



Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie
Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Sebastian Bożek

Nr albumu: 82160

Optymalizacja warunków klimatycznych w ekologicznej uprawie pod osłonami

Praca dyplomowa

Studia Podyplomowe Rolnictwo ekologiczne, produkty tradycyjne i regionalne – produkcja i
certyfikacja

Praca wykonana pod kierunkiem
dr hab. inż. Barbary Skowery
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji,
Katedra Ekologii, Klimatologii
i Ochrony Powietrza

Kraków, 2022

Ja, niżej podpisany/-a:

Sebastian Bożek

/ Imię i nazwisko /

/ Numer albumu /

autor pracy dyplomowej pt.:

Optymalizacja warunków klimatycznych w ekologicznej uprawie pod osłonami

/ Tytuł pracy /

Student/-ka Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Studia Podyplomowe Rolnictwo ekologiczne, produkty tradycyjne i regionalne – produkcja i certyfikacja

/ Wydział - kierunek studiów /

Oświadczam, że ww. praca dyplomowa:

- została przygotowana przeze mnie samodzielnie¹,
- nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U.2018. poz. 1191 t.j. z dnia 21.06.2018) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,

1. Oświadczam również, że treść pracy dyplomowej zamieszczonej przeze mnie w Archiwum Prac Dyplomowych jest identyczna z treścią zawartą w wydrukowanej wersji pracy.
2. W związku z realizowaniem przez Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie zadań ustawowych i statutowych, szczególnie w zakresie prowadzenia działalności dydaktycznej i naukowo-badawczej upoważniam Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja do archiwizowania i przechowywania w/w pracy utrwalonej w postaci tradycyjnej (papierowej) i elektronicznej - zgodnie z ustawą - prawo o szkolnictwie wyższym i przepisami wykonawczymi do tej ustawy, ustawą o narodowym zasobie archiwalnym i archiwach oraz ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Jestem świadomy/-a odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia.

Kraków, dn.r.

/ Miejsce i data/

/ Podpis autora pracy/

¹uwzględniając merytoryczny wkład opiekuna/promotora

*Składam serdeczne podziękowania
Pani dr hab. inż. Barbarze Skowerze
za cenne wskazówki udzielone mi w trakcie realizacji niniejszej pracy*

Spis treści

Cel pracy	6
1. Ogólna charakterystyka upraw pod osłonami	6
1.1. Wydajność	6
1.2. Realizacje, możliwości i ograniczenia	7
2. Parametry klimatyczne oraz ich wpływ na procesy życiowe roślin.....	10
2.1. Wilgotność gleby.....	12
2.2. Wilgotność powietrza.....	13
2.3. Temperatura gleby.....	15
2.4. Temperatura powietrza.....	16
2.5. Naświetlenie	16
2.6. Stężenie dwutlenku węgla	18
3. Pomiary i regulacja czynników klimatycznych	19
3.1. Komputery klimatyczne i internet rzeczy	19
3.2. Mikrokomputery i mikrokontrolery	20
3.3. Wilgotność gleby.....	22
3.3.1. Pomiary wilgotności gleby	22
3.3.2. Regulacja wilgotności gleby	25
3.4. Wilgotność powietrza.....	26
3.4.1. Pomiary wilgotności powietrza	26
3.4.2. Regulacja wilgotności powietrza.....	27
3.5. Temperatura powietrza i gleby.....	27
3.5.1. Pomiary temperatury powietrza i gleby	27
3.5.2. Regulacja temperatury powietrza i gleby	29
3.6. Naświetlenie	29
3.6.1. Pomiary naświetlenia	29
3.6.2. Regulacja naświetlenia	30

Dodatki	32
A) Fotosynteza	32
B) Respiracja	33
C) Transpiracja	33
D) Fotorezystor i fotodioda	34
Literatura	36

Cel pracy

Celem pracy jest przegląd współczesnych możliwości w zakresie optymalizacji ekologicznych upraw pod osłonami, w szczególności precyzyjnych pomiarów oraz automatycznej regulacji najważniejszych parametrów klimatycznych mających wpływ na rozwój roślin, takich jak temperatura powietrza i gleby, wilgotność względna powietrza, nawodnienie gleby, naświetlenie oraz stężenie dwutlenku węgla.

1. Ogólna charakterystyka upraw pod osłonami

1.1. Wydajność

W lipcu 1974 roku populacja ludzkości osiągnęła 4 miliardy [1]. O tego czasu, w ciągu kolejnych 50 lat liczba ludności na świecie podwoiła się. Obecnie szacuje się, że w 2050 roku na Ziemi będzie żyło 10 miliardów ludzi. O ile jeden człowiek jest w stanie żyć i funkcjonować na niewielkiej powierzchni, rzędu kilkudziesięciu, a w skrajnych przypadkach nawet kilku metrów kwadratowych, to jego wyżywienie wymaga już znacznie większego areалу. Wraz ze wzrostem liczby ludności wzrasta całkowita powierzchnia upraw, jednak odbywa się to kosztem innych zasobów planety, głównie lasów zaopatrujących ją w niezbędny dla życia tlen [2]. Obecnie na jednego mieszkańca Ziemi przypada poniżej 1 hektara upraw i pomimo powiększania się globalnej powierzchni upraw wartość ta maleje [1].

Powierzchnia upraw potrzebna do wyżywienia człowieka zależy od jakości gleby oraz warunków klimatycznych, jednak w znacznej mierze zależy również od stosowanej diety. Kanadyjscy naukowcy oszacowali, że stosowanie przez wszystkich ludzi na świecie diety zgodnej z wytycznymi żywieniowymi proponowanymi przez Departament Rolnictwa Stanów Zjednoczonych (USDA) przy stosowaniu konwencjonalnych upraw na otwartym terenie wymagałoby dodatkowego miliarda hektarów gruntów rolnych, co przekracza możliwości naszej planety [3]. Rozwiązaniem tego problemu może być zwiększenie powierzchni upraw pod osłonami oraz ich optymalizacja, a przez to uzyskanie znacznie większych plonów przy tej samej powierzchni zajmowanej przez uprawy. Przykładem może być Holandia, która pomimo swojej niewielkiej powierzchni jest jednym z największych światowych eksporterów żywności [4]. W Holandii 35% warzyw produkowanych jest pod osłonami na powierzchniach, które łącznie zajmują mniej niż 1% powierzchni tego kraju. W Hiszpanii na otwartym polu produkuje się średnio 4 kg pomidorów na metr kwadratowy, podczas gdy w Holandii w zoptymalizowanych uprawach pod osłonami wartość ta dochodzi do 80 kg, zużywając przy

tym 4 razy mniej wody [5,6]. Uzyskanie tak wysokich plonów z upraw w pomieszczeniach wynika z możliwości precyzyjnego dostosowania warunków klimatycznych do rodzaju uprawy. Izolacja upraw od warunków zewnętrznych pozwala na ograniczenie ilości stosowanych pestycydów. Produkcja pod osłonami jest także bardziej niezależna od zmian klimatu oraz od pogody, dzięki czemu jest znacznie bardziej przewidywalna.

1.2. Realizacje, możliwości i ograniczenia

Klimat ma decydujący wpływ na rozwój roślin, zarówno w uprawach polowych jak w pomieszczeniach[7]. Zaletą uprawy w pomieszczeniach jest możliwość regulowania czynników klimatycznych i tym samym dostosowanie ich do potrzeb uprawianych gatunków roślin. Podobnie jak w lokalach mieszkalnych przeznaczonych dla ludzi dąży się do stworzenia warunków klimatycznych najbardziej przyjaznych człowiekowi, tak w przypadku pomieszczeń przeznaczonych do upraw dąży się do uzyskania warunków klimatycznych optymalnych dla uprawianego gatunku roślin. Warunki domowe optymalne dla człowieka nie zawsze są optymalne dla roślin, wymagających zazwyczaj większej ilości światła od tej, która dostępna jest w typowym mieszkaniu. Obecnie nowe technologie, takie jak sztuczne oświetlenie UV oraz rozwiązania z zakresu hydroponiki¹, umożliwiają uprawę roślin na małą skalę produkcyjną w typowych mieszkaniach. Stworzone w ten sposób warunki w większości przypadków są jednak dalekie od naturalnego środowiska roślin. W niniejszej pracy omówione zostaną rozwiązania zgodne z ideą rolnictwa ekologicznego, w której dąży się do tego, aby rośliny, podobnie jak zwierzęta, przebywały w możliwie jak najbardziej komfortowych dla siebie warunkach zaspokajających ich naturalne potrzeby.

Pomieszczenia dedykowane do uprawy roślin to w większości przypadków szklarnie oraz tunele foliowe. Głównym celem tych pomieszczeń jest ochrona roślin przed niekorzystnymi dla nich warunkami atmosferycznymi, stąd pomieszczenia te nazywane są ogólnie osłonami. Początkowo szklarnie, zwane oranżeriami, wykorzystywane były do uprawy lub przechowywania roślin pochodzących z krajów o cieplejszym klimacie. Obecnie szklarnie, podobnie jak wysokie tunele foliowe, umożliwiają względnie stabilną produkcję rolną pomimo

¹Hydroponika to uprawa bez gleby. Rośliny umieszczone są na rurach z wodą, w której zanurzone są ich korzenie. Wraz z wodą podawane są substancje odżywcze (fertygacja). W rurach można chować ryby, których odchody pełnią funkcję nawozu dla roślin (akwaponika). Uprawy hydroponiczne to często uprawy pionowe. W ten sposób ściana w mieszkaniu może zmienić się w niewielkie pole uprawne, jednak zgodnie z założeniami rolnictwa ekologicznego tylko roślina znajdująca się w glebie może być rośliną „szczęśliwą”.

niesprzyjających warunków pogodowych, a w przypadku pomieszczeń klimatyzowanych produkcję całoroczną [7]. Koszty inwestycyjne związane w budowę osłon zwracają się dzięki wyższym dochodom, jakie dają rośliny uprawiane w optymalnych warunkach klimatycznych. Możemy wyróżnić szklarnie pojedyncze oraz zblokowane [8]. Szklarnie pojedyncze najpowszechniej stosowane są małych gospodarstwach, podczas gdy zblokowane są typowe dla większych producentów. Podstawę szklarni pojedynczej stanowi zazwyczaj betonowy fundament, który przenosi na grunt obciążenia szklarni. Są to obciążenia stałe, takie jak ciężar własny konstrukcji szklarni i dodatkowych elementów, oraz zmienne, takie jak śnieg i wiatr [8]. Rozróżnia się 2 rodzaje fundamentów na obwodzie szklarni: ciągłe i punktowe. Fundament ciągły znajduje się na całym obwodzie szklarni, podczas gdy fundament punktowy stanowią stopy fundamentowe rozstawione w pewnej odległości od siebie i połączone płytami żelbetowymi [8]. Szkielet szklarni stanowi konstrukcja z prętów stalowych, którą wypełnia materiał przepuszczający światło, nazywany materiałem wypełniającym lub pokrywającym. Mogą to być klasyczne szklane szyby, lub coraz bardziej popularne tworzywa sztuczne. Materiał wypełniający ma istotne znaczenie z uwagi na jego przepuszczalność spektralną, o czym będzie mowa w dalszej części pracy.

Spośród wszystkich typów osłon najbardziej rozpowszechnione w produkcji warzyw są pojedyncze tunele foliowe [8]. Tunele foliowe cechuje stosunkowo niski koszt zarówno budowy jak i eksploatacji, dzięki czemu przy tych samych nakładach można osłonić większy obszar upraw. Najprostsze konstrukcje można wykonać we własnym zakresie, wykorzystując drewno drzew iglastych lub akacji, elementy stalowe oraz folię [8]. W uprawach w Polsce najpowszechniej stosowane są tunele foliowe o wysokości powyżej 1,5m, stanowiące osłonę dla roślin od momentu ich posadzenia lub siewu do zbioru. Tunele te są wykorzystywane szczególnie wczesną wiosną do uprawy roślin wytrzymałych na niskie temperatury. Często stosuje się w nich proste systemy ogrzewania, takie jak piece olejowe z wentylatorami, nagrzewnice powietrza oraz piecyki opalane węglem lub drewnem. W tym ostatnim przypadku ważne jest odprowadzenie spalin na zewnątrz tunelu. Z kolei niskie tunele foliowe stosuje się do osłaniania roślin w polu przez pewien ograniczony czas [8].

