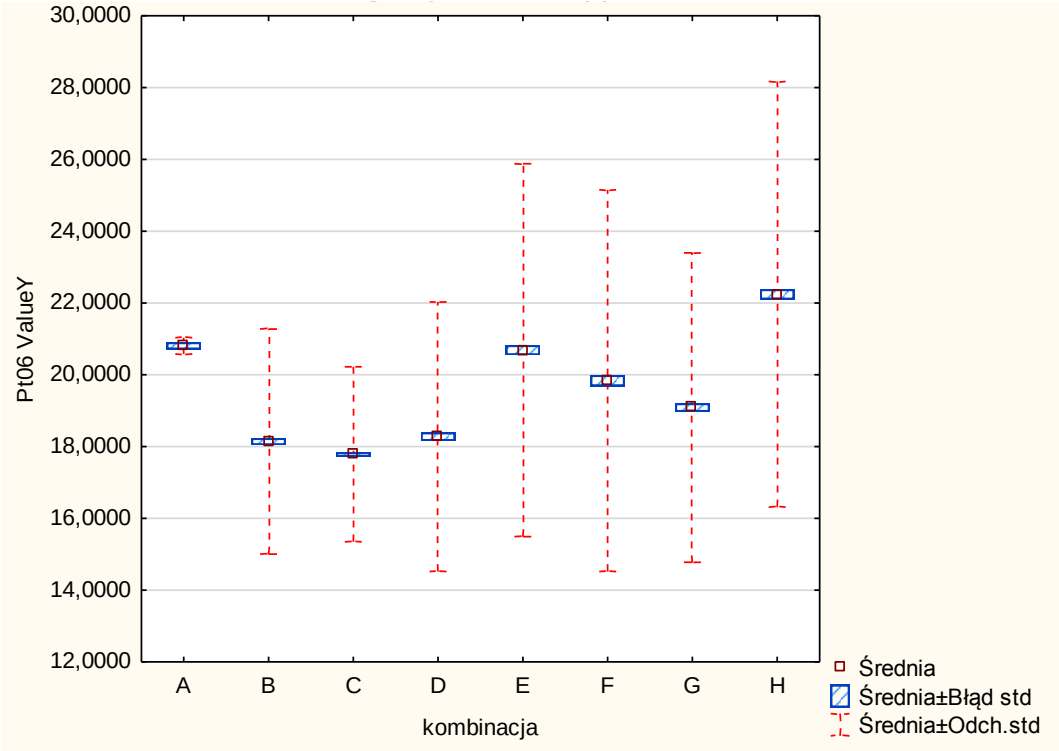
Po analizie potwierdzającej porównywalny wpływ warunków zewnętrznych na parametry mikroklimatu w szklarni przystąpiono do analizy zmienności rozkładu badanych parametrów w poszczególnych punktach siarki pomiarowej.

7.2.2. Charakterystyka temperatury powietrza w obiekcie badawczym

W punkcie nr 6 (rys. 34) będącym w środkowej części siatki pomiarowej po lewej jej stronie średnie wartości temperatury zmieniały się od 17,78℃ dla kombinacji C do 22,24℃ dla H. Na zbliżonym poziomie ok. 18℃ była wartość średnia wyznaczona dla kombinacji B, C i D. Najmniejszym zróżnicowaniem pomiarów charakteryzowała się kombinacja A mająca odchylenie standardowe na poziomie ok 0,2℃ co jest wartością zbliżoną do błędu standardowego dla wartości średniej. Dla pozostałych wartości średnich błąd standardowy

56:4171378828

jest na porównywalnym poziomie, lecz odchylenie standardowe jest wielokrotnie wyższe. Zmieniało się ono od 2,3°C dla kombinacji C do prawie 6°C dla H.



Rysunek 34. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie badawczym

Ocena statystyczna dla czujnika nr 6 (tab. 6) potwierdziła, że wartości średnie różnią się istotnie w 12 przypadkach. Najwięcej różnic zaobserwowano dla najwyższej średniej zarejestrowanej dla kombinacji H. Była ona istotnie wyższa niż dla kombinacji B, C, D, F i G. Kolejne dwie wielkości średnie dla kombinacji A oraz E były wyższe niż dla B, C i D. Zaobserwowano jeszcze jedną różnicę pomiędzy kombinacją C, a F.

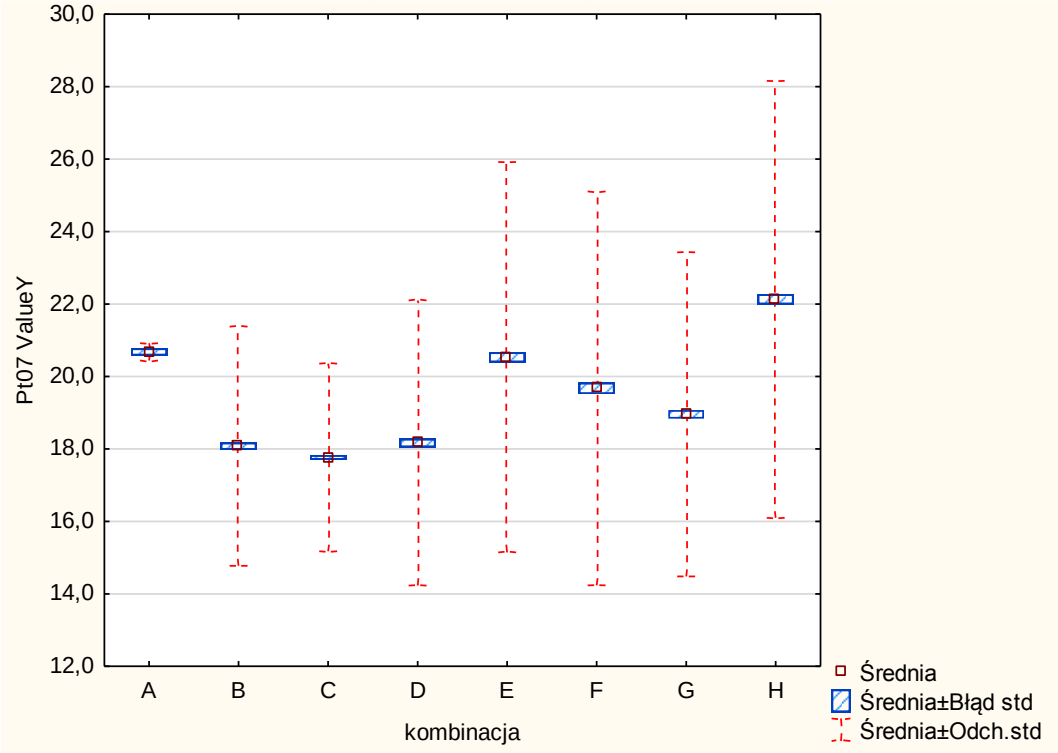
Tabela 6. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt06							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,805	M=18,139	M=17,784	M=18,274	M=20,686	M=19,835	M=19,087	M=22,241
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}			*			xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

57:3620439442

W punkcie numer 7 (rys. 35) będącym w środkowej części siatki pomiarowej uśrednione wartości temperatury oscylowały w przedziale od 17,77℃ dla kombinacji C do 22,13℃ dla H. Jedynie kombinacja A o stosunkowo wysokiej temperaturze przeciętnej na poziomie 20,68 ℃ charakteryzowała się bardzo małą zmiennością pomiarów. Wyznaczona wartość odchylenia standardowego była na poziomie poniżej 0,2℃. Dla pozostałych kombinacji parametr ten zmieniał się od 2,4℃ dla C do prawie 6℃ dla H.



Rysunek 35. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie badawczym

Ocena istotności (tab. 7) różnic pomiędzy wartościami średnimi wykazała ich istnienie dla 11 przypadków. Było to połączenie wartości średniej dla kombinacji A z B, C oraz D. Wartość przeciętna w pierwszym przypadku wynosiła 20,68℃, a dla pozostałych trzech oscylowała pomiędzy 17,77, a 18,16℃. Istotne różnic wystąpiły również pomiędzy kombinacją E wartości średniej zbliżonej do A również z B, C oraz D. Najwięcej istotnych statystycznie różnic wystąpiło dla największej średniej prędkości, którą zarejestrowano dla kombinacji H. Była wyższa nie tylko od parametrów uzyskanych dla kombinacji B, C, D, ale również od F i G. Pomiędzy wartościami najwyższymi (A, E, H) różnice były nieistotne.

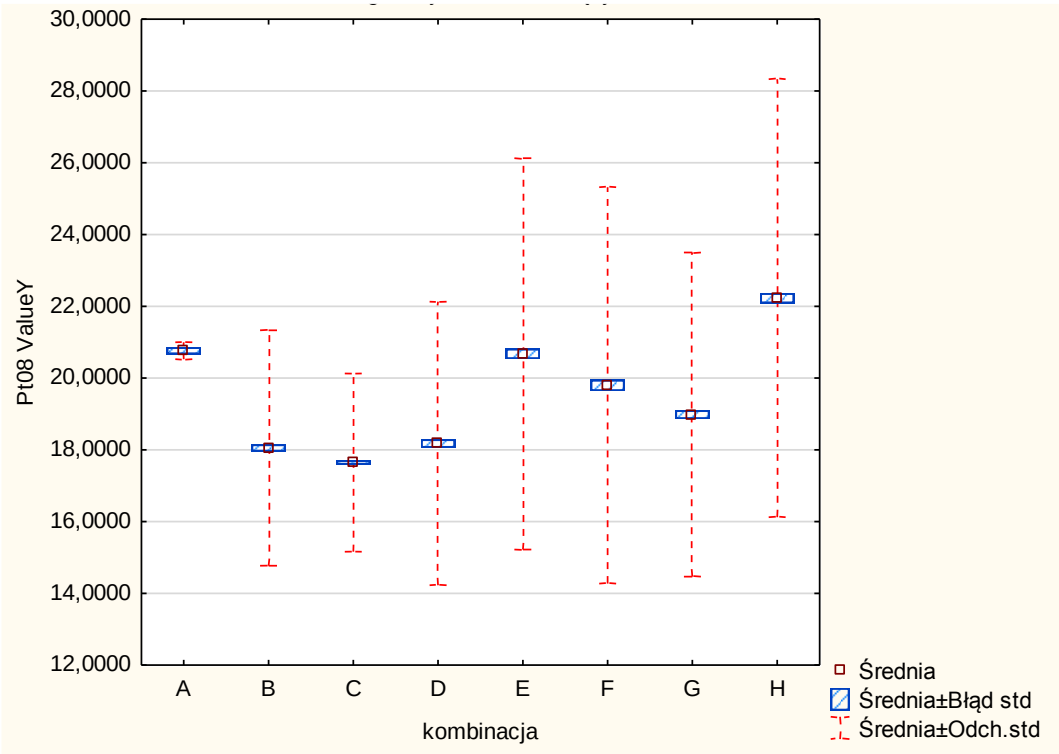
58:1514731193

Tabela 7. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 7 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt07							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,680	M=18,074	M=17,765	M=18,165	M=20,531	M=19,672	M=18,954	M=22,131
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}						xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Kolejny punkt pomiarowy w części środkowej miał numer 8, a zarejestrowane parametry dotyczące temperatury (rys. 36) były zbliżone do pozostałych pomiarów na tej wysokości. Wartość minimalna na poziomie 18,93℃ po raz kolejny wystąpiła dla kombinacji C, a wartość maksymalna wyższa od niej o 4,6℃ wystąpiła dla kombinacji H.



Rysunek 36. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 8 w obiekcie badawczym

Analiza istotności różnic pomiędzy wartościami średnimi (tab. 8) wskazała analogiczne zestawy jak dla punktu pomiarowego nr 6. Różnice pomiędzy średnimi

59:7591872759

wystąpiły więc pomiędzy kombinacją H z B, C, D, F i G oraz A i E z B, C, D jak również C z F.

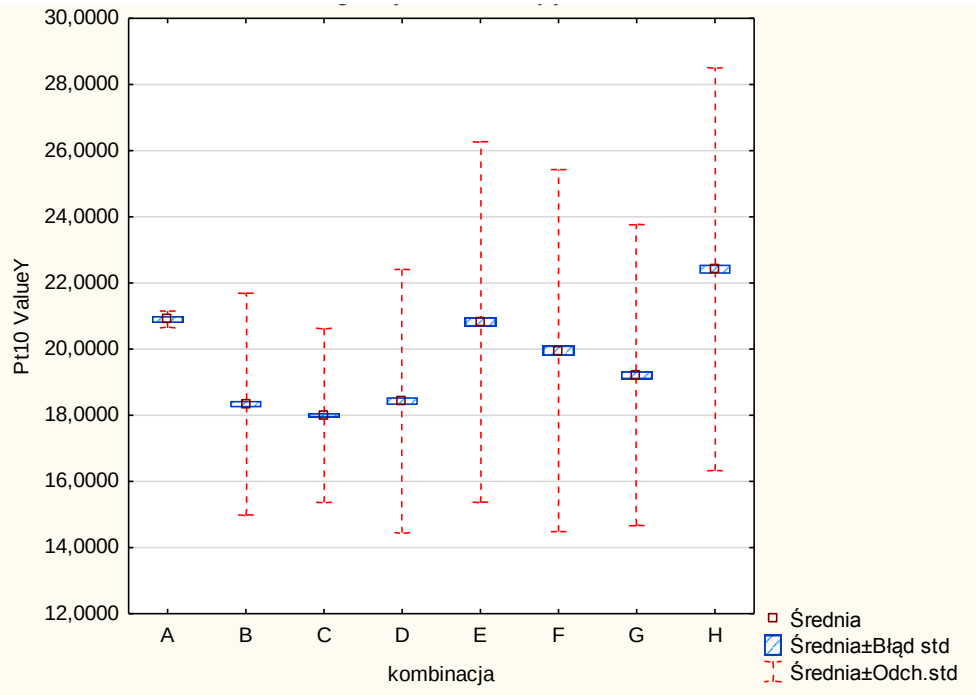
Tabela 8. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 8 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt08							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,761	M=18,052	M=17,644	M=18,177	M=20,675	M=19,795	M=18,983	M=22,226
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}			*			xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie pomiarowym o numerze 10 (rys. 37) temperatura dla poszczególnych kombinacji była na zbliżonym poziomie do punktu nr 7 występującego na tej samej wysokości tylko nie przy bocznej ścianie szklarni. Średnie wartości temperatur zmieniały się od 18,00℃ dla kombinacji C do 22,41℃ dla kombinacji H. Analogicznie jak poprzednio kombinacja A charakteryzowała się najmniejszą zmiennością dla pozostałych kombinacji odchylenie standardowe było na poziomie od 2,2℃ dla C do 6℃ dla H, czyli zbliżone do punktu nr 7. Nadal kombinacje B, C oraz D charakteryzowały się najniższymi wartościami średnimi, a A, E i H najwyższymi.

60:9317506371



Rysunek 37. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 10 w obiekcie badawczym

Z analizy statystycznej wynika (tab. 9), że spośród 32 badanych połączeń wartości średnich znów w 11 przypadkach wystąpiły istotne różnice. Analogicznie jak poprzednio wartości średnie różnicowały kombinację A oraz E z B, C, D, jak również H nie tylko z B, C, D, ale również z F i G. Na tej wysokości maksymalna temperatura na poziomie średnim ok 22,2℃ występowała dla wszystkich kombinacji parametrów pracy systemu grzewczego. Najniższa wartość średnia oscylująca wokół 17,7℃ występowała dla kombinacji C. Jedynie przy boku szklarni tj. W punkcie pomiarowym nr 10 była ona nieznacznie wyższa i wynosiła 18℃.

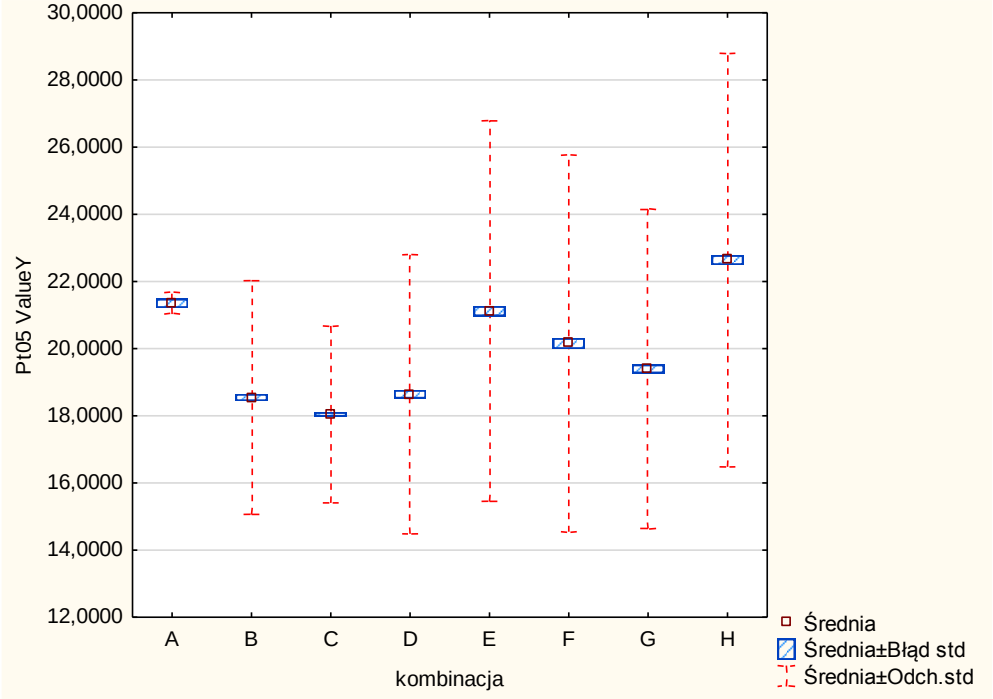
Tabela 9. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 10 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt10							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,896	M=18,337	M=18,002	M=18,429	M=20,822	M=19,954	M=19,211	M=22,417
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}						xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

61:7518422757

Analiza temperatury przy ścianie szklarni (rys. 38), lecz w górnej jej części wykazała bardzo nieznaczny wzrost temperatury. Nadal średnią najniższą temperaturę na poziomie 18,04°C odnotowano dla kombinacji C, a najwyższą (22,64°C) dla kombinacji H. Niski poziom temperatury w tej części szklarni wystąpił nie tylko dla kombinacji CC, ale również dla B i D. Nadal kombinacja A charakteryzowała się najmniejszym zróżnicowaniem wartości rejestrowanych pomiarów, dla których odchylenie standardowe było na poziomie 0,2°C, gdy dla pozostałych oscylowało w przedziale od 2,5°C dla kombinacji C do 6°C dla H.



Rysunek 38. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie badawczym

Ocena różnic pomiędzy wartościami średnimi (tab. 10) pokazała, że są one istotne w 11 przypadkach. Jest wśród nich zestawienie najwyższej wartości średniej, którą zaobserwowano dla kombinacji H w odniesieniu do wartości niższych zarejestrowanych dla B, C, D, F i G. Różnicujące okazały się również średnie wartości dla dwóch kolejnych najwyższych wartości średnich tj. kombinacji A (21,35°C) oraz E (21,12°C) w porównaniu z B, C oraz D. Dla trzech ostatnich kombinacji średnia temperatura była na poziomie od 18,04 do 18,64°C.

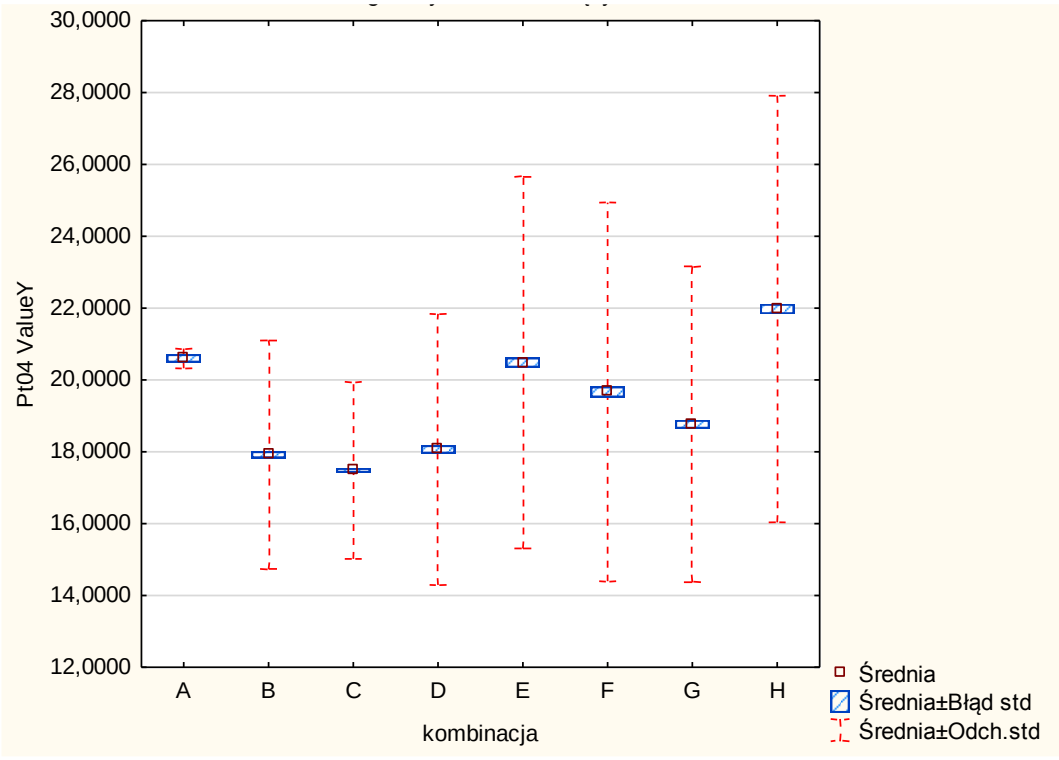
Tabela 10. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

62:9558625026

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt05							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=21,348	M=18,543	M=18,040	M=18,640	M=21,116	M=20,152	M=19,395	M=22,637
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}						xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Przesuwając się w lewą stronę siatki pomiarowej zaobserwowano, że punkcie pomiarowym nr 4 (rys. 39) temperatura jest nieznacznie niższa niż przy ścianie szklarni. Najwyższa średnia temperatura nadal występowała dla kombinacji H i wynosiła 21,92℃, a najniższą zarejestrowano dla kombinacji C na poziomie 17,48℃. Była ona zbliżona dla parametrów pracy ogrzewania w wariancie B i D. Analogicznie do wcześniejszych pomiarów kombinacja A charakteryzowała się najniższym zróżnicowaniem wyników pomiarów, a H najwyższym.



Rysunek 39. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie badawczym

63:5640007231

Dla tego punktu w 12 przypadkach potwierdzono statystycznie istotne różnice pomiędzy wartościami średnimi (tab. 11). Oprócz wcześniej już zidentyfikowanych pojawiała się kombinacja C z F. Jest to różnica pomiędzy wartością najniższą na poziomie 17,48°C, która wystąpiła dla kombinacji C, a 19,67°C dla punktu F.

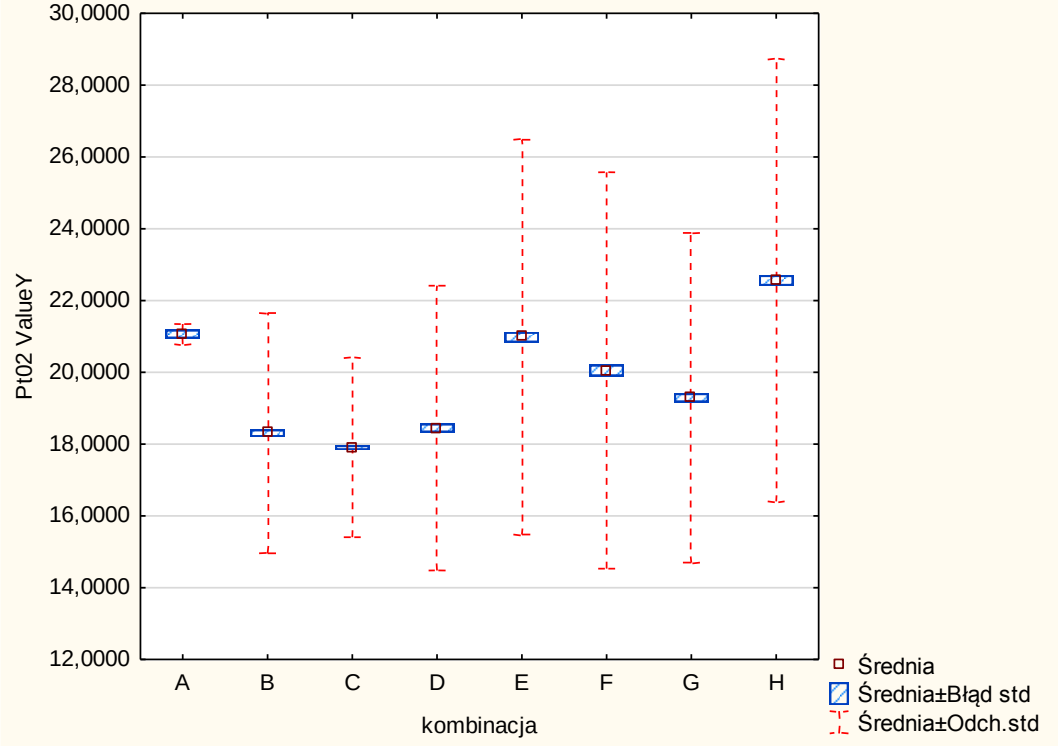
Tabela 11. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt04							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,599	M=17,918	M=17,484	M=18,068	M=20,482	M=19,667	M=18,766	M=21,974
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}			*			xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie pomiarowym nr 2 (rys. 40) średnie wartości temperatury zmieniały się w przedziale od 17,90°C dla kombinacji C do 22,56°C dla H, będąc na zbliżonym poziomie do punktu nr 5. Nadal na zbliżonym, a zarazem najniższym poziomie była średnia temperatura dla kombinacji B, C i D. Zmienność rejestrowanych pomiarów pozostała na dotychczasowym poziomie, w którym widoczna jest najmniejsza zmienność pomiarów dla kombinacji A.

64:4167676256



Rysunek 40. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie badawczym

Wyznaczone wartości średnie istotnie różniły się pomiędzy sobą dla 12 przypadków (tab. 12) analogicznie jak dla punktu pomiarowego nr 4. Istotny jest wzrost średniej temperatury w górnej strefie pomiarowej szklarni dla kombinacji parametrów pracy systemu grzewczego A, E i H w porównaniu do wartości najniższych występujących dla kombinacji B, C i D. W pierwszej grupie wartość średnia oscylowała pomiędzy 20,98, a 22,56 ℃ natomiast w drugiej zmieniała się od 17,90 do 18,44 ℃.

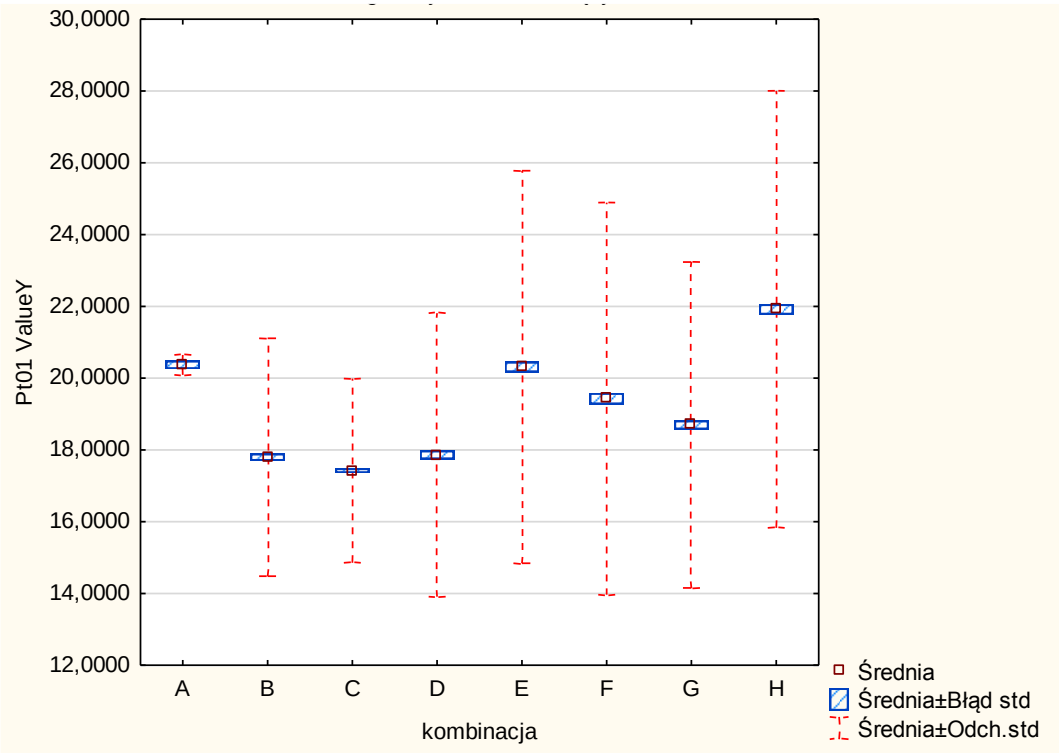
Tabela 12. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt02							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=21,065	M=18,304	M=17,900	M=18,448	M=20,980	M=20,052	M=19,291	M=22,559
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}			*			xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

65:1089385977

W ostatnim punkcie pomiarowym nr 1 (rys. 41) zlokalizowanym w górnej części siatki pomiarowej średnie wartości temperatur nie zmieniły się znacząco dla poszczególnych kombinacji parametrów pracy systemu grzewczego. Nadal najwyższą temperaturą charakteryzowała się kombinacja H na poziomie 21,92℃, a najniższa C na poziomie 17,42℃. Dla serii pomiarów wykonanej na tej wysokości średnie wartości maksymalne rejestrowane dla kombinacji H zmieniały się w wąskim przedziale od 21,92℃ dla punktu nr 1 do 22,6℃ dla punktu nr 5, będącego przy bocznej ścianie szklarni. Natomiast wartości minimalne dla wszystkich punktów pomiarowych występowały dla kombinacji C i zmieniały się od 17,42℃ w punkcie nr 1 do 18,04℃ przy bocznej ścianie szklarni. Najniższą zmiennością wyników pomiarów zaobserwowano dla kombinacji A, natomiast najwyższą na poziomie ok. 6℃ dla kombinacji H.



Rysunek 41. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie badawczym

W tym punkcie pomiarowym jako statystycznie istotnie różniące się średnie uznano 11 kombinacji (tab. 13). Były wśród nich kombinacje analogicznie do wcześniej już zidentyfikowanych. Nie potwierdzono jedynie istotnych różnic pomiędzy średnią temperaturą dla kombinacji C z F przy różnicy na poziomie 1,3℃ i zmienności opisywanej odchyleniem standardowym o wartości 4,7℃ dla kombinacji F.

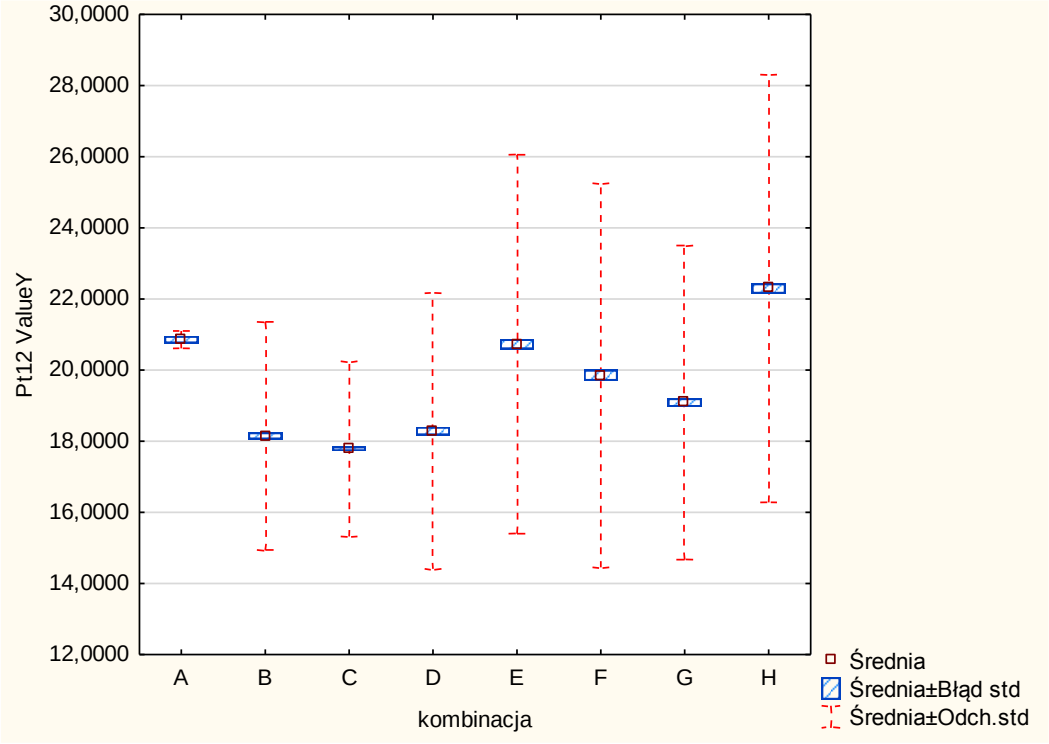
66:8031280800

Tabela 13. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt01							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,369	M=17,796	M=17,422	M=17,861	M=20,310	M=19,430	M=18,694	M=21,915
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}						xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W najniższej części siatki pomiarowej średnie temperatury były na zbliżonym poziomie do pozostałych dwóch wysokości, na których monitorowano zmiany temperatury (rys. 42). Nadal najniższa średnia temperatura na poziomie ok. 18℃ występowała dla kombinacji B, C i D, a najwyższa występowała dla H, A i E wynosząc odpowiednio 22,29, 20,86 i 20,73℃. Z wyjątkiem kombinacji A, dla której odchylenie standardowe zmieniało się od 2,2℃ dla kombinacji C do 6℃ dla H.



