



Andrea Patanè

Ilmastonhallintamalli vesiviljelyn suljettuun tutkimusympäristöön

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ympäristötekniikka

Insinöörityö

25.4.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Andrea Patanè
Otsikko:	Ilmastonhallintamalli vesiviljelyn suljettuun tutkimusympäristöön
Sivumäärä:	38 sivua
Aika:	25.4.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ympäristötekniikka
Ohjaaja:	Lehtori Kaj Lindedahl

Tutkimuksessa tavoiteltiin kokonaisvaltaista kuvausta kasvihuonekasvien kasvutekijöistä, kasvihuoneen ilmastoon vaikuttavista tekijöistä ja ilmastonhallintamenetelmistä ilmastonhallintamallin muodostamiseksi.

Kasvutekijöiden osalta tutkimustietoa kerättiin valosta, lämpötilasta, ilmankosteudesta, hiilidioksidista sekä kasteluvedestä. Ilmastoon vaikuttavat tekijät rajattiin valaisimista johtuvaan lämpöenergiaan sekä kasvien transpiraatioon, jolloin kasvihuoneen rakenteet jäivät tutkimuksen ulkopuolelle. Ilmastonhallintamenetelmissä kerättiin kooste yleisimmistä kaupallisissa kasvihuoneissa käytetyistä laitteista ja menetelmistä. Lisäksi tutkimukseen kerättiin laskukaavoja, jotka tukisivat oikean kokoisen laitteen hankintaa tutkimusympäristöön.

Kasvutekijöiden tutkimustieto antoi merkittävää näyttöä ilmastonhallinnan muuttujien vaikutuksesta tutkimustuloksiin ja loi perustan ilmastonhallintatarpeiden määrittämiselle. Ilmastoon vaikuttavien tekijöiden tutkimuksessa saatiin tietoa ja laskukaavoja valaisimista johtuvan lämpöenergian määrän sekä kasvien transpiraatiosta johtuvien lämpöenergia- ja vesihöyrymäärien arvioimiseksi. Ilmastonhallintamenetelmien tutkimuksessa hankittiin yleistietoa ilmanvaihdosta, hiilidioksidilannoituksesta, lämmityksestä lämpöputkilla sekä jäähdytyksestä haihdutuksella ja kondensaatiolla. Lisäksi jokaiselle menetelmälle saatiin ilmastonhallinnan suunnittelun kannalta hyödyllisiä laskukaavoja, jotka auttavat laitehankintojen määrittämisessä. Tutkimuksen lopputulos eli ilmastonhallintamalli muotoutui tutkimustietoa hyödyntäväksi prosessikaavioksi. Ehdotettua mallia voidaan käyttää perustana ilmastonhallinnan suunnittelulle tilanteissa, joissa kasvatusympäristön rakenteiden vaikutus ilmastoon on vähäinen.

Avainsanat: ilmastonhallinta, vesiviljely, kasvihuoneteknologia

Abstract

Author: Andrea Patanè
Title: Climate Control Model for Hydroponics in Closed Research Environment
Number of Pages: 38 pages
Date: 25 April 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Environmental Engineering
Supervisor: Kaj Lindedahl, Senior Lecturer

The objective of the research was to obtain a holistic review for greenhouse plants' growth parameters, factors affecting greenhouse climate and climate control methods to produce a climate control model.

Research was conducted on plants' growth parameters, which consisted of light, temperature, humidity, carbon dioxide and irrigation water. Evaluated factors affecting greenhouse environment were heat emissions from lighting systems and heat and vapor fluxes from plant transpiration. In the research for climate control methods, a collection of commercially viable methods and devices was gathered. Moreover, the research included equations for each method to support the acquisition of devices for specific greenhouses.

The research for growth parameters led to substantial evidence for the effect of climate control variables on research results. In addition, the results presented a holistic view of the requirements of hydroponic environment. The factors affecting greenhouse environment resulted in theory and equations to evaluate the heat emissions from lighting systems and heat and vapor fluxes from plant transpiration. The climate control methods included air exchange, cooling by evaporation and condensation, heating by heat pipes and carbon dioxide supplementation. In addition, equations were formed for each climate control method to support climate control design. The climate control model took shape as a process chart, which consisted of the gathered climate factors and climate control methods. The suggested model could be used as a basis for climate control design, when greenhouse structures cause minor effects to the inside climate.