W Polsce pod osłonami uprawia się głównie pomidory oraz ogórki, a także paprykę, sałatę, rzodkiewkę oraz zioła [9]. Popularność upraw pod osłonami jest wynikiem popytu konsumenckiego na świeże owoce i warzywa przez cały rok². Parametry jakościowe warzyw

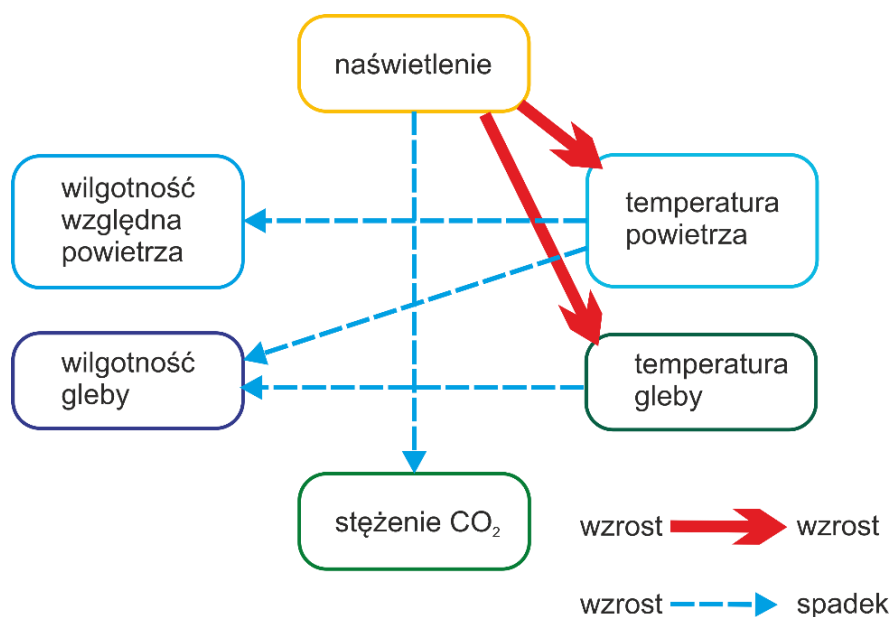
²Dr Steven Gundry – kardiolog i autor książek zakresu dietytyki – mawia: „niekończące się lato jest rzeczywiście korzystne dla naszego zdrowia [10, 11].

uprawianych pod osłonami, takie jak wygląd zewnętrzny, kształt, wielkość, wyrównanie, barwa oraz smak i zapach są zazwyczaj lepsze niż w przypadku warzyw uprawianych w polu, jednak ich wartość biologiczna jest niższa [8]. Wynika to z niższej intensywności światła oraz szybkiego wzrostu, będącego przyczyną wyższej zawartości wody i tym samym niższej zawartości substancji o znaczeniu prozdrowotnym, takich jak np. błonnik. Z drugiej strony warzywa uprawiane pod osłonami cechuje mniejsze skażenie metalami ciężkimi, takimi jak ołów i kadm, pozostałościami pestycydów oraz szkodliwych czynników mikrobiologicznych, głównie dzięki precyzyjnie prowadzonym zabiegom pielęgnacyjnym, których efektywność w uprawach polowych jest znacznie ograniczona. Zabiegi te znacznie ograniczają konieczność stosowania pestycydów, w szczególności insektycydów, fungicydów oraz herbicydów [8]. Tym, co z praktycznego punktu widzenia najbardziej odróżnia uprawy pod osłonami od upraw polowych, jest możliwość sterowania klimatem. Sterowanie to może odbywać się ręcznie lub automatycznie. Sterowanie ręczne to bezpośrednie działania człowieka, polegające na wykonywaniu czynności zamykania lub otwierania wietrzników, włączania lub wyłączania ogrzewania, nawadniania, wentylacji, lamp naświetlających oraz pozostałych elementów systemu [9]. Metoda ta jest jednak mało precyzyjna i przede wszystkim czasochłonna. Dlatego w uprawach pod osłonami coraz częściej stosuje się systemy automatyki dedykowane dla rolnictwa, dostępne na rynku w postaci gotowych rozwiązań. Najbardziej popularnym rozwiązaniem są komputery klimatyczne, wyposażone w specjalistyczne oprogramowanie. Ich działanie polega na automatycznej regulacji parametrów klimatycznych w obiekcie w oparciu o zaawansowane modele matematyczne, uwzględniające wspomniane wcześniej współzależności pomiędzy czynnikami klimatycznymi [9]. Rozwiązania te są jednak dość kosztowne, pozostając poza zasięgiem małych przydomowych gospodarstw.

Nowe możliwości w zakresie precyzyjnego oraz ciągłego monitoringu wilgotności gleby, powietrza, a także temperatury stwarzają obecnie stosunkowo tanie oraz łatwe w obsłudze systemy mikrokontrolerów Arduino i Raspberry Pi [22, 23]. Umożliwiają one nie tylko odczyt danych z czujników, lecz także modyfikację środowiska roślin poprzez sterowanie urządzeniami zewnętrznymi, takimi jak pompy wodne, wentylatory oraz siłowniki otwierające lub zamykające naturalne otwory wentylacyjne w szklarni. Systemy te zostaną omówione w dalszej części pracy.

2. Parametry klimatyczne oraz ich wpływ na procesy życiowe roślin

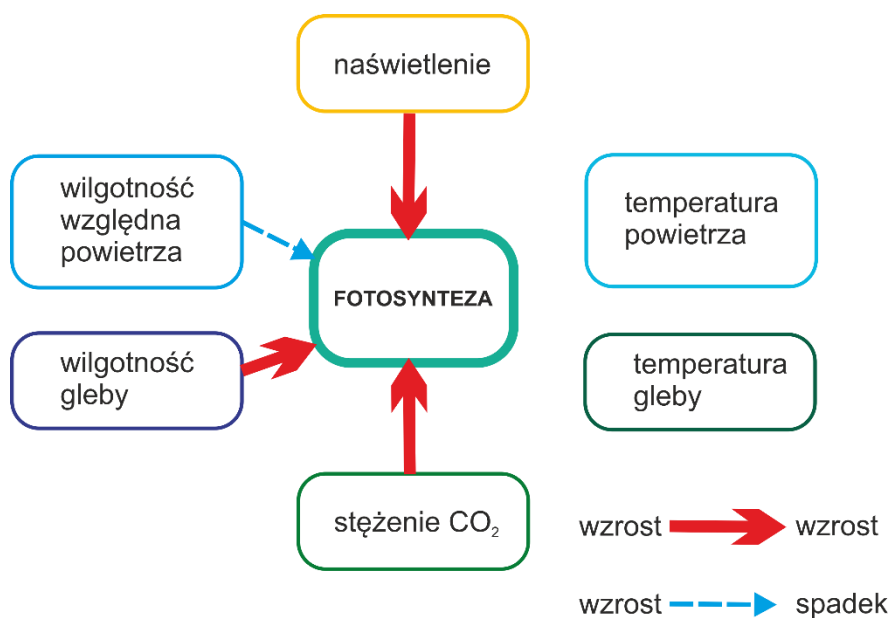
W meteorologii rozróżnia się mikroklimat i makroklimat. Makroklimat to klimat całej powłoki powietrznej otaczającej ziemię, natomiast mikroklimat to klimat warstwy atmosfery do 100 cm powyżej gruntu [7]. Podobnego podziału można dokonać w szklarni, gdzie makroklimat określa średnie warunki klimatyczne panujące w całej objętości szklarni, a mikroklimat warunki klimatyczne w strefie roślin. Wzrost roślin warunkowany jest przede wszystkim przez mikroklimat. Najważniejsze parametry klimatyczne wpływające na rozwój roślin pod osłonami to naświetlenie, temperatura powietrza i gleby, wilgotność względna powietrza, wilgotność gleby oraz stężenie dwutlenku węgla. Pomiędzy tymi parametrami zazwyczaj występuje współzależność (rys. 1).



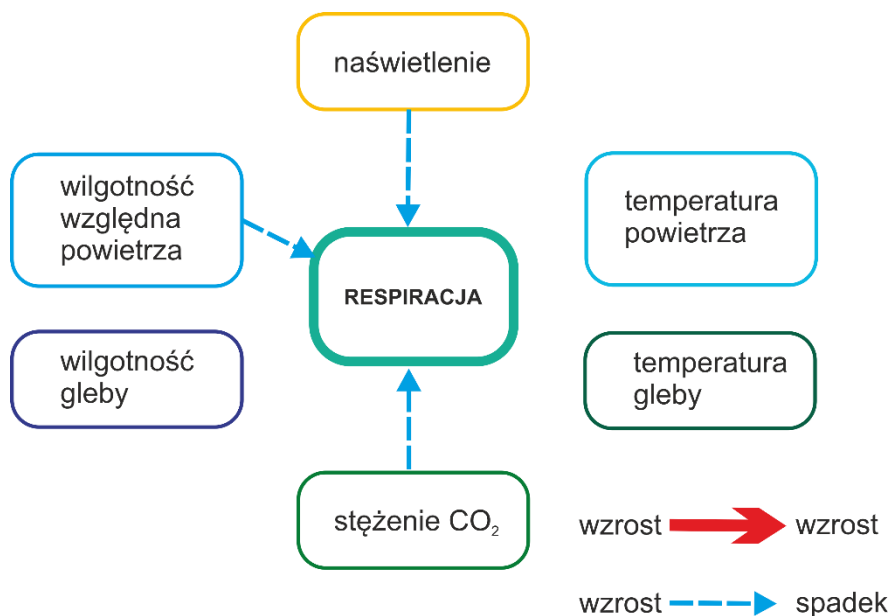
Rysunek 1 Najważniejsze parametry klimatyczne wpływające na rozwój roślin pod osłonami [9]. Strzałki ilustrują współzależności pomiędzy parametrami.

Jakość plonu możemy zatem traktować jak funkcję wielu zmiennych. W przeciwieństwie do upraw polowych, w uprawach pod osłonami istnieją duże możliwości sterowania czynnikami klimatycznymi [9]. Można zatem poszukiwać ekstremów tej funkcji. Obecne systemy informatyczne są przystosowane do przetwarzania i analizy dużej ilości danych, a systemy automatyki umożliwiają precyzyjne pomiary oraz sterowanie urządzeniami. Wymienione powyżej parametry klimatyczne wpływają na rozwój roślin m.in. poprzez wpływ na ich procesy

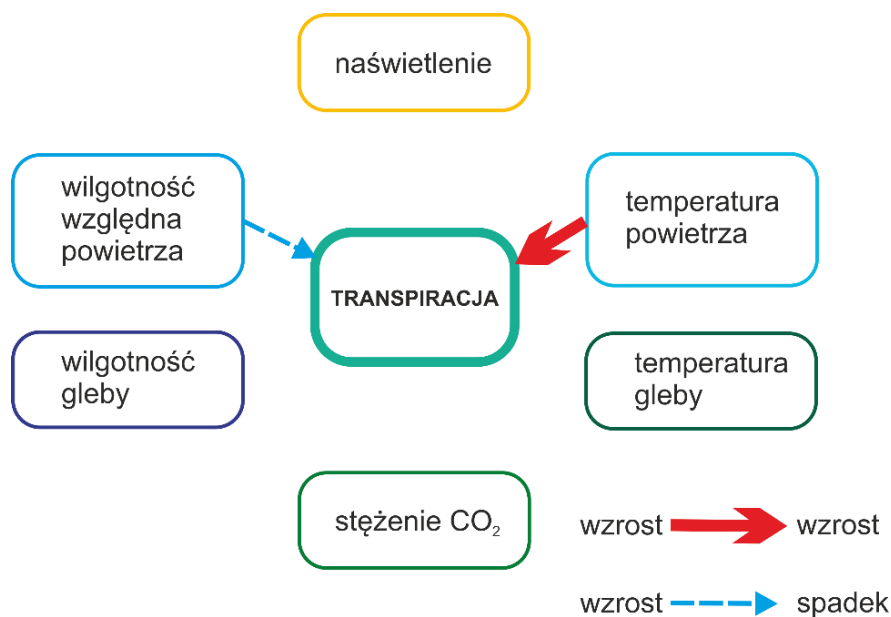
życiowe, takie jak fotosynteza [dodatek A], respiracja [dodatek B] i transpiracja [dodatek C]. Podobnie jak w przypadku wzajemnej interakcji przedstawionej na rysunku1, wpływ poszczególnych parametrów klimatycznych na wydajność procesów życiowych roślin może być zarówno dodatni jak i ujemny (rys. 2, 3, 4).



Rysunek 2 Wpływ parametrów klimatycznych na intensywność fotosyntezy [25]



Rysunek 3 Wpływ parametrów klimatycznych na intensywność respiracji



Rysunek 4 Wpływ parametrów klimatycznych na intensywność transpiracji

W tym rozdziale pracy, w kolejnych podrozdziałach omówione zostaną powyższe parametry klimatyczne, występujące pomiędzy nimi współzależności oraz ich wpływ na jakość upraw. W kolejnym rozdziale zostaną przedstawione systemy automatyki umożliwiające pomiar tych parametrów wraz z możliwościami ich automatycznej regulacji.