Rysunek 42. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 12 w obiekcie badawczym

67:1031878294

Analiza istotności różnic (tab. 14) pomiędzy wartościami średnimi po raz kolejny wskazała różnice pomiędzy kombinacją H, a B, C, D F i G oraz A i E w odniesieniu do B, C i D. Jest to tendencja widoczna na wszystkich poziomach niezależnie od miejsca pomiaru temperatury.

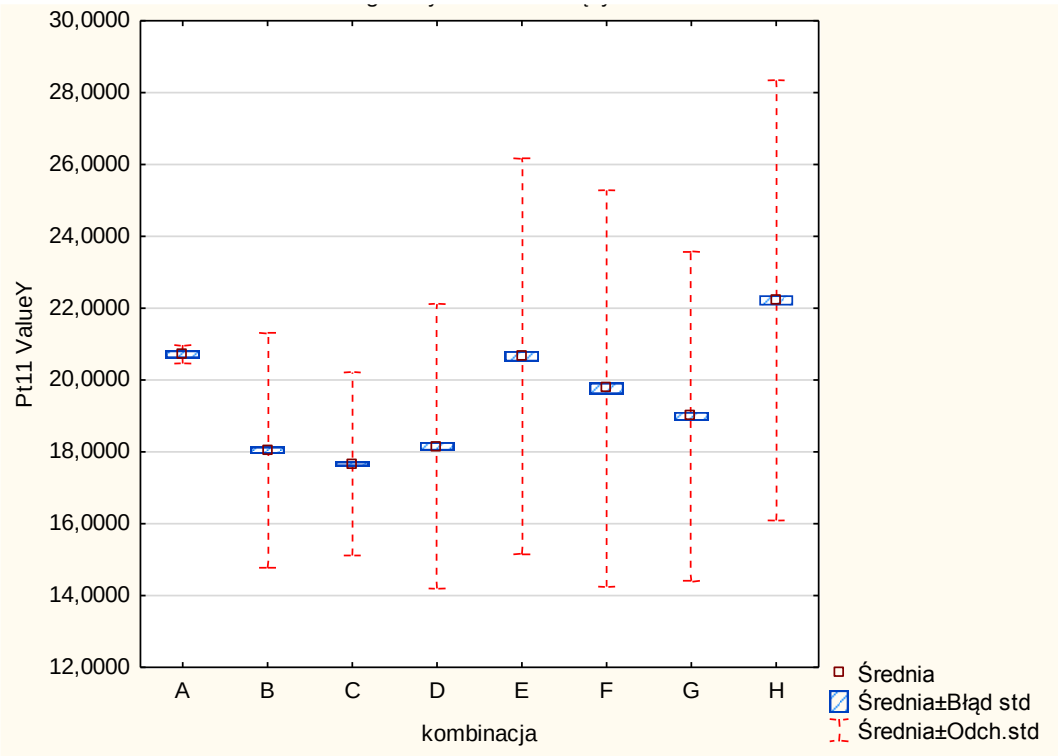
Tabela 14. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 12 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt12							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,856	M=18,150	M=17,785	M=18,286	M=20,728	M=19,854	M=19,088	M=22,294
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}						xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Ostatni z analizowanych punktów (rys. 43) pomiarowych potwierdził dotychczas zaobserwowane prawidłowości, że najwyższa średnia temperatura występuje dla kombinacji H, a potem A i E. Najniższe temperatury natomiast występują dla kombinacji B, C i D. Zmienność rejestrowanych pomiarów również jest na porównywalnym poziomie, dla którego kombinacja A ma odchylenie standardowe na poziomie 0,2°C, a pozostałe warianty oscylują od 2,3°C dla C do 6°C dla H.

68:6208463656



Rysunek 43. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 11 w obiekcie badawczym

Badania istotności (tab. 15) wykonane w tym punkcie również potwierdziły, że średnia temperatura dla kombinacji H jest istotnie wyższa niż dla B, C, D, F i G. Wzrost temperatury wystąpił również dla wariantu A oraz E w odniesieniu do B, C, D.

Tabela 15. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 11 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

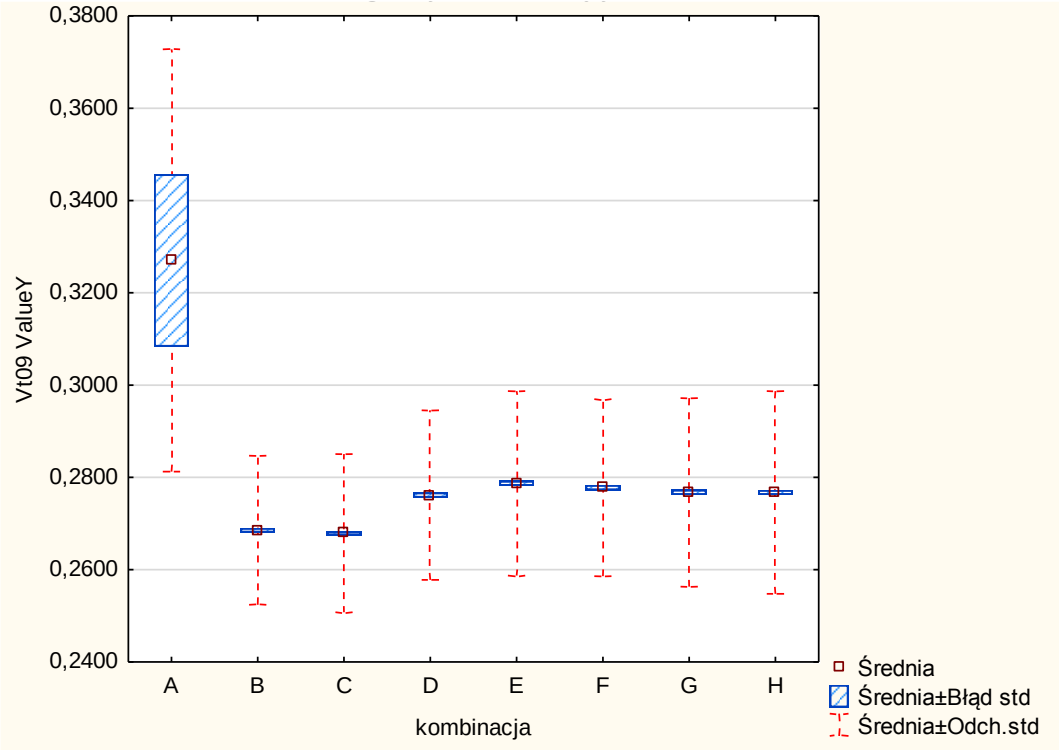
kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt11							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=20,717	M=18,044	M=17,663	M=18,154	M=20,659	M=19,764	M=18,987	M=22,216
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}		*	*	*	xxx			
F {6}						xxx		
G {7}							xxx	
H {8}		*	*	*		*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

69:8190982486

7.2.3. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza w obiekcie badawczym

W kolejnej części pracy dokonano analizy prędkości ruchu mas powietrza w poszczególnych 15 punktach siatki pomiarowej oraz przy ogrzewaniu dolnym i górnym. Charakterystykę prędkości ruchu powietrza w obszarze pomiaru czujnika nr 9 przedstawiono na rysunku (rys. 44). Najwyższą prędkość na poziomie średnim wynoszącym 0,327m·s^{-1} zarejestrowano dla kombinacji A. Była ona znacznie wyższa niż dla pozostałych analizowanych w pracy wariantów. Charakteryzowała się ona błędem standardowym na poziomie prawie 0,02m·s^{-1}. Była to wartość wielokrotnie większa niż dla pozostałych wariantów. Średnia prędkość ruchu powietrza dla kombinacji B-H była na poziomie w przedziale od 0,27 do 0,28m·s^{-1}. Wyznaczona dla nich zmienność opisywana odchyleniem standardowym była na poziomie nieznacznie poniżej 0,02m·s^{-1}.



Rysunek 44. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 w obiekcie badawczym.

Statystycznie istotną różnicę pomiędzy średnią prędkością ruchu powietrza dla czujnika nr 9 i dla kombinacji A wglądem pozostałych potwierdziła przeprowadzona analiza statystyczna, której podsumowanie przedstawiono w tabeli 16. Różnice pomiędzy średnimi prędkościami ruchu powietrza zaobserwowano jeszcze pomiędzy kombinacja B, a E i F oraz pomiędzy C, a E, F, G, H. Dla kombinacji B i C w prawym dolnym rogu siatki pomiarowej rejestrowano najniższe prędkości przepływu powietrza na poziomie 0,268m·s^{-1}. W pozostałych punktach (D-H) wartość średnia była ona poziomie od 0,276 do 0,279m·s^{-1}.

70:6765695207

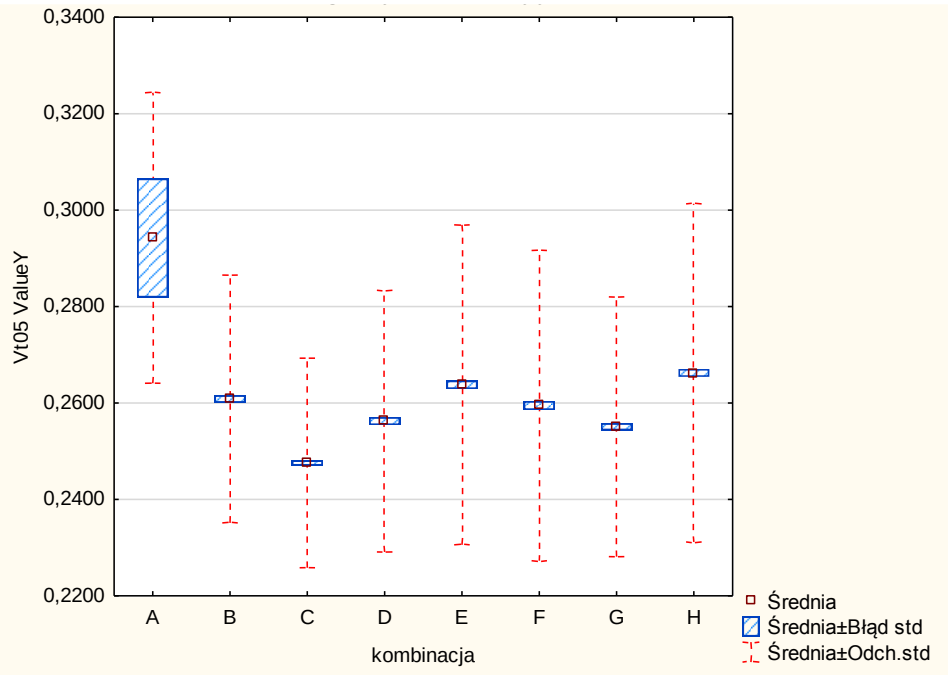
Tabela 16. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Vt09 ValueY (kombinacje)							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=0,327	M=0,268	M=0,267	M=0,276	M=0,279	M=0,277	M=0,276	M=0,276
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}	*	*	*		xxx			
F {6}	*	*	*			xxx		
G {7}	*		*				xxx	
H {8}	*		*					xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Na rysunku 45 przedstawiono charakterystykę zmian prędkości przepływu powietrza w lewym dolnym rogu siatki pomiarowej. Analogicznie jak po prawej stronie najwyższą prędkość uzyskano dla kombinacji A. Charakteryzowała się ona średnią wartością na poziomie 0,294m·s^{-1} podczas gdy w pozostałych punktach pomiarowych nie przekraczała ona 0,267m·s^{-1}. W czasie pomiarów rejestrowano znaczne wahania prędkości, czego efektem była zmienność opisywana odchyleniem standardowym na poziomie 0,02m·s^{-1} i mniejsza dokładność oszacowania wartości średniej. Dla pozostałych kombinacji wartości średnie oscylowały w przedziale od 0,246m·s^{-1} do 0,266m·s^{-1} z bardzo niskim błędem standardowym. Natomiast rozrzut rejestrowanych wartości pomiarowych dla tych punktów był wyższy niż dla kombinacji A i wynosił ok. 0,035m·s^{-1} dla wariantu, F i H. Wyznaczone w punkcie nr 5 wartości średnie dla wszystkich kombinacji były nieznacznie niższe niż w punkcie nr 9 i charakteryzowały się większą zmiennością.

71:8968214906



Rysunek 45. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie badawczym

Ocena statystycznej różnic pomiędzy wartościami średnimi (tab. 17) wskazała, że tylko w 9 przypadkach na 28 różnice są istotne. Mała liczba różnic wartości średnich dla poszczególnych kombinacji w dużej mierze wynika ze zmienności rejestrowanych wartości. Zgodnie z oczekiwaniami kombinacja A różniła się od wszystkich pozostałych oraz kombinacja C różniła się od E oraz H. Dla kombinacji C podobnie jak w puncie 9 zarejestrowano najniższą prędkość przepływu powietrza na poziomie 0,248m·s^{-1}. Kombinacje E i H charakteryzowały się wyższą prędkością na poziomie średnim wynoszącym odpowiednio 0,264 i 0,266m·s^{-1}.

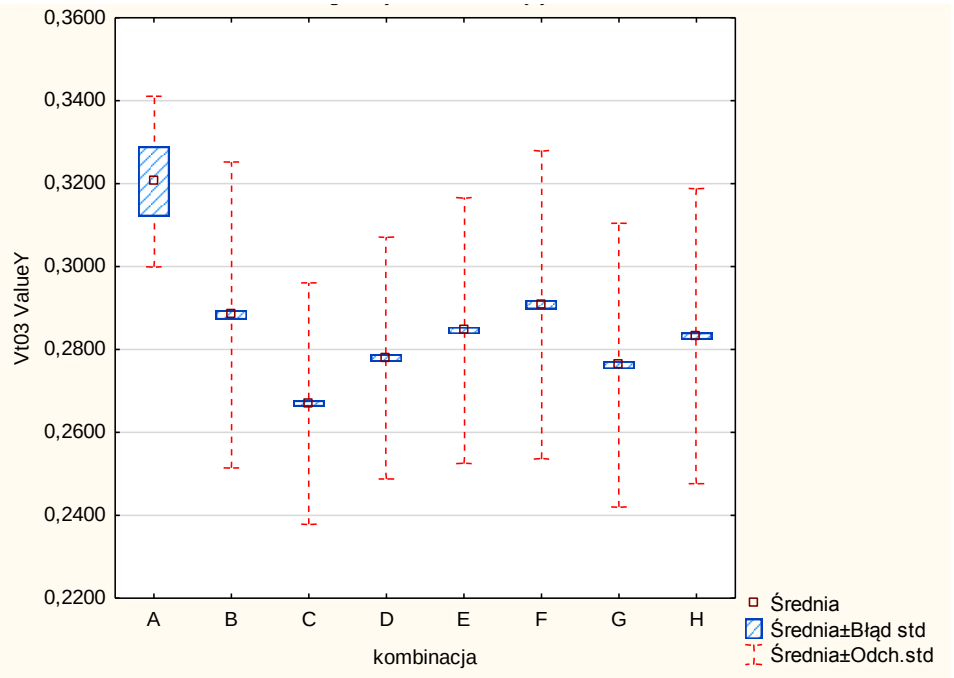
Tabela 17. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Vt05 ValueY (kombinacje)							
	{1} M=0,294	{2} M=0,261	{3} M=0,248	{4} M=0,256	{5} M=0,264	{6} M=0,259	{7} M=0,255	{8} M=0,266
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*		xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}	*		*		xxx			
F {6}	*					xxx		
G {7}	*						xxx	
H {8}	*		*					xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

72:1040615168

Na rysunku 46 przedstawiono prędkość ruchu powietrza w punkcie pomiarowym nr 3, czyli w górnej części siatki pomiarowej. Podobnie jak dla dotychczas analizowanych pomiarów kombinacja A charakteryzowała się najwyższą wartością średnią na poziomie 0,321m·s^{-1}. Zmienność pomiarów była jednak niższa niż dla pozostałych pomiarów co obrazuje odchylenie standardowe na poziomie 0,01m·s^{-1}. W kolejnych kombinacjach wartości średnie zmieniały się w przedziale od 0,267 do 0,291m·s^{-1} przy znacznie większym odchyleniu standardowym na poziomie dochodzącym do 0,02m·s^{-1}.



Rysunek 46. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 w obiekcie badawczym

Analiza statystyczna (tab. 18) wykazała, że w 11 przypadkach wyznaczone wartości średnie różniły się pomiędzy sobą istotnie. Po raz kolejny kombinacja A różniła się istotnie od wszystkich pozostałych oraz kombinacja C, dla której zarejestrowano najniższą wartość przeciętną wynoszącą 0,267m·s^{-1}. Różniła się od wartości średnich uzyskana dla parametrów pracy ogrzewania w kombinacji B, E, F oraz H. Dla tych parametrów pracy uzyskano wyższe wartości średnie oscylujące pomiędzy 0, 283 a 0,290m·s^{-1}.

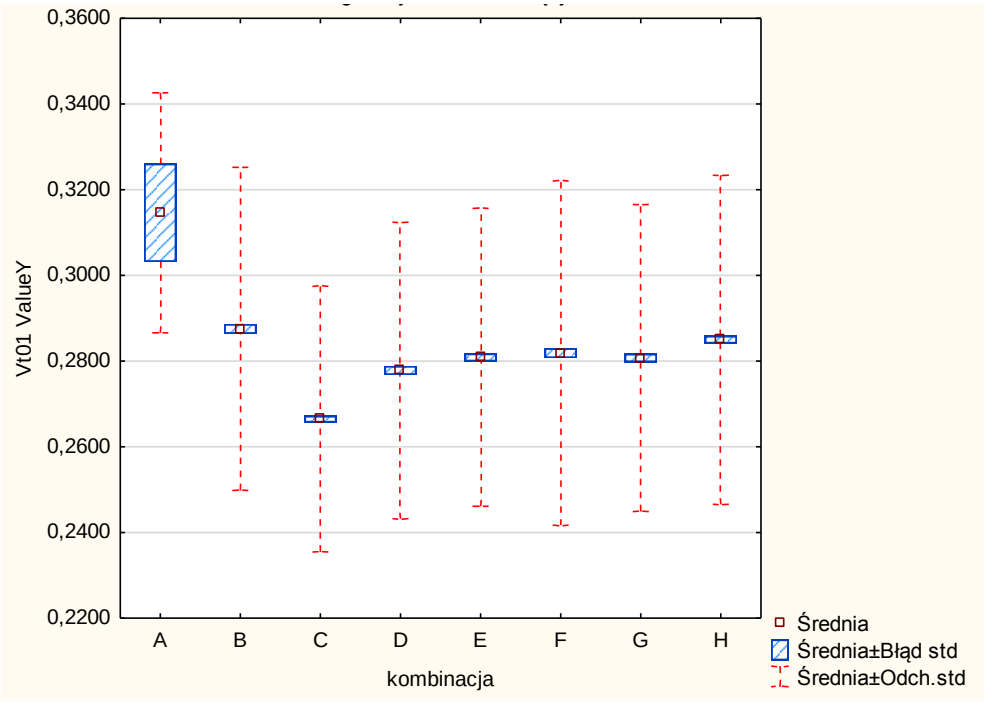
73:9493126707

Tabela 18. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Vt03 ValueY (kombinacje)							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=0,320	M=0,288	M=0,267	M=0,278	M=0,284	M=0,291	M=0,276	M=0,283
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*	*	xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}	*		*		xxx			
F {6}	*		*			xxx		
G {7}	*						xxx	
H {8}	*		*					xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Na rysunku 47 przedstawiono zarejestrowane zmiany wartości przepływu powietrza w lewym górnym rogu siatki pomiarowej, czyli w punkcie numer 1. Nadal kombinacja A pozwalała na uzyskanie najwyższej prędkości przepływu powietrza na poziomie 0,315m·s^{-1}. Wyznaczona wartość średnia charakteryzowała się znacznie większym błędem standardowym niż pozostałe kombinacje. Zmienność zarejestrowanych wartości była jednak dla tej kombinacji niższa, a wyznaczone odchylenie standardowe wynosiło poniżej 0,02m·s^{-1}, gdy dla kombinacji od B do H wzrastało do poziomu 0,04m·s^{-1}.



Rysunek 47. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie badawczym

74:5621379990

Wyznaczone wartości średnie (tab. 19) istotnie różnicowały tylko kombinację A z wszystkimi pozostałymi oraz kombinację C z B oraz H. Dla kombinacji C kolejny raz zaobserwowano najniższą prędkość ruchu powietrza na poziomie średnim wynoszącym 0,266m·s^{-1}, ale i tak była ona wyższa niższa niż w pomiarze wykonanym dla tej szerokości siatki pomiarowej w najniższym jej punkcie. Dla kombinacji B, D i H nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy prędkościami ruchu powietrza, a wartości średnie były na poziomie 0,278 – 0,287m·s^{-1}.

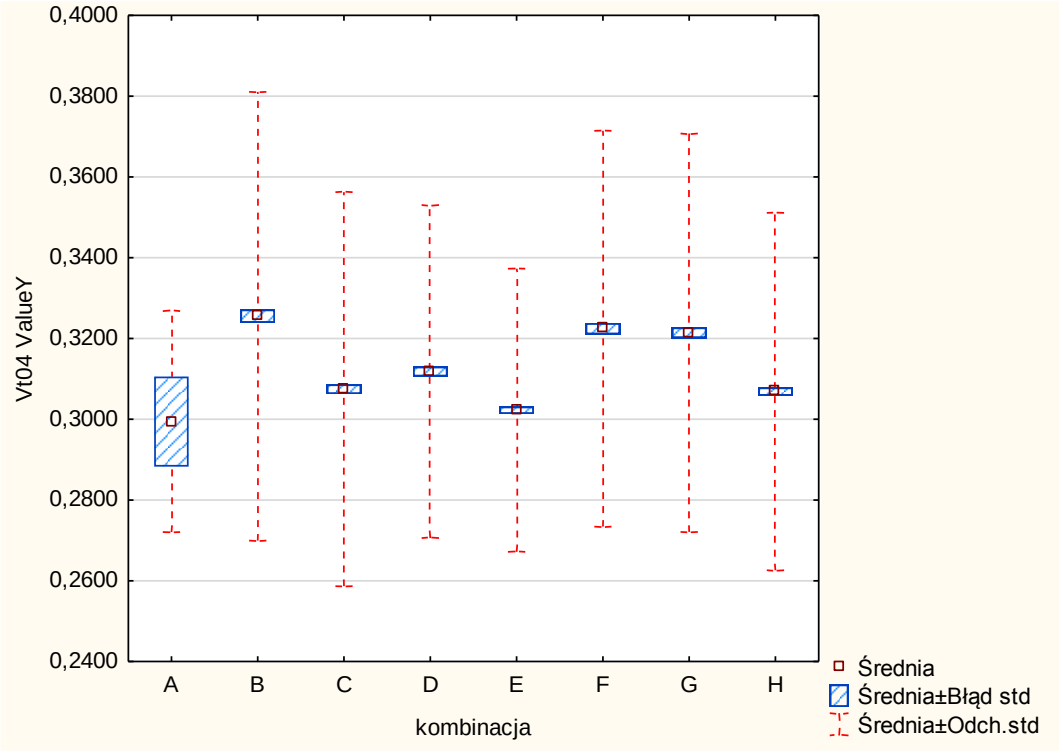
Tabela 19. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt01							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=0,315	M=0,28751	M=0,266	M=0,278	M=0,281	M=0,282	M=0,281	M=0,285
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}	*	*	xxx					
D {4}	*			xxx				
E {5}	*				xxx			
F {6}	*					xxx		
G {7}	*						xxx	
H {8}	*		*					xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Rysunek 48 przedstawia zmiany prędkości przepływu powietrza w prawym górnym rogu siatki pomiarowej. Jest to pierwszy przypadek, w którym kombinacja A nie uzyskała najwyższej prędkości ruchu powietrza, a wyznaczona wartość średnia była na poziomie 0,299m·s^{-1}. Warto podkreślić, że jest to wartość średnia najniższa spośród wszystkich analizowanych kombinacji. Nadal jednak kombinacja A charakteryzowała się najniższym zróżnicowaniem uzyskiwanych wyników pomiarów. Odchylenie standardowe pomiarów było na poziomie poniżej 0,02, gdy np. dla kombinacji B było na poziomie przekraczającym 0,05.

75:1148044193



Rysunek 48. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie badawczym

Analiza statystyczna (tab. 20) wykazała, że tylko 4 spośród 28 wyznaczonych wartości średnich istotnie różnią się pomiędzy sobą. Różnice te wystąpiły pomiędzy najniższa wartością średnią, którą uzyskano dla kombinacji A, a wartościami najwyższymi oscylującymi pomiędzy 0,307, a 0,326m·s^{-1} dla kombinacji B, F oraz G. Wśród wariantów od B do H istotne różnice pomiędzy średnimi wystąpiły tylko dla kombinacji B z E. Jest to zestawienie najwyższej wartości średniej z jedną z najniższych. Dla kombinacji E wartość średnia wynosiła 0,302m·s^{-1} i była nieznacznie tylko wyższa od wartości minimalnej (0,299 m·s^{-1}). Porównując pomiary z prawej skrajnej części siatki pomiarowej zaobserwowano, że dolnej jej części (pkt. nr 9) najniższa średnia prędkość przepływu powietrza wystąpiła dla kombinacji B, a najwyższa dla A. W górnej części nastąpiła zmiana i najniższą prędkość przeciętną rejestrowano dla kombinacji A, a najwyższa dla B. Z wyjątkiem kombinacji A w górnej strefie pomiarowej rejestrowano wyższe prędkości ruchu powietrza nawet o 0,06m·s^{-1}.

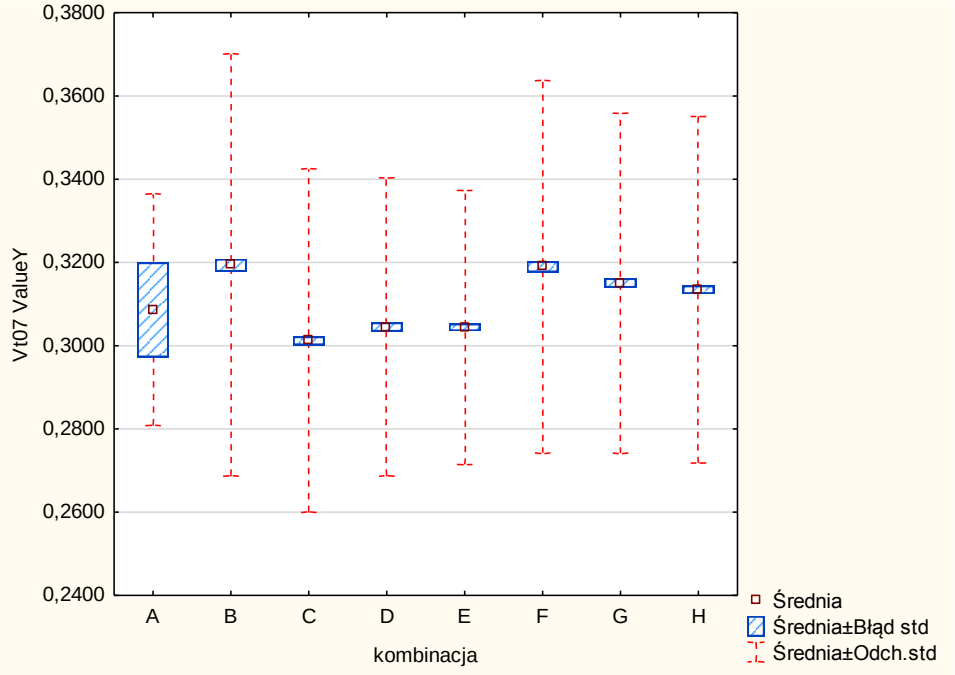
76:4000610123

Tabela 20. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt04							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=0,299	M=0,325	M=0,307	M=0,312	M=0,302	M=0,322	M=0,321	M=0,307
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}			xxx					
D {4}				xxx				
E {5}		*			xxx			
F {6}	*					xxx		
G {7}	*						xxx	
H {8}								xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

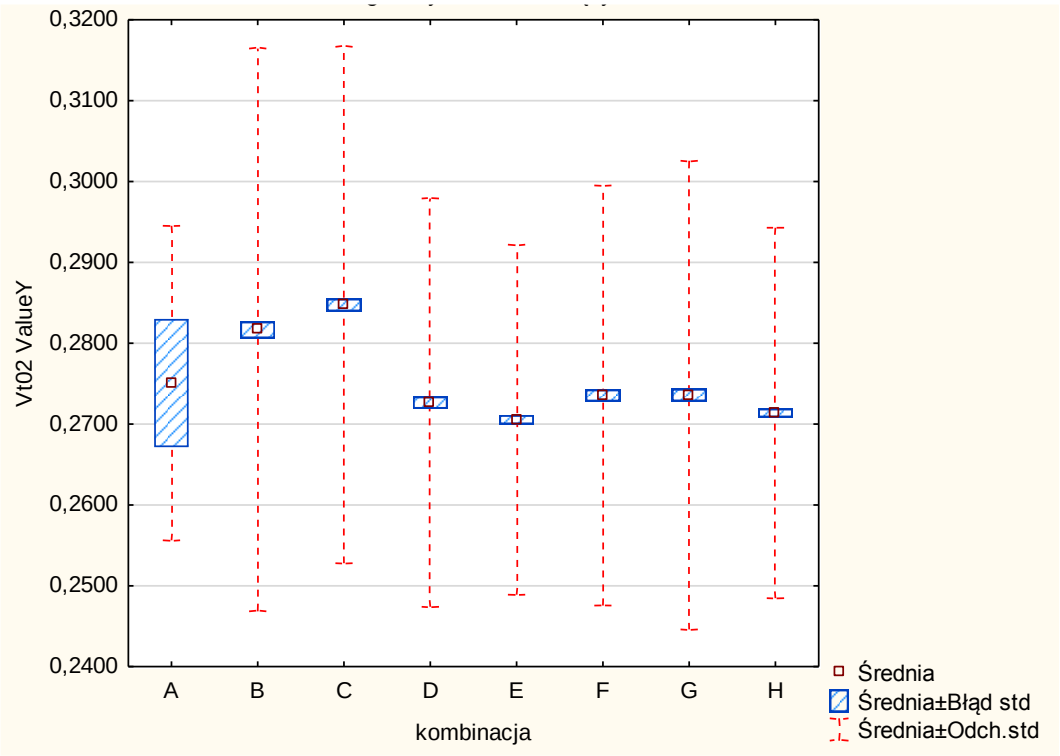
Na rysunku 49 przedstawiono charakterystykę prędkości ruchu powietrza w dolnej strefie pomiarowej w odległości ok. 0,75m od boku szklarni. W tym miejscu również podobnie jak w punkcie nr 4 kombinacja A nie zapewniła najwyższej średniej prędkości ruchu powietrza. Wykonane pomiary pokazały, że wartości średnie oscylują w przedziale od 0,304 do 0,319m·s^{-1}. Nadal kombinacja A charakteryzowała się najniższą zmiennością, dla której odchylenie standardowe wynosiło mniej niż 0,02m·s^{-1}, gdy dla pozostałych osiągało poziom nawet 0,05m·s^{-1} (kombinacja B).



Rysunek 49. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie badawczym

77:1053168840

Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic w wartości prędkości ruchu powietrza mierzonej czujnikiem nr 7 między kombinacjami doświadczenia. Kolejnym miejscem (rys. 50) analizowania prędkości ruchu powietrza był punkt nr 2 znajdujący się w górnej części siatki pomiarowej w oddaleniu 1,5m od boku szklarni. W punkcie tym podobnie jak w 4 oraz 7 kombinacja A nie zapewniła największej prędkości ruchu powietrza. W tym punkcie średnia wartość wynosiła 0,278m·s^{-1} i była niższa niż w kombinacji B oraz C, dla których była ona na poziomie odpowiednio 0, 282 i 0,285m·s^{-1}. Pozostałe warianty charakteryzowały się najniższymi wartościami. Zmienność pomiarów była na porównywalnym poziomie z poprzednimi pomiarami.



Rysunek 50. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie badawczym

Ocena statystyczna (tab. 21) różnic pomiędzy wartościami średnimi wykazała ich istnienie tylko pomiędzy dwoma kombinacjami. Było to zestawienie kombinacji C charakteryzującej się najwyższą prędkością ruchu powietrza na poziomie 0,285m·s^{-1} z wartościami najniższymi (0,271m·s^{-1}), które wystąpiły dla kombinacji E oraz H. Porównując ten punkt pomiarowy z punktem nr 7 będącym w tej samej odległości od boku szklarni, lecz dolnej jej części można zauważyć, że w tej części szklarni poszczególne kombinacje pracy systemu grzewczego słabo wpływają na prędkość ruchu powietrza. W czasie badania istotne różnice wystąpiły tylko dla dwóch kombinacji (C z E i H) ale tylko w górnej części obiektu. W tej części rejestrowano niższe prędkości niż w dolnej jej części.

78:5104906942

Analizując natomiast zmiany w prędkości ruchu powietrza nie wraz ze zmianą wysokości, lecz przy oddalaniu się od boku szklarni zaobserwowano, że najwięcej istotnych różnic dla wartości średnich wystąpiło w punkcie nr 3 (11 istotnych różnic) i nr 1 (9 istotnych różnic). W punktach tych zawsze najwyższą wartość średnią rejestrowano dla kombinacji A, a najniższą dla C. W punktach nr 2 i 4 istotne statystycznie różnice wystąpiły tylko odpowiednio dla dwóch i czterech średnich więc wpływ parametrów pracy systemu grzewczego był znacznie niższy.