Keywords: climate control, hydroponics, greenhouse technology

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kasvutekijät	2
2.1	Valosäteily	2
2.1.1	Säteilyn laatu	3
2.1.2	Säteilyn intensiteetti	4
2.2	Lämpötila ja ilmankosteus	4
2.2.1	Kyllästysvajaus	5
2.2.2	Kyllästysvajauden määrittäminen	6
2.2.3	Suhteellinen kosteus	8
2.3	Hiilidioksidi	9
2.4	Vesi ja ravinteet	10
2.4.1	Vedenjohtavuus	11
2.4.2	Kasteluveden pH-arvo	12
2.4.3	Kasteluveden lämpötila ja happipitoisuus	12
3	Ilmastonhallintaan vaikuttavat tekijät	13
3.1	SPNa- sekä LED-valaisimien vaikutus ilmastoon	14
3.1.1	Valosäteilyn laatu ja tehokkuus	14
3.1.2	Lämmöntuotto	15
3.2	Kasvien transpiraation vaikutus ilmastoon	16
4	Ilmastonhallintamenetelmät	18
4.1	Lämpötilan ja ilmankosteuden hallinta ilmanvaihdolla	19
4.2	Lämmitys lämpöputkilla	21
4.3	Jäähdytys haihdutuksella	22
4.3.1	Sumuttimet	23
4.3.2	Evaporative cooling pad -haihdutusjäähdytin	24
4.4	Jäähdytys kondensaatiolla	26
4.5	Hiilidioksidilannoitus	28
5	Ilmastonhallintamalli	29
6	Pohdinta	34
	Lähteet	36

1 Johdanto

Vesiviljely suljetussa kasvatusympäristössä on ympäristöystävällinen kasvien viljelymenetelmä. Kasvien tarvitsemat vesi ja ravinteet, jotka esimerkiksi avoilla kulkeutuvat hulevesien kautta ympäristöön, ovat vesiviljelyssä hallitusti suljetussa veden kierrossa. Rikkakasveja ja tuholaisia on suljetussa ympäristössä helpompi hallita ympäristöystävällisin torjuntakeinoin. Vesiviljelyssä kasveja voidaan tuottaa useassa kerroksessa, jolloin säästetään maan pinta-alaa. Lisäksi vesiviljely suljetussa ympäristössä tuo vakautta verrattuna maataloilla ilmeneviin epäsäännöllisiin sääilmiöihin. Suljetuissa ympäristöissä on kuitenkin haasteena tuottaa tasaista laatua kustannustehokkaasti. Haasteet luovat monia tutkimuskysymyksiä, joista muodostuu kysyntä tutkimustarkoituksessa käytettäville kasvatusympäristöille.

Kasvatusympäristön suurin haaste on kasvien kasvutekijöihin perustuvien olosuhteiden eli ilmaston hallinta. Kasvutekijöiden muuttujia on monia, joista jokainen vaikuttaa tutkimustuloksiin. Vaikutusten seurauksena tutkimusympäristössä on tärkeää hallita mahdollisimman tarkasti kasvatusympäristön ilmastoa.

Tutkimusprojekti käynnistettiin Metropolia Ammattikorkeakoululla tavoitellen kokonaisvaltaista katsausta ilmastoon vaikuttavista tekijöistä sekä ilmastohallintamenetelmistä. Tutkimus sisältää koosteen kasvutekijöistä, ilmastohallintaan vaikuttavista tekijöistä, ilmastohallintamenetelmistä sekä ilmastohallintamallin.

Tutkimus kasvutekijöistä kuvailee optimaalisen kasvatusympäristön tarpeita sekä selvittää eri tekijöiden vaikutuksia ilmastohallintaan sekä tutkimustuloksiin. Tutkimustietoa on kerätty valosäteilystä, lämpötiloista, ilmankosteudesta, hiilidioksidista sekä vedestä ja ravinteista.