2.1. Wilgotność gleby

Potrzeby wodne roślin uprawianych pod osłonami zależą od tych samych czynników co uprawianych w polu [9]. Ilość wody wymaganej dla optymalnego wzrostu roślin zależy od gatunku, a także od warunków mikroklimatycznych panujących w szklarni. Największe zapotrzebowanie na wodę mają warzywa, w szczególności gatunki posiadające słabo rozwinięty system korzeniowy i równocześnie dużą masę wytwarzanych owoców. Najbardziej wrażliwe na niedobór wody są ogórek, cebula, sałata, rzodkiewka, kalafior, brokuł i kapusta pekińska [9]. Z kolei najmniej wrażliwe na suszę są warzywa korzeniowe, takie jak marchew, pietruszka, burak ćwikłowy, chrzan, a także pomidor wysoko rosnący. Prawidłowe nawodnienie roślin wpływa korzystnie zarówno na wielkość jak i na jakość plonów, poprawiając m.in. wygląd i kształt korzenia marchwi oraz zwężłość główek kapusty i kalafiora [9]. W przypadku ogórka prawidłowe uwilgotnienie gleby zmniejsza liczbę owoców z pustymi komorami, wpływając korzystnie na barwę skórki i twardość kwaszonych owoców, jak również na ich konsystencję i walory smakowe [9]. Prawidłowe nawodnienie gleby wpływa również korzystnie na wielkość i jędrność oraz grubość skórki owoców pomidora, a w uprawie dla

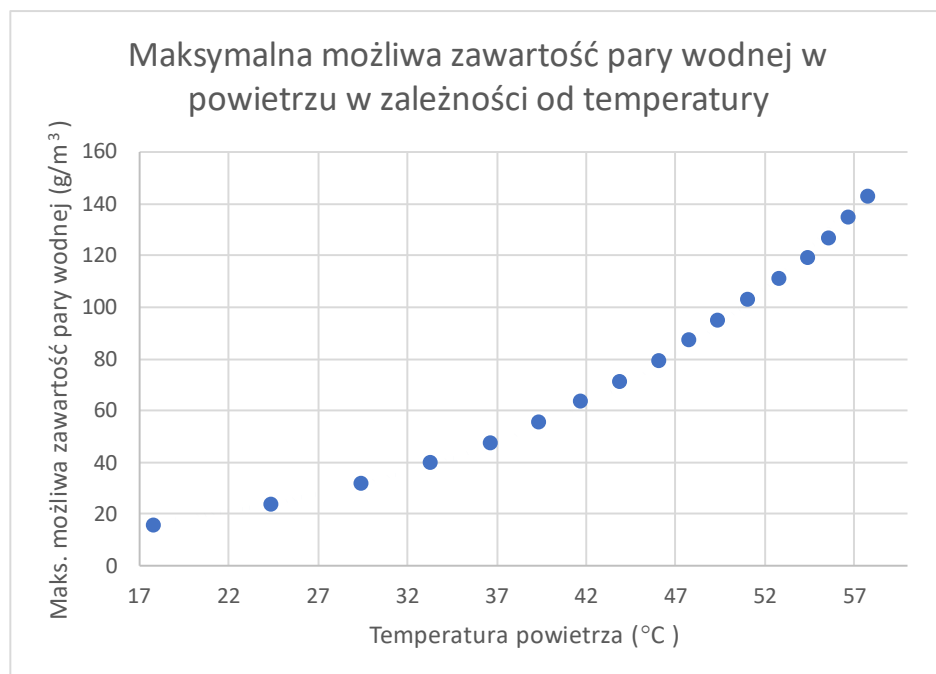
przetwórstwa poprawia smak i zapach koncentratu [9]. Odpowiednie nawadnianie ma również korzystny wpływ na zdrowotność roślin, ograniczając występowanie suchej zgnilizny wierzchołkowej pomidora, zamieranie liści selera oraz brzegów liści sałaty [9]. W okresach dużego zapotrzebowania roślin na wodę wskazane jest utrzymanie wysokiej wilgotności podłoża, co można uzyskać dostarczając małe dawki wody z dużą częstotliwością [8]. Należy jednak pamiętać, aby w podłożu znajdowała się zawsze pewna ilość powietrza umożliwiająca prawidłowy wzrost i funkcjonowanie korzeni. Przyjmuje się, że minimalna wartość objętości powietrza w glebie powinna wynosić 20%. Poniżej tej wartości występuje utrudnione oddychanie korzeni, co prowadzi do ich brązowienia, a w skrajnych przypadkach obumierania. Wzrasta też podatność rośliny na choroby, w szczególności choroby systemu korzeniowego [8]. Zalecany udział objętościowy powietrza w glebie po nawodnieniu to 25 – 30%.

Pod osłonami nie występuje naturalny deszcz, zatem system nawodnieniowy jest jedynym źródłem wody dla roślin. Dlatego w uprawie pod osłonami nawadnianie jest jednym z najważniejszych zabiegów agrotechnicznych, gdzie znaczenie ma nie tylko ilość, ale również jakość dostarczanej wody [9]. W przypadku nawadniania roślin przy użyciu wody pochodzącej z wodociągów komunalnych należy zwrócić uwagę na zawartość chloru, który jest aktywnie pobierany przez rośliny. Zbyt duża zawartość chloru w wodzie może powodować zakłócenia w pobieraniu azotanów oraz w transporcie kwasów organicznych. W Polsce w nawadnianiu upraw pod osłonami wykorzystuje się również wody podziemne, których jakość w dużej mierze zależy od ich pochodzenia oraz charakterystyki warstw wodonośnych [9]. Wykorzystanie wód podziemnych wymaga często ich uzdatniania, polegającego zazwyczaj na usuwaniu żelaza i manganu, których rozpuszczone związki w kontakcie z powietrzem mogą wytrącać się w przewodach oraz innych elementach systemu nawadniającego [9]. Niewielkie wymiary urządzeń wydających wodę oraz niewielkie prędkości przepływającej wody mogą być przyczyną zatykania systemu zanieczyszczeniami znajdującymi się w wodzie. Dlatego woda przeznaczona do nawadniania upraw pod osłonami powinna spełniać nie tylko wymagania sanitarne i fizjologiczne, ale również techniczne [9].

2.2. Wilgotność powietrza

Suche powietrze wchłania parę wodną, dlatego zawsze zawiera pewną jej ilość. Istnieje ścisły związek pomiędzy temperaturą powietrza a jego wilgotnością. Możemy wyróżnić wilgotność względną i bezwzględną. Wilgotność bezwzględna to ilość pary wodnej zawartej w powietrzu, wyrażona w gramach na metr sześcienny lub na kilogram powietrza suchego [7]. Ilość pary wodnej, jaką może wchłonąć metr sześcienny suchego powietrza, w decydującym

stopniu zależy od jego temperatury, dlatego wprowadzono pojęcie wilgotności względnej [7]. Dla każdej temperatury istnieje maksymalna ilość pary wodnej, jaką może przyjąć powietrze w tej temperaturze, uzyskując w ten sposób stan nasycenia (rys. 5) [21].



Rysunek 5 Maksymalna zawartość pary wodnej w powietrzu w zależności do temperatury [21].

Dla danych pomiarowych przedstawionych na wykresie maksymalną ilość pary wodnej f w g/m^3 w zależności od temperatury T podanej w stopniach Celsjusza można aproksymować funkcją

$$f(T) = 6,41 \cdot \exp(0,054 \cdot T)$$

Wartość stężenia pary wodnej podana w gramach na metr sześcienny to wilgotność bezwzględna. Na jej podstawie określana jest wilgotność względna, jako stosunek ilości pary wodnej zawartej faktycznie w powietrzu do maksymalnie możliwej w stanie nasycenia w danej temperaturze, wyrażony w procentach [7]. Na podstawie funkcji $f(T)$ możemy wyznaczyć, że metr sześcienny suchego powietrza w temperaturze 20°C może przyjąć 19 gramów pary wodnej. Jeżeli zatem w powietrzu znajduje się maksymalna ilość pary wodnej dla danej temperatury, to wilgotność względna tego powietrza wynosi 100%. Kiedy wilgotność względna powietrza przekroczy 100%, nadmiar pary wodnej tworzy mgłę, stąd obszar wykresu powyżej krzywej $f(T)$ nazywany jest strefą mgły [7].

Jedną z funkcji osłon jest zabezpieczenie roślin przed silnym wiatrem. Wiatr, oprócz możliwości uszkodzenia roślin, jest przyczyną znacznego osuszania upraw polowych [9]. Dodatkowo wilgotniejsza gleba oraz silnie rozrośnięte rośliny wyparowują większe ilości wody, która w zamkniętej szklarni nie jest odprowadzana do atmosfery. W rezultacie w uprawach pod osłonami naturalnie występuje większa wilgotność [9]. Tak jak w przypadku pozostałych czynników klimatycznych, nadmierna wilgotność również wpływa niekorzystnie na rozwój roślin. Przy wzroście wilgotności powietrza zmniejsza się intensywność transpiracji roślin, gdyż końcowym stadium strumienia transpiracji jest dyfuzja pary wodnej. Przy wyrównanych stężeniach pary wodnej w powietrzu i w roślinach para wodna z roślin nie wydostaje się na zewnątrz i proces transpiracji zostaje zahamowany. Wilgotność powietrza, wpływając na transpirację roślin, wpływa zatem na ich gospodarkę wodną i tym samym na ich wzrost [7]. W skrajnym przypadku, kiedy wilgotność względna powietrza przekroczy 100%, para wodna skrapla się na liściach, co może prowadzić do rozwoju chorób grzybowych [7,9].

2.3. Temperatura gleby

Gleba to przestrzeń tętniąca życiem. W jednym jej gramie można znaleźć setki milionów bakterii [12, 13]. Stwierdzono, że całkowita masa mikroorganizmów żyjących w jednym hektarze gleb bielicowych waha się od 1 do 3 ton, a na czarnoziemach, ciężkich glinach i łąkach wartość ta osiąga nawet 10 ton [12]. Te mikroorganizmy mają istotny wpływ na procesy życiowe roślin. Wpływ ten może być zarówno korzystny, jak i obojętny lub szkodliwy [14]. Kiełkowanie nasion oraz rozwój korzeni powoduje zwiększenie liczby drobnoustrojów w przestrzeni obejmującej powierzchnię korzenia oraz otaczającą go glebę. Przestrzeń ta nazywana jest ryzosferą, a mikroorganizmy w niej występujące – mikroflorą ryzosferową [12, 14, 24]. Wydzieliny korzeniowe powodują wyselekcjonowanie drobnoustrojów i w rezultacie utworzenie specyficznych zespołów bakterii, które dostarczają roślinom składników odżywczych³. Mikroorganizmy żyjące w symbiozie z roślinami lub wywierające korzystny wpływ na ich rozwój to ryzobakterie, definiowane skrótem PGPR (*ang. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) [14]. Tak jak wszystkie organizmy, posiadają one swoje optymalne warunki dla życia i rozwoju. Jednym z parametrów warunkujących rozwój i funkcjonowanie ryzobakterii jest temperatura. Stwierdzono, że rozwój ryzobakterii możliwy jest już w temperaturze powyżej 5°C, a ich optymalny wzrost zaobserwowano w temperaturze 28°C [15]. Jednak stwierdzono również, że w tak wysokich temperaturach wpływ ryzobakterii na

³ U człowieka podobną funkcję pełnią bakterie zasiedlające jelita [11]

wzrost roślin może zmienić się z korzystnego na obojętny [16]. Dla większości roślin optymalna temperatura gleby waha się w granicach od 18°C do 24°C [17]. Dlatego ważna jest kontrola oraz odpowiednia regulacja temperatury gleby, co zostanie omówione w dalszej części pracy.

2.4. Temperaturapowietrza

Temperatura roślin jest jednym z najważniejszych czynników warunkujących wzrost, ponieważ wpływa na procesy przemiany materii zachodzące w komórkach. Dlatego też głównym celem szklarni jest utrzymanie optymalnej temperatury dla wzrostu i rozwoju roślin [7]. Zarówno zbyt wysoka jak i zbyt niska temperatura mają niekorzystny wpływ na rozwój roślin. Przyrost masy roślin zależy od ilości docierającego do nich światła, jednak istnieje związek pomiędzy naświetleniem a temperaturą [8]. Rośliny rosną najlepiej, kiedy wraz ze wzrostem intensywności światła podnosi się również temperatura powietrza [7]. Jeżeli temperatura jest zbyt wysoka w stosunku do ilości światła, co ma miejsce najczęściej zimą lub przy dużym zagęszczeniu roślin, dochodzi do szybkiego wydłużania się pędów, które z uwagi na niedobór światła są cienkie i wiotkie, co może powodować opadanie owoców [8]. Z kolei zbyt duże zmiany temperatury w ciągu doby mogą powodować zrzucanie kwiatów oraz pękanie owoców i tym samym pogorszenie ich jakości [8]. Dodatkowo intensywność fotosyntezy oraz proces oddychania roślin zależą od temperatury. Przy zbyt wysokich temperaturach intensywność oddychania jest wyższa niż asymilacja dwutlenku węgla, wskutek czego zamiast przyrostu masy roślin następuje jej ubytek [9].