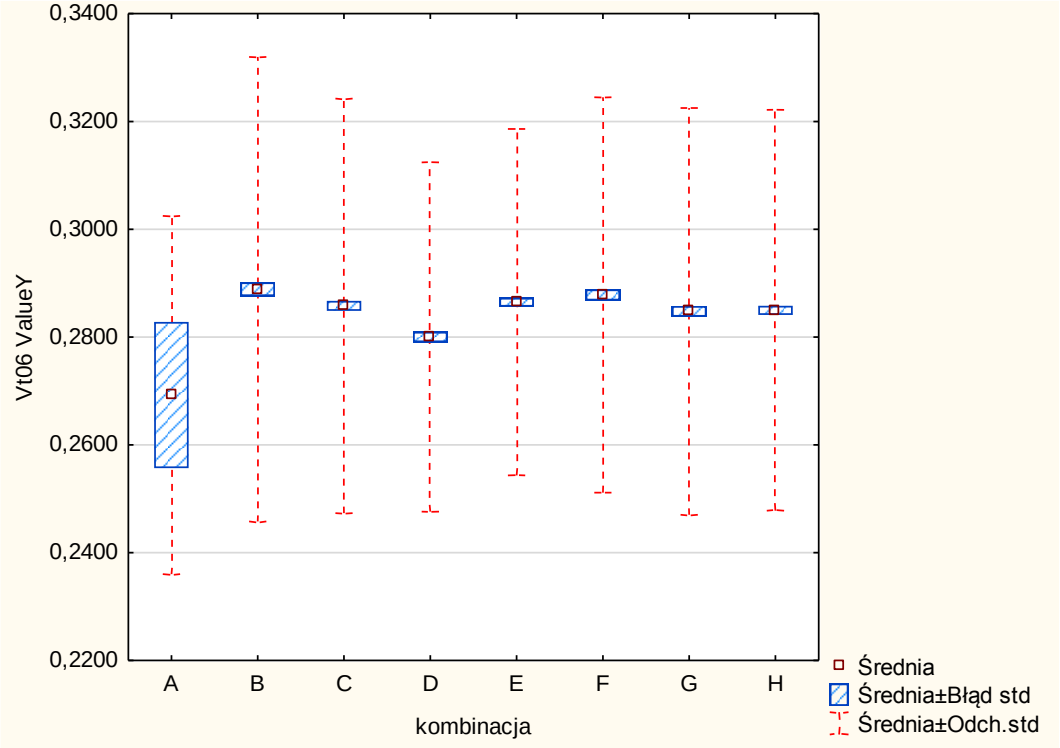
Tabela 21. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt02							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=0,275	M=0,282	M=0,285	M=0,273	M=0,270	M=0,273	M=0,273	M=0,271
A {1}	xxx							
B {2}		xxx						
C {3}			xxx					
D {4}				xxx				
E {5}			*		xxx			
F {6}						xxx		
G {7}							xxx	
H {8}			*					xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W kolejnym punkcie pomiarowym nr 6 (rys. 51) kombinacja A charakteryzowała się najniższą prędkością ruchu powietrza na poziomie 0,269m·s^{-1} (analogicznie jak dla punktów nr 2, 4 i 7). Dla pozostałych wariantów oscylowała ona w bardzo wąskim przedziale od 0,280m·s^{-1} (D) do 0,289m·s^{-1} (B). Zmienność rejestrowanych pomiarów była najmniejsza dla kombinacji A, która charakteryzowała się odchyleniem standardowym na poziomie 0,2m·s^{-1}. W pozostałych pomiarach zawierała się ona w zakresie od 0,3 do 0,5m·s^{-1}.

79:2745266128



Rysunek 51. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie badawczym

W punkcie tym również wybór konfiguracji parametrów pracy systemu grzewczego nieznacznie wpływała na prędkość ruchu powietrza. Statystycznie istotne różnice (tab. 22) pomiędzy wartościami średnimi uzyskano tylko dla trzech par. Było to połączenie kombinacji A z B oraz F. Kombinacja A charakteryzowała się najniższa wartością średnią natomiast w B i F prędkość była najwyższa i wynosiła odpowiednio 0,289 i 0,288m·s^{-1}.

Tabela 22. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt06							
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{6}	{7}	{8}
	M=0,26925	M=0,289	M=0,286	M=0,280	M=0,286	M=0,288	M=0,285	M=0,285
A {1}	xxx							
B {2}	*	xxx						
C {3}			xxx					
D {4}				xxx				
E {5}	*				xxx			
F {6}	*					xxx		
G {7}							xxx	
H {8}								xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

80:5637008111

Podsumowując ta część analizy oceniła wpływ kombinacji pracy systemu grzewczego na prędkość przepływu powietrza w zależności od odległości od ściany szklarni. Najwięcej istotnych różnic pomiędzy średnimi prędkościami ruchu powietrza zarejestrowano w punktach pomiarowych nr 5 i 9, dla których istotnie różniących się wartości przeciętnych było odpowiednio 9 i 13. W każdym z tych punktów kombinacja A istotnie różnił się od wszystkich pozostałych i charakteryzowała się ona największą prędkością ruchu powietrza na poziomie 0,294 i 0,327m·s^{-1}. Najniższą natomiast prędkość rejestrowano dla kombinacji C i wynosiła ona odpowiednio 0,248 i 0,268m·s^{-1}. Dla kombinacji A w punkcie pomiarowym nr 9 będącym przy ścianie szklarni w dolnej jej części zarejestrowano wyższą prędkość niż w tej samej odległości, lecz w jej górnej części.

7.2.4. Modelowanie prędkości ruchu powietrza w przekroju szklarni

W czasie analiz zaobserwowano występowanie statystycznie istotnej korelacji pomiędzy temperaturą powietrza wewnątrz obiektu, a prędkością przepływu powietrza (tab. 23). Najsilniejsza zależność występowała pomiędzy prędkością ruchu powietrza w punkcie pomiarowym 2 i 6, a temperatura powietrza w pozostałych punktach. Była to korelacja dodatnia, a wyznaczone współczynniki korelacji oscylowały w przedziale od 0,56 do 0,61. Dla punktów numer 1, 5, 7 i 9 zaobserwowano słabszą siłę korelacji, lecz nadal była ona statystycznie istotna. Jedynie dla dwóch punktów pomiarowych prędkości ruchu powietrza tj. 3 i 4 kierunek był ujemny co świadczy o zmniejszaniu się prędkości przepływu powietrza wraz ze wzrostem jego temperatury. W tych przypadkach wartości współczynników korelacji oscylowały pomiędzy – 0,09 a – 0,25.

Tabela 23. Współczynnik korelacji między prędkością ruchu powietrza a temperaturą powietrza

Zmienna	Korelacje (B_kombinacja)							
	Vt09	Vt05	Vt03	Vt01	Vt04	Vt07	Vt02	Vt06
Pt01	0,2233*	0,3143*	-0,2490*	0,0894*	-0,0936*	0,2007*	0,6052*	0,5767*
Pt02	0,2422*	0,3260*	-0,2409*	0,0997*	-0,0893*	0,2057*	0,5882*	0,5628*
Pt04	0,2418*	0,3262*	-0,2324*	0,0890*	-0,1126*	0,1822*	0,5856*	0,5615*
Pt05	0,2424*	0,3335*	-0,2364*	0,1076*	-0,0820*	0,2116*	0,5947*	0,5676*
Pt06	0,2304*	0,3138*	-0,2429*	0,0981*	-0,0828*	0,2098*	0,5962*	0,5685*
Pt07	0,2284*	0,3110*	-0,2501*	0,0924*	-0,0871*	0,2079*	0,6079*	0,5796*
Pt08	0,2430*	0,3203*	-0,2424*	0,0913*	-0,0988*	0,1968*	0,5878*	0,5608*
Pt10	0,2232*	0,3118*	-0,2500*	0,0907*	-0,0862*	0,2096*	0,6136*	0,5815*
Pt11	0,2364*	0,3222*	-0,2449*	0,0931*	-0,0983*	0,1977*	0,5934*	0,5671*
Pt12	0,2409*	0,3197*	-0,2416*	0,0900*	-0,1010*	0,1965*	0,5906*	0,5640*

* oznaczone współczynników korelacji statystycznie istotnych z p = 0,05

81:4429587001

Podjęto więc próbę zamodelowania prędkości ruchu powietrza w poszczególnych obszarach szklarni na podstawie zaprezentowanych w powyższej części pracy zmiennych niezależnych. Do budowy modeli regresyjnych wykorzystano dostępny w programie Statystyka moduł pozwalający na dobór optymalnego zestawu zmiennych niezależnych metodą regresji postępującej. W algorytmie tym jako pierwszą zmienną niezależną wprowadza się tą, która w najlepszym stopniu opisuje zmiany zmiennej zależnej. Następnie wprowadzane są kolejne zmienne niezależne i ocenia się jej wpływ na jakość modelu. Proces ten jest powtarzany do momentu wykorzystania wszystkich potencjalnych zmiennych niezależnych, istotnie wpływających na proces lub stwierdzenia braku poprawy jego jakości po wprowadzeniu kolejnej zmiennej na jego wejście. Z wykonanej analizy regresji wynika, że prędkość przepływu powietrza w punkcie pomiarowym nr 6 można opisać na podstawie 7 zmiennych niezależnych. Należą do nich: prędkość wiatru na zewnątrz obiektu w $m \cdot s^{-1}$, temperatura powietrza w punkcie pomiarowym Pt02, Pt05, Pt07, Pt08 wrażona w °C, natężenie promieniowania słonecznego w $W \cdot m^{-2}$, oraz temperatura powietrza na zewnątrz obiektu w °C.

Wykonana ocena statystyczna modelu pozwoliła na jego zapis w postaci jawnej:

$$Vt_06 = 0{,}265 + 0{,}004\ Vz + 0{,}04\ Pt_7 - 0{,}016\ Pt_5 - 0{,}021\ Pt_2 - 0{,}030\ Pt_8 + 0{,}000031\ Es - 0{,}0081 Tz \quad (1)$$

Opracowany model w 49 % wyjaśniał zmiany prędkości przepływu, a błąd estymacji, czyli średnia różnica pomiędzy wartością rzeczywistą, a uzyskaną z modelu była na poziomie $0{,}0278 m \cdot s^{-1}$. Z wykonanej analizy wynika, że czynnikami najsilniej wpływającymi na prędkość przepływu powietrza była jego temperatura w punkcie 7 oraz 8. Spośród analizowanych zmiennych w przypadku wzrostu poziomu $m \cdot s^{-1}$, Pt07, $W \cdot m^{-3}$ obserwowano wzrost prędkości. Dla pozostałych zmiennych występowała tendencja odwrotna.

Eliminacja czynników zewnętrznych i budowa modelu w oparciu tylko o parametry opisujące temperaturę w poszczególnych częściach obiektu spowodowała pogorszenie jakości modelu. Model regresyjny budowany w oparciu o zmienną opisującą temperaturę w punkcie pomiarowym nr 1, 4, 5, 7, 8 i 10 wyjaśniał przebieg zjawiska już tylko w 43%, a błąd estymacji wzrósł do $0{,}0291 m \cdot s^{-1}$.

W czasie budowy modelu regresyjnego opisującego zmiany prędkości powietrza w punkcie pomiarowym nr 2 za statystycznie istotne uznano następujące zmienne: temperatura powietrza w punkcie pomiarowym Pt02, Pt05, Pt06, Pt07, Pt 10, Pt11 wrażona

82:2184376336

w °C, natężenie promieniowania słonecznego w $W \cdot m^{-2}$, oraz temperatura powietrza na zewnątrz obiektu w °C. Taki zestaw zmiennych niezależnych pozwolił na zbudowanie modelu wyjaśniającego zmiany prędkości przepływu powietrza prawie w 60%. Był to wskaźnik oceny jakości wyższy niż dla pozostałych modeli o prawie 20%. Wyznaczając analizowaną wielkość na podstawie opracowanego modelu należy się spodziewać błędu estymacji na poziomie $0{,}020 m \cdot s^{-1}$. Podobnie jak w poprzednich analizach eliminacja zmiennych opisujących parametry zewnętrzne (temperatura powietrza oraz natężenie promieniowania słonecznego) spowodowało pogorszenie jakości modelu. Wyjaśniał on już analizowane zjawisko w 52 %, a błąd estymacji wzrósł do $0{,}0219 m \cdot s^{-1}$.

W analogiczny sposób zbudowano model regresyjny dla prędkości ruchu powietrza w punkcie pomiarowym nr 7. Spośród badanej grupy zmiennych niezależnych jako statystycznie istotnie wpływające uznano 6 zmiennych. Był to zmienne opisujące temperaturę powietrza w punktach: Pt01, Pt04, Pt05, Pt06, Pt10, Pt11.

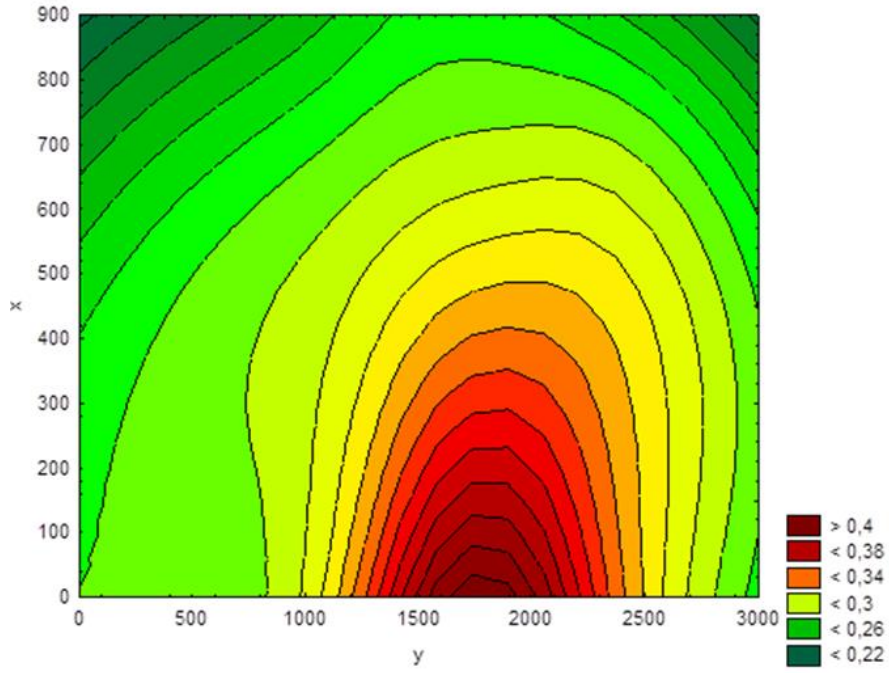
$$Vt_07 = 0{,}325 + 0{,}04\ Pt_10 + 0{,}03\ Pt_5 - 0{,}07\ Pt_4 - 0{,}04\ Pt_1 + 0{,}04\ Pt_6 - 0{,}04\ Pt_11 \quad (2)$$

Opracowany model tylko w 20% opisywał zmiany prędkości przepływu powietrza, a średni błąd oszacowania parametru był na 0,2418. Najsilniejszy wpływ wystąpił dla temperatury powietrza w punkcie nr 4 i był on prawie dwukrotnie większy niż dla pozostałych. Wzrost temperatury w punkcie 5, 6 i 10 powodował również wzrost prędkości przepływu powietrza. Dla pozostałych zmiennych ich wpływ był odmienny.

7.2.5. Analiza przestrzennej zmienności parametrów mikroklimatu w obiekcie badawczym

Obiekt badawczy ze względu na brak roślin umożliwiał wykonanie badan w szerokim zakresie zmian nastaw pracy systemu grzewczego. W pracy analizowano 8 kombinacji, a szczegółowe parametry pracy systemu grzewczego zestawiono w tabeli 4. W celu przedstawienia przestrzennego zróżnicowania temperatury i pionowego ruchu powietrza w obszarze siatki pomiarowej opracowano w programie Statistica 13.1, wykresy warstwicowe obrazujące te zjawiska (rys. 52). Wyniki pomiarów zostały przedstawione w układzie współrzędnych XYZ, a graficzną postać powierzchni opracowano zgodnie z procedurą wygładzania najmniejszych kwadratów ważonych odległością.

83:7139233502



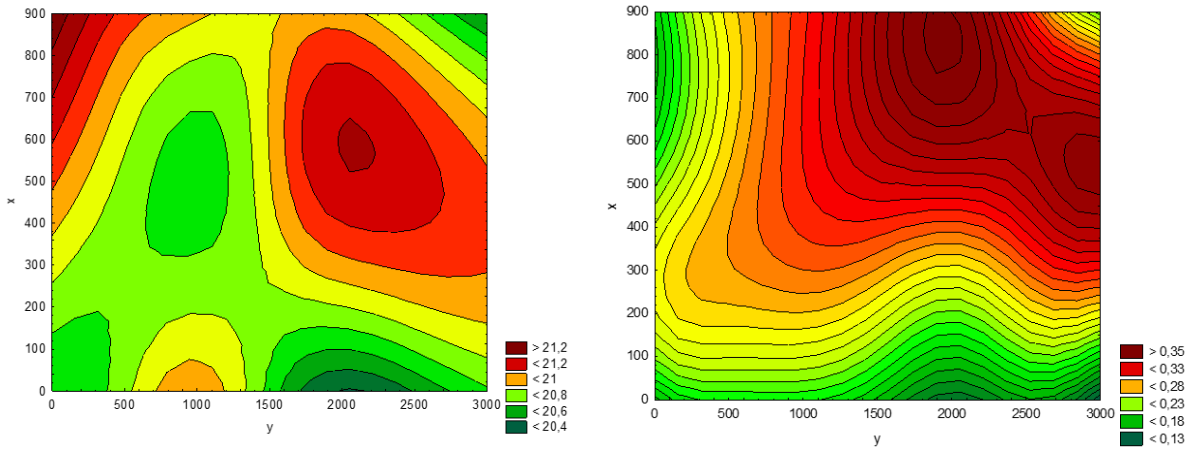
Rysunek 52. Przykładowy wykres warstwicowy prezentujacy przestrzenny rozkładu prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej

Na rysunku (rys. 53-a) przedstawiono opracowany rozkład temperatur w obszarze siatki pomiarowej dla kombinacji A. Najwyższa temperatura wystąpiła w lewym górnym rogu oraz po prawej stronie w górnej jej części. Temperatura była wyrównana, a zakres jej zmian był na poziomie 1^{o}C. Zgodnie z oczekiwaniami najniższej temperatury można się spodziewać w dolnej części.

Temperatura powietrza jest jednym z czynników determinujących ruch powietrza w obiekcie szklarniowym, w którym jest wykorzystywana wentylacja mechaniczna. Rozkład przestrzenny prędkości ruchu powietrza (rys. 53-b) wskazuje na jego wzrost w górnej części siatki pomiarowej szczególnie w prawej części. Jest to obszar zbliżony do miejsc, w których obserwowano wzrost temperatury powietrza. Prędkość przepływu powietrza zmieniała się w przedziale od 0,1 do ponad 0,3m·s^{-1}. Były to więc wartości zalecane w uprawie roślin pod osłonami.

84:1157324569

a) *b)*

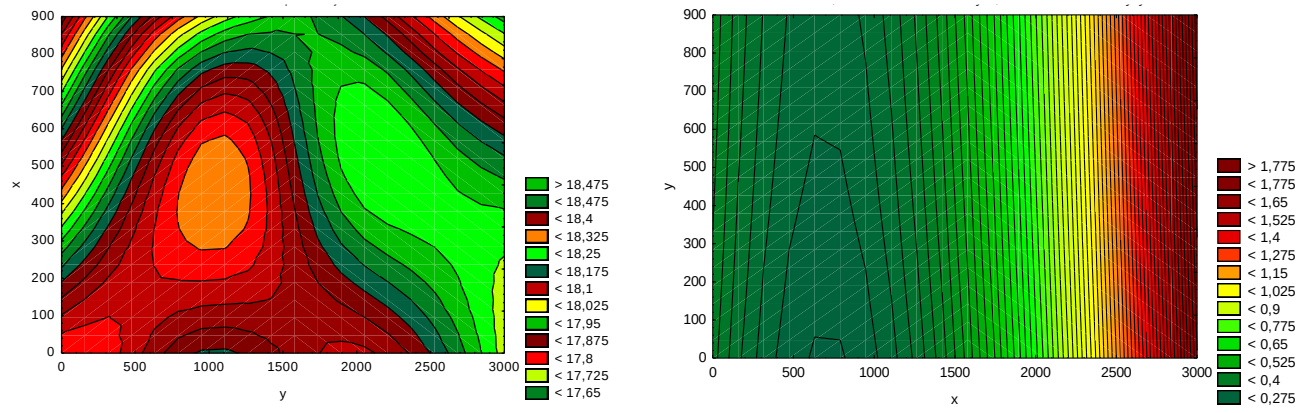


Rysunek 53. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji A)

Przestrzenny rozkład temperatury w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji B) przedstawiono na rysunku (rys. 54-a). Na wykresie warstwicowym skala kolorystyczna oddaje rozkład temperatur pomiędzy poszczególnymi punktami pomiarowymi. Osie X i Y orientacyjnie odwzorowują siatkę pomiarową i tak graficznie zobrazować można rozkład temperatury pomiędzy rzeczywistymi punktami na siatce pomiarowej.

Analogicznie można zwizualizować przestrzenny rozkładu prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (rys. 54-b). Tutaj jednak skala kolorystyczna odpowiadać będzie różnym wartościom prędkości przepływu powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych.

a) *b)*



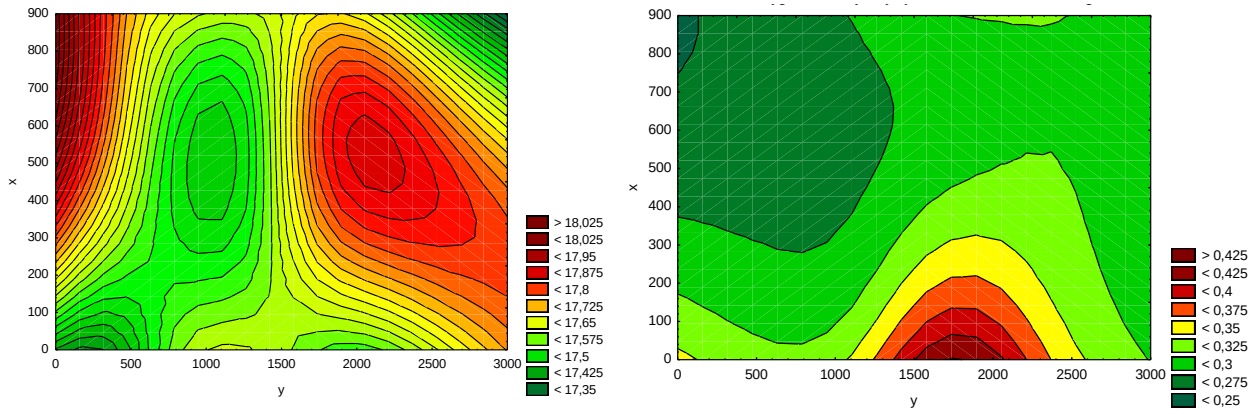
Rysunek 54. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji B)

Wykresy przestrzennego rozkładu temperatury i prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej przeanalizowano kolejno dla pozostałych sześciu kombinacji C, D, E, F, G, H. Dla wariantu C najwyższej temperatury (rys. 55-a) w siatce pomiarowej na

85:4252895955

poziomie powyżej 18°C należy się spodziewać w lewym górnym rogu, czyli miejscu, w którym występuje najniższa prędkość przepływów powietrza na poziomie poniżej 0,25m·s^{-1}. Wzrost temperatury do poziomu 17,8°C widać też po prawej stronie wykresu w obszarze, w którym prędkość przepływu powietrza jest na poziomie do 0,325m·s^{-1}. Temperatura w całym obszarze objętym analizą była wyrównana i różniła się mniej niż 0,7°C. Większe zróżnicowanie występowało natomiast dla prędkości przepływu powietrza (rys. 55-b). Najwyższa prędkość przepływu, na poziomie powyżej 0,4m·s^{-1}, występowała w dolnej części siatki pomiarowej w odległości ok 1-1,5m od ściany bocznej. Jak widać na wykresie na większości obszaru objętego analizą ruch powietrza nie przekracza 0,3m·s^{-1}.

a) *b)*

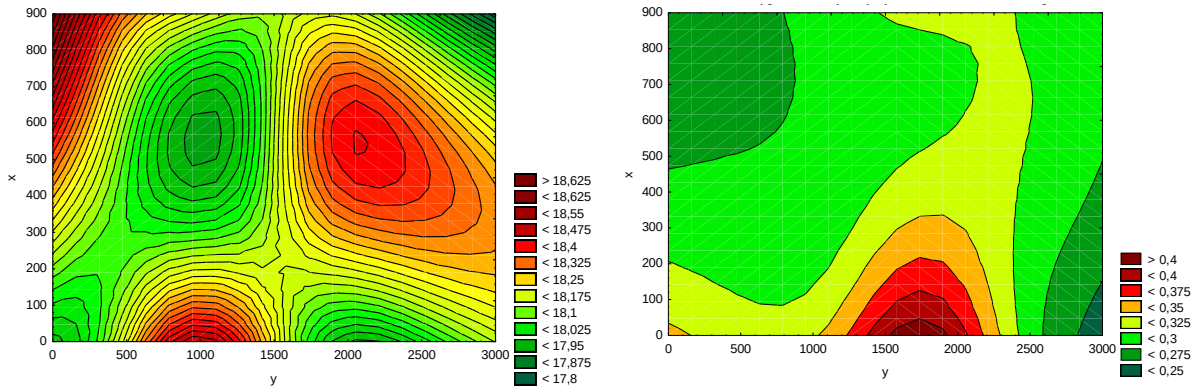


Rysunek 55. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji C)

Dla Kombinacji D najwyższa temperatura (rys. 56-a) jest zauważalna w lewym górnym rogu wykresu podobnie jak dla kombinacji C i wynosi powyżej 18,62°C. Prędkość powietrza w tym miejscu wynosi poniżej 0,25m·s^{-1} co widać na wykresie prędkości przepływu powietrza dla kombinacji D (rys. 56-b). Na wykresie można też zauważyć, że temperatury w granicy 18,4°C występują po prawej stronie w górnej części wykresu, a na dole w odległości ok. 1 metra do lewej strony siatki pomiarowej zauważalna jest temperatura na granicy 18,6°C. W tych miejscach na wykresie prędkość przepływu powietrza wynosi mniej niż 0,325m·s^{-1}. Na większości wykresu ruchu powietrza dominuje kolor zielony co świadczy o tym, że na większości obszaru pomiarowego prędkość ruchu powietrza była poniżej 0,3m·s^{-1}. Charakterystyczne jest natomiast występowanie obszaru, w którym prędkość powietrza była większa niż 0,3m·s^{-1} – odcina się on jasnym kolorem na wykresie i przebiega przez znaczną jego część, w odróżnieniu od wykresu kombinacji C, gdzie obszar o takich parametrach występował tylko do połowy wysokości obszaru pomiarowego.

86:3083837523

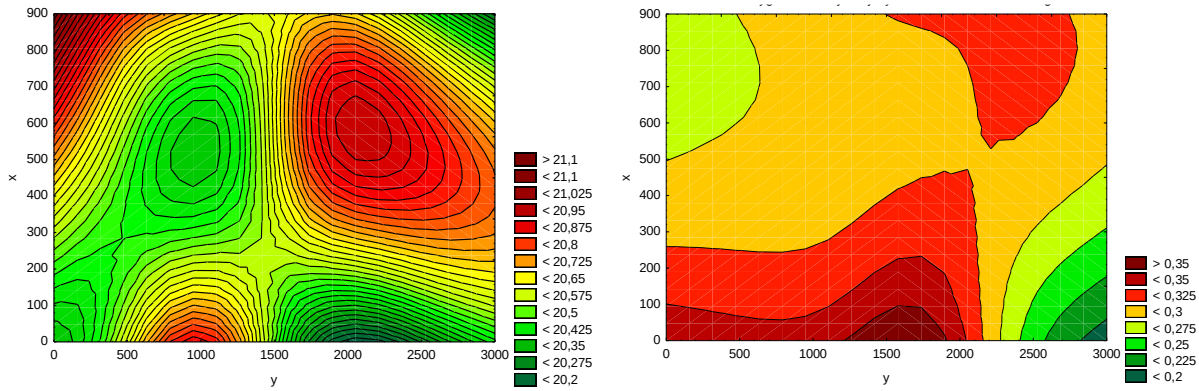
a) *b)*



Rysunek 56. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji D)

Dla kombinacja E (rys. 57-a) odnotowano jedne z najwyższych temperatur, co znajduje odzwierciedlenie graficzne również na poniższym wykresie rozkładu temperatur. Dla tej kombinacji temperatury osiągały ponad 21°C. W lewym górnym rogu wykresu widać wyraźnie odznaczający się ciemnoczerwony kolor, który zgodnie z legendą oznacza temperatury powyżej 21,1°C. Najniższe wartości temperatury (co w przypadku kombinacji E stanowi ok 20,2°C) widoczne są na dole wykresu. W miejscu najwyższej temperatury (lewy górny róg) prędkość ruchu powietrza wynosi mniej niż 0,275m·s^{-1} (rys. 57-b). Wykres rozkładu temperatur ma kształt podobny do wykresu dla wyżej opisanych kombinacji C i D, występujące temperatury są jednak wyższe dla E. W środkowej części na dole wykresu widać obok siebie (w odległości ok.1 m) obszary o różnicy temperatur prawie 1°C. Prędkość ruchu powietrza pomiędzy tymi dwoma obszarami wynosi więcej niż 0,35m·s^{-1}. W prawym dolnym rogu wykresu prędkości ruchu powietrza widać kolorystyczne odzwierciedlenie najniższej wartości tego parametru, w miejscu tym wartość ta nie przekracza 0,2m·s^{-1}

a) *b)*

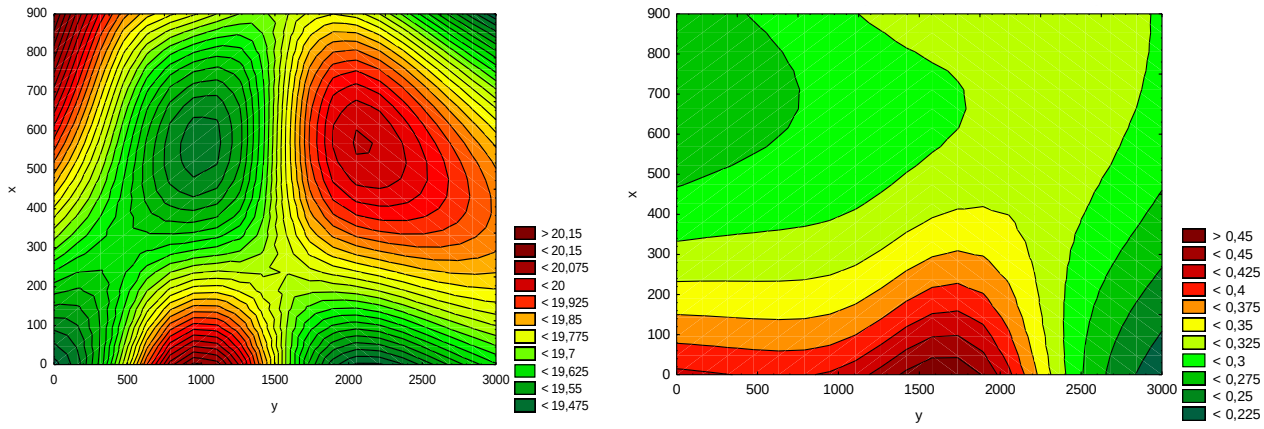


Rysunek 57. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji E)

87:6299746011

Wykres przestrzennego rozkładu temperatur dla kombinacji F (rys. 58-a) również ma zbliżony kształt do wcześniej opisanych wykresów, temperatury dla tej kombinacji mają jednak inny zakres. Najwyższe temperatury widać w lewym górnym rogu wykresu oraz dolnej jego części w odległości ok 1m od lewej strony siatki pomiarowej – są to temperatury powyżej 20,15°C. W dolnej oraz środkowej części wykresu widać dwa przeciwstawne do siebie pod względem temperatury obszary. W przypadku tej kombinacji zarejestrowane prędkości powietrza (rys. 58-b) były najwyższe spośród wszystkich kombinacji i osiągały nawet poziom powyżej 0,45m·s^{-1}. Na wykresie widać wyraźnie zarysowane kolorami czerwonym i pomarańczowym obszary o podwyższonej prędkości przepływu powietrza. Szerokim pasem odznacza się też obszar o wartości prędkości przepływu powietrza równej ok 0,325m·s^{-1}, który rozdziela dwa obszary o najniższych wartościach prędkości ruchu powietrza (0,25m·s$^{-1)}$ występujące w prawym dolnym i lewym górnym rogu siatki pomiarowej.

a) *b)*



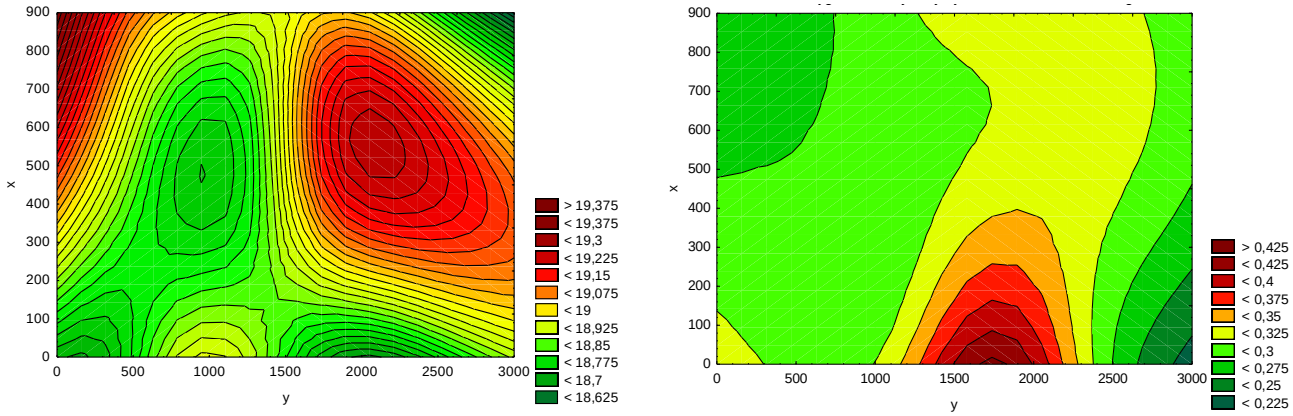
Rysunek 58. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji F)

Dla kombinacji G rejestrowano temperatury (rys. 59-a) niższe niż dla E i F, lecz wyższe niż dla C i D. W prawym górnym rogu widać odzwierciedlenie kolorystyczne najniższych wartości temperatur – poniżej 18,62°C. Po przeciwnej stronie wykresu w lewym górnym rogu widać odzwierciedlenie temperatur najwyższych dla danej kombinacji – powyżej 19,375°C. Widać na wykresie dwa przeciwstawne obszary temperaturowe pomiędzy którymi temperatury wahają się w obrębie 0,5°C. Znacznie słabiej widoczne jest jednak zróżnicowanie temperatur w dolnej strefie obszaru pomiarowego. W obszarze tym temperatury nie przekraczały 19°C. Wykres prędkości przepływu powietrza dla kombinacji G (rys. 59-b) odzwierciedla graficznie dużo mniejszy ruch powietrza z prawej i lewej strony obszaru pomiarowego niż w środkowej części wykresu– najniższa wartość zarejestrowana była w prawym dolnym rogu wykresu – wynosiła poniżej 0,225m·s^{-1}. Można też zauważyć

88:5479234170

wstępowanie obszaru o większym ruchu powietrza - w dolnej części tego wykresu, w odległości ok 1,5 – 2m od lewej strony siatki pomiarowej – gdzie jego wartość zmienia się od 0,425m·s^{-1} do 0,3m·s^{-1} wraz z przesuwaniem się w górę wzdłuż osi X.

a) *b*



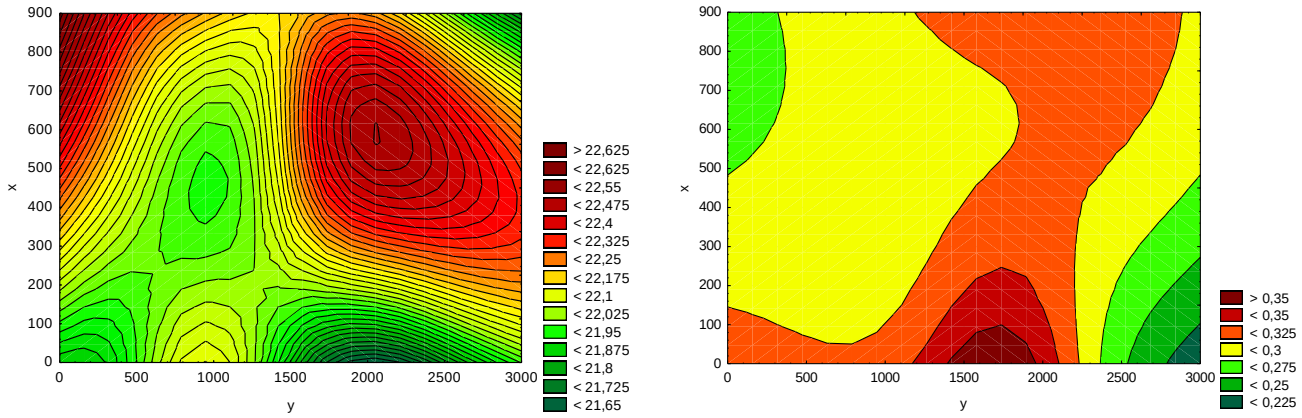
Rysunek 59. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji G)

Kombinacja H charakteryzowała się najwyższymi zarejestrowanymi temperaturami (rys. 60-a). Przekroczyła ona 22,6°C co widać wyraźnie na wykresie. W lewym górnym rogu wykresu i w środowej prawej części obszaru pomiarowego dominuje kolor ciemno czerwony co odzwierciedla temperatury powyżej 22,32°C. W dolnej części wykresu widać znacznie mniejsze zróżnicowanie temperatury. Najniższe zarejestrowano w dolnej części strefy pomiarowej w odległości ok 2 m od lewej strony siatki pomiarowej.