Ilmastohallintaan vaikuttavat tekijät sisältävät valaisimista sekä kasveista johdettavat lämpöenergian sekä vesihöyryjen virrat. Tutkimuksessa oletetaan kasvatustajärjestelmän ulkopuolen ja sisäpuolen välisien lämpötilaerojen vaikuttavan

vähäisesti valaisimiin ja kasveihin verrattuna. Tästä johtuen tutkimuksesta on rajattu kasvatusjärjestelmän rakenteista johtuvat ilmastoon vaikuttavat tekijät.

Ilmastonhallintamenetelmien koosteessa on pyritty keräämään yleisimmät kasvihuoneissa käytetyt ilmastonhallintamenetelmät, laitteet sekä teoreettisia kaavoja lämpöenergia-, vesihöyry- ja hiilidioksidivirtojen määrittämiselle. Menetelmiä ovat lämpötilan ja ilmankosteuden hallinta ilmanvaihdolla, lämmitys lämpöpötkillä, jäähdytys haihdutuksella ja kondensaatiolla sekä hiilidioksidilannoitus. Laitteisiin sisältyvät kanavapuhaltimet, lämpöpötket, sumutus- ja haihdutusjärjestelmät sekä lauhduttimet ja lämpöpömpöt.

Ilmastonhallintamalli sisältää prosessikaavion tutkimusympäristöön tarkoitetun kasvatusjärjestelmän ilmastonhallinnan suunnittelulle. Pää tavoitteena on luoda alusta tapauskohtaisten ilmastonhallintaratkaisujen suunnittelulle ja rakentamiselle.

2 Kasvutekijät

Tärkeimmät kasvutekijät ovat valosäteily, lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidi, vesi sekä ravinteet. Erityisesti tutkimusympäristössä korostuu kasvutekijöiden hallitsemisen tärkeys, sillä yhdenkin kasvutekijäarvon muuttuminen voi vaikuttaa lopulliseen tutkimustulokseen. Kasvutekijöiden hallitsemisessa on myös huomioitava tekijöiden välinen vuorovaikutus sekä vaikutus ilmastonhallintaan. Monilla kasvutekijöillä on vaikutusta kasvien transpiraatioon, joka tarkoittaa veden kulkeutumista kasvien juurista vesihöyryksi ilmaan. Veden olomuodonmuutokseen tarvitaan lämpöenergiaa, mistä johtuen transpiraatio vaikuttaa myös lämpötiloihin.

2.1 Valosäteily

Fotosynteesin aikana valosäteilystä saatua energiaa käytetään yhteyttämiseen, jossa muodostetaan kasvin toimintoihin tarvittavia hiilihydraatteja hiilidioksidista sekä vedestä. Saatavilla oleva energia vaihtelee valosäteilyn laadun sekä

intensiteetin myötä. Niiden avulla voidaan vaikuttaa myös tuotteen laatuun sekä moniin kasvin toimintoihin.

2.1.1 Säteilyn laatu

Valon laadulla tarkoitetaan säteilyn aallonpituutta, jota mitataan nanometreinä (nm). Kasvit pystyvät hyödyntämään vain tiettyjen aallonpituuksien säteilyä. Käyttökelpoisten aallonpituuksien laajuus on karkeasti 315 - 800 nm [1]. Kasvit käyttävät valosäteilyn energiaa useiden yhteyttämisväriaineiden kautta. Ne toimivat laajalla, mutta toisistaan poikkeavilla aallonpituuksilla. Näin ollen on usein tärkeää tarjota säteilyä laajalta aallonpituuksien spektriltä korkean yhteyttämis-tehon saavuttamiseksi. Lisäksi tiettyä aallonpituutta tarjoamalla voidaan vaikuttaa yhteyttämisensä lisäksi mm. kasvin kasvutapaan ja transpiraatioon sekä tuotteen laatuun.