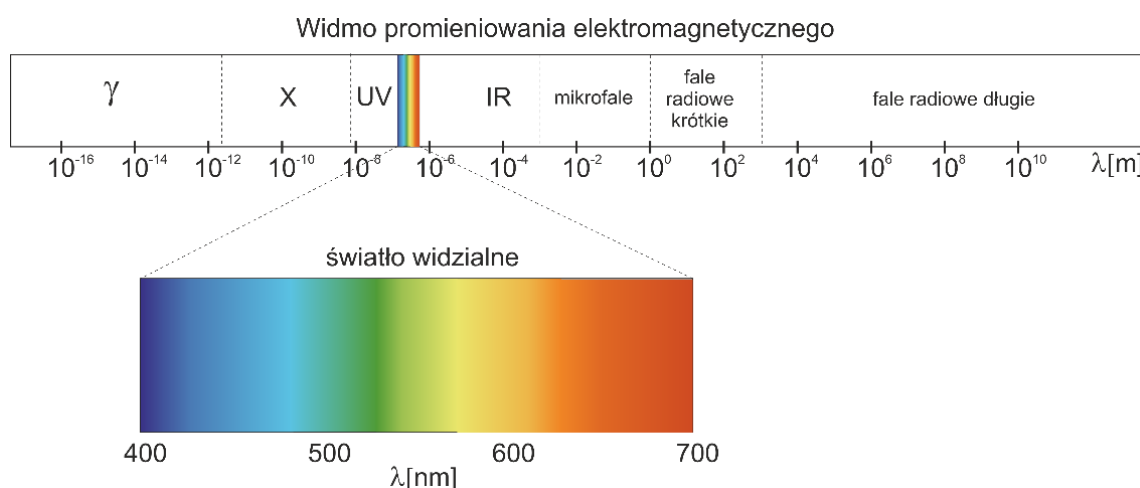
Temperatura, wpływając na proces parowania, wpływa również na proces transpiracji roślin. W wyższej temperaturze woda paruje szybciej, stąd ze wzrostem temperatury wzrasta intensywność transpiracji. Wzrost temperatury zwiększa zatem potrzeby wodne roślin. Głównym źródłem ciepła w szklarni jest promienowanie słoneczne [9]. Temperatura liści zależy od ich ustawienia względem promieni słonecznych. Zimą konieczne jest doprowadzenie ciepła do szklarni, natomiast w słoneczne letnie dni często zachodzi konieczność obniżenia temperatury w szklarni. Z kolei w pochmurne dni temperatura w szklarni jest niewiele większa niż na zewnątrz [7].

2.5. Naświetlenie

Światło jest podstawowym źródłem energii niezbędnej dla procesu fotosyntezy, stąd też jest jednym z podstawowych czynników plonotwórczych [9]. Natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego zmienia się wraz porą dnia i roku, co związane jest z wysokością

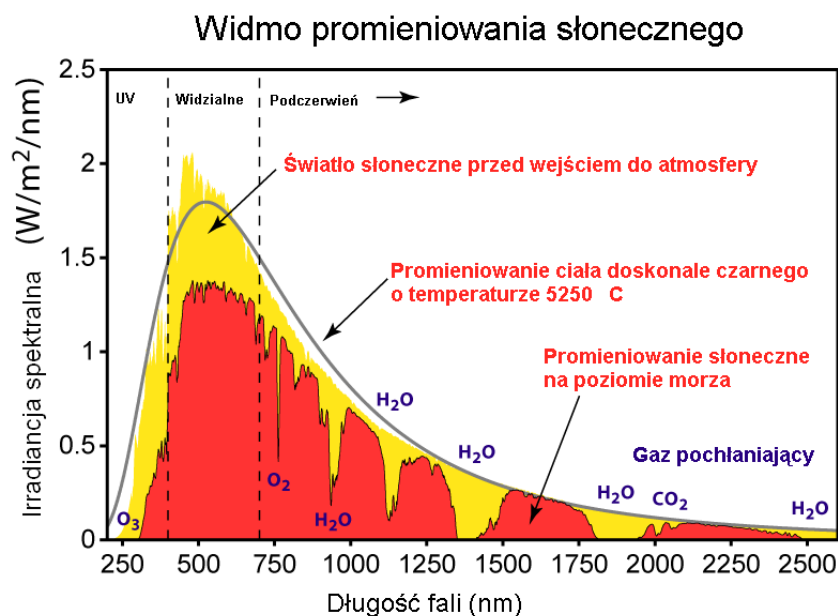
słońca nad horyzontem. Naświetlenie zależy także od zachmurzenia oraz zanieczyszczenia powietrza. W ciągu roku największe natężenie promieniowania występuje latem, a najniższe jesienią i zimą, kiedy słońce przez cały dzień pozostaje nisko nad horyzontem. W okresie zimowym w uprawach konwencjonalnych stosuje się dodatkowe doświetlanie w celu zwiększenia aktywności fotosyntezy lub przedłużenia długości dnia [9]. Intensywność fotosyntezy zależy od natężenia promieniowania, ale także od jego składu spektroskopowego (widma), temperatury oraz stężenia dwutlenku węgla. Zapotrzebowanie roślin na światło zależy od pory roku, ale także od wielkości liści i wysokości rośliny, zwłaszcza gdy poszczególne warstwy liści zatrzymują część promieniowania [9]. Intensywność światła ma znaczny wpływ zarówno na parametry jakościowe jak i wartość biologiczną warzyw. Światło wpływa korzystnie na wybarwienie oraz zawartość cukrów i witamin [8]. Jednak zbyt intensywne światło może powodować powstawanie plam na owocach, przypominających oparzenia.

Poszczególne zakresy widma promieniowania elektromagnetycznego mają różny wpływ na rozwój roślin. Przyjmuje się, że skutecznie działa tylko ta część widma, która jest absorbowana przez rośliny [7]. Rośliny wymagają stosunkowo dużej ilości światła czerwonego o długości fali ok. 660 nm, oraz światła niebieskiego o długości fal od 400 nm do 450 nm (Rys. 6) [7]. Światło zielone o długości fal od 450 nm do 510 nm cechuje stosunkowo niewielkie działanie biologiczne, ponieważ jest ono odbijane przez liście, co też determinuje ich barwę. Światło to w większym natężeniu autor pracy 7 uważa za szkodliwe.



Rysunek 6 Widmo promieniowania elektromagnetycznego [31]. Promieniowanie γ emitowane jest przez wzbudzone jądra atomowe w wyniku reakcji jądrowych lub rozpadów promieniotwórczych. Promieniowanie X to promieniowanie w zakresie rentgenowskim, pochodzące od wzbudzonych atomów lub źródeł sztucznych takich jak synchrotrony lub aparaty rentgenowskie. UV – ultrafiolet, IR (*infrared*) – promieniowanie podczerwone.

Światło widzialne stanowi zaledwie część widma, zarówno w przypadku promieniowania słonecznego jak i sztucznych źródeł światła. Widmo promieniowania słonecznego przed wejściem do atmosfery jest widmem promieniowania ciała doskonale czarnego z maksimum w zakresie widzialnym [24]. W atmosferze promieniowanie to jest selektywnie pochłaniane przez gazy wchodzące w skład atmosfery. Rysunek 7 przedstawia widmo promieniowania słonecznego, na którym pomarańczowym kolorem zaznaczono promieniowanie słoneczne na poziomie morza, które dociera do roślin.



Rysunek 7 Rozkład spektralny promieniowania słonecznego. Autor ilustracji: Robert A. Rohde, Global Warming Art, źródło: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_SpectrumPL.png (licencja GNU)

2.6. Stężenie dwutlenku węgla

Dwutlenek węgla jest roślinom niezbędny do życia. Atomy węgla pochodzące z tej cząsteczki, wraz z atomami wodoru pozyskanymi przez roślinę z wody, w efekcie procesu fotosyntezy tworzą glukozę oraz inne związki potrzebne roślinom do wzrostu oraz procesów życiowych (dodatek A) [27]. Rośliny pobierają dwutlenek węgla przez aparaty szparkowe. Przeciętne stężenie CO₂ w powietrzu wynosi ok. 400 ppm [8, 18]. Poziom ten utrzymuje się w prawidłowo wietrzonych pomieszczeniach uprawnych. Kiedy jednak pomieszczenia te pozostają przez dłuższy czas zamknięte, co ma miejsce np. zimą lub wczesną wiosną, stężenie CO₂ może się znacznie obniżyć. Jak wykazały ostatnie badania, nadmiar dwutlenku węgla również nie wpływa korzystnie na rozwój roślin [19, 20]. Duże stężenie CO₂ zmniejsza intensywność respiracji (Dodatek B). Respiracja jest dla roślin rodzajem korzystnego stresu, działającego na zasadzie efektu hormezy. W odpowiedzi na ten stres rośliny produkują

przeciwutleniacze, witaminy C i E oraz bardziej złożone białka [20]. Przy dużym stężeniu CO₂ rośliny i owoce są większe, jednak ich wartość odżywcza maleje.

3. Pomiary i regulacja czynników klimatycznych

3.1. Komputery klimatyczne i internet rzeczy

Możliwość sterowania klimatem jest tym, co z praktycznego punktu widzenia najbardziej odróżnia uprawy pod osłonami od upraw polowych. Regulacja parametrów klimatycznych odbywa się w oparciu o ich uprzednie pomiary i może odbywać się ręcznie lub automatycznie. Sterowanie ręczne to bezpośrednie działania człowieka, polegające na wykonywaniu czynności zamykania lub otwierania wietrzników, włączania lub wyłączania ogrzewania, nawadniania, wentylacji, oraz pozostałych elementów systemu [9]. Również do oceny parametrów klimatycznych człowiek może wykorzystać bezpośrednio swoje zmysły. Metody te są jednak mało precyzyjne i czasochłonne, wymagając od człowieka częstej obecności w pomieszczeniach uprawowych.

Postęp technologiczny, jaki dokonał się w ciągu ostatnich lat, pozwala obecnie na pełne zautomatyzowanie zarówno pomiarów jak i regulacji czynników klimatycznych w uprawach pod osłonami. Automatyka jest dziedziną inżynierii łączącą technologię informacyjną z systemami kontroli i sterowania [32]. W ostatnich latach dyscyplina ta zyskuje coraz większą popularność w rolnictwie. Na rynku dostępne są gotowe systemy automatyki dedykowane dla rolnictwa, w szczególności do monitoringu oraz regulacji parametrów klimatycznych w uprawach pod osłonami [34, 36, 37, 38, 35]. Ich podstawę stanowią komputery wyposażone w specjalistyczne oprogramowanie. Komputery te odczytują dane pomiarowe z czujników klimatycznych, a następnie przetwarzają je oraz interpretują w oparciu o zaawansowane modele matematyczne, uwzględniające wspomniane wcześniej współzależności pomiędzy czynnikami klimatycznymi [9]. Oprócz odczytu danych komputery te mogą sterować pracą urządzeń takich jak siłowniki, wentylatory, nagrzewnice, zawory wodne oraz inne urządzenia, przeznaczone do regulacji parametrów klimatycznych w uprawie pod osłonami. W ostatnich latach, dzięki rozwojowi internetu bezprzewodowego, zarówno odczyt danych z czujników jak i sterowanie urządzeniami może odbywać się zdalnie na odległość.

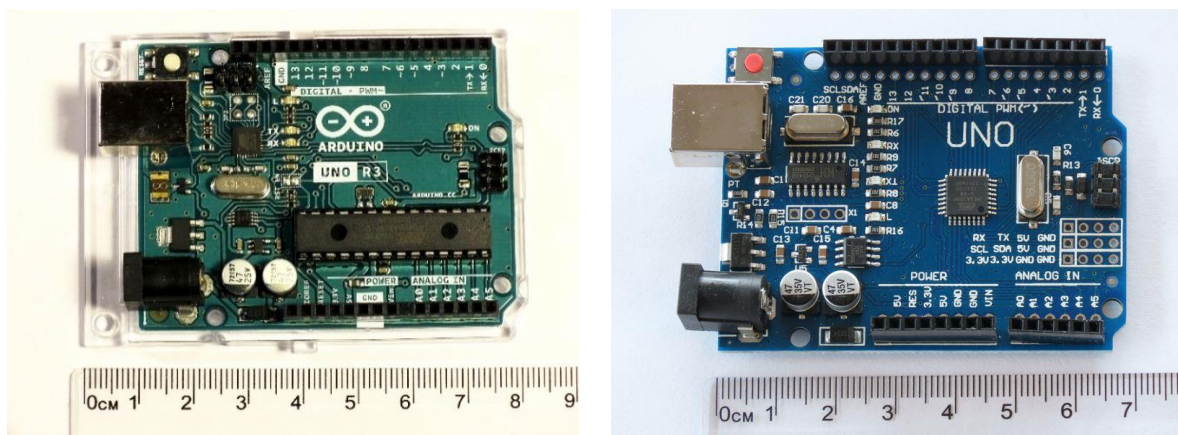
Najnowsze rozwiązania automatyki bazują na koncepcji internetu rzeczy (IoT – *Internet of Things*). Internet rzeczy to urządzenia elektroniczne wyposażone w procesory, które połączone z siecią internet mogą wymieniać ze sobą dane pomiarowe [24, 32]. Koncepcja ta

w ostatnich latach cieszy się coraz większym zainteresowaniem także w rolnictwie, dzięki zdalnej możliwości odczytu oraz interpretacji danych z czujników rozmieszczonych na dużym obszarze. Możliwości te przyczyniły się do rozwoju koncepcji rolnictwa precyzyjnego, gdzie działania podejmowane są na podstawie gromadzonych oraz przetwarzanych danych pomiarowych [32]. Metody automatyki najlepiej sprawdzają się w uprawach pod osłonami, ze względu na możliwość sterowania klimatem. W uprawach pod osłonami powszechnie wykorzystuje się m.in. czujniki temperatury, wilgotności, naświetlenia oraz stężenia dwutlenku węgla. Do bezprzewodowego transferu danych wykorzystywane są protokoły Bluetooth, ZigBee oraz Wi-Fi. Protokoły Bluetooth oraz ZigBee mogą połączyć urządzenia w zasięgu do 100 metrów. Protokół Wi-Fi umożliwia bezprzewodowe zbieranie danych z urządzeń oddalonych nawet o 1 km, a przy połączeniu z internetem zasięg ten jest globalny [32]. W ten sposób dane z czujników mogą być przetwarzane oraz interpretowane przez komputery znajdujące się w dowolnym miejscu na świecie. Te komputery wraz z oprogramowaniem oraz połączonymi urządzeniami tworzą tzw. chmurę [35, 38]. Obecnie największym dostawcą tego typu rozwiązań jest firma Amazon, która stworzyła chmurę Amazon Web Services (AWS). Chmura AWS IoT łączy urządzenia na całym świecie, analizując oraz przechowując dane pomiarowe [38]. AWS posiada oprogramowanie do analizy i przetwarzania danych, w tym rozwiązania bazujące na sztucznej inteligencji. Platforma zapewnia dobrą kompatybilność z urządzeniami mobilnymi, a w przypadku IoT oferuje m.in. urządzenia pomiarowe z bateriami litowymi, które mogą pracować przez lata.