Dla tego wariantu nie zarejestrowano wysokich pomiarów prędkości ruchu powietrza (rys. 60-b), co zdarzało się w przypadku innych kombinacji. Najwyższą wartość dla prędkości ruchu powietrza zauważa się w dolnej części wykresu, w odległości ok 1.5 - 2m od lewej strony siatki pomiarowej. W obszarze pomiarowym widać też wyraźnie rozdzielone obszary o niższych wartościach prędkości ruchu powietrza. Są one rozdzielone obszarem o prędkości ok. 0,325m·s^{-1}, który znajduje się na środku wykresu.

89:2319268606

a) *b)*



Rysunek 60. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji H)

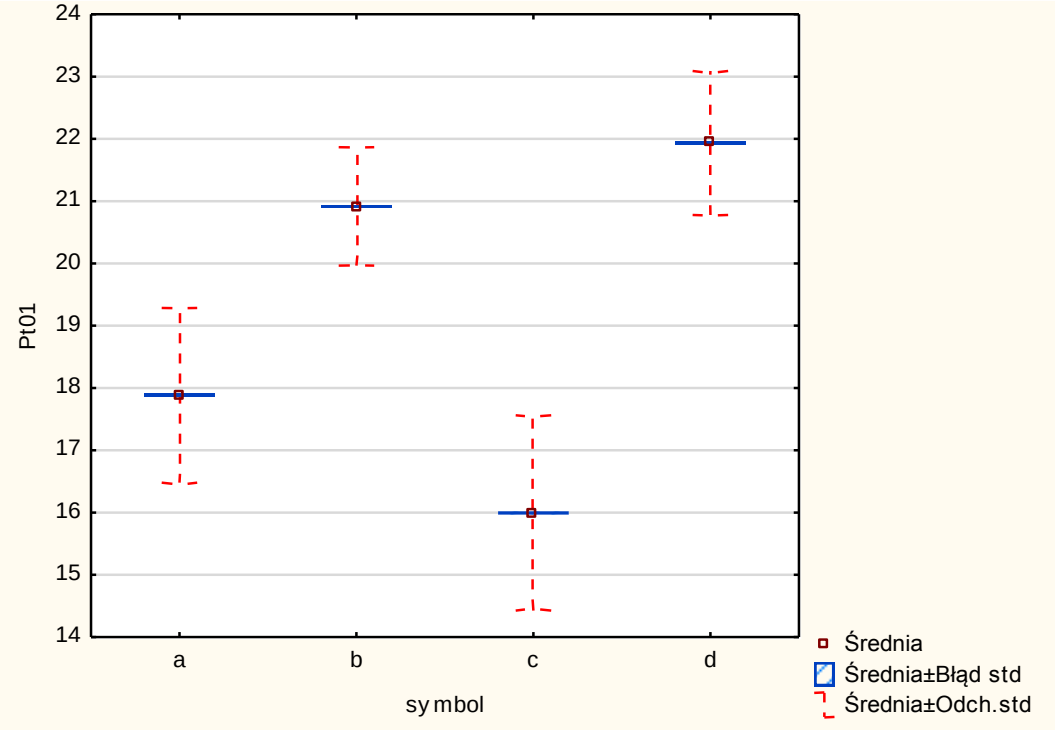
7.3. Obiekt rzeczywisty

W obiekcie rzeczywistym ze względu na reżim technologiczny uprawianych roślin, wyodrębniono cztery kombinacje nastaw temperatur, które stanowiły punkt wyjścia do różnicowania kombinacji wpływu parametrów pracy sytemu grzewczego na prędkość ruchu powietrza. Do analiz wybrano tylko te okresy, w których warunki mikroklimatyczne na zewnętrz obiektu szklarniowego były zbliżone do warunków zewnętrznych obiektu badawczego. System grzewczy zastosowany w obiekcie rzeczywistym pozwalał na bezpośrednią implementację struktury nastaw temperatury czynnika grzewczego w elementach systemu grzewczego. W przedmiotowym obiekcie dokonano walidacji pozwalającej na uzyskanie modelowego rozkładu temperatury i ruchu powietrza w układzie poprzecznym szklarni. Szczegółowe wyniki zarejestrowane dla poszczególnych punktów pomiarowych (rozmieszczonych w sposób analogiczny jak dla obiektu badawczego) przedstawiono na rysunkach rys. 61 – rys. 80 oraz w tabelach tab. 24 – tab. 43.

7.3.1. Charakterystyka temperatury powietrza w obiekcie rzeczywistym

W kolejnej części pracy dokonano w sposób analogiczny jak dla obiektu badawczego analizy temperatury powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej. W obiekcie rzeczywistym ze względu na reżimu technologiczny uprawianych roślin badania ograniczono do czterech kombinacji pracy systemu grzewczego. Wybrane kombinacje charakteryzowały się analogicznymi parametrami pracy jak w obiekcie badawczym. Na rysunku 61 przestawiono wpływ kombinacji parametrów pracy systemu grzewczego na temperaturę powietrza w pierwszym punkcie pomiarowym obiektu rzeczywistego.

90:5519466525



Rysunek 61. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie rzeczywistym

Punkt pomiarowy zlokalizowany był w lewym dolnym rogu siatki pomiarowej. Najniższą średnią temperaturę na poziomie 16°C zarejestrowano dla kombinacji c. Największy wzrost temperatury na poziomie prawie 3°C wystąpił pomiędzy wariantami a i b. Wybór kombinacji c pozwalał na uzyskanie najwyższej średniej temperatury wynoszącej 22°C. Wszystkie warianty z wyjątkiem wariantu b charakteryzowały się zmiennością, która opisana za pomocą odchylenia standardowego była większa od 1°C. Wskaźnik ten dla kombinacji b był najniższy i wynosił poniżej 1°C. Przeprowadzona ocena istności różnic wykazała (tab. 24) istotne różnice we wszystkich wariantach doświadczenia dla czujnika numer 1.

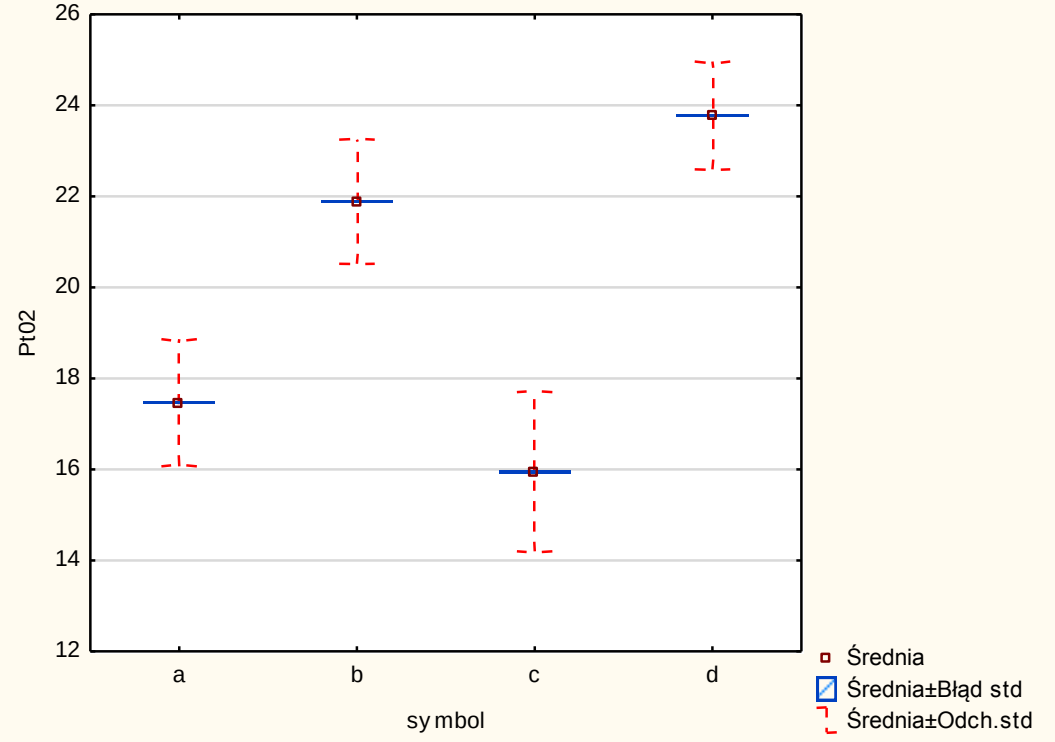
Tabela 24. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt01			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,883	M=20,916	M=15,994	M=21,935
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

91:3578591424

W punkcie nr 2 (rys. 62), czyli nadal po lewej stronie siatki pomiarowej, lecz na wysokości 0,4m, również została utrzymana tendencja odnośnie do poziomu wartości średnich temperatur dla poszczególnych kombinacji ogrzewania, podobnie jak dla pierwszego punktu pomiarowego.



Rysunek 62. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie rzeczywistym

Nadal wariant c charakteryzował się najniższą temperaturą, a d najwyższą. Zaobserwowano jednak pewne zmiany odnośnie do wartości średnich. Wzrost w porównaniu do punktu nr 1 wystąpił dla kombinacji b i d, który były na poziomie odpowiednio 1 i 1,8℃. W pozostałych przypadkach wystąpił spadek do poziomu 17,43 ℃ dla wariantu a i 15, 95℃ dla wariantu c. Były to jednak bardzo małe różnice na poziomie odpowiednio 0,45℃ i 0,05℃. Zmienność rejestrowanych parametrów mierzona odchyleniem standardowym dla wszystkich pomiarów była na podobnym poziomie i wynosiła do 1,5℃. Podobnie jak w poprzednim przypadku wszystkie wartości średnie istotnie różniły się pomiędzy sobą (tab.25).

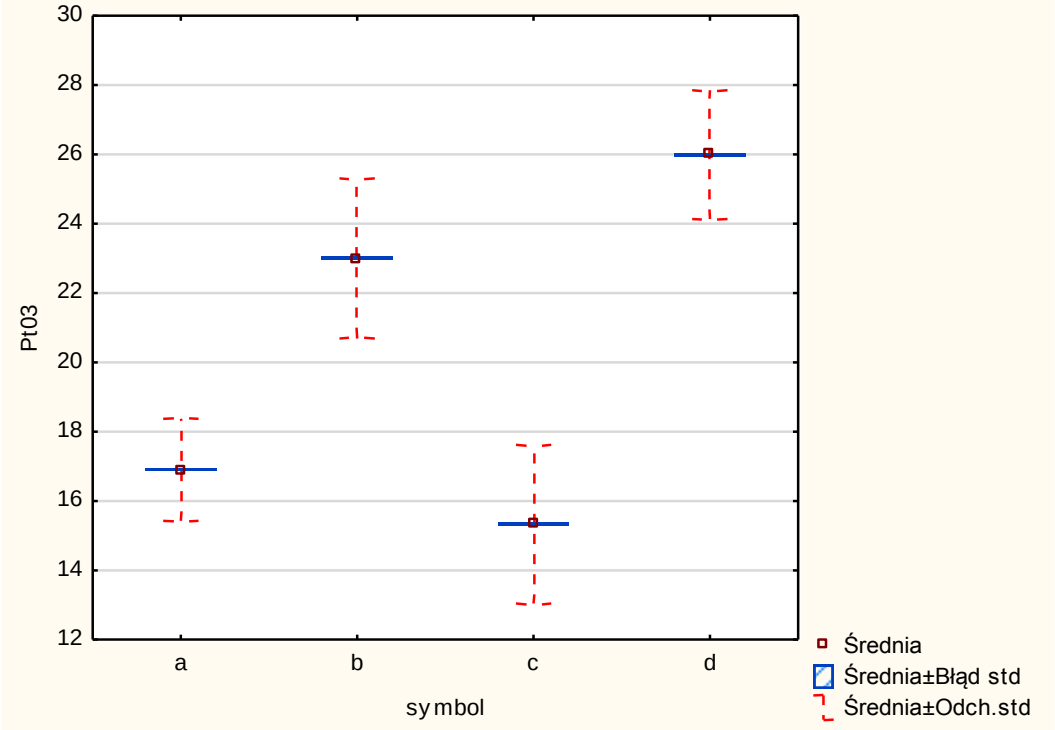
92:5624036466

Tabela 25. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt02			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,463	M=21,884	M=15,948	M=23,778
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie nr 3 (rys. 63) zarejestrowano dalszy wzrost temperatury dla kombinacji b i d. Średnia wartość temperatury w tych punktach osiągnęła poziom 23°C i 26°C. Została również utrzymana tendencja obniżania się temperatury dla wariantów a i c. Wyniosła ona odpowiednio 16,9°C i 15,33°C.



Rysunek 63. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 3 w obiekcie rzeczywistym

Najniższym zróżnicowaniem wyników pomiarów charakteryzował się wariant a dla którego odchylenie standardowe wyniosło 1,5°C w czasie, gdy dla b i c był wyższe niż 2°C. Analogicznie jak w poprzednich pomiarach wyznaczone wartości średnie były istotnie różne od siebie (tab. 26).

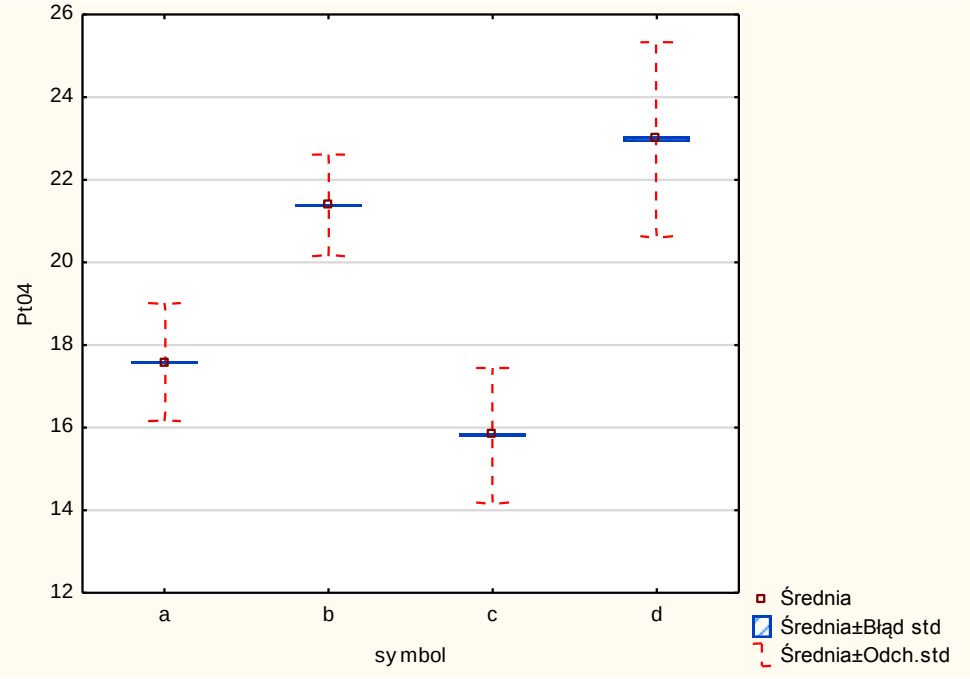
93:9498718813

Tabela 26. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 3 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt03			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=16,901	M=22,999	M=15,333	M=25,995
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie pomiarowym numer 4 (rys. 64), który jest zlokalizowany w dolnej strefie pomiarowej, lecz w po prawej stronie czujnik o numerze 01 nadal najniższą temperaturę średnią uzyskano dla kombinacji c. Była ona na poziomie 15,82℃ podczas gdy maksymalną wartość na poziomie prawie 23℃ zarejestrowano dla kombinacji d. Przeciętne wartości temperatury w tym punkcie były bardzo zbliżone do pomiarów w lewym skrajnym narożniku.



Rysunek 64. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie rzeczywistym

Dla tej kombinacji występowała też największa zmienność rejestrowanych pomiarów charakteryzująca się odchyleniem standardowym na poziomie powyżej 2℃ w czasie, gdy dla pozostałych była prawie dwukrotnie mniejsza. Nadal jednak były podstawy do odrzucenia hipotezy o równości wartości średnich dla poszczególnych pomiarów (tab. 27).

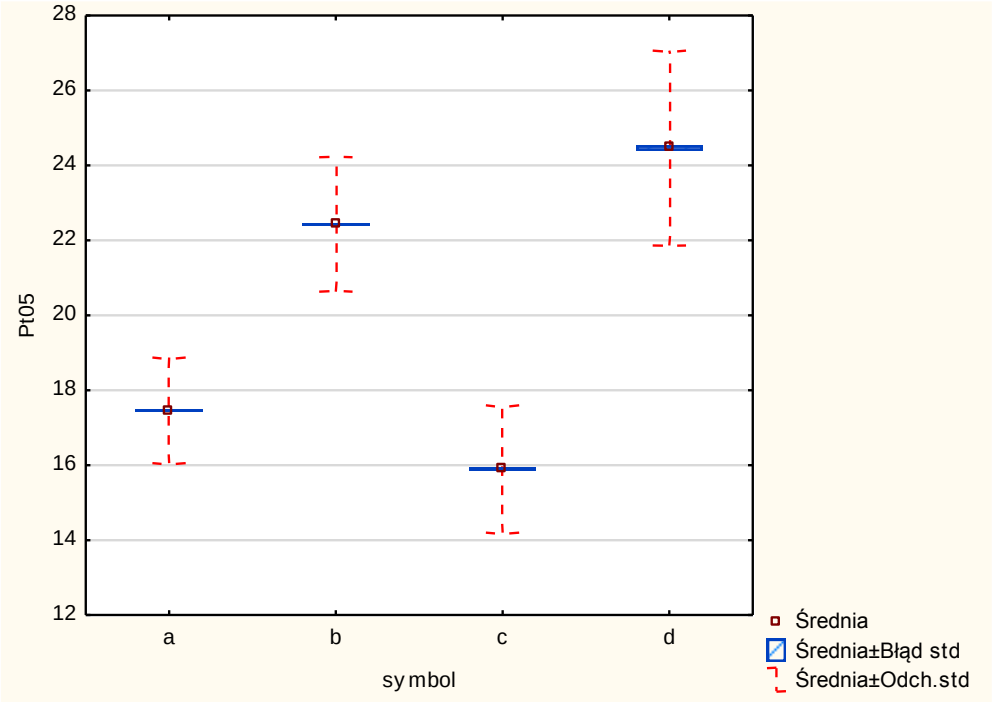
94:3930377179

Tabela 27. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt04			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,586	M=21,378	M=15,817	M=22,981
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie pomiarowym nr 5 (rys. 65) dla kombinacji a i c uzyskano analogiczną wartość średnią (odpowiednio 17,45 i 15,90°C) jak w punkcie 2, zlokalizowanym na tej samej wysokości, lecz w lewym skrajnym rzędzie siatki pomiarowej. Wariant b i c natomiast charakteryzował się wyższą średnią temperaturą (22,43°C i 24,47°C) o ok. 0,6°C – 0,7°C.



Rysunek 65. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie rzeczywistym

Kombinacja d charakteryzowała się największą zmiennością, dla której odchylenie standardowe przekraczało 2,5°C, gdy dla kombinacji a było o połowę niższe. Nadal wyznaczone wartości średnie istotnie różniły się od siebie (tab. 28).

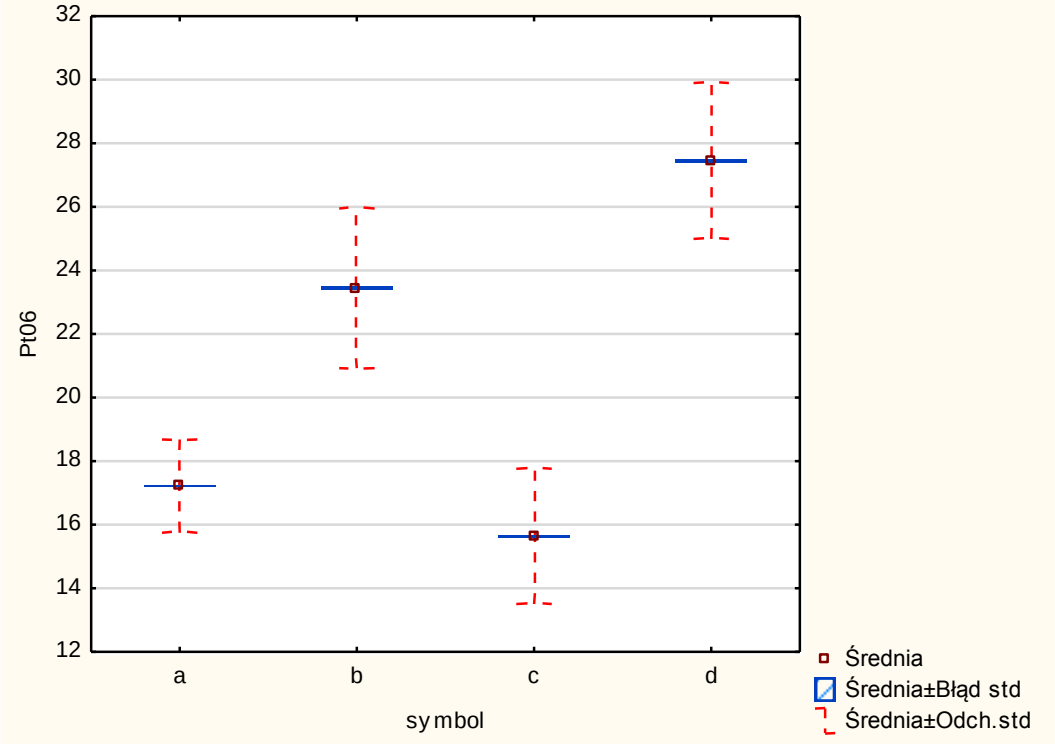
95:4803543131

Tabela 28. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt05			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,464	M=22,425	M=15,897	M=24,465
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W najwyższym punkcie tej szerokości pomiarowej (rys. 66) wartości średnie temperatur oscylowały pomiędzy 15,63℃ dla wariantu c do 27,44℃ dla d i były one wyższe dla wszystkich kombinacji niż w punktach po lewej stronie. Dla kombinacji d była to najwyższa dotychczas zarejestrowana wartość średnia.



Rysunek 66. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie rzeczywistym

Kombinacje b, c i d charakteryzowały się zmiennością na poziomie do 2,5℃, a dla a był on znacznie niższy. Kolejny raz wartości średnie istotnie różniły się od siebie (tab. 29). Zaobserwowano, że dla kombinacji a oraz c wzrost wysokości, na której wykonywany był pomiar powodował jej obniżanie się od 0,1 do 0,5℃. Natomiast dla kombinacji b i d wzrost

96:6367832297

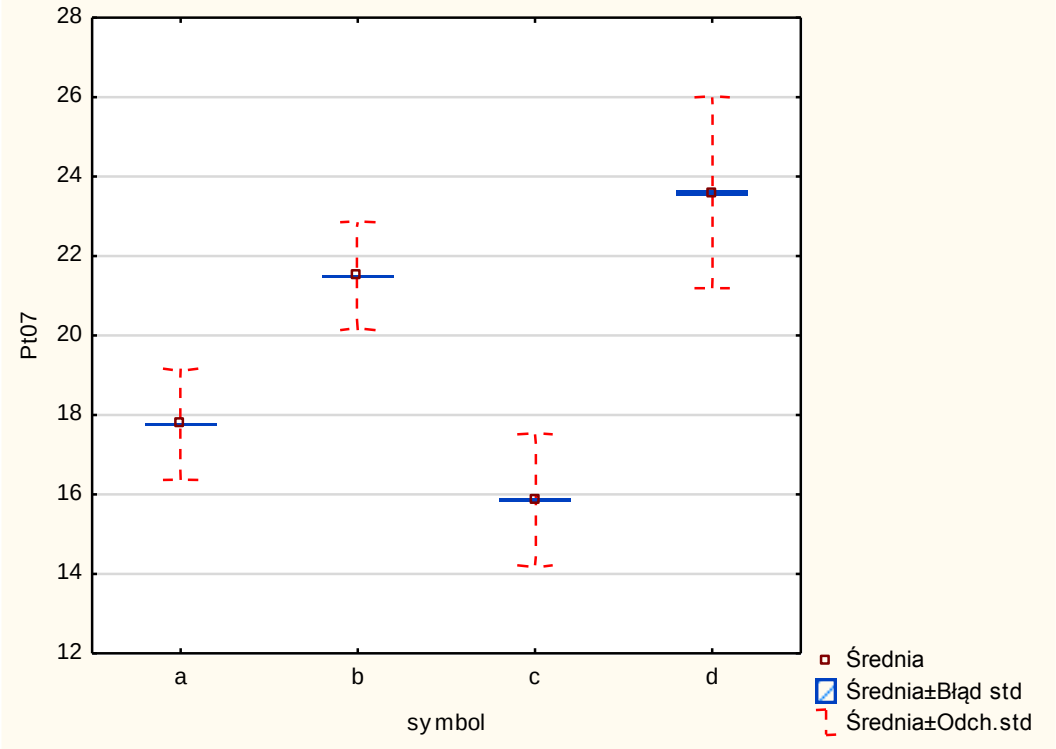
wysokości pomiaru temperatury w szklarni skutkował wzrostem temperatury pomiędzy poziomami nawet o prawie 3°C (wariant d).

Tabela 29. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt06			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,213	M=23,438	M=15,633	M=27,442
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie pomiarowym nr 7 (rys. 67), który był zlokalizowany w najniższej strefie objętej pomiarami wartości średnie temperatury były w przedziale od 15,85°C dla wariantu c do 23,59°C dla wariantu d. Były one bardzo zbliżone do pomiarów wykonanych w punkcie nr 04 zlokalizowanym na tej samej wysokości. Wyznaczone wartości średnie różniły się zaledwie o 0,05°C dla wariantu c do 0,6°C dla wariantu d.



Rysunek 67. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie rzeczywistym

97:2411081833

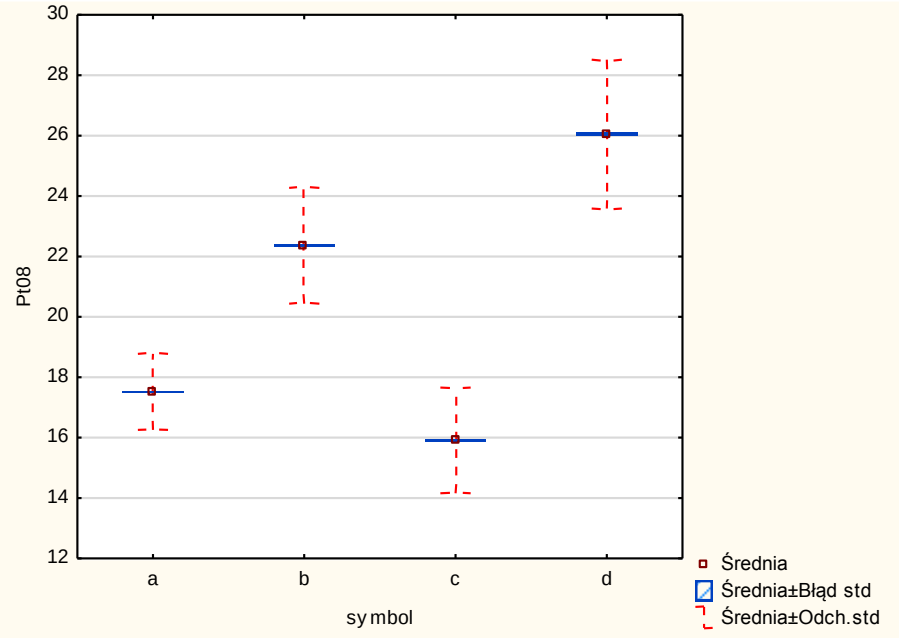
W czasie analizy wyników pomiarów zaobserwowano, że największą zmienność pomiarów uzyskano dla wariantu d, w którym odchylenie standardowe było na poziomie 2,4℃. W pozostałych przypadkach nie przekraczało 2℃ przyjmując najniższą wartość na poziomie 1,7℃ dla wariantu b. Nadal wszystkie wartości średnie istotnie różniły się od siebie na poziomie ufności 0,05 (tab. 30).

Tabela 30. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 7 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt07			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,768	M=21,494	M=15,864	M=23,594
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie pomiarowym nr 8 (rys. 68) czyli powyżej punktu nr 7 zarejestrowano wzrost średniej temperatury dla wszystkich wariantów z wyjątkiem a. Charakteryzował się on minimalnie niższą temperaturą średnią na poziomie 17,52℃. W pozostałych przypadkach zarejestrowano temperaturę średnią w przedziale od 15,91℃ dla wariantu c do 26,05℃ dla wariantu d. Należy zaznaczyć, że wariant d charakteryzował się najwyższa temperatura na tej wysokości realizacji pomiarów.



Rysunek 68. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 8 w obiekcie rzeczywistym

98:2398029125

W punkcie tym analogicznie do wcześniej zrealizowanych pomiarów kombinacja d dawała największe zróżnicowanie) poszczególnych pomiarów oceniane przez odchylenie standardowe. Najniższy jego poziom zaobserwowano już nie dla a jak poprzednio tylko dla b. W tym punkcie również wszystkie wartości średnie istotnie różniły się od siebie (tab. 31).