Kasvutapaan eniten vaikuttavat aallonpituudet ovat 315 - 400 sekä 700 - 800 nm alueella [1]. Ultravioletin 315 - 400 nm:n säteilyn on todettu vaikuttavan kasvin muotoon siten, että kasvusta tulee tiiviimpää [1]. Kaukopunaisten 700 - 800 nm:n säteilyn vaikutus kasvin korkeuteen on havaittu useissa tutkimuksissa. Esimerkiksi tutkimuksessa, jossa arvioitiin aallonpituuksien vaikutusta vihannespaprikan kasvuun, kaukopunaista valosäteilyä saaneet kasvit kasvoivat korkeammaksi ja varren paksuus lisääntyi [2]. Korkeutta lisäävää kaukopunaisten säteilyn vaikutusta havaittiin myös toisessa tutkimuksessa, jossa tomaateille annettiin laajan spektrin valaisimien lisäksi 735 nm:n kaukopunaista säteilyä [3]. Kasvutavan muokkaamisesta voi olla hyötyä tietyn kokoisissa kasvatusjärjestelmissä, jossa korkeuskasvua pyritään lisäämään tai rajoittamaan.

Aallonpituudet voivat vaikuttaa myös tuotteen transpiraatioon sekä kemialliseen koostumukseen. Transpiraatioon vaikuttavat eniten säteilyn intensiteetti sekä muut kasvutekijät, mutta myös sinisen 400 - 510 nm valosäteilyn on havaittu vaikuttavan. Lisäksi tietyt aallonpituusalueet voivat vaikuttaa tuotteen kemialliseen koostumukseen aineenvaihduntatuotteiden lisääntyessä. Esimerkiksi mäkikuismaan (*Hypericum perforatum*) kohdistuneessa tutkimuksessa, jossa

tutkittiin eri aallonpituusalueiden vaikutusta, sinisen 400 - 510 nm valosäteilyn havaittiin lisäävän eniten transpiraatiota ja yhteyttämistä, mutta punainen 610 - 700 nm valosäteily tuotti eniten tavoiteltuja aineenvaihduntatuotteita. [4.]

Aallonpituuksien eriävien vaikutusten lisäksi olennaista on eri säteily-yhdistelmien vaikutus. Käsitettä tukevia havaintoja on löydetty mm. tomaatin kasvatuksessa suoritetussa tutkimuksessa, jossa vertailtiin sinisen, punaisen ja kaukopunaisen valosäteily-yhdistelmien vaikutusta kasvatapaan ja sadon laatuun. Tutkimuksessa havaittiin yhdistelmien tuottavan muutoksia mm. hedelmän ja varsien massasuhteille sekä hedelmän muodostumisen nopeudelle. Suurin massa tomaatin hedelmälle suhteessa sen varsiin ja lehtiin havaittiin yhdistelmässä, joka sisälsi tasaisesti punaista ja kaukopunaista säteilyä. [5.]

2.1.2 Säteilyn intensiteetti

Valosäteilyn intensiteetillä viitataan sen sisältämään fotonien määrään, jota mitataan yksikössä $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sen määrä kasvihuoneissa vaihtelee tyypillisesti 50 - 350 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ [1]. Intensiteetin lisääminen optimaalisten raja-arvojen sisällä vaikuttaa mm. kasvuun, veden ja ravinteiden kulkuun sekä transpiraatioon. Optimaaliset intensiteetit vaihtelevat eri kasvilajikkeilla. Intensiteetillä on myös vahva yhteisvaikutus ympäristön muiden kasvutekijöiden kanssa.

Valon intensiteetin vaikutus kasvuun on riippuvainen mm. kasvuympäristön hiilidioksidikonsentraatioista (kuva 2, luku 2.3). Lisäksi tomaatin kasvatuksessa intensiteetin nouseminen on merkinnyt optimaalisten lämpötilojen nousemista [6]. Valon intensiteetillä on myös merkittävä vaikutus ilmastonhallinnan suunnitelmassa, sillä se on tärkein muuttuja transpiraatiomäärien arvioimisessa. [7.]

2.2 Lämpötila ja ilmankosteus

Lämpötilaan vaikuttaa kasvatustilanteen sisäiset lämpöenergiämäärät. Optimaalisen lämpötilan tiedetään vaihtelevan eri kasvilajikkeiden välillä. Lisäksi lämpötila-arvo vaihtelee valon intensiteetin sekä suhteellisen kosteuden myötä.