3.2. Mikrokomputery i mikrokontrolery

Wadą profesjonalnych rozwiązań są wysokie koszty. Opłaty za korzystanie z chmury IoT pobierane są w sposób ciągły w formie miesięcznego lub rocznego abonamentu. Możliwości w zakresie precyzyjnego oraz ciągłego monitoringu parametrów klimatycznych stwarzają obecnie stosunkowo tanie oraz łatwe w obsłudze systemy mikrokontrolerów Arduino i Raspberry Pi [22, 23]. Podobnie jak profesjonalne komputery, umożliwiają one zarówno odczyt danych z czujników jak i sterowanie urządzeniami zewnętrznymi. Mikrokontrolery to małe komputery realizowane w formie pojedynczego układu scalonego zawierającego jednostkę centralną (CPU – Central Processing Unit), pamięć RAM oraz rozbudowane układy wejścia-wyjścia [24]. Ich nazwa pochodzi od głównego ich zastosowania, jakim jest sterowanie urządzeniami elektronicznymi. Pierwsze mikrokontrolery powstały w latach 70-tych ubiegłego wieku, jednak ich obsługa wymagała specjalistycznej wiedzy, a programowanie ówczesnych mikrokontrolerów było czasochłonne i skomplikowane. Przełomem w popularyzacji

zastosowań mikrokontrolerów było pojawienie się w 2005 roku systemu Arduino – stworzonej przez włoskich inżynierów łatwej w obsłudze elektronicznej platformy mikrokontrolerów z przyjaznym językiem programowania [39]. Typowa płytką Arduino ma rozmiary karty kredytowej i jest w stanie wczytywać oraz przetwarzać dane z różnych czujników elektronicznych, zarówno cyfrowych jak i analogowych (fot. 1).



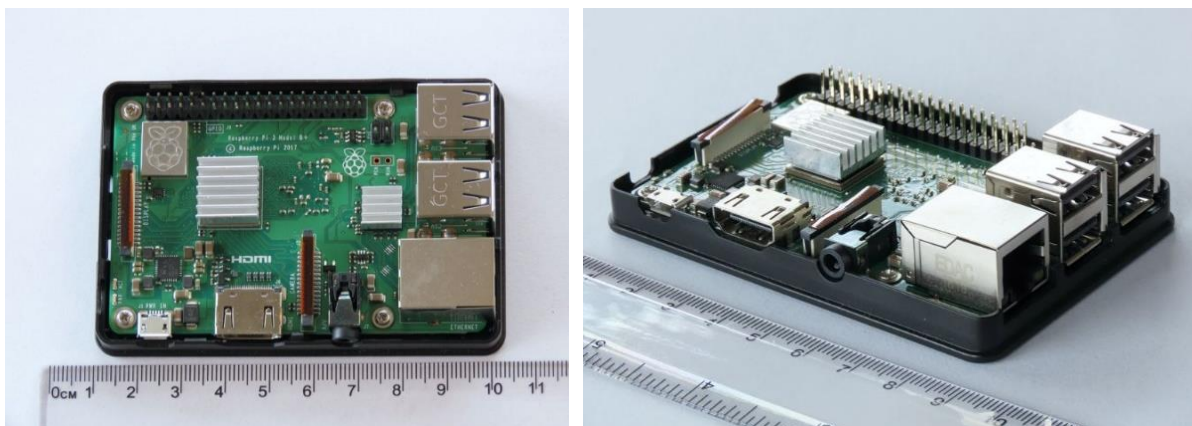
Fot. 1 a) Oryginalna płytką Arduino UNO, b) płytką typu Arduino Uno niezależnego producenta. Arduino jest projektem typu Open Hardware, co oznacza, że inni producenci także mogą produkować płytki typu Arduino, jednak nie mogą oznaczać ich znakiem towarowym Arduino.

W celu zaprogramowania Arduino podłącza się do komputera poprzez port USB. Programowanie odbywa się w dedykowanym dla kompilatorze Arduino IDE (Zintegrowane Środowisko Programistyczne - *Integrated Development Environment*). Po pomyślnej kompilacji programu płytką Arduino może zostać odłączona od komputera i samodzielnie realizować wgrany program.

Pojawienie się w systemie Arduino czujników wilgotności gleby wraz z możliwościami sterowania pompą wodną wzbudziło zainteresowanie zarówno majsterkowiczów zajmujących się okazynie przydomową uprawą warzyw, jak i naukowców. Uwzględnione w tym systemie czujniki temperatury oraz wilgotności powietrza, a także sterowniki silników umożliwiających automatycznie otwieranie i zamykanie drzwi lub okien stwarzają obecnie możliwości pełnej automatyzacji w uprawie szklarniowej [32, 40, 40, 41, 42].

System Arduino był prawdopodobnie inspiracją dla twórców mikrokomputera Raspberry Pi, opracowanego w 2006 roku w przez brytyjską fundację o tej samej nazwie [23]. Raspberry Pi to w pełni działający komputer o rozmiarach porównywalnych z Arduino (Fot. 2). Raspberry Pi działa w dedykowanym linuksowym systemie Raspbian, chociaż możliwa jest również instalacja na Raspberry popularnego Ubuntu. Raspberry Pi posiada wejścia USB oraz

HDMI, umożliwiające podłączenie klawiatury, myszy oraz monitora, a także port na kartę MicroSD, na której znajduje system obsługujący komputer oraz miejsce na przechowywanie danych.



Fot. 2 Mikrokomputer Raspberry Pi. Na zdjęciu po prawej stronie widoczne (od lewej) wejście HDMI, wejście zasilające, port ethernet oraz 4 wejścia USB. Na środku płytki widoczny mikroprocesor z radiatorem, a za nim gniazdo karty microSD. Dzięki niewielkim rozmiarom oraz niewielkim wymaganiom dotyczącym zasilania Raspberry Pi można umieścić w niewielkim pojemniku w pobliżu upraw.

Płytką Raspberry Pi, podobnie jak Arduino, posiada porty wejścia oraz wyjścia umożliwiające odczyt danych z czujników oraz sterowanie urządzeniami. Podobnie jak w przypadku Arduino, możliwości Raspberry Pi znalazły także zastosowanie w monitoringu oraz regulacji parametrów klimatycznych w uprawach pod osłonami. [43, 44]. Modułem dedykowanym do rejestracji danych z urządzeń dla Raspberry Pi jest mikrokontroler PI Pico, którego niewątpliwą zaletą jest możliwość programowania w popularnym języku Python[46]. Raspberry PI umożliwia instalację środowiska Arduino oraz pełną współpracę z tym systemem, stąd wiele projektów wykorzystuje oba te systemy [45].

3.3. Wilgotność gleby

3.3.1. Pomiary wilgotności gleby

Potrzeby wodne roślin uprawianych pod osłonami zależą od tych samych czynników jak w przypadku roślin uprawianych w polu, mogą zatem być mierzone przy użyciu tych samych przyrządów [9]. Jednak w uprawach pod osłonami wilgotniejsza gleba oraz silnie rozróżnione rośliny wyparowują większe ilości, tworząc inne warunki klimatyczne niż w polu. Z uwagi na wyższą temperaturę rośliny wymagają tu większych ilości wody podawanej we

właściwym dla nich czasie, zależnych od rodzaju uprawy. Zalecenia dotyczące optymalnej wilgotności podłoża mogą być podawane jako procentowy udział wody w danej objętości gleby (% wilgotności) lub jako procent połowej pojemności wodnej (% ppw), czyli ilości wody zawartej w glebie względem ilości wody, jaka znajduje się w niej po zakończeniu nawadniania kiedy odpłynie jej nadmiar [8]. Połowa pojemność wodna wynika z porowatości gleby - z większych porów woda odpływa szybciej, natomiast w mniejszych może być utrzymywana siłami kapilarnymi przez dłuższy czas [47]. Procent połowej pojemności wodnej determinuje potencjał wody glebowej, definiowany jako praca potrzebna do usunięcia jednostki masy wody poza zasięg sił wiążących [24].

Do pomiaru potencjału wody glebowej stosuje się tensjometry. Tensjometr ma kształt podłużnej rurki, która umieszczana jest w glebie. Na samym dole znajduje się część porowata, wykonana najczęściej z ceramiki, która połączona jest ze wskaźnikiem próżni poprzez tubę wypełnioną wodą [48]. Procent połowej pojemności wodnej określa wskaźnik stanu równowagi pomiędzy próżnią a siłą ssącą gleby determinowaną przez potencjał wody glebowej. Wskazania tensjometru podawane są w kilopaskalach (*tension* – ciśnienie). Im mniej jest wody w podłożu, tym wyższe wartości wskazuje tensjometr. W okresie dużego zapotrzebowania roślin na wodę wskazane jest nawadnianie kiedy potencjał wody glebowej przekroczy 10 kPa [8].

Metodą pomiaru wilgotności gleby stosowaną na większym obszarze jest reflektometria czasowa [49, 50, 51]. Metoda ta polega na pomiarze czasu przemieszania się impulsu elektromagnetycznego pomiędzy prętami umieszczonymi w glebie. Prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku c_0 zależy od względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r oraz względnej przenikalności magnetycznej μ_r tego ośrodka zgodnie ze wzorem:

$$c_0 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni [24].

Cząsteczka wody jest dipolem elektrycznym, stąd względna przenikalność elektryczna wody wynosi ok. 80, podczas gdy dla gleby wartość ta zawiera się w przedziale od 2 do 7, a dla powietrza wynosi 1 [49]. Stąd pomiar wilgotności gleby możliwy jest także w oparciu o pomiar pojemności elektrycznej, która również zależy od względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r zgodnie ze wzorem

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

gdzie

C -pojemność elektryczna kondensatora,

S – pole powierzchni okładek kondensatora,

d – odległość pomiędzy okładkami

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni

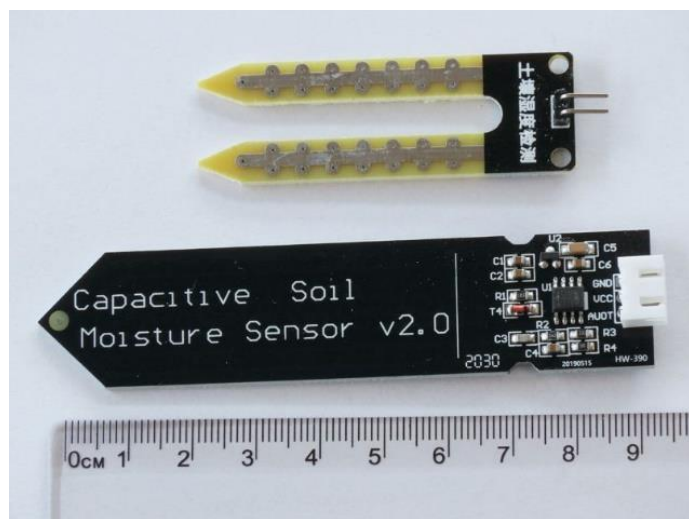
ε_r - względna przenikalność elektryczna materiału izolującego (w tym przypadku gleby)[52]

Woda, poprzez zwiększenie przenikalności elektrycznej ośrodka, zwiększa jego pojemność elektryczną. Pomiar pojemności elektrycznej może być wykonany pośrednio poprzez pomiar częstotliwości impulsu elektromagnetycznego w trakcie przejścia przez glebę, zgodnie ze wzorem:

$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C}$$

gdzie X_C jest rezystancją pojemnościową, a f to częstotliwością prądu przemiennego [53].