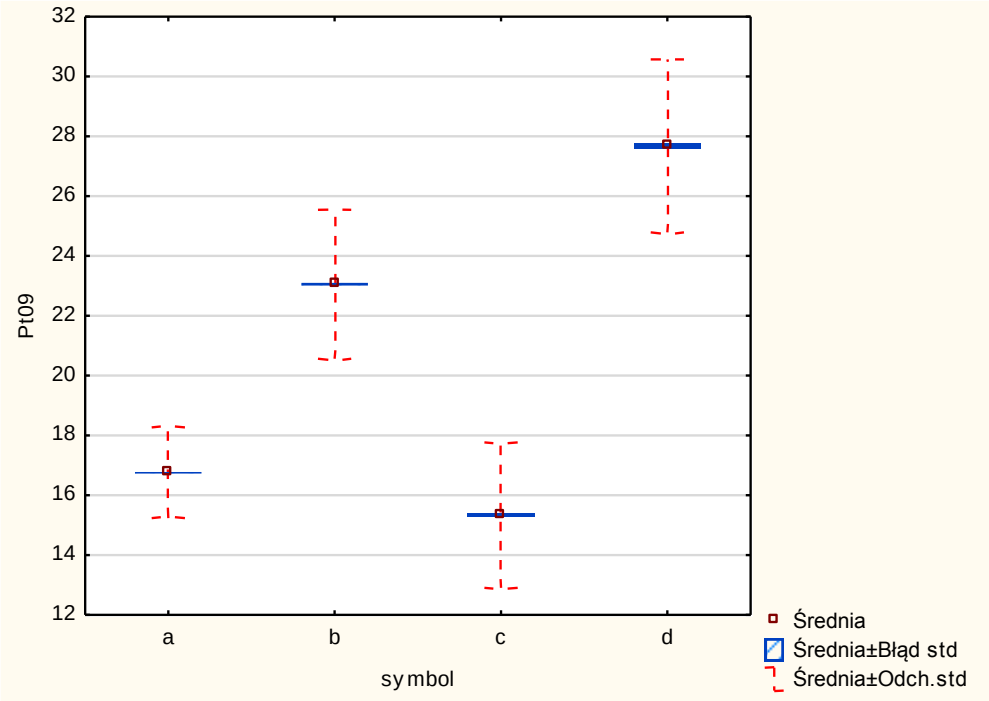
Tabela 31. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 8 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt08			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,516	M=22,353	M=15,909	M=26,050
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Punkt pomiarowy nr 9 (rys. 69) był położony na najwyższym poziomie w tej szerokości siatki pomiarowej. Wyznaczone wartości średnie dla poszczególnych kombinacji pracy systemu grzewczego charakteryzowały się największym zróżnicowaniem. Najniższa wartość średnia na poziomie 15,33℃ zarejestrowano dla kombinacji c. Była to wartość najniższa spośród większości pomiarów. Jedynie dla punktu nr 3 zarejestrowano wartość zbliżoną. Natomiast dla kombinacji d zarejestrowano wartość średnią najwyższą spośród wszystkich wykonanych pomiarów na poziomie 27,68℃. Różnica pomiędzy wartościami skrajnymi w punkcie tym wynosiła więc prawie 12,4℃.

99:8475797786



Rysunek 69. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 9 w obiekcie rzeczywistym

Analizując wszystkie pomiary zaobserwowano, że w najwyższej warstwie pomiarowej występowało istotnie statystyczne zróżnicowanie wartości średnich (tab. 32), na poziomie od 10,6℃ do 12,4℃, co daje ok 50-60%. Dla porównania na najniższej wysokości wartości średnie różniły się o ok 6-8℃, co daje 30-40%.

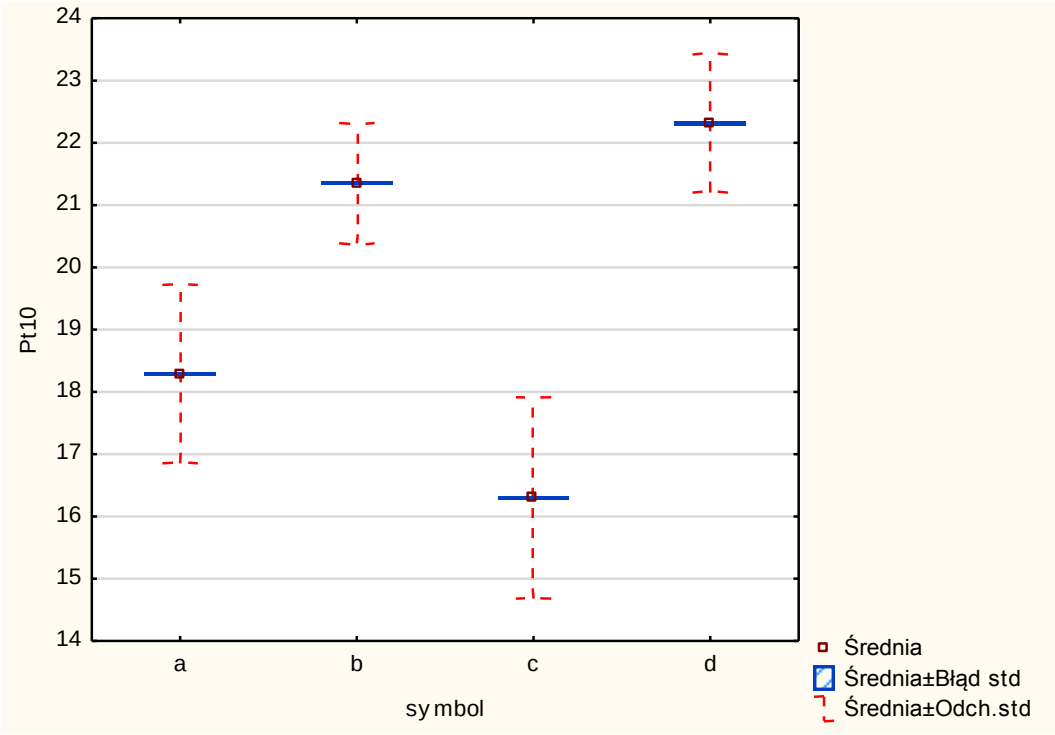
Tabela 32. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 9 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt09			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=16,753	M=23,058	M=15,338	M=27,680
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W punkcie pomiarowym nr 10 (rys. 70), czyli w prawym dolnym rogu siatki pomiarowej analogicznie jak w poprzednich pomiarach najniższą średnią temperaturę rejestrowano w dla wariantu c (16,30℃), a najwyższą dla wariantu d (22,31℃).

100:3035063689



Rysunek 70. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 10 w obiekcie rzeczywistym

Zarejestrowane wyniki pomiarów charakteryzowały się niską zmiennością, a wyznaczone odchylenia standardowe były w każdym przypadku poniżej 2°C. Najniższą wartość na poziomie 1°C zarejestrowano dla wariantu b. Nadal jednak wartości średnie różniły się istotnie pomiędzy sobą (tab. 33).

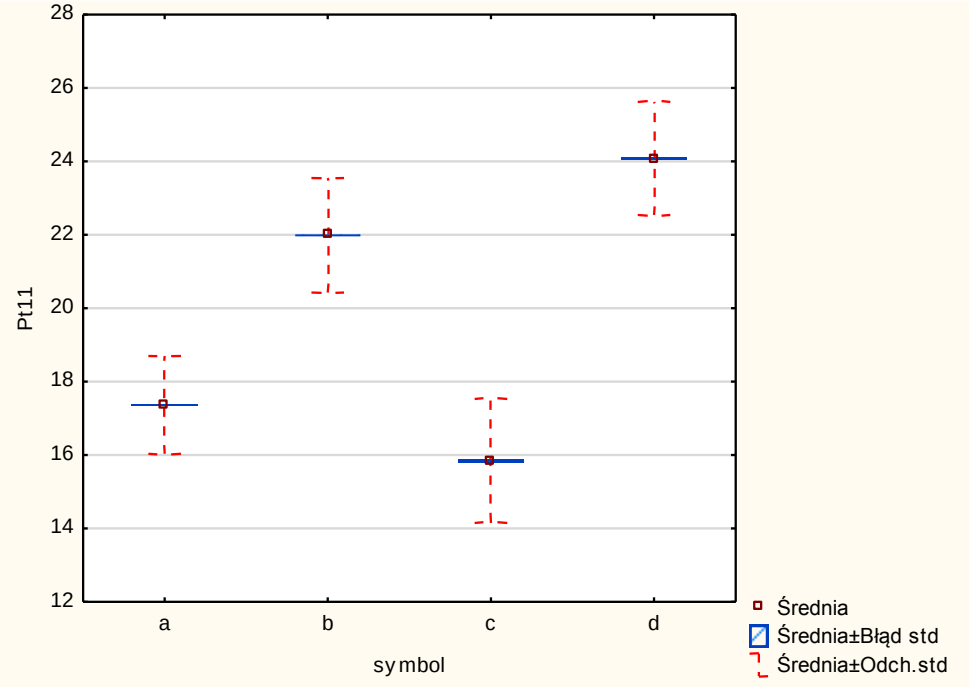
Tabela 33. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 10 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt10			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=18,286	M=21,354	M=16,298	M=22,309
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Punkt pomiarowy nr 11 (rys. 71) charakteryzował się dla wariantu a oraz c niższą wartością średnią temperatury (odpowiednio 17,37°C i 1584°C) niż punkt zlokalizowany poniżej (nr 10). Obniżenie temperatury ze wzrostem wysokości realizacji pomiarów było jednak na poziomie do 1°C. Dla wariantu b i d zaobserwowano tendencję odmienną, a wzrost temperatury był rzędu do 1,78°C.

101:1469348046



Rysunek 71. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 11 w obiekcie rzeczywistym

Wszystkie pomiary charakteryzowały się zbliżoną wartością odchylenia standardowego, a wyznaczone wartości średnie różniły się statystycznie istotnie pomiędzy sobą (tab. 34).

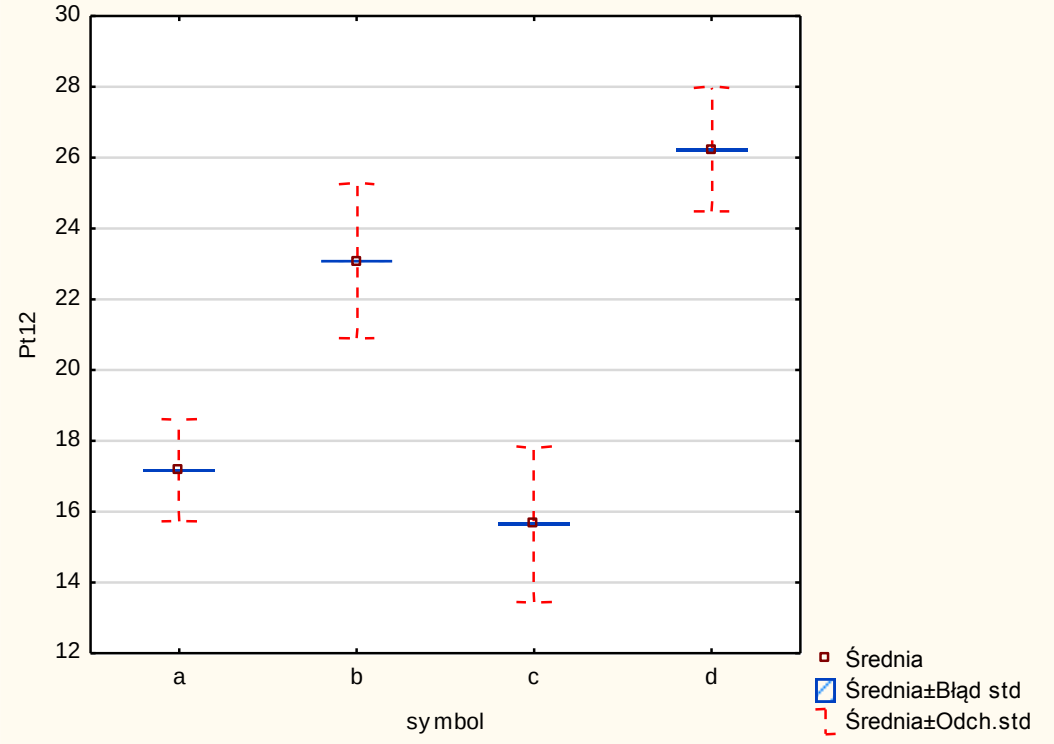
Tabela 34. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 11 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt11			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,368	M=21,987	M=15,842	M=24,081
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W ostatnim z analizowanych punktów pomiarowych (rys. 72), który był zlokalizowany w prawym górnym rogu siatki pomiarowej zaobserwowano dla wariantu a oraz c minimalne obniżenie wartości średnich temperatur na poziomie ok. 0,2°C. Natomiast wybór pozostałych wariantów powodował wzrost temperatury średnio o ponad 1°C dla wariantu b i ponad 2°C dla wariantu d.

102:7215333966



Rysunek 72. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 12 w obiekcie rzeczywistym

W punktach tych przeciętna temperatura w okresie pomiarowym wynosiła odpowiednio 23,08℃ i 26,23℃. Nie były to jednak wartości maksymalne na tej wysokości, ponieważ w wariancie b wystąpiła ona w punkcie nr 6, a dla d w punkcie 9. Nadal wszystkie wartości średnie statystycznie istotnie różniły się pomiędzy sobą (tab. 35).

Tabela 35. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 12 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym.

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Pt12			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=17,169	M=23,076	M=15,646	M=26,226
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

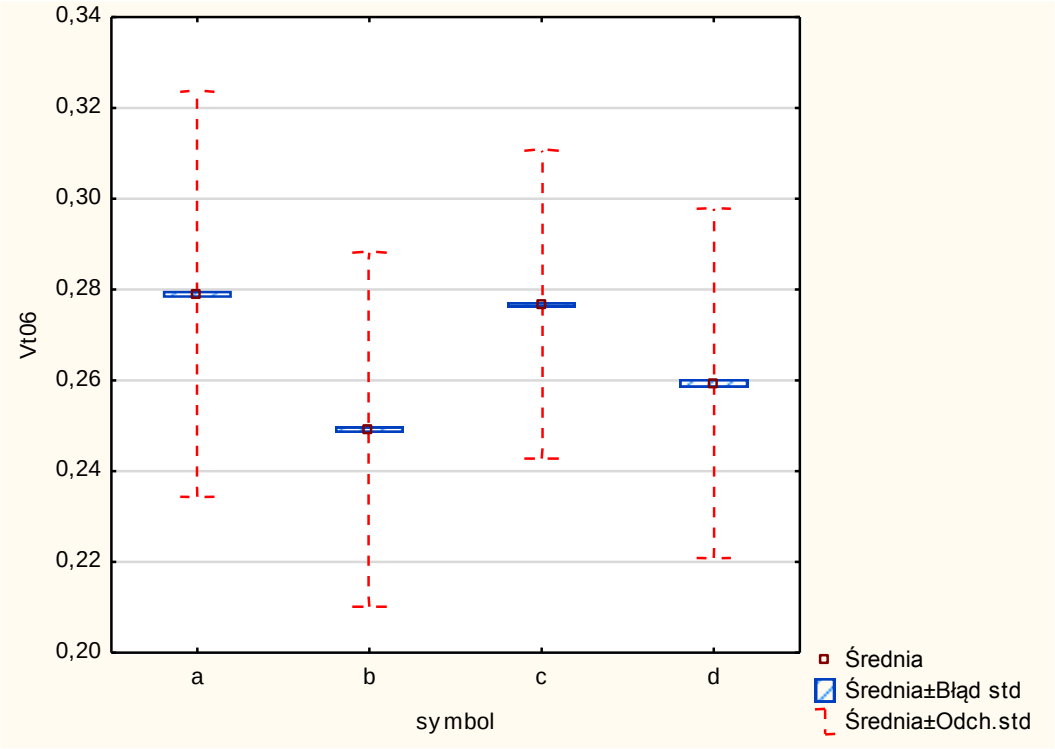
*różnice istotne na poziomie p=0,05

7.3.2. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym

Temperatura powietrza, a dokładnie różnica temperatur jest jednym z głównych czynników wymuszających ruch powietrza w szklarni. W kolejnej części pracy dokonano w sposób analogiczny jak dla obiektu badawczego analizy prędkości ruchu powietrza

103:4912590857

w poszczególnych punktach siatki pomiarowej. W lewym dolnym rogu siatki pomiarowej średnie wartości prędkości przepływu powietrza (rys. 73) zmieniały się od 0,25m·s^{-1} (wariant b) do 0,28m·s^{-1} (wariant a). Wariant a i c pozwolił na uzyskanie najwyższych prędkości przepływu powietrza.



Rysunek 73. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie rzeczywistym

Wszystkie pomiary charakteryzowały się wysoką zmiennością, a wyznaczone odchylenie standardowe było na poziomie od 0,036m·s^{-1} dla wariantu c do 0,042m·s^{-1} dla a. Wszystkie wyznaczone wartości średnie istotnie różniły się pomiędzy sobą (tab. 36).

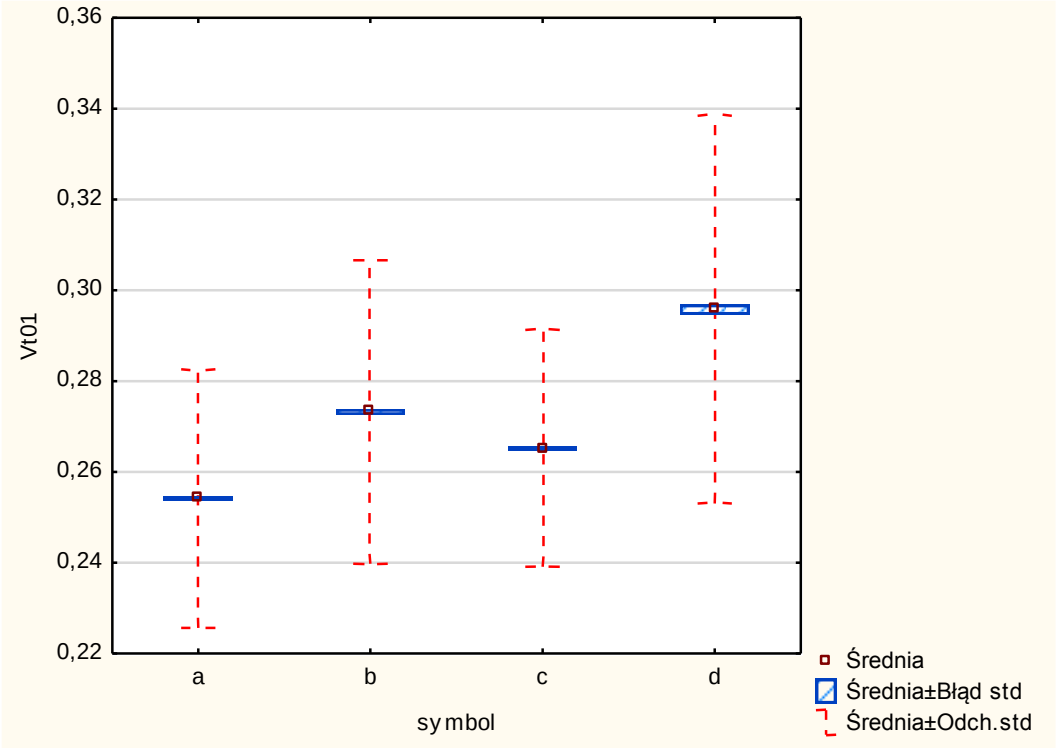
Tabela 36. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt06			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,27895	M=0,24912	M=0,27666	M=0,25933
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

104:3896635757

W punkcie nr 1 (rys. 74) zaobserwowano obniżenie się średniej prędkości przepływu powietrza dla wariantu a i c natomiast dla wariantu b i d nastąpił jej wzrost względem pomiarów na najniższej wysokości. Zmiany te jednak były w zakresie od 0,01m·s^{-1} do 0,04m·s^{-1}. W tym punkcie najniższa średnia prędkość była dla kombinacji a i wynosiła ona 0,25m·s^{-1}, a najwyższa dla d i wynosiła 0,30m·s^{-1}. Zaobserwowano więc zwiększenie rozstępu pomiędzy wartościami skrajnymi (w odniesieniu do punktu nr 6) do 0,04m·s^{-1}.



Rysunek 74. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie rzeczywistym

Punkt ten charakteryzował się mniejszą zmiennością pomiarów, a wyznaczone odchylenie standardowe zmieniało się od 0,02m·s^{-1} dla wariantu a i c do 0,04m·s^{-1} dla wariantu d. Wyznaczone wartości średnie nadal istotnie różniły się pomiędzy sobą (tab. 37).

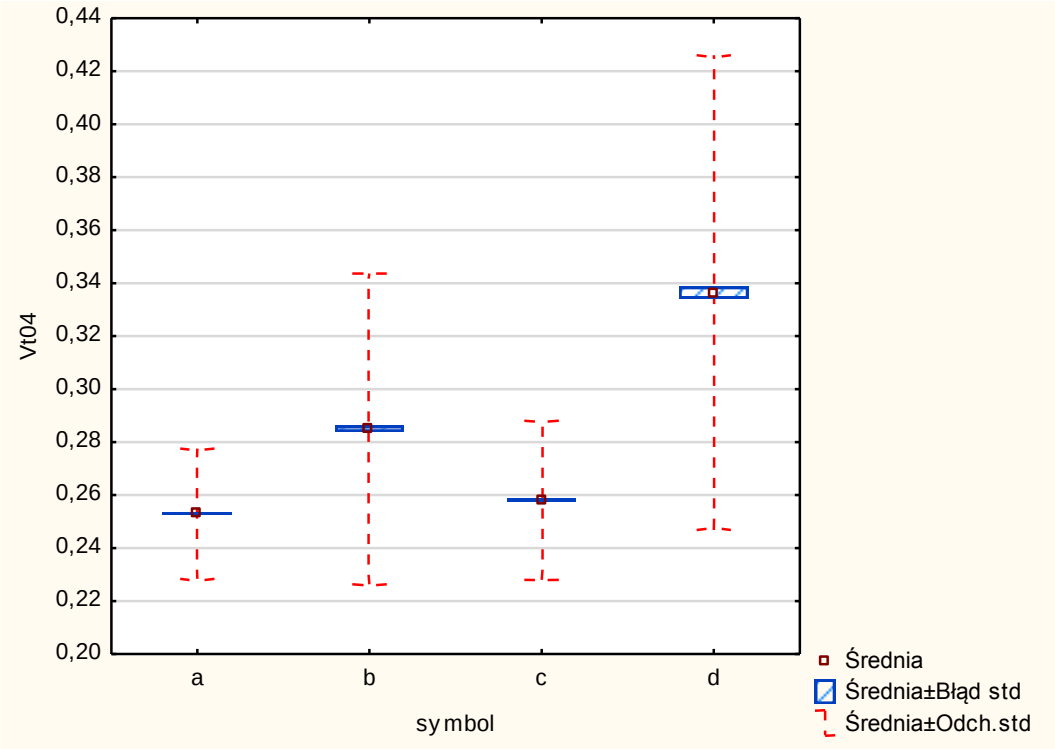
Tabela 37. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt01			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,25412	M=0,27319	M=0,26518	M=0,29574
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

105:2895989946

Przesunięcie się do lewej strony w kierunku obszaru środkowego siatki pomiarowej spowodowało dalsze obniżanie się prędkości przepływu powietrza (rys. 75) dla wariantu a oraz c. Natomiast dla wariantu b i d wartości średnie zwiększyły się do poziomu odpowiednio 0,28m·s^{-1} i 0,34m·s^{-1}. W punkcie tym nastąpił dwukrotny wzrost rozstępu pomiędzy skrajnymi wartościami średnimi do poziomu 0,08m·s^{-1}. Zaobserwowano również wzrost zmienności rejestrowanych pomiarów, a wyznaczone odchylenie standardowe dla wariantu d wyniosło aż 0,09m·s^{-1} w czasie, gdy dla wariantu a i c pozostało na poziomie ok 0,02m·s^{-1}. Wykonany test Duncana wskazał, że wartości średnie różnią się pomiędzy sobą (tab. 38).



Rysunek 75. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie rzeczywistym

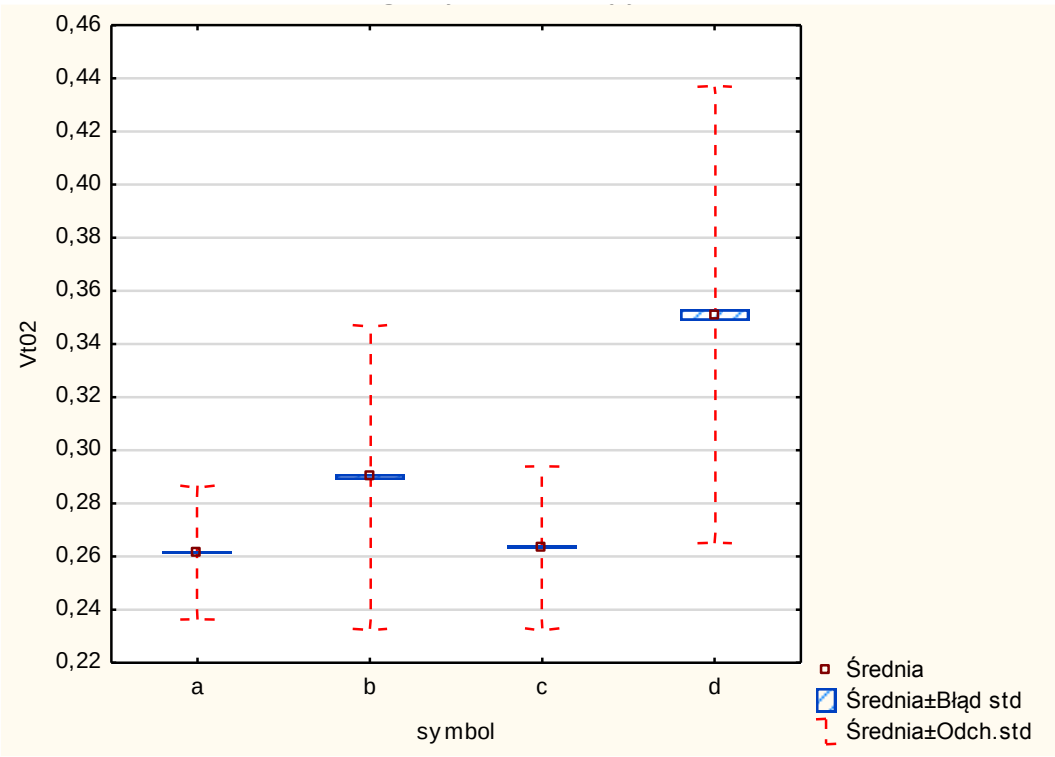
Tabela 38. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt04			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,25298	M=0,28500	M=0,25806	M=0,33642
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

106:8724422687

Po zwiększeniu wysokości, na której dokonywano pomiaru prędkości przepływu powietrza (rys. 76) zaobserwowano wzrost średniej prędkości przepływu powietrza dla wszystkich kombinacji w odniesieniu do punktu 4. Najniższą wartością na poziomie 0,26m·s^{-1} charakteryzował się wariant a oraz c. Najwyższą zarejestrowano dla wariantu d, gdzie wynosiła 0,35m·s^{-1}.



Rysunek 76. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie rzeczywistym

Dodatkowo nadal charakteryzowała się ona największą zmiennością, dla której odchylenie standardowe wynosiło 0,085m·s^{-1}. Dla wariantu a i c odchylenie standardowe było na znacznie niższym poziomie i wynosiło ono nieco powyżej 0,02m·s^{-1}. We wszystkich analizowanych przypadkach odnotowano statystycznie istotne różnice (tab. 39).

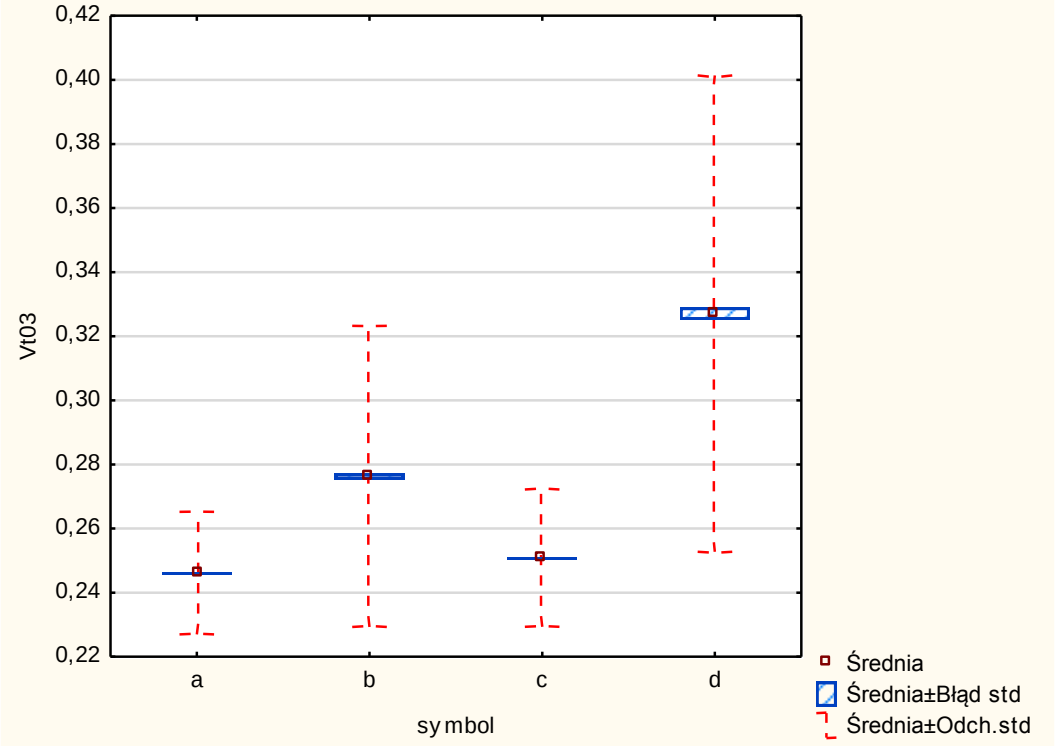
Tabela 39. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt02			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,26147	M=0,28993	M=0,26343	M=0,35093
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}		*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

107:3214707603

W punkcie 3 (rys. 77) średnie prędkości przepływu powietrza zawierały się w przedziale od ok 0,25m·s^{-1} dla wariantu a i c do 0,3m·s^{-1} dla wariantu d. Były to jedne z najniższych wartości rejestrowanych w dolnej strefie pomiarowej. Niższe wartości zarejestrowano tylko dla wariantu b i d w lewej skrajnej strefie pomiarowej. Nadal jednak została utrzymana zależność, że najniższe prędkości są dla wariantów a i c, a najwyższe dla d.



Rysunek 77. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 w obiekcie rzeczywistym

Zmienność wyników pomiarów charakteryzowana przez odchylenie standardowe zmieniające się od 0,02m·s^{-1} (a i c) do 0,07m·s^{-1} (d) pozostała na zbliżonym poziomie do sąsiednich punktów, w których rejestrowano pomiary. Nadal wartości średnie w większości przypadków istotnie różniły się pomiędzy sobą (tab. 40). Wyjątek stanowiło porównanie wariantów a i c, gdzie, był to jedyny istotny brak różnic pomiędzy średnimi prędkościami przepływu powietrza.

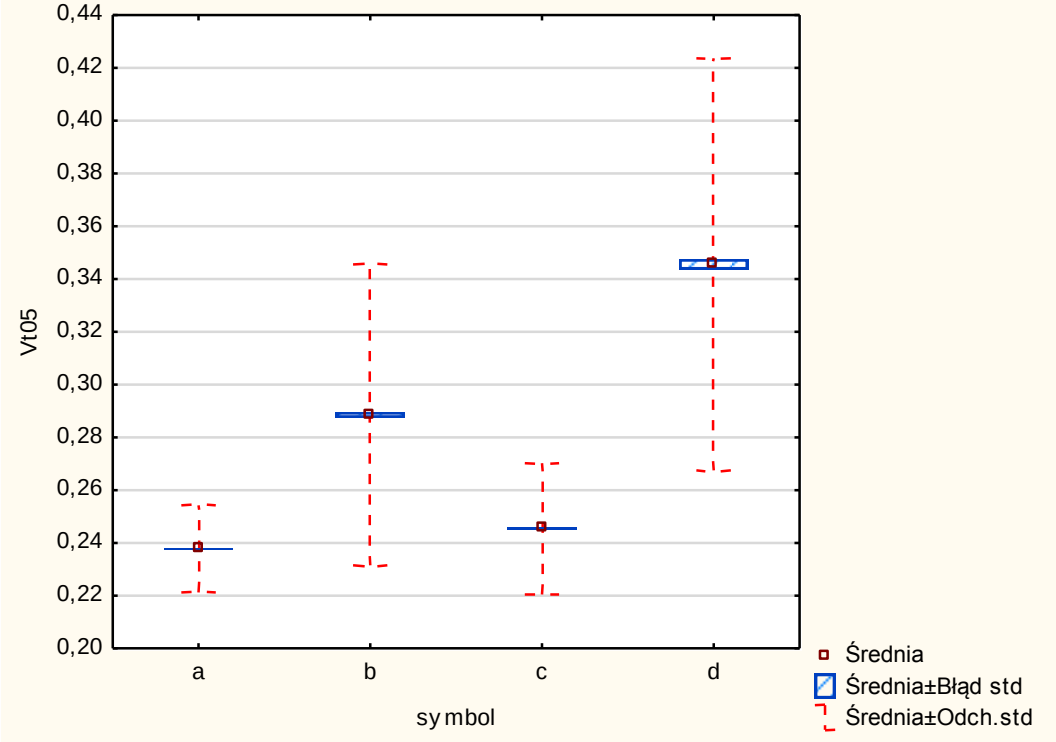
108:1825207749

Tabela 40. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt03			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,24608	M=0,27628	M=0,25076	M=0,32706
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}		*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Zwiększenie wysokości, na której rejestrowano pomiary w punkcie 5 (rys. 78) spowodowało obniżenie średniej temperatury dla wariantu a i c oraz wzrost dla wariantu b i c w odniesieniu do punktu Vt03. Średnie prędkości przepływu powietrza zmieniały się od 0,24m·s^{-1} dla A do 0,35m·s^{-1} dla d. Nadal wariant a charakteryzował się najniższym odchyleniem standardowym na poziomie poniżej 0,02m·s^{-1} w czasie, gdy dla d wynosiło ono prawie 0,08m·s^{-1}. Wyznaczone wartości średnie istotnie różniły się pomiędzy sobą (tab. 41).