Lämpötila vaikuttaa moniin kasvin toimintoihin, sillä korkeammissa lämpötiloissa on suurempi energiasaataavuus lehtien pinnalla [7]. Lämpötila vaikuttaa myös optimaaliseen ilmankosteuteen, sillä se muuttaa ilmaan mahtuvaa vesihöyryn määrää. Kasvien toimintoihin vaikuttaa suhteellisen kosteuden sijaan ilman kylästysvajaus, joka kertoo, kuinka paljon vesihöyryä on mahdollista lisätä ennen vesihöyryn kyllästymistä.

Tarvittavat lämpötila-arvot jakautuvat valojaksotusten mukaan päivä- sekä yölämpötiloihin. Lisäksi optimaaliset lämpötila-arvot vaihtelevat viljelyn eri vaiheissa. Viljelyn eri vaiheissa tavoitella mm. lehtien massan lisääntymistä tai kukkien ja hedelmien muodostumista. Esimerkiksi vihannespaprikan viljelyssä päivälämpötilat voi vaihdella 21 - 27 °C sekä yölämpötilat 17 - 20 °C [8]. Tärkeänä pidetään myös päivä- sekä yölämpötilojen välisiä keskiarvolämpötiloja, joiden optimiarvot vaihtelevat myös viljelyn eri vaiheissa [9]. Haasteena on kyetä muuttamaan lämpötiloja viljelytekniikoiden tarpeisiin, ylläpitäen samalla tiettyä kyllästysvajautta.

2.2.1 Kyllästysvajaus

Kyllästysvajaus vaikuttaa ilmaston höyrypaineisiin. Höyrypaine vaikuttaa lehtien ilmarakojen avonaisuuteen. Säättämällä lehtien ilmarakojen avonaisuutta voidaan vaikuttaa mm. yhteyttämiseen, transpiraatioon ja ravinteiden ottoon. Kirjallisuudessa kyllästysvajautta arvioidaan yksikössä g/m^3 , mutta joskus myös höyrypaineen vajautena yksikössä Pa. Kyllästysvajaus voi suljetussa ympäristössä olla liian korkea tai liian vähäinen. Ilmankosteuden lähestyessä vesihöyryn kylästystilaa kasvi ei kykene haihduttamaan ilmaan lisää kosteutta ja transpiraatio heikentyy. Toisaalta ilman ollessa liian kuiva kasvit saattavat reagoida sulkeamalla ilmarat kokonaan estääkseen kuihtumista [1].

Ilmarakojen aukinaisuus luo mahdollisuuden suuremmalle hiilidioksidinotolle, jota tarvitaan yhteyttämisessä. Transpiraatioissa vesi nousee kasvualustasta ja veden mukana nousee ravinteita. Esimerkiksi kalsium on ravinne, jota kasvi saa ainoastaan transpiraation mukana [1]. Suurella transpiraatiolla voidaan myös

madaltaa kasteluliuoksen ravinnekonsentraatiota [1]. Tällöin korkealla transpiraatiolla ravinneliuoksen virtaus kasvissa on suurempi kuin matalalla transpiraatiolla.

Optimaalisia kyllästymisvajauksia löytää kirjallisuudesta esimerkiksi tomaatille 3 - 7 g/m³ [1] ja vihannespaprikalle 3 - 6 g/m³ [8]. Kyllästysvajauksen vaikutusta on havaittu mm. vihannespaprikan viljelyyn kohdistuneissa mittauksissa sekä mallinuksissa. Tutkimuksissa pyrittiin arvioimaan hiilidioksidin vaikutusta kasvin toimintoihin erilaisissa kyllästysvajauksissa ja hiilidioksidipitoisuuksissa valointensiteetin pysyessä vakiona. Mittaustuloksissa havaittiin korkeimmat arvot mm. ilmarakojen aukinaisuudelle ja yhteyttämislle matalissa, noin 3,8 g/m³ kyllästysvajauksissa, kaikissa eri hiilidioksidin asetuksissa [10]. Mittaustuloksia tukevia havaintoja on esitetty myös tutkimuksessa, jossa Penman-Monteithin haihdutusyhtälöä käytettiin eri hiilidioksidi- sekä kyllästysvajauseräilyjen vaikutusten mallintamiseen. Mallinnuksessa noin 3,8 g/m³:n kyllästysvajauseräily toi suurimmat ilmarakojen aukinaisuudet kaikilla eri hiilidioksidikonsentraatioilla [11].