W systemach Arduino i Raspberry Pi dostępne są dwa rodzaje czujników wilgotności gleby – rezystywne i pojemnościowe [54] (Fot 3). Czujniki rezystywne bazują na pomiarze oporu elektrycznego pomiędzy dwiema elektrodami umieszczonymi w glebie. Niewzbudzone cząsteczki wody są elektrycznie obojętne, dlatego czysta destylowana woda nie przewodzi prądu elektrycznego. Jednak woda pochodząca zarówno ze źródeł naturalnych jak i gospodarczych zawiera rozpuszczone jony, które są nośnikami ładunku elektrycznego, dlatego wraz ze wzrostem zawartości wody w glebie maleje jej opór elektryczny. Wadą czujników rezystywnych jest szybka korozja elektrod, będąca wynikiem elektrolizy powodowanej przez przepływający prąd jonowy. Dlatego w celu uzyskania bardziej miarodajnych wyników obecnie stosuje się czujniki pojemnościowe bazujące na opisanym powyżej pomiarze pojemności elektrycznej gleby. Są one droższe, jednak dokładniejsze i bardziej trwałe.



Fot. 3 Czujniki wilgotności gleby. U góry czujnik rezystywny, poniżej czujnik pojemnościowy.

3.3.2. Regulacja wilgotności gleby

W uprawach pod osłonami wilgotność nie powinna spadać poniżej 60% ppw. Nawadnianie rozpoczyna się zazwyczaj ok. 2-3 godziny po wschodzie słońca, a kończy ok. 1-2 przed zachodem słońca [8]. Dostępność wody dla roślin zależy również od innych czynników, takich jak np. zasolenie gleby. Przy dużym zasoleniu gleby może dojść do sytuacji, kiedy roślina nie może pobrać wody z gleby pomimo dużej wilgotności [8]. System nawadniania powinien być wyposażony w filtr w celu usunięcia z wody zanieczyszczeń, które mogą być przyczyną zatykania systemu [56].

Źródłem wody w uprawach pod osłonami jest najczęściej sieć wodociągowa, chociaż mogą w tym celu zostać wykorzystane inne zasoby wodne wymienione w podrozdziale 2.1. Do źródła podłączony jest zawór wody, który w uprawach zautomatyzowanych może być sterowany czasowo lub w oparciu o pomiar wilgotności [55]. Do zaworu dołączone są przewody doprowadzające wodę w okolice roślin. Woda z przewodów doprowadzających kierowana jest do przewodów nawadniających [9]. Sposób, w jaki przewody nawadniające przekazują wodę do roślin to system nawadniania. Spośród dostępnych systemów nawadniania możemy wyróżnić m.in. nawadnianie punktowe, kropłowe oraz mikrozaszacze [9].

W systemie punktowym końcówka przewodu z wodą kierowana jest do postawy rośliny. Metoda ta jest najbardziej odpowiednim sposobem nawadniania roślin rosnących w pojemnikach. W systemie kropłowym podstawowymi elementami są linie oraz taśmy kropłujące. Są to przewody wykonane z polietylenu z umieszczonymi w niej elementami lub fragmentami zawierającymi otwory zwane emiterami lub kropłownikami. Kiedy linia lub taśma kropłująca zostaje wypełniona wodą, woda wydostaje się przez emitery w postaci kropel lub

bardzo niewielkim strumieniem, powoli i równomiernie nawadniając rośliny znajdujące się przy emiterach [56, 57]. Mikrozaszace to urządzenia rozpylające wodę w formie niewielkich kropeł. Mogą służyć zarówno do nawadniania jak i do chłodzenia roślin.

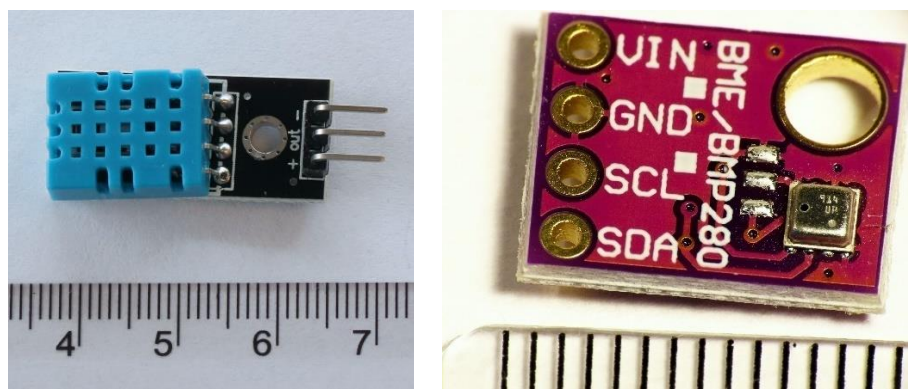
W systemach Arduino i Raspberry Pi do sterowania zaworami wody wykorzystuje się silniki krokowe lub zawory elektromagnetyczne [24, 58, 60, 60, 61, 62]. Silnik krokowy ma większą precyzję, jednak cechuje się większym rozmiarem oraz dłuższym czasem reakcji. Zawory elektromagnetyczne wykorzystują solenoid. W odróżnieniu od zaworów sterowanych silnikami krokowymi mają dostępne tylko dwa stany – otwarty lub zamknięty. Prąd przepływający przez cewkę indukuje pole magnetyczne, które siłą przyciągania bądź odpychania przesuwa element zaworu zamykający dopływ wody.

3.4. Wilgotność powietrza

3.4.1. Pomiary wilgotności powietrza

Tradycyjnym urządzeniem do pomiaru wilgotności powietrza jest higrometr (*hygros* – wilgotny). Zasada działania higrometrów opiera się na rejestracji zmian właściwości pewnych substancji lub materiałów, które zmieniają się przy zmianach wilgotności powietrza [65]. Najstarszym tradycyjnym higrometrem jest higrometr włosowy, który wykorzystuje zjawisko wydłużania się włosa przy wzroście wilgotności [63]. W nowoczesnych higrometrach włosowych włosy zastępowane są nicią syntetyczną. W higrometrach kondensacyjnych wilgotność względna obliczana jest na podstawie temperatury, przy której para wodna skrapla się na elementach urządzenia. W tym przypadku wilgotność względną można obliczyć na podstawie zależności przedstawionej na rysunku 5. Kolejnym rodzajem higrometru jest psychometr, którego działanie opiera się na pomiarze spadku temperatury wody w wyniku jej parowania. Im mniejsza jest wilgotność powietrza, tym większe jest parowanie wody i tym samym niższa jest jej temperatura w stosunku do temperatury otoczenia.

Wilgotność powietrza, podobnie jak wilgotność gleby, może zostać wyznaczona na podstawie pomiaru pojemności elektrycznej kondensatora. Pojemność ta wzrasta wraz z wilgotnością, co zostało opisane w poprzednim podrozdziale. Metoda pomiaru pojemności elektrycznej została wykorzystana w czujnikach wilgotności DHT11 i DHT22 zgodnych z systemami Arduino i Raspberry Pi, jak również w bardziej zaawansowanych modułach Si7021 i BME280 [66, 67].



Fot. 4. Czujniki temperatury oraz wilgotności a) DHT22 b) BME 280

3.4.2. Regulacja wilgotności powietrza

W uprawie szklarniowej warzyw optymalna względna wilgotność powietrza waha się w granicach 60-70%. Powyżej 90% zwiększa się ryzyko kondensacji pary wodnej na liściach, co sprzyja powstawaniu chorób grzybowych [8]. Dlatego przed nocą zalecane jest obniżenie wilgotności względnej.

Podstawowym sposobem obniżania wilgotności względnej jest wietrzenie i ogrzewanie. Wietrzenie można wykonać przez otwieranie wietrzników. W systemach Arduino i Raspberry Pi może się to odbywać automatycznie z wykorzystaniem silników krokowych, wspomnianych w poprzednim podrozdziale, przy pomocy których otwierane są wietrzniki [64]. Dodatkowo można zastosować wentylatory oraz również rury grzejne z automatycznym otwieraniem zaworów. Z kolei w przypadku zbyt niskiej wilgotności można zastosować zraszanie.

3.5. Temperatura powietrza i gleby

3.5.1. Pomiary temperatury powietrza i gleby

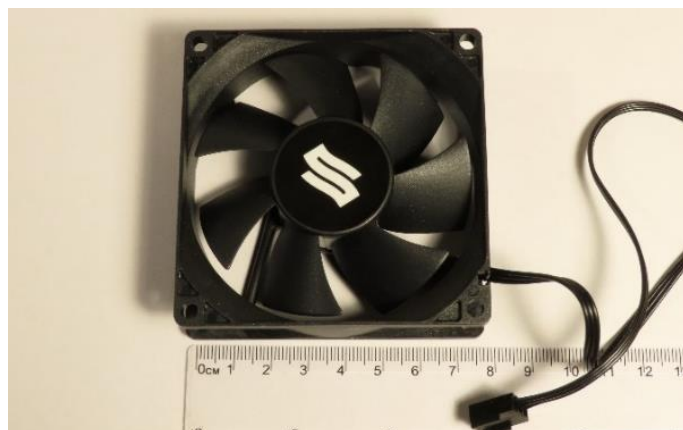
Termometr jest powszechnie dostępnym urządzeniem, stąd temperatura może wydawać się najprostszym do zmierzenia czynnikiem klimatycznym. Jednak czujniki temperatury, podobnie jak rośliny, pochłaniają promieniowanie słoneczne [7]. W rezultacie wskazania termometru mogą być wyższe od faktycznej temperatury, zarówno gleby jak i powietrza. Efekt ten można łatwo zaobserwować na wskazaniach termometrów wystawionych na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego. Dlatego termometry powinny być osłonięte przed promieniowaniem.

Klasycznym przyrządem do pomiaru temperatury jest termometr cieczowy, wykorzystujący zjawisko rozszerzalności cieplnej cieczy [24]. Do konstrukcji termometrów cieczowych używa się cieczy o możliwie niskiej temperaturze krzepnięcia, wysokiej temperaturze wrzenia oraz dużej i liniowej rozszerzalności cieplnej [24]. Z uwagi na te właściwości ciecze te nazywane są termometrycznymi. Pierwszym termometrem cieczowym był termometr rtęciowy. Rtęć jest jednak cieczą toksyczną, dlatego w 2007 roku Parlament Europejski wprowadził na terenie Unii Europejskiej zakaz sprzedaży termometrów rtęciowych [68]. Obecnie zamiast rtęci stosuje się alkohole, najczęściej izopropanol [24]. Alternatywą dla termometrów cieczowych są termometry metaliczne, wykorzystujące zjawisko rozszerzalności cieplnej metali [69]. Zaletą termometrów cieczowych i metalicznych jest brak kosztów eksploatacji. Jednak możliwości automatycznego przekazania wskazań tego typu urządzeń są bardzo ograniczone. Dlatego w automatyzowanych pomiarach zastosowanie znajdują termometry elektroniczne. Wykorzystują one zjawisko zależności oporu elektrycznego metali od temperatury [71]. W systemach Arduino i Raspberry Pi wykorzystuje się m.in. moduł DS18B20 [66,72, 73, 74]. DS18B20 mierzy temperaturę w zakresie od -55°C do $+125^{\circ}\text{C}$. W

zakresie od -10°C to do 85°C błąd pomiarowy urządzenia wynosi $0,5^{\circ}\text{C}$. W 64-bitowej pamięci ROM przechowywany jest unikalny numer seryjny urządzenia, pozwalający na jego łatwą identyfikację. Jest to bardzo przydatne w sytuacji, kiedy do jednej magistrali podłączonych jest wiele takich czujników [74]. Moduł posiada możliwość ustawienia alarmu dla górnej i dolnej granicy temperatury. DS18B20 nie wymaga zewnętrznego źródła zasilania i może być zasilany bezpośrednio z magistrali Arduino lub Raspberry Pi. Dostępny jest również czujnik z przewodem i wodoodporną końcówką, dzięki czemu może zostać również wykorzystany do pomiaru temperatury gleby. Do pomiaru temperatury powietrza można wykorzystać także elementy DHT11, DHT22, Si7021 oraz BME280 omówione w poprzednim podrozdziale.

3.5.2. Regulacja temperatury powietrza i gleby

W przypadku zbyt wysokiej temperatury w szklarni najprostszym i najbardziej ekonomicznym sposobem jej regulacji jest wietrzenie [7]. Możemy wyróżnić wietrzenie naturalne, czyli kawitacyjne, oraz mechaniczne, czyli wymuszone. Przy wietrzeniu naturalnym wymiana powietrza następuje poprzez otwory w dachu lub ścianach bocznych, zwane wietrznikami. Wymiana ta następuje wskutek naturalnego ruchu powietrza, który pojawia się przy różnicy temperatur, oraz wskutek ruchu powietrza pod wpływem wiatru [7]. Wietrzniki powinny być rozmieszczone w taki sposób, aby wiatr mógł powodować dobre przemieszczanie się powietrza. Natomiast w przypadku wietrzenia wymuszonego powietrze z zewnątrz doprowadzane jest do szklarni przez wentylatory. W celu obniżenia temperatury w szklarni można również zastosować zraszanie.