Rysunek 78. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie rzeczywistym

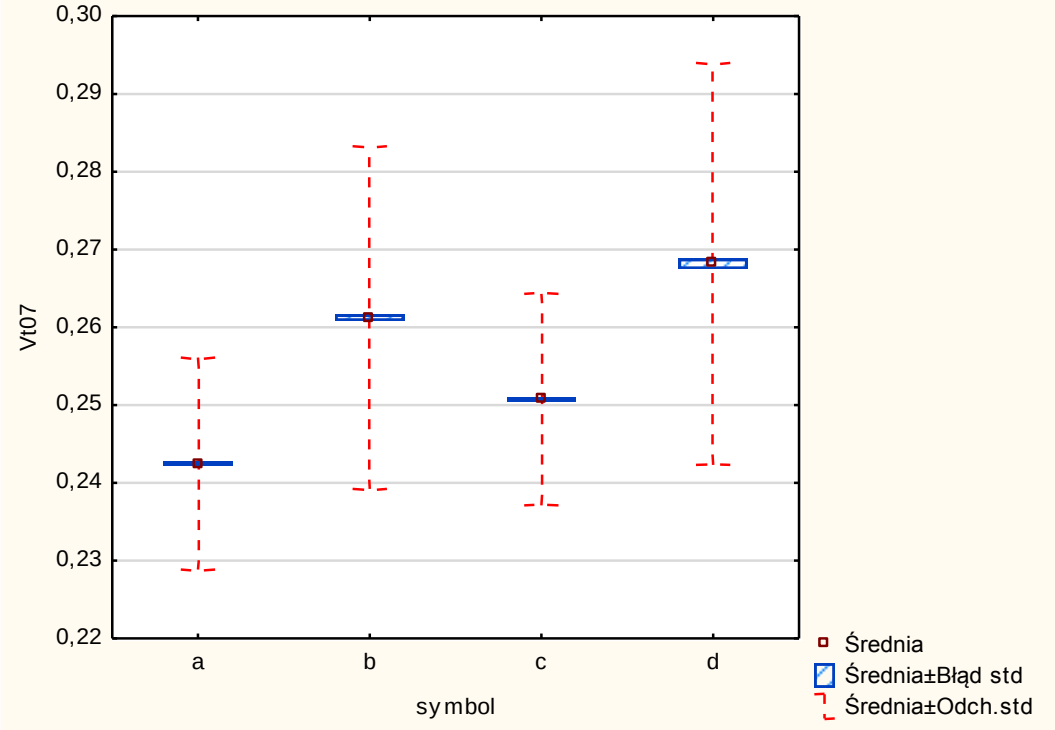
109:2209198979

Tabela 41. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt05			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,23771	M=0,28850	M=0,24533	M=0,34557
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

W centralnej części obszaru pomiarowego prędkość ruchu powietrza przekraczała 0,33m·s^{-1}, a w analizowanym przypadku wyniosła zaledwie 0,27m·s^{-1} (rys. 79). Była to wartość zbliżona do lewego dolnego punktu pomiarowego. W pozostałych wariantach nadal wariant a charakteryzował się najniższą średnią wartością ruchu powietrza wynoszącą 0,24m·s^{-1}.



Rysunek 79. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie rzeczywistym

Zmienność rejestrowanych pomiarów oceniana odchyleniem standardowym zmieniała się od 0,015m·s^{-1} dla wariantu a i c do 0,026m·s^{-1} dla wariantu d. Nadal wszystkie wartości średnie różniły się pomiędzy sobą (tab. 42).

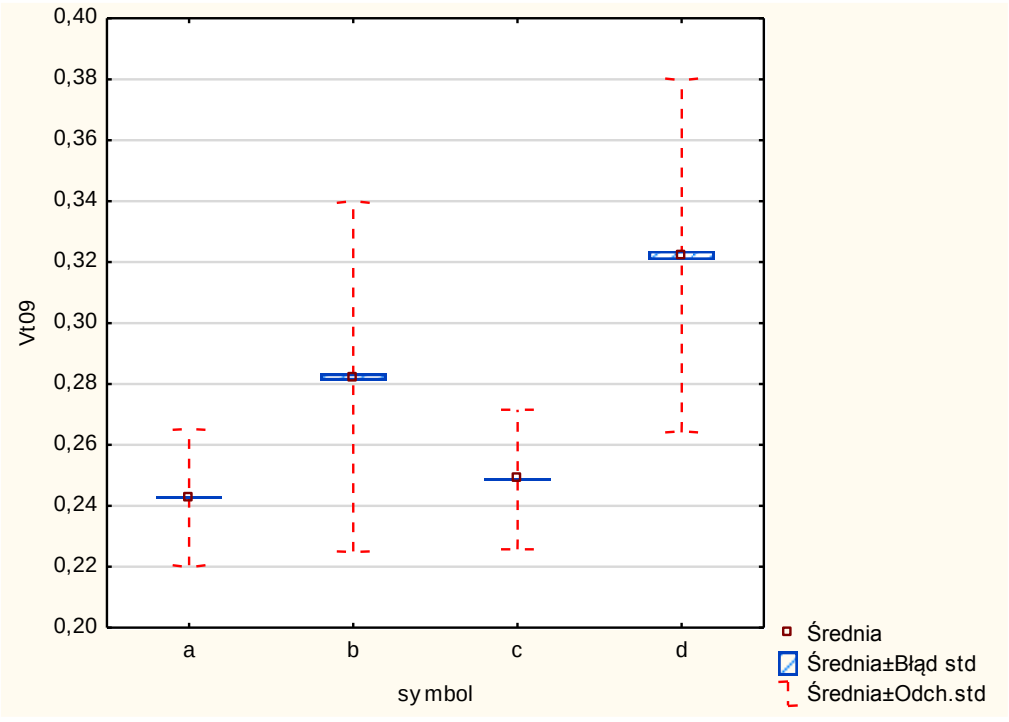
110:9602059895

Tabela 42. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 7 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt07			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=,24248	M=,26125	M=,25070	M=,26815
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

Ostatni punkt pomiarowy nr 9 (rys. 80) lokalizowany był z prawej strony siatki pomiarowej, lecz w górnej strefie obszaru pomiarowego. Charakteryzował się on wartościami średnimi przepływu powietrza w zakresie od 0,24m·s^{-1} dla wariantu a do 0,32m·s^{-1} dla wariantu d. Wzrost wysokości realizacji pomiarów w prawej skrajnej części charakteryzował się wzrostem prędkości przepływu na poziomie 0,02m·s^{-1} i 0,05m·s^{-1} dla wariantu b i d. W pozostałych wariantach można uznać, że zmiany były bardzo małe.



Rysunek 80. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 w obiekcie rzeczywistym

Pomimo tego wykonana statystyczna analiza wykazała istnienie istotnych różnic pomiędzy wartościami średnimi dla wszystkich kombinacji pracy systemu grzewczego (tab. 43).

111:2286293566

Tabela 43. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

kombinacja	Test Duncana; zmienna: Vt09			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=0,24272	M=0,28225	M=0,24864	M=0,32220
a {1}	xxx			
b {2}	*	xxx		
c {3}	*	*	xxx	
d {4}	*	*	*	xxx

*różnice istotne na poziomie p=0,05

7.3.3. Modelowanie temperatury powietrza w przekroju poprzecznym szklarni

Przeprowadzona ocena istotności korelacji (tab. 44) pomiędzy temperaturą w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji a wykazała jej istnienie dla wszystkich analizowanych połączeń, a siła zależności była na poziomie od 0,94 do 0,99. Była więc to bardzo silna relacja, a jej kierunek był dodatni. Statystycznie istotna korelacja wystąpiła również dla większości połączeń prędkości ruchu powietrza. Nie były to już tak silne relacje, ponieważ współczynnik korelacji nie przekraczał poziom 0,5. Najwyższy współczynnik korelacji odnotowano pomiędzy V01, a V06 i V04 oraz V04 z V02. Nie istotna była siła korelacji pomiędzy V7, a V2, V3 V4, V5 i V6 jak również pomiędzy V9, a V1, V4 i V6 oraz V6 i V2, V1 i V3. Umiarkowana siła korelacji do 0,32 istniała dla większości połączeń temperatur i prędkości ruchu powietrza. Warto zaznaczyć, że dla Vt03 była korelacja ujemnie z temperaturami mierzonymi we wszystkich punktach. Statystycznie istotna korelacja wystąpiła również pomiędzy V03, a V06.

112:3890120626

Tabela 44. Istotność statystyczna korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji a doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

Zmienne	Korelacje wewnątrzgrupowe dla obiektu rzeczywistego Grupa: symbol a																			
	Pt01	Pt02	Pt03	Pt04	Pt05	Pt06	Pt07	Pt08	Pt09	Pt10	Pt11	Pt12	Vt06	Vt01	Vt04	Vt02	Vt03	Vt05	Vt07	Vt09
Pt01	xxx																			
Pt02	**	xxx																		
Pt03	**	**	xxx																	
Pt04	**	**	**	xxx																
Pt05	**	**	**	**	xxx															
Pt06	**	**	**	**	**	xxx														
Pt07	**	**	**	**	**	**	xxx													
Pt08	**	**	**	**	**	**	**	xxx												
Pt09	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx											
Pt10	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx										
Pt11	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx									
Pt12	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx								
Vt06	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx							
Vt01	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx						
Vt04	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx					
Vt02	-	**	**		**	**		**	**	-		**		**	**	xxx				
Vt03	- **	- **	- **	- **	- **	- **	- **	-	- **	- **	- **	- **	- **		**	**	xxx			
Vt05	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx		
Vt07	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		- **	-	-	-		xxx	
Vt09	- **			-			-	**	**	- **	**	**	-	-	-	**	**	**	**	xxx

**korelacje istotne na poziomie p=0,05; - korelacja ujemna

Dla kombinacji b pracy systemu ogrzewania w szklarni zaobserwowano, że korelacja (tab. 45) pomiędzy temperaturami powietrza w poszczególnych punktach pomiarowych była statystycznie istotna i silna. Współczynniki korelacji zmieniały się w przedziale od 0,7 do 0,99. We wszystkich przypadkach korelacja była dodatnia. Warto zaznaczyć, że siła korelacji była niższa niż dla kombinacji a ponieważ dla niej najniższa wartość współczynnika korelacji była powyżej 0,94. Statystycznie istotną korelację stwierdzono również pomiędzy prędkościami przepływu powietrza w poszczególnych punktach pola. Była ona znacznie słabsza niż dla temperatur, a wyznaczone współczynniki korelacji oscylowały w przedziale od 0,07 do 0,58. Najsilniejsza korelacja powyżej 0,5 wystąpiła pomiędzy Vt5, a Vt3 oraz Vt9 jak również pomiędzy Vt4, a Vt2 oraz Vt5. W dwóch przypadkach tj. dla Vt06 z Vt07 oraz Vt06 z Vt09 korelacja była ujemna, lecz w drugim przypadku nie potwierdzono jej istotności. Oceniając korelację pomiędzy temperaturą, a prędkością przepływu powietrza zaobserwowano, że wyznaczone współczynniki w większości przypadków są statystycznie istotne, lecz ich wartość jest poniżej 0,35. Z wyjątkiem połączenia V06 z Pt2-9 i Pt11-12 korelacja była dodatnia.

113:2740212102

Tabela 45. Statystycznie istotne współczynniki korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji b doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

Zmienne	Korelacje wewnątrzgrupowe dla obiektu rzeczywistego Grupa: symbol b																			
	Pt01	Pt02	Pt03	Pt04	Pt05	Pt06	Pt07	Pt08	Pt09	Pt10	Pt11	Pt12	Vt06	Vt01	Vt04	Vt02	Vt03	Vt05	Vt07	Vt09
Pt01	xxx																			
Pt02	**	xxx																		
Pt03	**	**	xxx																	
Pt04	**	**	**	xxx																
Pt05	**	**	**	**	xxx															
Pt06	**	**	**	**	**	xxx														
Pt07	**	**	**	**	**	**	xxx													
Pt08	**	**	**	**	**	**	**	xxx												
Pt09	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx											
Pt10	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx										
Pt11	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx									
Pt12	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx								
Vt06		- **	- **	- **	- **	- **	-	- **	- **		- **	- **	xxx							
Vt01	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx						
Vt04		**	**	**	**	**	**	**	**		**	**	**	**	xxx					
Vt02	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx				
Vt03	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx			
Vt05	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx		
Vt07		**	**	**	**	**	**	**	**		**	**	- **	**	**	**	**	**	xxx	
Vt09	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	-	**	**	**	**	**	**	xxx

**korelacje istotne na poziomie p=0,05; - korelacja ujemna

Kombinacja c (tab. 46) charakteryzowała się analogicznie jak poprzednie bardzo silną i statystycznie istotną korelacją pomiędzy wartościami temperatury w poszczególnych punktach siatki pomiarowej. Współczynniki korelacji podobnie jak dla wariantu a miały wartości powyżej 0,96. W wszystkich przypadkach korelacja była dodatnia. Tak silnej współzależności nie zaobserwowano dla prędkości przepływu powietrza. Współczynniki korelacji osiągały poziom nieprzekraczający 0,5. Najsilniejszą współzależnością charakteryzowało się połączenie V02 z V04 oraz V05 z V09. Natomiast dla V6 z V05 V07 i Vt09 korelacja była ujemna. Zaobserwowano również występowanie istotnej korelacji pomiędzy wartością temperatury i prędkością przepływu powietrza. Współzależność ta charakteryzowała się umiarkowaną siłą, a najwyższe wartości współczynnika korelacji na poziomie ok. 0,5 zanotowano dla kombinacji V05 z temperaturą we wszystkich punktach pomiarowych. Z wyjątkiem połączenia V05 z temperaturą w poszczególnych punktach

114:9707352699

pomiarowych korelacja była dodatnia, czyli wzrost temperatury powodował wzrost prędkości przepływu powietrza.

Tabela 46. Istotność statystyczna korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji c doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

	Korelacje wewnątrzgrupowe dla obiektu rzeczywistego Grupa: symbol: c																			
Zmienne	Pt01	Pt02	Pt03	Pt04	Pt05	Pt06	Pt07	Pt08	Pt09	Pt10	Pt11	Pt12	Vt06	Vt01	Vt04	Vt02	Vt03	Vt05	Vt07	Vt09
Pt01	xxx																			
Pt02	**	xxx																		
Pt03	**	**	xxx																	
Pt04	**	**	**	xxx																
Pt05	**	**	**	**	xxx															
Pt06	**	**	**	**	**	xxx														
Pt07	**	**	**	**	**	**	xxx													
Pt08	**	**	**	**	**	**	**	xxx												
Pt09	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx											
Pt10	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx										
Pt11	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx									
Pt12	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx								
Vt06	- **	- **	- **	- **	- **	- **	- **	- **	- **	- **	- **	- **	xxx							
Vt01	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx						
Vt04	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx					
Vt02	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		**	**	xxx				
Vt03	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**		**	**	**	xxx			
Vt05	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	-	**	**	**	**	xxx		
Vt07	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	- **	**	**			**	xxx	
Vt09	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	-	**	**	**	**	**	**	xxx

**korelacje istotne na poziomie p=0,05; - korelacja ujemna

Dla wariantu d (tab. 47) zaobserwowano obniżenie się siły korelacji dla temperatur. Współczynniki korelacji dla większości zestawień były istotne statystycznie, lecz ich siła była umiarkowana. Siłą powyżej 0,9 charakteryzowało się jedynie połączenie Pt1 i Pt10. Pojawiły się również zależności nieistotne jak w zestawieniu Pt04 z Pt09, Pt05 z Pt08 czy Pt6 z Pt12. Analizując zależności korelacyjne pomiędzy prędkościami przepływu powietrza zaobserwowano, że dla większości przypadków były ona istotne z wyjątkiem połączenia V06 z V04 i V09. Siła zależności była umiarkowana i poziom 0,5 przekraczała jedynie dla połączenia V04 z V02 oraz V03 z V05. W dwóch przypadkach tj. V06 z V04 oraz V07 korelacja była ujemna. Dla tej konfiguracji pracy sytemu ogrzewania aż w 41 przypadkach korelacja pomiędzy temperaturą powietrza, a prędkością przepływu powietrza była nieistotna. W wielu przypadkach, dla których potwierdzono statystyczną istotność korelacja

115:1110146921

była ujemna. Zależność ta dotyczyła głównie wpływu temperatury w punktach: Pt01, Pt05, Pt06, Pt10 i Pt12.

Tabela 47. Istotność statystyczna korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji d doświadczenia w obiekcie rzeczywistym

	Korelacje wewnątrzgrupowe dla obiektu rzeczywistego Grupa: symbol: d																			
Zmienne	Pt01	Pt02	Pt03	Pt04	Pt05	Pt06	Pt07	Pt08	Pt09	Pt10	Pt11	Pt12	Vt06	Vt01	Vt04	Vt02	Vt03	Vt05	Vt07	Vt09
Pt01	Xxx																			
Pt02	**	xxx																		
Pt03	**	**	xxx																	
Pt04	**	**	**	xxx																
Pt05	**	**	**	**	xxx															
Pt06	**	**	**	**	**	xxx														
Pt07	**	**	**	**	**	**	xxx													
Pt08	**	**	**	**	-	**	**	xxx												
Pt09	**	**	**	-	-**	**		**	xxx											
Pt10	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx										
Pt11	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	xxx									
Pt12	**	**	**	**	**		**	**	**	**	**	xxx								
Vt06	-		-	-	-	-**	**	**		-	-	-	xxx							
Vt01	-**	**	**	-	-**		**	**	**	-**	-	-**	**	xxx						
Vt04		-	-	**	**	-**	**		-**	**	**	**	-	**	xxx					
Vt02	-	**	-		-	-	**	**	**	-		-**	**	**	**	xxx				
Vt03	-**	**	**		-**	-	**	**	**			-	**	**	**	**	xxx			
Vt05	-**	**	**	-**	-**	-	**	**	**	-**	-**	-**	**	**	**	**	**	xxx		
Vt07	-		-	-	-	-**	**	**	-**	-	-	-	-**	**	**	**	**	**	xxx	
Vt09				**		-**	**	**	**	**	**	**		**	**	**	**	**	**	xxx

**korelacje istotne na poziomie p=0,05; - korelacja ujemna

Wyniki analizy pozwalają stwierdzić, że model regresji uwzgledniający jako zmienną niezależną prędkość ruchu powietrza we wskazanych punktach (V1-V9) pozwala wyjaśnić 36% wariancji zmiennej niezależnej, którą jest temperatura powietrza Pt1. Wysoka wartość statystyki F (771) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0,05$) potwierdzają istotność modelu liniowego. Wartość statystyki t wykorzystana do oceny istotności poszczególnych współczynników regresji oraz odpowiadający im poziom prawdopodobieństwa p potwierdza, że parametry te istotnie różnią się do zera. Jedyny wyjątek stanowi zmienna V3 dla której wartość prawdopodobieństwa *p* wyniosła 0,08. Zmienna ta nie będzie więc uwzględniona w modelu. Ponieważ z analizy reszt modelu wynik, że mają one rozkład normalny oraz losowy spełnione więc zostały założenia i nie ma przeszkód do zapisania modelu w postaci jawnej:

116:1437664989

$$PT_1^* = 982{,}236 - 960{,}176 \cdot V6 + 495{,}976 \cdot V1 + 262{,}526 \cdot V4 + 325{,}918 \cdot V2 + 1188{,}295 \cdot V5 + 1039{,}295 \cdot V7 + 862{,}324 \cdot V9 \quad (3)$$

Na temperaturę w punkcie Pt1 największy wpływ ma prędkość ruchu powietrza w punkcie V5 oraz V7. Wzrost prędkości przepływu powietrza w tych punktach o $1 \cdot 10^{-3}$ $m \cdot s^{-1}$ przy stałych wartościach pozostałych parametrów spowoduje wzrost temperatury odpowiednio o 1,188°C i 1,039°C. Dla większości punktów pomiarowych wzrost prędkości przepływu powietrza powodował wzrost temperatury. Wyjątek stanowił punkt V6, w którym wraz ze wzrostem prędkości powietrza występowało obniżenie temperatury.

W punkcie Pt2 opracowany model regresyjny w oparciu o prędkość ruchu powietrza w punktach V1 do V9 pozwala na wyjaśnienie przebiegu zmian temperatury w 48%. W pozostałej części zjawisko opisują inne zmienne. Statystyka F o wartości 1252 i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0{,}05$) potwierdzają istotność modelu liniowego. Ocena wartość statystyki *t* oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* dla poszczególnych współczynników regresji potwierdza, że parametry te istotnie różnią się do zera. Ponieważ wszystkie założenia zostały spełnione zapisano model regresyjny w postaci jawnej:

$$PT_2^* = 52{,}095 - 147{,}889 \cdot V6 + 123{,}737 \cdot V1 + 18{,}493 \cdot V4 + 43{,}883 \cdot V2 + 47{,}202 \cdot V3 + 154{,}694 \cdot V5 + 158{,}370 \cdot V7 + 122{,}826 \cdot V9 \quad (4)$$

Wpływ zmian prędkości powietrza na temperaturę w punkcie Pt2 był niższy niż w punkcie Pt1. Zmiana prędkości ruchu powietrza o $1 \cdot 10^{-3}$ $m \cdot s^{-1}$ przy stałych wartościach pozostałych parametrów spowoduje zmianę temperatury o mniej niż 0,16°C. Najwyższe wartości współczynników regresji zarejestrowano dla punktów V6, V5, V7 na poziomie oscylującym pomiędzy 150, a 160. Dla Pt1 oscylowały one wokół 1000. Analogicznie jak dla poprzedniego punktu pomiarowego pierwszy z nich miał wartość ujemną. Wzrost prędkości w punkcie V6 powoduje obniżenie temperatury Pt2. Nadal najniższy wpływ na wartość temperatury w szklarni ma ruch powietrza w punktach V2-V4.

Dla kolejnego punktu (Pt3) opracowany model regresyjny w oparciu o analogiczny zestaw zmiennych niezależnych opisujących prędkość ruchu powietrza w punktach V1 do V9 wyjaśnił przebiegu zmian temperatury w 50%. Nadal wysoka wartość statystyki F (1364) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0{,}05$) potwierdzają istotność modelu liniowego. Analiza wartość statystyki *t* oraz poziomu prawdopodobieństwa *p* dla poszczególnych współczynników regresji pozwala stwierdzić, że różnią się one istotnie do

117:7007724204

zera. Spełnione zostały również pozostałe założenia więc niebyło przeszkód do zapisania modelu w postaci jawnej:

$$PT_3^* = 13{,}767 - 226{,}802 \cdot V6 + 149{,}438 \cdot V1 + 18{,}346 \cdot V4 + 57{,}940 \cdot V2 + 84{,}337 \cdot V3 + 209{,}638 \cdot V5 + 205{,}068 \cdot V7 + 178{,}208 \cdot V9 \quad (5)$$

Model regresyjny zapisany dla punktu Pt3 charakteryzował się parametrami o wartościach zbliżonych do modelu dla Pt2. Dla poszczególnych zmiennych niezależnych ich wartości oscylowały w przedziale od ponad 18 dla V4 do prawie 230 dla V6. Nadal najwyższy wpływ na temperaturę ma prędkość ruchu powietrza w punktach V5-V7, a wzrost prędkości w punkcie V6 obniża temperaturę. Na nieznacznie niższym poziomie wynoszącym odpowiednio 178 i 149 były współczynniki modelu dla punktów V9 i V1. W punkcie tym prostej regresji przechodzi dla zerowych prędkości ruchu powietrza najbliżej początku układu współrzędnych. Wartość wyrazu wolnego dla modelu jest na poziomie wynoszącym 13,767, a w poprzednich modelach wynosiła 52,1 dla Pt2 i 982,2 dla Pt1.

Wyniki analizy pozwalają stwierdzić, że model regresji przedstawiający zmiany temperatury w punkcie Pt4 uwzględniający zmienne niezależne opisujące prędkość ruchu powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej pozwala wyjaśnić ponad 40% wariancji badanego zjawiska. Wysoka wartość statystyki F (922,82) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0{,}05$) potwierdzają statystyczną istotność modelu liniowego. Natomiast wartość statystyki *t*, wykorzystywana do oceny istotności współczynnika regresji wyznaczonych dla poszczególnych zmiennych niezależnych oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* potwierdzają, że parametry te istotnie różnią się od zera. Spełnienie pozostałych założeń dotyczących m.in. reszt modelu pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT4^* = 70{,}624 - 124{,}092 \cdot V6 + 73{,}202 \cdot V1 + 48{,}426 \cdot V4 + 35{,}632 \cdot V2 + 40{,}637 \cdot V3 + 113{,}809 \cdot V5 + 131{,}85 \cdot V7 + 121{,}428 \cdot V9 \quad (6)$$

Wynika z niego, że w punkcie tym prędkość ruchu powietrza w mniejszym stopniu wpływa na temperaturę niż w we wcześniej analizowanych punktach siatki pomiarowej. Największy wpływ nadal ma zmienna V5-V7 oraz V9. Zmiana prędkości o $1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$ powoduje zmianę temperatury o 0,12 – 0,130°C. Nadal wzrost prędkości w punkcie V6 powoduje obniżenie temperatury w analizowanym obszarze. Ponad dwukrotnie niższy wpływ na zmianę temperatury ma prędkość ruchu powietrza w pozostałych punktach.

Opracowany model regresji przedstawiający zmiany temperatury w punkcie Pt5 w oparciu o prędkość ruchu powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej pozwala wyjaśnić prawie 44% wariancji badanego zjawiska. Nadal wysoka wartość

118:1135804795

statystyki F (1067,4) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0,05$) potwierdzają statystyczną istotność modelu liniowego. Analiza wartość statystyki *t* oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* pozwalają stwierdzić, że parametry wyznaczone dla poszczególnych zmiennych niezależnych istotnie różnią się od zera. Zostały również spełnione pozostałe założenia dotyczących m.in. reszt modelu co pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT5^* = 49,48 - 173,883 \cdot V6 + 93,307 \cdot V1 + 46,812 \cdot V4 + 47,562 \cdot V2 + 47,030 \cdot V3 + 137,978 \cdot V5 + 184,672 \cdot V7 + 156,811 \cdot V9 \quad (7)$$

Z wykonanej analizy wynika, że wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych na temperaturę w punkcie Pt5 jest bardzo zbliżony do Pt4. Najsilniejszym oddziaływaniem charakteryzowała się zmienna V7 oraz V6. Nadal druga ze zmiennych miała wartość ujemną, czyli wzrost jej wartości powoduje obniżenie temperatury.

Dla kolejnego punktu z siatki pomiarowej wykonano analizę regresji również z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Uzyskane wskaźniki pozwalają stwierdzić, że opracowany model regresji przedstawiający zmiany temperatury w punkcie Pt6 wyjaśnia w prawie 50% wariancję badanego zjawiska. Jedna z najwyższych wartość statystyki F (1340,5) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0,05$) potwierdzają statystyczną istotność modelu liniowego. Analiza wartość statystyki *t* oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* pozwalają stwierdzić, że parametry wyznaczone dla poszczególnych zmiennych niezależnych istotnie różnią się od zera. Jedynie dla wyrazu wolnego wartość *p* jest wyższa niż ustalony próg. Wyraz wolny jest o bardzo niskiej wartości (zaledwie 0,5762) i nie różni się on statystycznie od zera. Linia regresji przechodzi więc bardzo blisko środka układu współrzędnych. W trakcie badania potwierdzono, że zostały spełnione założenia dotyczących m.in. reszt modelu co pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT6^* = 0,5762 - 236,386 \cdot V6 + 157,555 \cdot V1 + 18,634 \cdot V4 + 89,111 \cdot V2 + 75,075 \cdot V3 + 220,759 \cdot V5 + 212,575 \cdot V7 + 186,307 \cdot V9 \quad (8)$$

W oparciu o zapisany model regresyjny możemy stwierdzić, że największy wpływ na temperaturę w szklarni ma prędkość ruchu powietrza w punkcie V6. Ujemna wartość współczynnika regresji pokazuje, że wzrost prędkości $1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$ spowoduje obniżenie temperatury o $0,236^oC$. W pozostałych punktach wraz ze wzrostem prędkości ruchu

119:2848128163

powietrza wzrasta również temperatura. Zależność ta jest najsilniejsza dla punktów V5 i V7. Najsłabszy, ale nadal statystycznie istotny jest wpływ prędkości ruchu powietrza w punkcie V4. W tym miejscu zmiana prędkości o $1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$ spowoduje zmianę temperatury o 0,0186°C. Jest to wiec odziaływanie ponad dziesięciokrotnie słabsze niż w pozostałych punktach.

Wyniki analizy regresji dla punktu Pt7 pozwalają stwierdzić, że opracowany model regresji uwzględniający prędkość ruchu powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej pozwala wyjaśnić prawie 45% wariancji badanego zjawiska. Wysoka wartość statystyki F (1114,4) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0,05$) pozwalają na stwierdzenie statystycznej istotność modelu liniowego. Natomiast w oparciu o wartość statystyki *t* oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* można uznać, że oszacowane parametry modelu regresyjnego istotnie różnią się od zera. Spełnienie pozostałych założeń dotyczących m.in. reszt modelu pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT7^{*} = 49,856 - 117,91 \cdot V6 + 109,789 \cdot V1 + 29,657 \cdot V4 + 32,413 \cdot V2 + 102,307 \cdot V3 + 118,478 \cdot V5 + 138,577 \cdot V7 + 113,130 \cdot V9 \quad (9)$$

Opracowany model regresyjny pokazuje, że tym punkcie siatki pomiarowej wpływ prędkości ruchu powietrza jest umiarkowany. Wartości współczynników regresji oszacowanych metodą najmniejszych kwadratów są poniżej 140. Najwyższą wartością charakteryzowała się zmienna V7, a następnie V5, V6, V9. Nadal wzrost prędkości ruchu powietrza w punkcie V6 powoduje obniżenie temperatury. Najniższy, lecz nadal statystycznie istotnym wpływem charakteryzowały się zmienne V2 i V4. Zmiana ich wartości $1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$ spowoduje wzrost temperatury, ale tylko odpowiednio o 0,0324°C i 0,0296°C.

Model regresji przedstawiający zmiany temperatury w punkcie Pt8 w oparciu o prędkość ruchu powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej pozwala wyjaśnić w ponad 53% wariancję badanego zjawiska. Nadal bardzo wysoka wartość statystyki F (1553,3) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* ($p<0,05$) potwierdzają statystyczną istotność modelu liniowego. Analiza wartość statystyki *t* oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* pozwalają stwierdzić, że parametry wyznaczone dla poszczególnych zmiennych niezależnych istotnie różnią się od zera z wyjątkiem parametru dla zmiennej V4. Zmienna ta jest o bardzo niskiej wartości i przy przyjętym poziomie prawdopodobieństwa nie różni się istotnie od zera. Dla opracowanego

120:1132341063

modelu zostały spełnione założenia dotyczące m.in. reszt modelu co pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT8^{*} = 15{,}698 - 169{,}774 \cdot V6 + 154{,}82 \cdot V1 + 62{,}394 \cdot V2 + 136{,}546 \cdot V3 + 179{,}593 \cdot V5 + 157{,}692 \cdot V7 + 143{,}045 \cdot V9 \quad (10)$$

Widzimy, że wpływ poszczególnych zmiennych niezależnych jest bardzo wyrównany. Dla większości zmiennych przyjmuje on wartości bezwzględne z przedziału od 136,546 dla V3 do 179,593 dla V5. Dwukrotnie niższą wartością charakteryzował się parametr wyznaczony dla zmiennej V2. Nadal jedynie parametr dla zmiennej V6 ma wartość ujemną. Warto zaznaczyć, że analogicznie jak dla punktu Pt3 i Pt6 wyraz wolny jest o niskiej wartości co oznacza, że linia regresji przechodzi bardzo blisko środka układu współrzędnych.

Wykonana analiza dla kolejnego puntu siatki pomiarowej pozwala stwierdzić, że z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów można opracować model regresji przedstawiający zmiany temperatury w punkcie Pt9 wyjaśniający w prawie 50% wariancję badanego zjawiska. Jedna z najwyższych wartość statystyki F (1457,2) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* (p<0,05) potwierdzają statystyczną istotność modelu liniowego. Analiza wartość statystyki *t* oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa *p* potwierdza, że poszczególne parametry wyznaczone dla badanych zmiennych niezależnych istotnie różnią się od zera. Jedyny wyjątek stanowił parametr dla zmiennej V4 o wartości zaledwie 0,1195, który dla przyjętych założeń nieistotnie różnił się od zera. Jest to sytuacja analogiczna jak dla modelu dla punktu Pt8. Jest to pierwszy przypadek, w którym wyraz wolny ma wartość ujemną (-12,969), czyli prosta regresji przecina oś Y nieznacznie poniżej zera. W trakcie badania potwierdzono, że zostały spełnione założenia dotyczące m.in. reszt modelu co pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT9^{*} = -12{,}696 - 225{,}631 \cdot V6 + 176{,}987 \cdot V1 + 87{,}612 \cdot V2 + 96{,}266 \cdot V3 + 258{,}288 \cdot V5 + 195{,}126 \cdot V7 + 191{,}342 \cdot V9 \quad (11)$$

Parametry modelu charakteryzują się większą zmiennością niż dla poprzedniej analizy. Największy wpływ na temperaturę ma zmiana prędkości powietrza w punkcie V5, a następnie V6. W pierwszym przypadku wzrost prędkości ruchu powietrza o $1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$ spowoduje wzrost temperatury o 0,258^{o}C, a w drugim spadek o 0,226^{o}C. Najmniejszy, ale nadal statystycznie istotny wpływ będzie miła zmiana prędkości w punktach V2 oraz V3.

121:1142663730

Wyniki analizy regresji dla punktu Pt10 pozwalają stwierdzić, że opracowany model regresji uwzględniający prędkość ruchu powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej pozwala wyjaśnić zaledwie 36% wariancji badanego zjawiska. Jest to wartość niska i zbliżona do wyniku uzyskanego dla punktu Pt1. Wysoka wartość statystyki F (771,3) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa p (p<0,05) pozwalają na stwierdzenie statystycznej istotność modelu liniowego. Natomiast w oparciu o wartość statystyki t oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa p można uznać, że wszystkie oszacowane parametry modelu regresyjnego istotnie różnią się od zera. Spełnienie pozostałych założeń dotyczących m.in. reszt modelu pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT10^* = 997{,}945 - 959{,}357 \cdot V6 + 448{,}786 \cdot V1 + 267{,}787 \cdot V4 + 316{,}847 \cdot V2 + 169{,}440 \cdot V3 + 1188{,}290 \cdot V5 + 1088{,}927 \cdot V7 + 883{,}248 \cdot V9 \quad (12)$$

Analizując uzyskane wyniki zaobserwowano bardzo dużą zmienność oszacowanych parametrów modelu. Największy wpływ na temperaturę ma prędkość ruchu powietrza w punkcie V5 oraz V7, a następnie V6. Zmiana prędkości ruchu powietrza w tych punktach o $1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1}$ spowoduje zmianę temperatury o ok. 1ºC. Analogicznie jak w poprzednich przypadkach parametr dla zmiennej V6 jest ujemny. Najmniejszy wpływ na analogiczne zmiany wymuszenia na poziomie wynoszącym ok. 0,017ºC odnotowano dla zmiennej V3. W punkcie tym nastąpił duży wzrost przesunięcia prostej względem początku układu współrzędnych. Wartość wyrazu wolnego była bowiem na poziom 998 w czasie, gdy dla od Pt2 do Pt9 oscylowała w przedziale od -12,7 dla Pt9 do 70,6 dla Pt4. Tak wysoki poziom zarejestrowano jedynie dla Pt1.