2.2.2 Kyllästysvajauden määrittäminen

Kyllästysvajauden voi laskea vähentämällä ilman absoluuttisesta kosteudesta kyllästystilassa sen absoluuttinen kosteus suhteellisessa kosteudessa. Ilman absoluuttien kosteus A_w (g/m³) voidaan laskea seuraavasti:

$$A_w = C * \frac{P_w}{T} \quad (1)$$

jossa C on vakio (gK/J), P_w on höyrypaine (Pa) ja T on lämpötila (K). [12.]

Veden höyrypaineen määrittämiseksi on ensin laskettava veden höyrypaine kyllästystilassa P_{ws} (hPa) seuraavasti:

$$P_{ws} = A * 10^{\frac{m*T}{T+T_n}} \quad (2)$$

jossa A , m , T_n ovat lämpötilakohtaisia vakioita ja T on lämpötila yksikössä °C.
[12.]

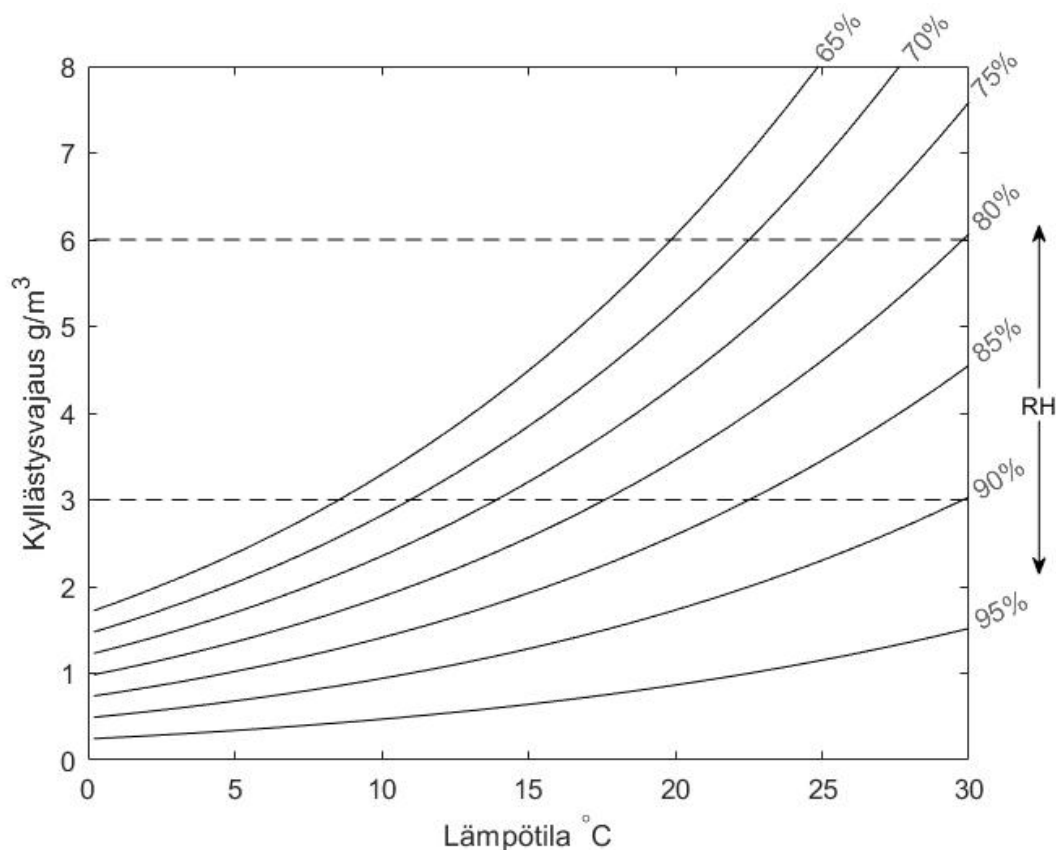
Veden höyrypaine P_w (hPa) suhteellisessa kosteudessa RH (%) voidaan määrittää seuraavasti [12]:

$$P_w = P_{ws} * \frac{RH}{100} \quad (3)$$

Viimeisenä kyllästysvajaus K_v (g/m³) määritellään laskemalla A_{ws} veden höyrypaineella kyllästystilassa P_{ws} ja vähentämällä siitä A_w veden höyrypaineella suhteellisessa kosteudessa P_w :