Fot. 5 Wentylator komputerowy Zephyr 80. Praca wentylatorów komputerowych może być sterowana przez Arduino [70].

W celu podwyższenia temperatury można wykorzystać nagrzewnice oraz rury grzejne [7]. Wskazane jest, aby rury te znajdowały się możliwie nisko nad powierzchnią gleby pomiędzy zagonami. Ciepłe powietrze z uwagi na mniejszą gęstość wznosi się do góry, a schłodzone przy dachu opada na dół. W ten sposób można uzyskać konwekcyjny ruch powietrza ogrzewającego pomieszczenie. Rury grzejne mogą zostać umieszczone także w glebie w celu podniesienia jej temperatury. W tym przypadku również można skorzystać z możliwości automatycznego sterowania zaworami wody na podstawie odczytu temperatury gleby.

3.6. Naświetlenie

3.6.1. Pomiary naświetlenia

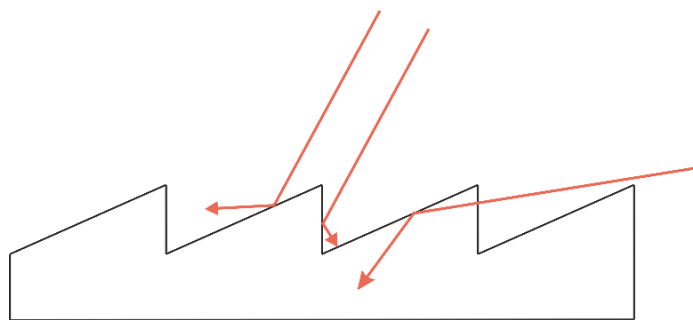
W urządzeniach służących do pomiaru naświetlenia wykorzystywane są fotorezystory i fotodiody (dodatek D). Urządzeniami dedykowanymi do pomiaru natężenia światła przy

uprawach są mierniki typu PAR (*Photosynthetically Active Radiation*) [75]. Mierzą one intensywność światła w zakresie od 400 nm do 700 nm, wykorzystywanym przez rośliny w procesie fotosyntezy. Wynikiem pomiaru jest wielkość PPFD, czyli gęstość strumienia fotonów zdolnych do fotosyntezy (*Photosynthetic Photon Flux Density*), której jednostką jest liczba fotonów podana w mikromolach na metr kwadratowy na sekundę ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) [75]. Profesjonalny miernik PAR to obecnie koszt rzędu kilkuset dolarów. Ciekawym natomiast rozwiązaniem jest aplikacja Photone (dawniej Korona 2.0), którą można zainstalować na urządzeniach mobilnych firmy Apple [76, 77]. Aplikacja ta mierzy PPFD z dość dobrą dokładnością, wykorzystując w tym celu kamery urządzeń iPhone oraz iPad.

W systemach Arduino i Raspberry Pi do pomiarów intensywności naturalnego światła stosowany jest moduł BH1750FVI, który rejestruje promieniowanie widzialne w zakresie długości fali 400-700 nm przy natężeniu 1-65535 lx [66, 78]. W systemie Arduino możliwe jest także wykorzystanie profesjonalnego detektora PAR LI-190R [79]. Zestaw PARduino, którego nazwa sugeruje zastosowanie oraz przynależność systemową, został zaprezentowany przez autorów pracy⁸⁰.

3.6.2. Regulacja naświetlenia

Istotny wpływ na ilość światła docierającego do roślin ma usytuowanie osłon oraz ich konstrukcja, w szczególności kształt dachu oraz materiał wypełniający [7]. Przez większą część roku ilość światła w szklarni jest zbyt mała dla zapewnienia roślinom optymalnego wzrostu, dlatego poprzez odpowiednią konstrukcję a także usytuowanie szklarni względem stron świata dąży się do uzyskania możliwie dużego naświetlenia wewnątrz. Szklarnia, której oś ustawiona jest w kierunku W-E otrzymuje więcej światła w zimie, przez co uprawa roślin wymagających więcej światła zimą przy takim usytuowaniu daje lepsze rezultaty. Jednak w skali rocznej, a w szczególności latem, szklarnia z osią ustawioną w kierunku N-S otrzymuje więcej światła [7]. W konstrukcji szklarni wpływ na ilość docierającego światła ma także kąt nachylenia dachu. Przykładem może być dach pilasty, który umożliwia uzyskanie w szklarni naświetlenia większego niż na zewnątrz w sytuacji, kiedy słońce jest nisko nad horyzontem. Równocześnie kształt ten zmniejsza nasłonecznienie kiedy światło słoneczne pada pionowo, zapobiegając w ten sposób nadmiernemu naświetleniu i wzrostowi temperatury (rys.8) [7].



Rysunek 8 Dach pilasty[7]. Przy niskim położeniu słońca nad horyzontem do szklarni wnika duża ilość światła dzięki odbiciu od wewnętrznej powierzchni dachu. Z kolei promienie padające pod dużym kątem odbijają się od zewnętrznej strony dachu zmniejszając nasłonecznienie szklarni[7].

Najistotniejszym elementem osłon mającym wpływ na ilość światła docierającego do roślin jest materiał wypełniający. Materiał ten powinien cechować się możliwie jak największą przepuszczalnością promieniowania słonecznego, równocześnie zatrzymując ciepło w godzinach nocnych [8]. Zakres oraz intensywność promieniowania przenikającego przez materiał wypełniający określa jego przepuszczalność spektralna. Przepuszczalność ta wpływa zarówno na widmo światła docierającego do roślin, jak i na temperaturę pomieszczenia [7]. Różnice w przepuszczalności różnych długości fal promieniowania dla materiałów stosowanych w konstrukcji osłon są jedną z przyczyn tzw. efektu szklarniowego [7]. Blisko 80% energii promieniowania trafiającego do szklarni to promieniowanie o falach krótszych, które przenika przez szyby. Promieniowanie to jest pochłaniane przez rośliny oraz glebę, co powoduje ich nagrzewanie. W warunkach naturalnych ciepło to oddawane jest do atmosfery, natomiast w szklarni jest ono zatrzymywane przez szyby, które nie przepuszczają promieniowania ciepłego. Wskutek tego prawie cała energia dostarczona przez promieniowanie pozostaje w szklarni, podnosząc temperaturę powietrza. W letnie dni, kiedy temperatura powietrza na zewnątrz osiągała 30°C , w szklarni odnotowywano temperaturę 60°C i wyższą [7].

W zakresie światła widzialnego zwykle szkło cechuje stała przepuszczalność wynosząca ok. 90% [7]. Promieniowanie UV przenika przez szkło tylko w niewielkim stopniu, w zakresie fal najdłuższych (UV-A) [7,24]. Światło UV wpływa korzystnie na nasycenie barw kwiatów roślin, a w przypadku warzyw także na zawartość witamin i aromat, stąd w uprawie szklarniowej parametry te mogą być niższe. Z kolei w zakresie podczerwieni przepuszczalność szkła jest stała i wynosi ok. 85%, po czym gwałtownie spada do zera dla wartości ok. 3000 nm [7]. Przepuszczalność spektralną szkła można także regulować w pewnym zakresie poprzez dodanie barwników. Szkło takie będzie odbijać promieniowanie odpowiadające danej barwie.

W ostatnich latach do wypełnienia szkieletu szklarni stosuje się coraz częściej tworzywa sztuczne, takie jak poliestr, pleksiglas i polietylen. W zakresie promieniowania widzialnego przepuszczalność tych tworzyw jest porównywalna z przepuszczalnością szkła, jednak w zakresie podczerwieni materiały te absorbują promieniowanie o długościach fal już powyżej 1700 nm. W zakresie UV pleksiglas wykazuje większą przepuszczalność niż szkło, natomiast poliestr przepuszcza promieniowanie o długości fal powyżej 400 nm.

Dodatki

A) Fotosynteza

Wszystkie organizmy żyją na koszt energii zmagazynowanej w wiązaniach cząsteczek organicznych, dostarczanej w formie pokarmu [27]. Stworzenia mięsożerne pozyskują tę energię zjadając inne stworzenia, natomiast stworzenia roślinożerne pozyskują ją z roślin. Rośliny natomiast pozyskują energię z powietrza, gleby oraz światła słonecznego w procesie nazywanym fotosyntezą (*foto* – światło, *synthesis* – łączenie) [24]. W procesie tym rośliny pozyskują wszystkie potrzebne im do życia składniki ze źródeł nieorganicznych. Najważniejszymi składnikami są węgiel, który rośliny pobierają z atmosferycznego dwutlenku węgla, wodór i tlen pozyskiwane z wody, oraz azot i niewielkie ilości substancji mineralnych pobierane z gleby. Rośliny łączą te składniki w małe cząsteczki cukrów, aminokwasów, nukleotydów oraz kwasów tłuszczowych. Do tworzenia wiązań chemicznych pomiędzy atomami rośliny wykorzystują energię uzyskaną ze światła słonecznego. W dalszym etapie fotosyntezy rośliny łączą te małe cząsteczki w większe, tworząc w ten sposób białka, kwasy nukleinowe, polisacharydy oraz lipidy, ostatecznie budujące roślinę.

Reakcje fotosyntezy przebiegają w dwóch etapach. W pierwszym etapie następuje wychwytywanie energii świetlnej i tymczasowe magazynowanie jej w postaci energii wiązań chemicznych cząsteczek ATP i NADP [27,28]. Etap ten nazywany jest fazą jasną, ponieważ może zachodzić tylko w obecności światła. Na tym etapie rośliny uwalniają tlen, który powstaje w wyniku rozpadu cząsteczki wody pod wpływem światła (fotolizy), oraz magazynują atomy wodoru. Drugim etapem jest proces asymilacji węgla z atmosferycznego CO₂. W tym procesie z węgla oraz wodoru powstaje glukoza. Proces ten jest niezależny od światła, stąd nazywany jest fazą ciemną.

B) Respiracja

Rośliny pozyskują większość energii w procesie fotosyntezy, jednak do realizacji tego procesu niezbędne jest światło. Jest ono dostępne dla roślin w ciągu dnia, natomiast nie jest dostępne w nocy. Tymczasem nocą procesy życiowe roślin nie ustają. Komórki roślinne, podobnie jak zwierzęce, potrzebują w tym czasie energii do realizacji procesów życiowych, takich jak transport minerałów oraz tworzenie związków organicznych [29]. W ciemności rośliny pozyskują energię w procesie zwanym oddychaniem lub respiracją. Energia ta pozyskiwana jest z tlenu oraz z utworzonej w procesie fotosyntezy glukozy [30]. Proces ten zachodzi na drodze reakcji:



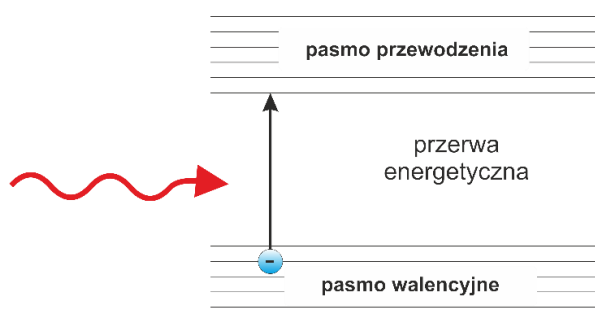
W procesie tym rośliny pobierają tlen i wydzielają dwutlenek węgla, co z punktu widzenia obserwatora jest efektem odwrotnym do fotosyntezy.

C) Transpiracja

Tylko niewielka część wody pobranej z gleby jest wykorzystywana przez rośliny na wzrost oraz procesy metaboliczne. Ponad 90% wody pobranej przez system korzeniowy jest zwracana przez roślinę do środowiska poprzez procesy transpiracji i gutacji [24]. Transpiracja to proces czynnego odparowania wody z nadziemnych części roślin, natomiast gutacja to zjawisko wydzielania kropel wodnych. Transpiracja może zachodzić przez aparaty szparkowe, skórę oraz przetchlinki. Proces ten jest jedną z przyczyn powstawania chmur nad obszarami leśnymi. W efekcie transpiracji w górnych częściach rośliny tworzy się podciśnienie, które przewyższając siłę grawitacji umożliwia roślinie transport wody przez system kapilarny od korzeni w górę. Taki przepływ wody przez roślinę (strumień transpiracji) umożliwia roślinie pobieranie składników mineralnych z gleby [26]. Intensywność transpiracji skorelowana jest z intensywnością parowania, a ta z kolei zależy od ciśnienia, temperatury, nasłonecznienia oraz wilgotności powietrza.