Model regresji przedstawiający zmiany temperatury w punkcie Pt11 w oparciu o prędkość ruchu powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej pozwala wyjaśnić w ponad 47% wariancję badanego zjawiska. Nadal bardzo wysoka wartość statystyki F (1222,5) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa p (p<0,05) potwierdzają statystyczną istotność modelu liniowego. Analiza wartość statystyki t oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa p pozwalają stwierdzić, że parametry wyznaczone dla poszczególnych zmiennych niezależnych istotnie różnią się od zera. Dla opracowanego modelu zostały spełnione pozostałe założenia dotyczące m.in. reszt modelu co pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT11^* = 51{,}597 - 162{,}020 \cdot V6 + 97{,}758 \cdot V1 + 35{,}375 \cdot V4 + 44{,}831 \cdot V2 + 51{,}330 \cdot V3 + 141{,}617 \cdot V5 + 169{,}450 \cdot V7 + 145{,}730 \cdot V9 \quad (13)$$

122:8409121375

Opracowany model charakteryzował się znacznie mniejszą siłą oddziaływania poszczególnych zmiennych niezależnych na temperaturę w analizowanym punkcie. Największy wpływ wywierała zmiana prędkości ruchu powietrza w punkcie V7 i V6. Wyznaczone dla tych punktów parametry modelu regresyjnego wynosiły odpowiednio 169,450 i -162,020. Najniższym natomiast oddziaływaniem charakteryzowały się zmienne od V2 do V4. Wartości parametrów dla tych zmiennych nie przekraczały 52.

W ostatnim z badanych punktów (Pt12) wykonana analiza pozwoliła na stwierdzenie, że z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów można opracować model regresji przedstawiający zmiany temperatury, który wyjaśnia w prawie 50% wariancję badanego zjawiska. Wysoka wartość statystyki F (1321,2) i odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa p (p<0,05) potwierdzają statystyczną istotność modelu liniowego. Analiza wartość statystyki t oraz odpowiadający jej poziom prawdopodobieństwa p potwierdza, że poszczególne parametry wyznaczone dla badanych zmiennych niezależnych istotnie różnią się od zera. W trakcie badania potwierdzono, że zostały spełnione założenia dotyczące m.in. reszt modelu co pozwoliło na zapisanie modelu w postaci jawnej:

$$PT12^{*} = 20{,}574 - 218{,}895 \cdot V6 + 124{,}938 \cdot V1 + 39{,}727 \cdot V4 + 53{,}271 \cdot V2 + 69{,}275 \cdot V3 + 190{,}998 \cdot V5 + 212{,}135 \cdot V7 + 187{,}964 \cdot V9 \quad (14)$$

Opracowany model charakteryzował się niskim wpływem zmiennych niezależnych na temperaturę w obiekcie szklarniowym. Najwyższym wpływem charakteryzowały się zmienne V5-V7 oraz V9. Wyznaczone dla nich parametry modelu regresyjnego oscylowały w przedziale od 187,964 dla V9 do 218,895 dla V6. Parametr dla ostatniej ze zmiennych analogicznie jak we wszystkich badaniach miał wartość ujemną, czyli jego wzrost obniżał temperaturę w obiekcie szklarniowym. Warto podkreślić, że we wszystkich analizach błąd standardowy estymacji poszczególnych parametrów modelu regresyjnego nie stanowił więcej niż 2% jego wartości.

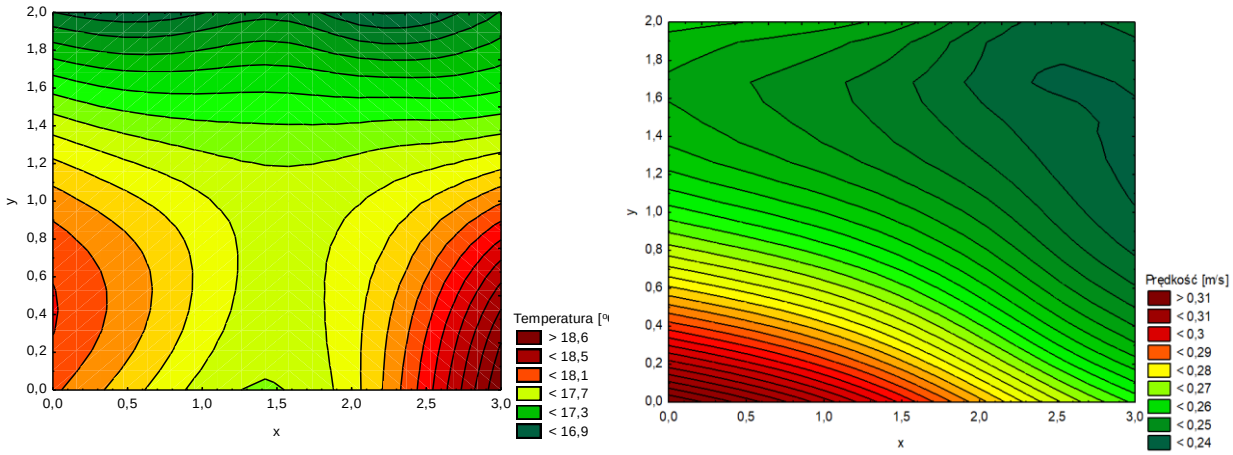
7.3.4. Analiza przestrzennej zmienności parametrów mikroklimatu w przekroju szklarni

Wyniki pomiarów temperatury dla obiektu rzeczywistego przedstawiono w formie graficznej w postaci wykresów warstwicowych dla poszczególnych kombinacji. Na wykresie dla kombinacji a (rys. 81-a) najwyższe temperatury powietrza na poziomie

123:1101735718

powyżej 18,5°C zauważa się w prawym dolnym rogu obszaru pomiarowego. Wyższa temperatura jest też widoczna po lewej stronie i w dolnej części siatki pomiarowej – wynosi w tym miejscu ok. 18°C. Najniższa temperatura, poniżej 17°C panuje w górnej warstwie strefy pomiarowej i części środkowej rozdzielającej obszary o podwyższonej temperaturze. Obserwując natomiast prędkości ruchu powietrza (rys. 81-b) zaobserwowano, że najwyższe wartości - na poziomie powyżej 0,31m·s^{-1} - zarejestrowane zostały w lewym dolnym rogu siatki pomiarowej. Analizując wykres po przekątnej od tego miejsca w stronę prawego górnego rogu wykresu widać systematyczną malejącą zmianę prędkości do poziomu poniżej 0,24m·s^{-1}.

a) *b)*

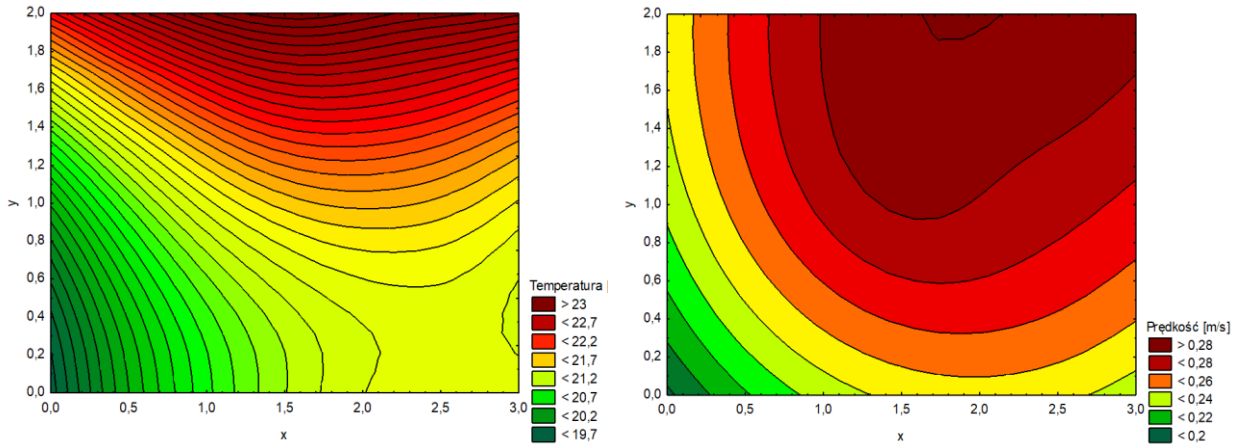


Rysunek 81. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji a

Dla kombinacji b rozkład temperatur (rys. 82-a) w obszarze objętym analizą jest odmienny. Najwyższa temperatura występuje w części górnej strefy pomiarowej - na środku - i systematycznie maleje wraz z przemieszczaniem się do warstwy dolnej. Dla tego wariantu występuje znacznie większa różnica pomiędzy wartościami skrajnymi na poziomie powyżej 3°C, gdy dla kombinacji a była na poziomie poniżej 2°C. Rozkład prędkości ruchu powietrza (rys. 82-b) jest graficznie nieco zbliżony do rozkładu temperatur. Najwyższe prędkości ruchu powietrza zarejestrowane są w górnej części strefy pomiarowej na środku. W miejscu tym prędkość ruchu powietrza osiąga 0,28m·s^{-1}, a w tym samym czasie, w lewym dolnym rogu widać wartość najniższą, gdzie prędkość ruchu powietrza jest poniżej 0,2m·s^{-1}. Dla tego wariantu prędkości przepływu powietrza są na niższym poziomie, lecz zakres ich zmian jest podobny ok. 0,7m·s^{-1}.

124:9496279522

a) *b)*

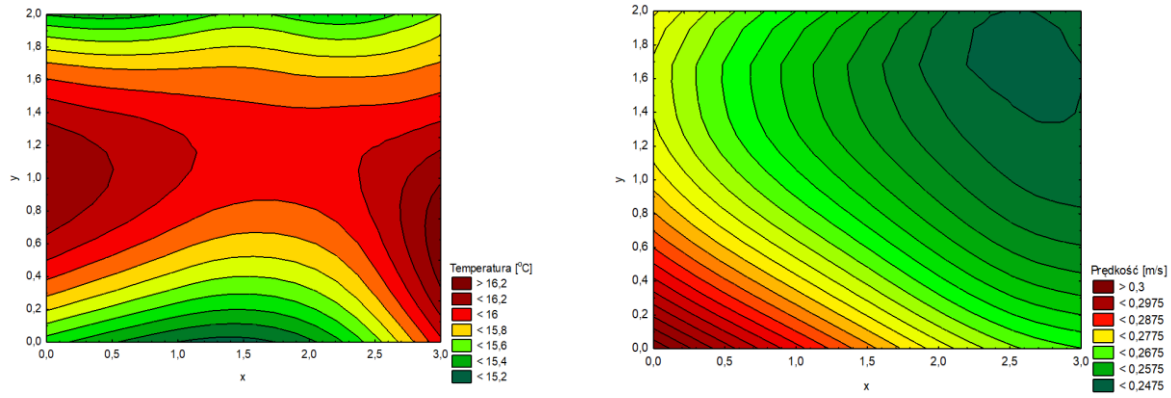


Rysunek 82. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji b

Dla wariantu c rozkład temperatur (rys. 83-a) w obszarze objętym analizą jest odmienny niż dla b. Najwyższe temperatury, powyżej 16,2℃ występuj po prawej i lewej stronie w centralnej części strefy pomiarowe. Najniższe temperatury odnotowano na samym dole strefy pomiarowej, są one też niższe u góry strefy pomiarowej co wyraźnie widać na wykresie. Dla tego wariantu różnica pomiędzy wartościami skrajnymi jest na poziomie ok 1℃. Można więc powiedzieć, że wariant ten charakteryzuje się bardzo wyrównanym rozkładem temperatur. Rozkład prędkości ruchu powietrza (rys. 83-b) graficznie odzwierciedla przepływy powietrza dla tej kombinacji. Zakres zmian prędkości podobnie jak w przypadku temperatury jest mniejszy niż dla wcześniej analizowanych wariantów. Najwyższą prędkość można odczytać z wykresu w dolnym lewym rogu strefy pomiarowej, gdzie odczytana wartość to 0,3 $m \cdot s^{-1}$. Analizując wykres po przekątnej widać, że prędkości ruchu powietrza maleją osiągając wartości ok 0,2875$m \cdot s^{-1}$, 0,2775$m \cdot s^{-1}$, 0,2675$m \cdot s^{-1}$ do ok 0,2475$m \cdot s^{-1}$ w górny prawym rogu strefy pomiarowej.

125:4037133863

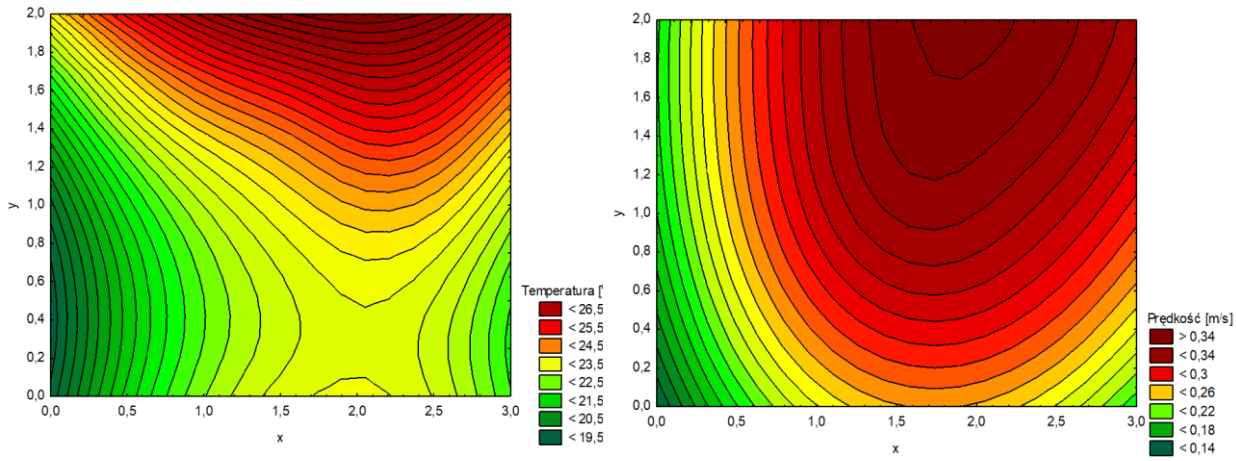
a) *b)*



Rysunek 83. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji c

Dla wariantu d rozkład temperatur (rys. 84-a) jest graficznie zbliżony do zmian zaobserwowanych dla b, zakres temperatur jest jednak wyższy. Najwyższa temperatura na poziomie poniżej 26,5℃ występowała w górnej strefie pomiarowej. Obszar ten dla pozostałych scenariuszy charakteryzował się temperaturą na poziomie niższym o ok. 3℃. Analizując wykres kolejno w dół obserwowano spadek temperatury do poziomu poniżej 23 ℃ w strefie centralnej i poniżej 20℃ w dolnej prawej i lewej części strefy pomiarowej. Dla d zaobserwowano również największe zmiany prędkości ruchu powietrza (rys. 84-b) w porównaniu do wszystkich analizowanych wariantów pracy systemu grzewczego w obiekcie rzeczywistym. Najwyższe wartości prędkości przekraczające 0,34m·s^{-1} wystąpiły w górnej strefie, czyli w obszarze, w którym temperatura była najwyższa. Analiza wykresu nieco niżej pozwalała na zauważenie spadku wartości prędkości do poziomu poniżej 0,14m·s^{-1}. Jest to obszar, w którym temperatura była najniższa, co wyraźnie widać szczególnie w dolnych rogach siatki pomiarowej.

a) *b)*



Rysunek 84. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji d

126:5311217975

8. Dyskusja i wnioski

Produkcja szklarniowa w Polsce jest istotnym elementem struktury krajowego sektora produkcji rolniczej, w przypadku której bardzo intensywnie rozwinęły się systemy automatyki i robotyzacji. Duże zainteresowanie rynku produktami pochodzącymi z produkcji szklarniowej determinowały postęp w tej dziedzinie. Zmieniające się ceny nośników energii, których udział w produkcji szklarniowej jest znaczny, wymuszały wprowadzanie nowych rozwiązań. Ta dwukierunkowa obserwacja procesu produkcyjnego powodowała znaczący postęp oraz wymuszała dużą efektywność procesu produkcyjnego. Kontrola mikroklimatu w procesie uprawy oraz możliwości jego sterowania pozwalały na: wydłużenie okresu wegetacji, lepsze wykorzystanie substancji odżywczych, ograniczenie zużycia wody oraz minimalizację zużycia środków ochrony roślin. Zapewnienie optymalnych warunków rozwoju uprawianych roślin nie jest łatwe, ponieważ duży udział w procesie wzrostu mają czynniki zewnętrzne. Do nich należy temperatura zewnętrzna, prędkość i kierunek wiatru oraz natężenie promieniowania słonecznego. Biorąc pod uwagę efektywność produkcji szklarniowej należy umiejętnie łączyć wyposażenie szklarni z systemem sterowania. Parametry mikroklimatu wewnątrz obiektu szklarniowego są silnie uzależnione od konstrukcji szklarni, systemu grzewczego i wentylacyjnego, wywołującego ruch powietrza. Główną siłą wymuszającą ruch powietrza w szklarni posiadającej wentylację grawitacyjną jest różnica ciśnień wywołanych wieloma czynnikami: rozmieszczeniem oraz temperaturą elementów grzejnych, warunkami klimatycznymi występującymi na zewnątrz obiektu. Należy pamiętać, że szybkość zmian warunków zewnętrznych może być bardzo różna, dlatego układ automatycznej regulacji mikroklimatu powinien działać z wyprzedzeniem. Dokładna znajomość szybkości zmian zachodzących wewnątrz szklarni w zależności od warunków zewnętrznych pozwala na poprawną pracę systemu sterowania mikroklimatem. Często w celu mniejszego uzależnienia się od warunków zewnętrznych w zakresie mikroklimatu obiekty szklarniowe wyposaża się w wentylację wymuszoną. Wykorzystanie wentylacji wymuszonej, niestety zwiększa energochłonność produkcji oraz może powodować straty energii powodowane ruchem powietrza w całym przekroju obiektu.

W literaturze przedmiotu wiele uwagi poświęca się rozwiązaniom zapewniającym komfort termiczny roślin w czasie produkcji. W podręczniku ASHRAE (2009) podane jest stwierdzenie, że optymalna prędkości powietrza w szklarni powinna być w zakresie 0,5–

127:1138809376

0,7m·s^{-1}. Ze względu na dobrostan roślin i jakość produktu zaleca się by prędkość ruchu powietrza w szklarni nie przekraczała 1m·s^{-1}. Dlatego ze względów energetycznych preferowana jest naturalna wentylacja z jednoczesnym zapewnieniem równomiernego rozkładu przestrzennego parametrów środowiskowych (Akrami M. i in. 2020, Bournet P. i in. 2010. Papadakis G. i in. 1996, Boular T. i in. 1995). W niekorzystnych warunkach meteorologicznych koniecznością jest wspomaganie wymuszenia ruchu powietrza w szklarni. Najprostszym rozwiązaniem jest wykorzystanie wentylatorów, lecz zadanie to realizowane jest również m.in. przez zmiany konstrukcyjne np. dach typu NVAC i zamgławianie. Z badań wynika, że rozwiązanie to pozwoliło zapewnić ruch powietrza w szklarni z prędkością do 0,38m·s^{-1} (bez użycia wentylatorów) (McCartney L. i in. 2018). Prace prowadzone przez Lopeza, Valera, Molina-Aiz i Peña (2010) wykazały, że wykorzystanie mat chłodzących i wentylatorów w szklarni wielonawowej przy uprawie pomidorów, jak i bez upraw pozwoliło na uzyskanie średniej prędkości powietrza wewnątrz szklarni na poziomie odpowiednio 0,21 i 0,26m·s^{-1}.

Na temat wpływu parametrów konstrukcyjnych oraz systemu grzewczego w literaturze dostępnych jest bardzo dużo opracowań (Sleger V., Neuberger P., Polak M. 2009). Zdecydowanie mniej badań dotyczy problematyki podjętej w pracy, w której analizowany jest wpływ pracy systemu grzewczego na ruch powietrza w szklarni. Wykonane badania pozwoliły na potwierdzenie postawionej hipotezy, że istnieje możliwość sterowania ruchem powietrza wewnątrz szklarni odpowiednią kombinacją temperatur w systemach grzejnych. Pomiary wykonane w obiekcie doświadczalnym (tab. 48) wykazały, że zróżnicowanie średnich temperatur powietrza jest na poziomie ok 4^{o}C. Najwyższa temperatura (powyżej 22^{o}C) wystąpiła dla kombinacji H pracy sytemu grzewczego, a najniższa dla B, C oraz D (obiektu doświadczalnego). W obiekcie doświadczalnym, w którym nie było roślin, zgodnie z oczekiwaniami nie zaobserwowano zmian temperatury w międzyrzędziach oraz w miejscach potencjalnego wzrostu roślin.

Prędkość ruchu powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej jest ściśle uzależniona m.in. od rozkładu temperatury powietrza. W obiekcie doświadczalnym z wyjątkiem wariantu A prędkość ruchu powietrza dla większości kombinacji zmieniała się w przedziale od 0,2m·s^{-1} do 0,45m·s^{-1}. Dla wariantu C, D oraz F (które posiadały jednakowe nastawy jak obiekt produkcyjny) zaobserwowano wzrost prędkości w dolnej części siatki pomiarowej (szczególnie w środkowej jej części). Rejestrowane wartości zmniejszały się wraz ze wzrostem wysokości, a minimum wystąpiło w lewym górnym i prawym dolnym rogu siatki pomiarowej. Kombinacje E oraz H charakteryzowały się niższymi wartościami prędkości oraz bardziej równomiernym rozkładem prędkości przepływu powietrza.

128:4710861282

Najwyższe prędkości występowały dla kombinacji C, F i G, w dolnej strefie siatki pomiarowej z wyjątkiem prawego dolnego rogu (rys. 55, 58, 59).

Z przeprowadzonych badań w obiekcie rzeczywistym, (tab. 49) w którym prowadzono uprawę pomidora, wynika, że temperatura w strefie roślin jest zbliżona do temperatury w międzyrzędziach. Najwyższą temperaturę niezależnie od wysokości pomiaru rejestrowano dla kombinacji b i d, w której obieg grzewczy numer 1 miał obniżoną temperaturę. Dla tych parametrów pracy systemu grzewczego w obiekcie obserwowano średnie temperatury oscylujące w przedziale od 21^{o}C do 26^{o}C. W większości wariantów prowadzonych badań zaobserwowano spadek temperatury wraz z obniżeniem wysokości (rys. 82, 83, 84). Zmiany te były na poziomie 2^{o}C na jeden metr wysokości szklarni w wariancie b i d. Wariant a i c charakteryzował się niższymi temperaturami, gdzie średnia wartość mieściła się w przedziale od 16^{o}C (wariant c) do 18^{o}C (wariant a). W czasie badań w obiekcie rzeczywistym prędkości ruchu powietrza oscylowały w przedziale od 0,25m·s^{-1} dla wariantu a oraz c do 0,35m·s^{-1} dla wariantu d. Rejestrowane prędkości przepływu powietrza były zbliżone do badań innych autorów (McCartney L., Orsat V., Lefsrud M.G. 2018, Lopez A. 2010). Zaobserwowano, że w strefie roślin występowało większe zróżnicowanie prędkości ruchu powietrza wraz z wysokością szklarni. Różnice te były szczególnie widoczne w wariancie b i d. W górnej strefie szklarni prędkość ruchu powietrza była wyższa o 0,04m·s^{-1}. W międzyrzędziach różnice były nieznaczne i nie przekraczały 0,02m·s^{-1}. Wykazano również, że wymuszony ruch powietrza odpowiednią kombinacją działania systemu grzejnego pozwala na asymetryczny rozkład temperatury w przekroju poprzecznym szklarni. W wariancie b i d (rys. 82 i 84), w obiekcie rzeczywistym, najwyższe temperatury występowały centralnie w górnej strefie siatki pomiarowej i systematycznie obniżały się wraz z przemieszczaniem się kierunku warstwy dolnej. Najniższe temperatury wystąpiły w lewym, dolnym rogu siatki pomiarowej. Dla wariantu b różnica temperatur była na poziomie 3^{o}C, a dla kombinacji d zwiększyła się ona do 6^{o}C.

Wariant „a" który charakteryzował się jednakową temperaturą wszystkich trzech systemów grzewczych (co charakteryzuje starsze obiekty szklarniowe) posiadał niską średnią temperaturę wewnętrzną jak też dwie strefy o podwyższonej temperaturze zlokalizowane w dolnych rogach siatki pomiarowej. Wartość ekstremalna wystąpiła w prawym dolnym rogu. Różnica temperatur rejestrowana w czasie pomiarów nie przekraczała 2^{o}C. Zbliżony rozkład temperatur, lecz o większej symetrii zaobserwowano dla wariantu c (rys. 83). Ekstremalne temperatury występowały w połowie wysokości siatki pomiarowej po prawej i lewej jej stronie. Zmienność temperatur była na poziomie zbliżonym do rejestrowanego w wariancie „a".

129:1095346556

Wyniki analizy końcowej badań wpływu temperatury układów grzewczych szklarni na ruch powietrza w strefie wegetacji roślin przedstawiono w tabeli 48.

Tabela 48. Charakterystyka ruchu powietrza w obiekcie badawczym w zależności od nastaw temperatury systemów grzewczych

Wariant	Zakres temperatur wewnątrz obiektu ^oC	Nastawy temperatur obiegów grzewczych ^oC			Zakres prędkości ruchu powietrza $m \cdot s^{-1}$	Wysokość strefy wyrównanej prędkości powietrza mm	Prędkość ruchu powietrza w strefie wyrównanej prędkości powietrza $m \cdot s^{-1}$
		I	II	III			
A	20,40 – 21,20	40,5	40,5	40,5	0,13 – 0,35	1450	0,30
B	17,64 – 18,40	20,5	40,5	40,5	0,22 – 0,40	1650	0,32
C	17,35 – 18,02	25,5	50,5	30,5	0,25 – 0,43	1450	0,32
D	17,80 – 18,62	20,5	50,5	30,5	0,25 – 0,4	1550	0,32
E	20,20 – 21,10	20,5	55,5	30,5	0,20 – 0,35	1550	0,30
F	19,48 – 20,15	20,5	60,5	30,5	0,23 – 0,45	1500	0,32
G	18,62 – 19,38	20,5	50,5	30,5	0,23 – 0,44	1600	0,32
H	21,66 – 22,63	20,5	40,5	30,5	0,23 – 0,35	1600	0,31

W obiekcie badawczym prowadzono pomiary w warunkach zbieżnych z obiektem rzeczywistym. Nastawy układu sterowania systemu grzewczego były zbliżone do nastaw obiektu rzeczywistego. W okresie badań wewnątrz obiektu temperatura wahała się od 17,35^{o}C do 22,63^{o}C, przyjmując wartość średnią 18,68^{o}C. Nastawy obwodów grzewczych w wariantach A, C, D, F były identyczne jak w obiekcie rzeczywistym. Przy tych nastawach średni zakres prędkości ruchu powietrza wynosił 0,32$m \cdot s^{-1}$ (z wyjątkiem kombinacji A). Wyrównana prędkość ruchu powietrza była osiągana na wysokości 1550 mm. Obwody grzewcze pierwszy i trzeci w wszystkich czterech wariantach (E, F, G, H) posiadały nastawy jednakowe, które wynosiły dla obwodu pierwszego 20,5^{o}C dla obwodu trzeciego 30,5^{o}C. Zmianie ulegały nastawy obwodu drugiego (podrynnowego). System grzewczy umożliwiał uzyskanie wyrównanej średniej prędkości ruchu powietrza na wysokości 1550 mm. Wyniki końcowe badań w obiekcie badawczym pozwoliły osiągnąć ruch powietrza na poziomie 0,31$m \cdot s^{-1}$. Uwzględniając okres prowadzonych badań uprawiane w szklarniach pomidory w obiekcie rzeczywistym posiadały średnio wysokość 2,15m, a temperatura zewnętrzna w godzinach porannych wynosiła średnio 14,0^{o}C do 16,5^{o}C (Tab.49).

Tabela 49. Charakterystyka ruchu powietrza w obiekcie rzezczywistym w zależności od nastaw temperatury systemów grzewczych

Wariant	Zakres temperatur wewnątrz obiektu ^oC	Nastawy temperatur obiegów grzewczych ^oC			Zakres prędkości ruchu powietrza $m \cdot s^{-1}$	Wysokość strefy wyrównanej prędkości powietrza mm	Prędkość ruchu powietrza w strefie $m \cdot s^{-1}$
		I	II	III			
A	16,9 – 18,6	40,5	40,5	40,5	0,24 – 0,31	1850	0,27
B	19,7 – 23,0	20,5	50,5	30,5	0,20 – 028	1750	0,24
C	15,2 – 16,2	25,5	50,5	30,5	0,25 – 0,30	1650	0,27
d	19,5 – 26,5	20,5	60,5	30,5	0,19 – 0,35	1550	0,30

130:1925483897

Układ grzewczy zaprogramowany był w tym okresie średnio na temperaturę 22,5°C. W tych warunkach średnia wartość prędkości powietrza wynosiła 0,27m·s^{-1}. Wielkość ta nie była zadawalająca. Analizując układy grzewcze szklarni w tab. 49 zauważa się wzrost temperatury w strefie środkowej (podrynnowej). Parametr ten spowodował wzrost prędkości ruchu powietrza średnio do 0,29m·s^{-1}. **Odnosząc uzyskane wyniki do obiektu badawczego zaobserwowano, że intensywność pracy systemu grzewczego środkowego (podrynnowego) ma decydujący wpływ na prędkość ruchu powietrza.** Prędkość ruchu powietrza w wyrównanej formie rejestrowano na wysokości 1650 mm. Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że rośliny znajdujące się w szklarni powodują obniżenie prędkości ruchu powietrza o 0,02m·s^{-1} oraz osiągnięcie stanu wyrównanej prędkości ruchu powietrza na wysokości o 100 mm wyżej w porównaniu do obiektu badawczego.

Należy zaznaczyć, że udział ogrzewania w produkcji pod osłonami stanowi około 60% ogólnych kosztów produkcji. Jest to niezwykle istotne zagadnienie, któremu poświęca się wiele uwagi. Ich wielkość w głównej mierze zależy od izolacyjności osłony oraz utrzymywanych warunków termicznych wewnątrz obiektu, które zależą od rodzaju produkcji, okresu uprawy, a także zewnętrznych warunków pogodowych. Zarówno w ciągu dnia, a w szczególności nocy obiekty szklarniowe w ostatnich latach wyposażano w specjalne kurtyny, które znacznie ograniczają straty ciepła. Drugim niezmiernie ważnym zagadnieniem jest układ grzewczy i jego sterowanie, który analizowano powyżej. W nowoczesnych obiektach szklarniowych stosuje się rury wykonane z tworzyw sztucznych o przekroju gwiazdy. Kształt ten umożliwia uzyskanie większej powierzchni grzewczej w stosunku do rur tradycyjnych przy mniejszej objętości czynnika grzewczego. Wyposażenie obiektów szklarniowych w dany typ systemu grzewczego zależy od uprawianych roślin. Najczęściej są to trzy lub cztery obwody grzewcze posiadające niezależną regulację temperatury. Temperatura poszczególnych elementów grzejnych systemu grzewczego ma wpływ na ruch powietrza w szklarni. Mając na uwadze mikroklimat w obiekcie szklarniowym podczas badań wykonywano pomiary temperatur elementów grzejnych a ich wyniki po analizie statystycznej służyły do wyznaczania prędkości ruchu powietrza, która jest istotna w uprawach roślin. Mikroklimat w strefie uprawianych roślin ma znaczący wpływ na efekty produkcji. Parametry mikroklimatu decydują o jakości i wielkości uzyskiwanego plonu. Określono zużycie ciepła w poszczególnych wariantach doświadczenia, które w obiektach rzeczywistych wynosiło od 100W·m^{-2} do 180W·m^{-2}.