$$K_v = C * \frac{P_{ws}}{T} - C * \frac{P_w}{T} \quad (4)$$

Yhtälöllä 4 saadusta kaaviosta (kuva 1) voidaan huomata, että esimerkiksi 85 %:n suhteellisessa ilmakehän kosteudessa pysytään vihannespaprikalle optimaalisten kyllästysvajauksien rajoissa noin 23 - 30 °C:ssa, mutta pudotaan optimaalisten arvojen ulkopuolelle matalammassa lämpötiloissa.



Kuva 1. Yhtälöllä 3 saavutetut kyllästysvajaudet sekä vihannespaprikan optimaalisten kyllästysvajauksien rajat (3 - 6 g/m³)

2.2.3 Suhteellinen kosteus

Kasvien reagoiessa kyllästysvajautteen on suhteellinen kosteus silti tärkeä muuttuja. Suhteellinen kosteus määrittää prosenttiosuutena, kuinka paljon vesihöyryä tietyssä lämpötilassa on suhteessa kyllästymiseen tarvittavasta vesihöyrystä. Nostamalla lämpötiloja voidaan laskea suhteellista kosteutta ja laskeamalla lämpötiloja voidaan nostaa suhteellista kosteutta kyllästymiseen saakka. Tästä johtuen lämpötilojen vaihteluista, etenkin äkillisistä lämpötilan laskuista, voi muodostua haasteita ilmastonhallinnassa. Suhteellisen kosteuden lähestyessä kyllästystilaa äkillinen lämpötilan lasku voi aiheuttaa liiallista vesihöyryä tai vesihöyryn kondensoitumista.

Liiallisesta vesihöyrystä voi olla merkittävää haittaa kasveille. Esimerkiksi vihannespaprikan viljelyssä liian suuri vesihöyryn määrä voi altistaa harmaahomeelle

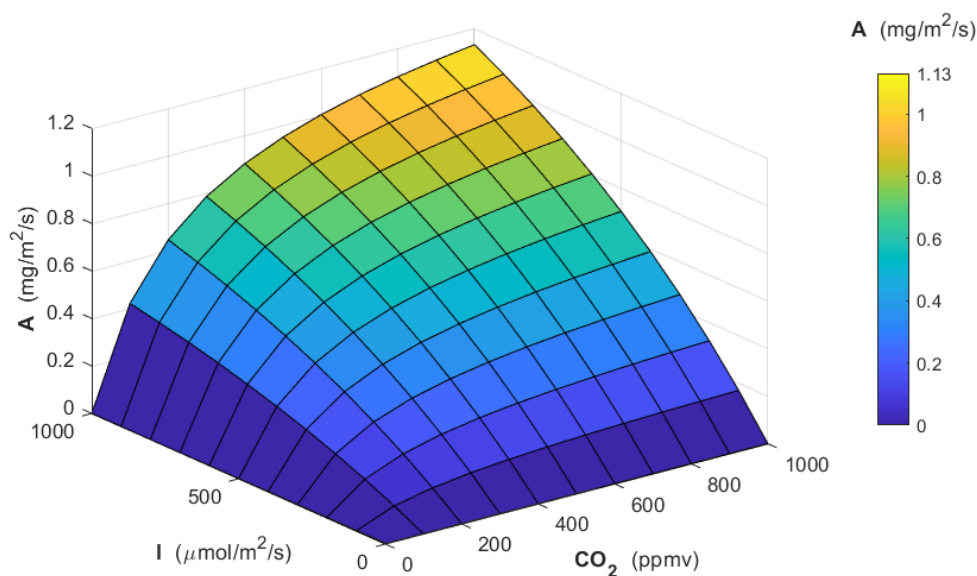
[8]. Lisäksi jos vesihöyry on kondensoitunut lehtien pinnalle, se voi vaikuttaa tuotteen laatuun tai luoda hyvän alustan patogeeneille. [1] Liiallisen vesihöyryn tai sen kondensoitumisen estämiseksi on tarkkailtava myös kasvien vaikutusta ilmastoon (luku 3.2).