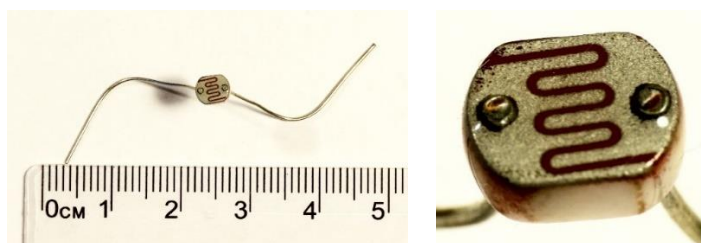
D) Fotorezystor i fotodioda

Fotorezystory i fotodiody wykonane są z półprzewodników. Półprzewodniki to materiały, w których występuje przerwa energetyczna pomiędzy tzw. pasmem walencyjnym, w którym elektrony są związane z atomami, a pasmem przewodzenia, w którym mogą się one przemieszczać w materiale zgodnie z przyłożonym napięciem. Jeżeli na półprzewodnik pada foton, którego energia jest większa od przerwy energetycznej, to może nastąpić przeniesienie elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia [24].



Rysunek 9 Struktura pasmowa półprzewodnika, przejście elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia

W momencie przyłożenia zewnętrznego napięcia elektron ten będzie przemieszczał zgodnie kierunkiem pola elektrycznego tworząc prąd. Zatem ze wzrostem natężenia promieniowania padającego na półprzewodnik zmniejsza się jego opór elektryczny. W ten sposób działa fotorezystor. Z uwagi na niewielką ilość generowanych w ten sposób nośników ładunku fotorezystor ma stosunkowo duże wymiary.



Fot. 6 Fotorezystor

W celu zwiększenia ilości nośników prądu naturalne (samoistne) materiały półprzewodnikowe domieszkowane są atomami o większej (typ n) lub mniejszej (typ p) liczbie elektronów na powłoce walencyjnej w stosunku do pozostałych atomów w sieci półprzewodnika, co powoduje powstanie dodatkowych poziomów w przerwie energetycznej. W półprzewodniku typu n poziomy te nazywane są donorowymi, a w półprzewodniku typu p – akceptorowymi. Poziomy donorowe to miejsca, gdzie może znajdować się dodatkowy elektron, a poziomy akceptorowe to miejsca, gdzie może brakować elektronu. Poziom akceptorowy z brakującym elektronem nazywany jest dziurą elektronową.

W praktyce wykorzystuje się złącza p - n , powstałe w wyniku połączenia półprzewodnika typu n z półprzewodnikiem typu p . Takie złącze to dioda. W miejscu połączenia dwóch rodzajów półprzewodników dochodzi do rekombinacji (połączenia) dziur i elektronów i powstaje tzw. warstwa zubożona, gdzie nie występują dodatkowe ładunki w postaci nadmiarowych elektronów i dziur. Szerokość warstwy zubożonej może być regulowana przez napięcie zewnętrzne. Jeżeli do obszaru typu n zostanie przyłożone napięcie ujemne, a do obszaru typu p dodatnie, to dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia, umożliwiającym przepływ prądu przy różnicy potencjałów powyżej 0,7 V. Natomiast kiedy do obszaru typu n zostanie przyłożone napięcie dodatnie, a do obszaru typu p ujemne, to dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym. Przez złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym płynie bardzo niewielki prąd (tzw. prąd ciemny), którego natężenie rośnie z temperaturą. Jeżeli natomiast na złącze to pada światło, to fotony promieniowania powodują przejścia elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodzenia, generując pary elektron-dziura. W tej polaryzacji elektrony przemieszczają się w stronę obszaru typu n , a dziury w stronę obszaru typu p . Przez diodę płynie prąd, którego natężenie wzrasta ze wzrostem intensywności promieniowania padającego na złącze.

Literatura

1. Our World in Data, <https://ourworldindata.org/land-use>
2. Our Planet, Netflix, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=JkaxUblCGz0>
3. Sarah Rizvi, Chris Pagnutti, Evan Fraser, Chris T. Bauch, Madhur Anand. Global land use implications of dietary trends. PLOS ONE, 2018; 13 (8): e0200781 DOI: 10.1371/journal.pone.0200781, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0200781>
4. <https://globaledge.msu.edu/industries/food-and-beverage/tradestats>
5. <https://www.dutchgreenhouses.com/en>
6. The World Horti E-Book, <https://rise.articulate.com/share/tE04hMcfk9aBq2zCxyC1-u1oXeQpcsA5#/>
7. Paul Kanthak, Klimat i klimatyzacja szklarni, PWRiL, Warszawa 1976
8. Uprawa warzyw w pomieszczeniach, praca zb., red. Mikołaja Knafliewskiego, PWRiL, Poznań 2010
9. Nawadnianie roślin, praca zb., red. Stanisława Kaczmarczyka i Lecha Nowaka, PWRiL, Poznań 2006
10. Steven R. Gundry, Roślinne kłamstwo [The Plant Paradox], Wyd. Vivante, 2018
11. Steven R. Gundry, The Longevity Paradox, Harper Collins Publishers, 2019
12. <https://www.procam.pl/mikroswiat-ktorego-nie-dostrzegasz/>
13. Living Soil, Soil Health Institute, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=ntJouJhLM48>
14. M. Pocięjowska, M. Natywa, A. Gałązka, Stymulacja wzrostu roślin przez bakterie PGPR, <https://kosmos.ptpk.org/index.php/Kosmos/article/view/1246/1225>
15. R.Meena et al., Isolation of low temperature surviving plant growth – promoting rhizobacteria (PGPR) from pea (Pisum sativum L.) and documentation of their plant growth promoting traits, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, Vol 4, 2015
16. J. Heinze, S. Gensch, E. Weber, J. Joshi, Soil temperature modifies effects of soil biota on plant growth, Journal of Plant Ecology, Vol 10, 2017
17. <https://www.gardeningknowhow.com/garden-how-to/soil-fertilizers/determining-soil-temperature.htm>
18. M. Poudel, B. Dunn, Greenhouse Carbon Dioxide Supplementation <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/greenhouse-carbon-dioxide-supplementation.html>

19. <https://news.stanford.edu/pr/02/jasperplots124.html>
20. <https://cfaes.osu.edu/news/articles/higher-carbon-dioxide-levels-prompt-more-plant-growth-fewer-nutrients>
21. The MAC humidity/moisture handbook, <https://www.macinstruments.com/wp-content/uploads/handbook.pdf>
22. <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
23. <https://www.raspberrypi.org/>
24. Wikipedia, <https://pl.wikipedia.org/>
25. <https://www.toppr.com/guides/biology/photosynthesis-in-higher-plants/factors-affecting-photosynthesis/>
26. What is Transpiration in Plants?, Free Animated Education, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=5jJLfwTkGe8>
27. B. Alberts, D. Bray, K. Hopkin, A. Johnson, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts, P. Walter, Podstawy biologii komórki, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2007
28. What is Photosynthesis?, Free Animated Education, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=38HvoBIIXrM>
29. M. Ząbczyńska, Krótko i węzłowato. Kiedy rośliny produkują, a kiedy zużywają tlen?, <https://cogiteon.pl/2020/04/krotko-i-wezlowato-kiedy-rosliny-produkuja-a-kiedy-zuzywaja-tlen/>
30. <https://ncert.nic.in/textbook/pdf/kebo114.pdf>
31. <https://pl.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
32. I. Ardiansaha, N. Bafdalb, E. Suryadib, A. Bono, Greenhouse Monitoring and Automation Using Arduino: a Review on Precision Farming and Internet of Things (IoT), International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, 2020, https://www.researchgate.net/publication/340920556_Greenhouse_Monitoring_and_Automation_Using_Arduino_a_Review_on_Precision_Farming_and_Internet_of_Things_IoT
33. J.M. Aaslyng, J.B. Lund, N. Ehler, E. Rosenqvist, IntelliGrow: a greenhouse component-based climate control system, Environmental Modelling & Software, 2003, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815203000525>
34. <https://nigma-ltd.com/>
35. <https://www.30mhz.com/>

36. <http://www.scadafarm.com/solutions>
37. <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-agriculture>
38. <https://aws.amazon.com/blogs/iot/aws-iot-driven-precision-agriculture/>
39. <https://www.ahirlabs.com/2017/10/11/history-of-arduino/>
40. B. Doraswamy, Automatic Irrigation System using Arduino Controller, International Journal of Advanced Technology and Innovative Research, 2016, <http://ijatir.org/uploads/453612IJATIR9293-106.pdf>
41. H. Prskalo, J. Trstenjak, B. Trstenjak, Smart greenhouse based on the arduino platform, 31st DAAMInternational Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2020/039.pdf
42. Autonomous greenhouse with mobile app. Automatic drip watering / irrigation system. Arduino DIY, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=j8CbyzdwVQE>
43. K. Ganesan, U. Walele, N. Hambire, P. Choughule, D. Oommen, Raspberry-Pi Based Automated Greenhouse, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol 05, 2018, <https://www.irjet.net/archives/V5/i3/IRJET-V5I3536.pdf>
44. S. Ishak, N. Malik, N. Latiff, G. Effiyana, M. Baharudin, Smart home garden irrigation system using Raspberry Pi, International Conference on Communications (MICC), 2017, https://www.researchgate.net/publication/323715665_Smart_home_garden_irrigation_system_using_Raspberry_Pi
45. DIY Raspberry Pi Arduino Plant Watering System, Caroline Dunn, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=DOaDnYj3vFI>
46. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-pico/>
47. <https://eagronom.com/pl/blog/polowa-pojemnosc-wodna-gleby-dlaczego-to-tak-wazne/>
48. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/tensiometer>
49. <https://labmodules.soilweb.ca/time-domain-reflectometry/>
50. D. J. Sample, J. S. Owen, J. S. Fields, S. Barlow, Understanding Soil Moisture Sensors: A Fact Sheet for Irrigation Professionals in Virginia, Virginia State University, https://ext.vt.edu/content/dam/pubs_ext_vt_edu/BSE/BSE-198/BSE-198-PDF.pdf
51. W. Skierucha, Wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną gleby w aspekcie reflektometrycznego [TDR] pomiaru jej wilgotności objętościowej, Acta Agrophysica, 1999.
52. <https://efizyka.net.pl/pojemnosc-kondensatora-plaskiego-walcowego-i-kulistego>
53. Capacitive Reactance, https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_1.html

54. <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/01/10/what-is-soil-moisture-sensor-and-simple-arduino-tutorial-to-get-started/>
55. <https://www.groworganic.com/>
56. <https://fajnyogrod.pl/porady/nawadnianie-kropelkowe-krok-po-kroku-jak-podlewac-metoda-kropelkowa/>
57. <https://www.nawadnianie-ogrodow.pl/oferta/systemy-nawadniajace/linie-kroplujace>
58. Arduino and Stepper Motor Configurations,
<https://docs.arduino.cc/learn/electronics/stepper-motors>
59. Demo Stepper Driven Control Valve, Youtube,
<https://www.youtube.com/watch?v=IJ8C341Ai2Q>
60. D. Yoon, M. Mujumdar, Lietz, Variable Controlled Solenoid Valve,
<https://courses.grainger.illinois.edu/ece445/getfile.asp?id=18403>
61. <https://tameson.com/solenoid-valve-types.html>
62. Arduino Solenoid Valve Circuit: How to control water flow with an Arduino, Youtube,
<https://www.youtube.com/watch?v=ioSYlxHlYdI>
63. <https://www.wlin.pl/rola-wody/wilgotnosc-powietrza/pomiar-wilgotnosci/>
64. Mini-Greenhouse automation project using Raspberry Pi, Youtube,
<https://www.youtube.com/watch?v=Fqefbtw1OC8>
65. <https://www.conrad.pl/artykuly/guides/higrometry-zasada-dzialania-i-wykorzystanie>
66. <https://www.mysensors.org/build>
67. <https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf>
68. <https://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+IM-PRESS+20070706IPR08897+0+DOC+PDF+V0//PL&language=PL>
69. <https://tameson.com/bimetallic-thermometer.html>
70. Arduino Fan Control, Science Fun, Youtube,
<https://www.youtube.com/watch?v=UJK2JF8wOu8>
71. http://www.uwm.edu.pl/studydays/files/zss/tps_2/4_termistory/termistory.pdf
72. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
73. <https://www.theengineeringprojects.com/2019/01/introduction-to-ds18b20.html>
74. <https://arduino-tutorials.net/tutorial/reading-1-wire-ds18b20-temperature-sensor-with-arduino>
75. <https://www.vernier.com/files/manuals/par-bta.pdf>
76. <https://growlightmeter.com/korona-2-0/>

77. Your Smartphone is a Quantum Par Meter - Photone App, Youtube,
<https://www.youtube.com/watch?v=t0umUgrS UE>
78. BH1750, <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
79. LI-190R, <https://www.licor.com/env/products/light/quantum>
80. H. R. Barnard, M. C. Findley, J. Csavina, PARduino: a simple and inexpensive device for logging photosynthetically active radiation, Tree Physiology, Vol. 34, 2014,
<https://academic.oup.com/treephys/article/34/6/640/2338115>