Rozwój technik produkcji roślinnej w systemach o podwyższonym poziomie CO_2 w produkcji szklarniowej, pozwala uzyskać jeszcze wyższe plony (Dsouza A. 2022, Tripathi

131:7129293333

N. i in., 2019). Stężenie dwutlenku węgla [CO_2] jest istotnym elementem intensywności fotosyntezy roślin (Avila R. i in., 2020). Uprawa roślin pod osłonami pozwala osiągnąć wielokrotnie wyższe plony w stosunku do upraw tradycyjnych oraz wydłużyć okres wegetacji roślin. Jednym z czynników limitujących produkcję pod osłonami jest występowanie w szklarni niedoboru CO_2. Problem ten wynika z budowy obiektów, w których rośliny są izolowane od środowiska zewnętrznego. Obecnie stężenie CO_2 w atmosferze jest na poziomie ok. 400 $\mu mol \cdot mol^{-1}$. W zamkniętym środowisku szklarni poziom ten jest jeszcze niższy więc prawie 90% znanych gatunków roślin nie jest w stanie nasyconym fotosyntetycznie (Karim i in., 2020). W związku z tym można się spodziewać wzrostu fotosyntezy i biomasy roślin w warunkach zwiększonego udziału CO_2 (Kimball, 2016). Stężenie CO_2 wpływa na różne wskaźniki wzrostu roślin, np. wysokość rośliny, średnicę łodygi, powierzchnię liści, całkowitą suchą masę oraz plon będący głównym celem produkcji. W literaturze przedmiotu zmiany plonu wywołane dokarmianiem roślin CO_2 określane są w przedziale od 20% do ponad 120%. Badania Jin i in., (2009) wykazały, że optymalne dla wzrostu roślin stężenie CO_2 wynosi 800–1000 $\mu mol \cdot mol^{-1}$. Na przykładzie uprawy pomidora w obiektach szklarniowych przeprowadzono wstępną analizę warunków mikroklimatycznych uwzględniającą ruch powietrza w szklarni, który ma bezpośredni wpływ na pozostałe parametry mikroklimatu szklarniowego. Z badań wynika, że plony pomidorów wzrastały o 38% przy CO_2 w przedziale od 1000 do1500 $\mu mol \cdot mol^{-1}$ (Karim i in., 2020), oraz o 125% przy 700 $\mu mol \cdot mol^{-1}$ (Mamatha i in., 2014) stąd wniosek dotyczący dawki CO_2. Działania zmierzające do optymalizacji dawki CO_2 są realizowane np. za pomocą analizy głównych składników (PCA) i techniki preferencji kolejności przez podobieństwo do rozwiązania idealnego (TOPSIS). W celu uzyskania optymalnego wzrostu pomidorów, plonu, efektywności wykorzystania wody i jakości owoców konieczne jest sterowanie poziomem CO_2 w zależności od fazy rozwoju rośliny i warunków meteorologicznych. Dostawa CO_2 do szklarni może się odbywać poprzez dostarczenie gazu z zewnątrz lub metodami alternatywnymi jak np. kompostowanie słomy i obornika bezpośrednio w szklarni. W zakresie dokarmiania roślin CO_2 ważne jest zapewnienie odpowiedniego stężenia gazu w poszczególnych piętrach rośliny. Drugim bardzo ważnym czynnikiem w zakresie efektywnego wykorzystania CO_2 jest ruch powietrza w szklarni. Stąd powyżej realizowany zakres badań. Niekorzystne jest wietrzenie obiektu i usuwanie CO_2 do atmosfery. Dwutlenek węgla i temperatura powietrza nie są jedynymi czynnikami wpływającymi na prawidłowy rozwój roślin w uprawach pod osłonami. Ważna jest nie tylko temperatura powietrza, ale również jego wilgotność. Wzrost wilgotności w szklarni sprzyja rozwojowi wielu patogenów chorobotwórczych co z kolei wymusza stosowanie zwiększonej

132:7263472060

ilości środków ochrony roślin i podnosi koszty uprawy oraz pogarsza jakość plonów. Na wilgotność powietrza w szklarni główny wpływ ma transpiracja roślin. Im większa transpiracja roślin, tym większy napływ wilgoci do szklarni, a tym samym wyższy poziom wilgotności powietrza. Odparowanie wody przez aparaty szparkowe roślin zwiększa zawartość wody w powietrzu, lecz jest to proces istotny dla optymalnego przyswajania minerałów przez rośliny, a więc i prawidłowego ich rozwoju. Optymalną wilgotność powietrza w szklarni można osiągnąć m.in. przez ogrzewanie powietrza, wentylację czy stosowanie osuszaczy. W celu ograniczenia nakładów energetycznych na zapewnienie odpowiedniej wilgotności powietrza w szklarni stosuje się np. pasywny proces osuszania wykorzystujący materiały PCM. Pozwalają one na utrzymywanie wilgotności na poziomie 10–14% niższym w porównaniu do wilgotności względnej powietrza w szklarni konwencjonalnej (Berroug i in., 2011) przy jednoczesnej redukcji kosztów na ogrzewanie.

Wykorzystanie systemu grzewczego pozwala na zmniejszenie wilgotności, ale system ten winien być z synchronizowany z pozostałymi wymogami obiektu. Prawidłowo dobrane temperatury systemów grzewczych obniżają wilgotność powietrza w obiekcie oraz pozwalają na osiąganie prawidłowego mikroklimatu w szklarniach. Wietrzenie, a więc pobieranie powietrza zewnętrznego, obniża temperaturę w szklarni, pociągając za sobą konieczność jego ogrzewania. Producent ponosi wiec dodatkowe koszty, co jest szczególnie dotkliwe w obliczu rosnących cen energii, z którymi w ostatnich latach borykają się producenci rolni. Dodatkowo taki sposób regulacji sprawia, że mikroklimat jest niestabilny co niekorzystnie wpływa na rozwój roślin w czasie wegetacji oraz ilość i jakość plonu. Z badań wynika, że szkodliwe dla roślin jest nie tylko zwiększenie, ale również i obniżenie wilgotności. W okresie wegetacji roślin w szklarni wilgotność może spadać do poziomu 20–35%, co prowadzi do deficytu ciśnienia pary wodnej (VPD) w zakresie 18–21kPa. Tak niski udział wody występuje nawet jeśli powietrze zewnętrzne ma wilgotność na poziomie 70-85%. Jest to powodowane wzrostem temperatury wewnątrz szklarni. W takich warunkach mikroklimatu niemożliwy jest rozwój np. pomidorów. Stąd odpowiednio zróżnicowana temperatura systemów grzewczych umożliwia spełnienie wyżej wymienionych wymagań oraz przyczynia się do obniżenia nakładów energetycznych.

133:2493665563

9. Literatura

1. Akhlaq M., Chuan Z., Haofang Y., Shaowei L., i in. (2023). Exploring adequate CO_2 elevation for optimum tomato growth and yield under protected cultivation. Journal of Plant Physiology. Vol. 289.; 154093
2. Akrami M., Salah A. H., Javadi A.A., i. in. (2020). Towards a Sustainable Greenhouse: Review of Trends and Emerging Practices in Analysing Greenhouse Ventilation Requirements to Sustain Maximum Agricultural Yield. Sustainable Applications in Agriculture. 12(7), 2794
3. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). (2009). Fundamentals of control ASHRAE handbook: Fundamentals
4. Atılgan AY., Ali Aktaş H., Tunçbilek F. (2019). Investigation of heating and cooling degree-hour values in greenhouses with different color cover materials: the case of lettuce plant. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. nr III/1
5. Avila R., DeAlmeida W., Costa L., Machado L., i in. (2020). Elevated air [CO_2] improves photosynthetic performance and alters biomass accumulation and partitioning in drought-stressed coffee plants. Environmental and Experimental Botany. Vol. 177.; 104-137
6. Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H., Van de Braak NJ. (1995). Greenhouse climate control an integrated approach. Wageningen: Wageningen Pers.
7. Barabasz R. (2016). Nowości z Amsterdamu. Hasło Ogrodnicze. 8/2016
8. Bazgaou A., Fatnassi H., Bouhroud R., Gourdo L., i in. (2018). An experimental study on the effect of a rock-bed heating system on the microclimate and the crop development under canarian greenhouse. Solar Energy. Vol. 176.; 42-50
9. Berroug F., Lakhal E.K., El Omari M., Faraji M., El Qarnia H. (2011). Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. Energy and Buildings. Vol. 43, Issue 11.; 3027-3035
10. Boular T., Draoui B. (1995). Natural Ventilation of a Greenhouse with Continuous Roof Vents: Measurements and Data Analysis. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 61, Issue 1.; 27-35
11. Bournet P., Boulard T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 74, Issue 2.; 195-217

134:8371801149

12. Bredenbeck H. (1989). Energy saving greenhouses system with solar energy. Acta Horticulturae. 245.; s.300-306
13. Cichoń T. (1979). Budowa szklarni - Skrypty dla Szkół Wyższych. Kraków: Wydanie II
14. Czekalski M. (2010). Ogólna uprawa roślin Ozdobnych. Wydanie III poprawione i uzupełnione. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. ISSN 1897-9408
15. D'Amico A., De Boni A., Palmisano G.O., Acciani C., Roma R. (2023). Environmental analysis of soilless tomato production in a high-tech greenhouse. Cleaner Environmental Systems. Vol. 11.; 100137
16. Dey T., Naughton D. (2019). Nano-porous sol-gel derived hydrophobic glass coating for increased light transmittance through greenhouse. Materials Research Bulletin. Vol 116.; 126-130
17. Dsouza A. (2022). Evaluating the Feasibility of Carbon Dioxide Enrichment in Greenhouses/Vertical Farms through Composting Crop Residues. OMAFRA Rural Symposium.
18. Eğilmez Z., Atılgan A. (2019). Effects of greenhouse covering materials of different colors on plant development in greenhouse cultivation: radish (Raphanus sativus var L.) case. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. nr III/1
19. Ertop H., Atilgan A. (2017). The determination of properties of heating and cooling systems in greenhouse. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. nr III/2
20. Forkuor G., Amponsah W., Oteng-Darko P., Osei G. (2022). Safeguarding food security through large-scale adoption of agricultural production technologies: The case of greenhouse farming in Ghana. Cleaner Engineering and Technology. Vol. 6.; 100384
21. Gajc-Wolska J., Kowalczyk K., Hemka L. [i in.]. (2010). Wpływ doświetlania lampami sodowymi i metalohalogenkowymi na wybrane parametry fizjologiczne roślin pomidora (lycopersicon esculentum mill.). Prace Instytutu Elektrotechniki. Z. 245
22. Grabarczyk S. (2010). Wpływ zmienności promieniowania słonecznego na zużycie energii cieplnej w szklarni. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. z.57[271], nr 4.
23. Grabarczyk S. (2010). Zużycie energii cieplnej w szklarni z ruchomym ekranem termoizolacyjnym. Czasopismo Techniczne. Budownictwo. R. 10

135:1142434238

24. Grabarczyk S. (2011). Zużycie energii cieplnej na cele grzewcze w zależności od stanu funkcjonowania szklarni. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. T. 6
25. Grabarczyk S. (2016). Dokładność prognozowania zapotrzebowania na ciepło w szklarni. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. T. 8
26. Grabarczyk S. (2016). Rzeczywista charakterystyka energetyczna budynku szklarni. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. T. 8, nr 4
27. Greń J. (1982). Statystyka matematyczna modele i zadania. PWN, Warszawa
28. Hanan J. (1998). Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture. CRC Press LLC. SBN: 0-8493-1698-7
29. Hao P. F., Qiu C., Ding G., Vincze E., Zhang G., Zhang Y., Wu F. (2020). Agriculture organic wastes fermentation CO_2 enrichment in greenhouse and the fermentation residues improve growth, yield, and fruit quality in tomato. Journal of Cleaner Production. Vol. 275.; 123885
30. Henten van E.J. (1994). Greenhouse climate management: an optima control approach. Ph.D. Dissertation, Agricultural University Wageningen.
31. Hobler T. (1986). Ruch ciepła i wymienniki. Warszawa: WN-T.
32. Jablońska L., Olewnicki D. (2011). Zmiany w powierzchni upraw ogrodniczych pod osłonami w Polsce w pierwszej dekadzie XXI w. Warszawa: Samodzielna Pracownia Organizacji i Ekonomiki Ogrodnictwa, Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu, SGGW.
33. Jathunarachchi AS., Perera P., Salgadoe S. (2021). Plant genetic resources assay for abiotic stress-tolerant traits using tissue culture techniques: a review. SABRAO Journal of Breeding & Genetics. Vol. 53 Issue 3, p334-351
34. Karim M., Hao P., Nordin N., i in. (2020). CO_2 enrichment using CRAM fermentation improves growth, physiological traits, and yield of cherry tomato (Solanum lycopersicum L.). Saudi Journal of Biological Sciences. Vol. 27, Issue 4.; 1041-1048
35. Kiełbasa P., Budyn P., Elżbieta B. (2009). Analysis of energy output in production of selected groups of plants. Acta Technologica Agriculturae. nr 3.; s.72-75
36. Kiełbasa P., Pikul K., Kurpaska S. [i in.]. (2017). Wpływ promieniowania mikrofalowego na stopień eliminacji mikroorganizmów w wierzchniej warstwie gleby. Przegląd Elektrotechniczny. vol. 93, nr 12.; s.107-110
37. Kiełt Ł., Pisarev V. (2010). Analiza zaopatrzenia w energię szklarni typu Venlo za pomocą układu kogeneracyjnego. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. z.57

136:7962247535

38. Kimball B. (2016). Crop responses to elevated CO_2 and interactions with H2O, N, and temperature. Current Opinion in Plant Biology. Vol. 31.; 36-43
39. Kleiber T. (2012). Pollution of the Natural Environment in Intensive Cultures Under Greenhouses. Archives of Environmental Protection. Vol. 38
40. Klepacz-Baniak J. (2016). Turecka sztuka hodowli. Hasło Ogrodnicze. 8/2016
41. Knaga J., Famielec S., Rutkowski K. (2019). The New Construction of Heating Elements for Greenhouse Heating Systems. Infrastructure and Environment. ISBN 978-3-030-16541-3.; s.30-36
42. Kosieradzki J. (2016). Magazynowanie energii cieplnej. Rośliny Ozdobne. 7-8/2016
43. Krzesiński W. (2002). Jak uzyskać 55 kg/m2 – cz. II temperatura, dwutlenek węgla, wilgotność powietrza. Hasło Ogrodnicze. nr. 12
44. Krzesiński W. (2002). Pomidory – jak uzyskać 55 kg/m2 cz.I. Hasło Ogrodnicze. 11/2002
45. Krzesiński W. (2014). Kontrola wybranych parametrów klimatu. Hasło Ogrodnicze. 8/2014
46. Kurkowski M., Witkowski P. (2014). Wpływ światła emiterów LED na rozwój roślin szklarniowych. Śląskie Wiadomości Elektryczne. Nr 6 (117)
47. Kurpaska S. (2014). Sterowanie parametrami mikroklimatu. Hasło Ogrodnicze. 8/2014
48. Kurpaska S. (2008). Wymiary Geometryczne oraz rodzaj pokrycia a zapotrzebowanie ciepła w szklarni. Inżynieria Rolnicza. 6(104) /2008
49. Kurpaska S. (2016). Innowacyjne rozwiązania. Hasło Ogrodnicze. 8/2016
50. Kurpaska S., Kiełbasa P. (2019). Technical and economic analysis of use of solar collectors in greenhouse production. Engineering for Rural Development. Latvia University of Life Sciences and Technologies. vol. 18.; s.1574-1580
51. Kurpaska S., Latała H., Rutkowski K. (2003). Zmiany temperatury powietrza przy zróżnicowanym wyposażeniu technicznym tunelu foliowego. Inżynieria Rolnicza. 11 (53).; s.129-136
52. Kurpaska S., Ślipek Z., Łapczyńska-Kordon B. (1996). The thermal properties of greenhouse substrate. Annual Review of Agricultural Engineering. 1 (1).; s.13-21
53. Liberacki D., Stachowski P., Kozaczyk P. (2017). Ocena nawadniania kroplowego w uprawie pomidora szklarniowego w warunkach produkcyjnych. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. nr I/1

137:5265262580

54. Libik A., Starzecki W., Szubski J. (1996). Technologia dokarmiania upraw szklarniowych dwutlenkiem węgla przy zastosowaniu prototypowego systemu EUDW-2. Zeszyty Prob. Post. Nauk Rolniczych. z. 429.; s.195-2001
55. Lopez, A. (2010). Experimental evaluation by sonic anemometry of airflow in a Mediterranean greenhouse equipped with a pad-fan cooling system. Transactions of the ASABE 53.3.; 945-957
56. Mamatha H., Srinivasa Rao N. K., Laxman R.H., i in., (2014). Impact of elevated CO_2 on growth, physiology, yield, and quality of tomato (Lycopersicon esculentum Mill) cv. Arka Ashish. Photosynthetica 2014. Vol. 52, Issue 4.; 519-528
57. McCartney L., Orsat V., Lefsrud M.G. (2018). An experimental study of the cooling performance and airflow patterns in a model Natural Ventilation Augmented Cooling (NVAC) greenhouse. Biosystems Engineering. Vol. 174.; 173-189
58. Namysłowska-Wilczyńska B. (2006). Geostatystyka, Teoria i zastosowanie. Politechnika Wrocławska. Wrocław. ISBN 83-7085-928-3.
59. Nawalany G.; Sokołowski P. (2019). Impact of Selected Technical Soil Parameters on the Greenhouse Energy Management. Journal of Ecological Engineering. Vol. 20, nr 9
60. Neuberger P.; Sleger V., Polak M. (2009). Feasibility of using heat-recovery exchangers in livestock buildings at a site at a specific altitude with a specific average outdoor air temperature. Infrastructure and Ecology of Rural Areas. Nr 7/2009.; s.47-56
61. Oświęcimski W. (2007). Dwutlenek węgla w uprawach pod osłonami. Hasło Ogrodnicze. 9/2007
62. Papadakis G., Mermier M., Meneses J.F., Boulard T. (1996). Measurement and Analysis of Air Exchange Rates in a Greenhouse with Continuous Roof and Side Openings. Journal of Agricultural Engineering Research. Vol. 63, Issue 3.; 219-227
63. Pedchenko O., Guzyk D. (2015). Ways of energy saving in agricultural buildings and structures blocks. Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym. nr 2(16)
64. Podymniak M., Sprzaczka I. (2009). Kurtyny - różne uprawy, różne cele. Hasło Ogrodnicze. 3/2009.; s.176-180
65. Pokluda R., Kozba F. (2011). Sklemiky, Foliovniki, Vyuziti a pestebni technologie. Praha: Profi Press.
66. Puła M. (2014). Strategia wietrzenia i ogrzewania. Hasło Ogrodnicze. 8/2014
67. Puła M. (2016). Zbiorniki buforowe. Hasło Ogrodnicze. 8/2016

138:8048286122

68. Raczek A., Wachowicz E. (2014). Model procesu wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnątrz szklarni. Agricultural Engineering. Vol. 18, No. 1
69. Runkle E. (2016). Diffused Glass. Technially Speaking at GPNMAG.COM.
70. Rutkowski K. (2002). Wpływ składu podłoży ogrodniczych na proces termicznej dezynfekcji. PAN ZPPNR. z. 465
71. Rutkowski K. (2005). Zużycie ciepła w inspektach ogrodniczych. Inżynieria Rolnicza. 7/2005.; s.273-280
72. Rutkowski K. (2006). Wpływ warunków solarnych na zużycie ciepła w inspektach ogrodniczych. Inżynieria Rolnicza. 11/86./2006.; s.401-407
73. Rutkowski K. (2008). Analiza energetyczna wybranych typów szklarni. Inżynieria Rolnicza. 9/107./2008.; s.249-257
74. Rutkowski K. (2010). Analiza energetyczno-technologiczna szklarni. Inżynieria Rolnicza. 2(120)2010.; s.157-163
75. Rutkowski K. (2014). Oszczędzić energię. Hasło Ogrodnicze. 8/2014
76. Rutkowski K., Adamovsky D., Neuberger P. (2008). Analysis of impact of plate air-to-air recovery untightness on its thermal and mass balance. Scientia Agriculturae Bohemica. vol. 39,2008 (3) CS ISSN 289-294.
77. Rutkowski K., Grodny K. (2009). Wykorzystanie czujnika fotosyntezy PAR (Photosynthetically Active Radiation) w systemie dokarmiania roślin w szklarniach. Inżynieria Rolnicza. 9/118./2009
78. Rutkowski K., Grodny K. (2010). Sterowanie oraz wizualizacja procesem technologicznym w obiektach szklarniowych. Inżynieria Rolnicza. 3(121)2010.; s.171-177
79. Rutkowski K., Krakowiak-Bal A., Vogelgesang J., Sikora J. (2014). Rury „Walczaka" w systemie grzewczym szklarni. Agriculturae et Silviculturae Mondelanae Brunensis. 1211 -8516
80. Rutkowski K., Wojciech J. (2009). Horizontal Temperature Profile in Selected Glasshouses. Media4u Magazine. X1/2009, ISSN 1214-9187
81. Rutkowski K., Wojciech J. (2009). Reakcja istniejących systemów grzewczych w szklarni na zmieniające się warunki zewnętrzne. Inżynieria Rolnicza. 8/117./2009
82. Rutkowski K., Wojciech J. (2009). Wpływ wysokości szklarni na zużycie ciepła. Inżynieria Rolnicza. 5/114./2009
83. Salazar M.R., Rojano A.A., López C.I. (2014). New technologies in tomato greenhouse production. International Conference of Agricultural Engineering. AgEng 2014, Zurich 6-10 July.

139:7779518659

84. Shamshiri R. (2017). Measuring optimality degrees of microclimate parameters in protected cultivation of tomato under tropical climate condition. Measurement. Vol. 106.; 236-244
85. Szafirowska A. (2010). Ocena plonowania kilku odmian pomidora w uprawie ekologicznej. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering. Vol. 55, nr 4
86. Szyperek M. (2013). Szkło a światło. Owoce, Warzywa, Kwiaty. 12/2013.; s.46-47
87. Tawalbeh M., Aljaghoub H., Alami A. H., Olabi A.G. (2023). Selection criteria of cooling technologies for sustainable greenhouses: A comprehensive review. Thermal Science and Engineering Progress. Vol. 38.; 101666
88. Thomopoulos V., Tolis F., Blounas T., Tsipianitis D., Kavga A. (2024). Application of Fuzzy logic and IoT in a small-scale Smart Greenhouse System. Smart Agricultural Technology. Vol. 8.; 100446
89. Tripathi N., Hills C., Singh R., Atkinson C. (2019). Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. Climate and Atmospheric Science. Vol. 2.;
90. Tyl T. (2008). Rodzaje kurtyn i środków do cieniowania. Hasło Ogrodnicze. 12/2008.; s.20-25
91. Tytko R. (2016). Instalacje fotowoltaiczne w ogrodnictwie. Hasło Ogrodnicze. 8/2016
92. Wachowicz E. (2011). Zbiory rozmyte w sterowaniu mikroklimatem w budynkach rolniczych. Inżynieria Rolnicza. R.15, nr 6
93. Wilczyńska A. (2014). Ciekawe rozwiązania w starszych obiektach. Hasło Ogrodnicze. nr. 8
94. Wilczyńska A. (2016). Zaoszczędzić energię. Hasło Ogrodnicze. 8/2016
95. Wilczynska A. (2015). Więcej światła w szklarni. Hasło Ogrodnicze. 08/2015.; s.24-27
96. Wilczyńska A., Klepacz-Baniak J. (2016). Pod Szkłem. Hasło Ogrodnicze. 5/2016
97. Wojcieszak D., Mazur M., Domaradzki J., Kaczmarek., Placido F., Dong S. (2014). Właściwości fotokatalityczne wielowarstwowych powłok antyrefleksyjnych. Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania. Vol. 55, nr 8.; s.37-39
98. Wrzesiński W. (2005). Zasady sterowania klimatem w szklarniach z wykorzystaniem komputerów. Hasło Ogrodnicze. nr. 4

140:6904154368

99. Wysocka-Owczarek M. (2001). Pomidory pod osłonami. Uprawa tradycyjna i nowoczesna. Wydanie III poprawione i uzupełnione. Warszawa: Hortpress Sp. z.o.o 2001.
100. Wysocka-Owczarek M. (2007). Bez glebowa uprawa pomidorów, Ocena wzrostu i aktywności roślin oraz ważniejszych parametrów klimatyczno-uprawowych. Warszawa: Hortpress Sp. z.o.o 2007.
101. Wysocka-Owczarek M. (2016). Pomidory pod osłonami. Warszawa: Hortpress Sp. z.o.o 2016.
102. Zabeltitz CH. (1991). Szklarnie projektowanie i budowa. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne.
103. Zawadzki J. (2005). Wykorzystanie metod geostatystycznych w badaniach środowiska przyrodniczego. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. z. 49.; s. 1-134.
104. Zhou B., Zhang Y., Fang H., Yan Q., Ao H. (2016). Performance experiment and design of simply assembled Chinese solar greenhouse equipped with heating and dehumidification system. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. Vol. 32, Number 11.; 226-232(7)

Inne źródła:

- http://www.cieplej.pl/
- https://mularski.pl/
- http://www.pphukazimierczak.pl/
- https://www.ho.haslo.pl/article.php?id=2930&rok=2006&numer=07

141:5170628095

Spis rysunków

Rysunek 1. Schematy różnych systemów ogrzewania: ..... - 21 -
Rysunek 2. Ruch powietrza w różnych systemach grzewczych: ..... - 21 -
Rysunek 3. Geometria rur Walczaka ..... - 23 -
Rysunek 4. Widok obiektu badawczego UR Kraków ..... - 27 -
Rysunek 5. Widok systemu grzewczego i siatki pomiarowej w obiekcie badawczym URK ..... - 28 -
Rysunek 6. Obiekt szklarniowy rzeczywisty ..... - 29 -
Rysunek 7. Schemat przekroju poprzecznego jednej z naw w obikcie rzeczywistym . - 30 -
Rysunek 8. Przykładowa maska technologiczna z systemem sterowania ogrzewaniem ..... - 31 -
Rysunek 9. Maska technologiczna - kotłownia ..... - 32 -
Rysunek 10. Maska technologiczna systemu dokramiania roślin dwutlenkiem węgla - 33 -
Rysunek 11. Schemat ideowy systemu dokarmiania roslin ..... - 34 -
Rysunek 12. Schemat ideowy działania maty startowej ..... - 35 -
Rysunek 13. Maska technologiczna systemu wywietrzników ..... - 36 -
Rysunek 14. System zasłon cieniująco izolacyjnych ..... - 37 -
Rysunek 15. System doświtlania roślin ..... - 38 -
Rysunek 16. System wentylatorów ..... - 38 -
Rysunek 17. Czujnik promieniowania LP PAR ..... - 39 -
Rysunek 18. Przykładowe dobowe zarchiwizowane parametry w szklarni ..... - 40 -
Rysunek 19. Przykładowa maska technologiczna z rzeczywistego obiektu..... - 41 -
Rysunek 20. Rozmieszczenie elementów pomiarowych w obiekcie doświadczalnym - 42 -
Rysunek 21. Usytuowanie siatki pomiarowej w przekroju nawy ..... - 43 -
Rysunek 22. Schemat ideowy siatki pomiarowej obiekt: a) doświadczalny, b) rzeczywisty ..... - 44 -
Rysunek 23. Maska technologiczna obrazująca wartosci pomiarowe ..... - 45 -
Rysunek 24. Komputer archiwizacji danych a) obiekt rzeczywisty, b) obiekt badawczy URK ..... - 45 -

142:5050576911

Rysunek 25. Czujnik tempertury o bardzo małej bezwładności dedykowany do pomiarów gazowych ..... - 46 -
Rysunek 26. Widok czujnika temperatury zamontowanego na siatce pomiarowej - obiekt badawczy UR ..... - 46 -
Rysunek 27. Przetwornik temperatury FlexTop 2201 ..... - 47 -
Rysunek 28. Czujnik prędkości ruchu powietrza INT 512 ..... - 48 -
Rysunek 29. Charakterystyka czujnika INT 512 (producent: Kriwan) ..... - 49 -
Rysunek 30. Charakterystyka temperatury zewnętrznej przy obiekcie badawczym - 54 -
Rysunek 31. Charakterystyka natężenia promieniowania słonecznego przy obiekcie badawczym ..... - 55 -
Rysunek 32. Dydtrybuanty empiryczne natężenia promieniowania słonecznego przy obiekcie badawczym dla poszczególnych kombinacji pracy systemu grzewczego ..... - 55 -
Rysunek 33. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza w obiekcie badawczym - 56 -
Rysunek 34. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie badawczym ..... - 57 -
Rysunek 35. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie badawczym ..... - 58 -
Rysunek 36. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 8 w obiekcie badawczym ..... - 59 -
Rysunek 37. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 10 w obiekcie badawczym ..... - 61 -
Rysunek 38. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie badawczym ..... - 62 -
Rysunek 39. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie badawczym ..... - 63 -
Rysunek 40. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie badawczym ..... - 65 -
Rysunek 41. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie badawczym ..... - 66 -
Rysunek 42. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 12 w obiekcie badawczym ..... - 67 -
Rysunek 43. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 11 w obiekcie badawczym ..... - 69 -

143:1018983750

Rysunek 44. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 w obiekcie badawczym. ..... - 70 -
Rysunek 45. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie badawczym ..... - 72 -
Rysunek 46. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 w obiekcie badawczym..... - 73 -
Rysunek 47. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie badawczym ..... - 74 -
Rysunek 48. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie badawczym ..... - 76 -
Rysunek 49. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie badawczym ..... - 77 -
Rysunek 50. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie badawczym ..... - 78 -
Rysunek 51. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie badawczym ..... - 80 -
Rysunek 52. Przykładowy wykres warstwicowy prezentujacy przestrzenny rozkładu prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej ..... - 84 -
Rysunek 53. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji A) ..... - 85 -
Rysunek 54. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji B) ..... - 85 -
Rysunek 55. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji C) ..... - 86 -
Rysunek 56. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji D) ..... - 87 -
Rysunek 57. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji E)..... - 87 -
Rysunek 58. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji F)..... - 88 -
Rysunek 59. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji G) ..... - 89 -
Rysunek 60. Przeszczenny rozkład a) temperatury i b) prędkości ruchu powietrza w obrębie siatki pomiarowej (dla kombinacji H) ..... - 90 -

144:7280825530

Rysunek 61. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie rzeczywistym ..... - 91 -
Rysunek 62. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie rzeczywistym ..... - 92 -
Rysunek 63. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 3 w obiekcie rzeczywistym ..... - 93 -
Rysunek 64. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie rzeczywistym ..... - 94 -
Rysunek 65. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie rzeczywistym ..... - 95 -
Rysunek 66. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie rzeczywistym ..... - 96 -
Rysunek 67. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie rzeczywistym ..... - 97 -
Rysunek 68. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 8 w obiekcie rzeczywistym ..... - 98 -
Rysunek 69. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 9 w obiekcie rzeczywistym ..... - 100 -
Rysunek 70. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 10 w obiekcie rzeczywistym ..... - 101 -
Rysunek 71. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 11 w obiekcie rzeczywistym ..... - 102 -
Rysunek 72. Charakterystyka temperatury powietrza dla czujnika nr 12 w obiekcie rzeczywistym ..... - 103 -
Rysunek 73. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 w obiekcie rzeczywistym ..... - 104 -
Rysunek 74. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 w obiekcie rzeczywistym ..... - 105 -
Rysunek 75. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 w obiekcie rzeczywistym ..... - 106 -
Rysunek 76. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 w obiekcie rzeczywistym ..... - 107 -
Rysunek 77. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 w obiekcie rzeczywistym ..... - 108 -

145:7184647512

Rysunek 78. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 w obiekcie rzeczywistym ..... - 109 -
Rysunek 79. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 7 w obiekcie rzeczywistym ..... - 110 -
Rysunek 80. Charakterystyka prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 w obiekcie rzeczywistym ..... - 111 -
Rysunek 81. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji a ..... - 124 -
Rysunek 82. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji b ..... - 125 -
Rysunek 83. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji c ..... - 126 -
Rysunek 84. Charakterystyka rozkładu a) temperatury powietrza i b) prędkości ruchu powietrza w obiekcie rzeczywistym dla kombinacji d ..... - 126 -

Spis tabel

Tabela 1. Parametry geometryczne rury PP-R ..... - 23 -
Tabela 2. Dane techniczne przetwornika temperatury ..... - 47 -
Tabela 3. Podstawowe dane techniczne czujnika INT 512 ..... - 49 -
Tabela 4. Parametry kombinacji doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 50 -
Tabela 5. Parametry kombinacji doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 50 -
Tabela 6. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym - 57 -
Tabela 7. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 7 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym - 59 -
Tabela 8. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 8 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym - 60 -
Tabela 9. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 10 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 61 -

146:4920851314

Tabela 10. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym - 62 -

Tabela 11. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym - 64 -

Tabela 12. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym - 65 -

Tabela 13. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym - 67 -

Tabela 14. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 12 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 68 -

Tabela 15. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 11 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 69 -

Tabela 16. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 71 -

Tabela 17. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 72 -

Tabela 18. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 74 -

Tabela 19. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 75 -

Tabela 20. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 77 -

147:6983615040

Tabela 21. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 79 -
Tabela 22. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie badawczym ..... - 80 -
Tabela 23. Współczynnik korelacji między prędkością ruchu powietrza a temperaturą powietrza..... - 81 -
Tabela 24. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 91 -
Tabela 25. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 93 -
Tabela 26. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 3 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 94 -
Tabela 27. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 95 -
Tabela 28. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 96 -
Tabela 29. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 97 -
Tabela 30. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 7 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 98 -
Tabela 31. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 8 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 99 -
Tabela 32. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 9 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 100 -

148:6914574363

Tabela 33. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 10 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 101 -
Tabela 34. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 11 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 102 -
Tabela 35. Istotność statystyczna różnic wartości średniej temperatury powietrza dla czujnika nr 12 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym. ..... - 103 -
Tabela 36. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 6 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 104 -
Tabela 37. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 1 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 105 -
Tabela 38. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 4 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 106 -
Tabela 39. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 2 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 107 -
Tabela 40. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 3 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 109 -
Tabela 41. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 5 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 110 -
Tabela 42. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 7 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 111 -
Tabela 43. Istotność statystyczna różnic wartości średniej prędkości ruchu powietrza dla czujnika nr 9 między analizowanymi kombinacjami doświadczenia w obiekcie rzeczywistym ..... - 112 -

149:2281285206

Tabela 44. Istotność statystyczna korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji a doświadczenia w obiekcie rzeczywistym .....- 113 -

Tabela 45. Statystycznie istotne współczynniki korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji b doświadczenia w obiekcie rzeczywistym .....- 114 -

Tabela 46. Istotność statystyczna korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji c doświadczenia w obiekcie rzeczywistym .....- 115 -

Tabela 47. Istotność statystyczna korelacji pomiędzy wartościami średniej temperatury powietrza i prędkością jego przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych dla kombinacji d doświadczenia w obiekcie rzeczywistym .....- 116 -

Tabela 48. Charakterystyka ruchu powietrza w obiekcie badawczym w zależności od nastaw temperatury systemów grzewczych.....- 130 -

Tabela 49. Charakterystyka ruchu powietrza w obiekcie rzezczywistym w zależności od nastaw temperatury systemów grzewczych.....- 130 -

150:2847196455