2.3 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi on yksi tärkeimmistä kasvuun vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi hiilidioksidipitoisuuksien on havaittu vaikuttavan kasvuympäristön ilmastoon muuttaen kasvin ilmarakojen aukinaisuutta sekä haihdutusta. Hiilidioksidipitoisuutta mitataan usein yksikössä ppm tai ppmv, joka viittaa tilavuusosuuteen. Pitoisuutta pyritään pitämään vähintään ulkoilman tasolla, joka on noin 340 - 350 ppm [8]. Kasvilajikkeesta ja olosuhteista riippuen suuremmista pitoisuuksista voi olla suurta hyötyä. Pitoisuuksien kohentamisesta on mitattua näyttöä nettoyhteyttämisessä, ilmarakojen aukinaisuudessa sekä transpiraatiossa. Pitoisuuden kasvattamisella on merkitystä ainoastaan valojakson ollessa aktiivinen, jolloin kasvit saavat yhteyttämiseen tarvitsemaansa energiaa.

Nettoyhteyttämisellä viitataan yhteyttämistuotteiden osuuteen, jonka kasvi käyttää kasvuun. Hiilidioksidin vaikutusta tomaatin nettoyhteyttämiseen on mallinnettu mittaustuloksiin perustuvalla kaavalla (yhtälö 5), jossa CO_2 on ympäristön hiilidioksidipitoisuus yksikössä ppmv, I on fotosynteettinen valosäteily yksikössä $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ja A_{net} on nettoyhteyttäminen yksikössä $\text{mg}/\text{m}^2/\text{s}$ (kuva 2) [13].

$$A_{\text{net}} = 2.2 \frac{1}{1 + \left(\frac{230}{CO_2}\right)} [1 - \exp(-0.0010 I)] \quad (5)$$



Kuva 2. Kaavalla 4 saavutettu tomaatin nettoyhteyttäminen valosäteilyn ja hiilidioksidin vaikutuksesta. Värit ilmaisevat nettoyhteyttämissen arvon kasvua [13, muokattu].

Hiilidioksidipitoisuuksien on havaittu vaikuttavan myös kasvien transpiraatioon sekä ilmarakojen aukinaisuuteen. Vihannespaprikaan kohdistetussa tutkimuksessa, jossa vertailtiin eri hiilidioksidipitoisuuksia valosäteilyn pysyessä vakiona, nettoyhteyttäminen oli suurimmillaan 700 ppm:n pitoisuudessa, kun taas transpiraatio ja ilmarakojen aukinaisuus 1000 ppm:n pitoisuudessa. [10.]

2.4 Vesi ja ravinteet

Vedellä on valosäteilyn ja hiilidioksidin tavoin elintärkeä rooli yhteyttämisessä. Vesi toimii myös liuottimena ja kuljetusvälineenä kasvualustasta saataville ravinteille. Ravinteet puolestaan toimivat rakennusaineina monille kasvin toiminoille, joiden saatavuuteen vaikuttaa kasteluveden pH-arvo. Lisäksi tärkeä muuttuja kasteluvedessä on sen lämpötila ja happipitoisuus. Vesi ja ravinteet on huomioitava ilmastonhallinnassa, sillä ne ovat yhteisvaikutuksessa kasvien transpiraation kanssa ja kasvatusympäristön lämpötilat vaikuttavat veden happipitoisuuteen.

Veden nousuun kasvualustasta vaikuttaa esimerkiksi osmoottinen paine ja transpiraatio. Osmoottinen paine perustuu kasteluveden ja kasvin välisiin ravinekonsentraatioeroihin, joten ravinteiden määrä kasvualustassa vaikuttaa veden saantiin [1]. Veden haihtuessa transpiraation aikana syntyy haihdutusimu, joka veden vetovoimaan perustuen nostaa vettä kasvualustasta. Ilmastonhallinnassa voi arvioida saatavilla olevaa veden määrää ja pyrkiä arvion perusteella joko lisäämään tai vähentämään transpiraatiota.

Korkean veden saatavuuden on havaittu myös osaltaan lisäävän transpiraatiota. Vihannespaprikan viljelyyn kohdistuneessa tutkimuksessa kokeiltiin eri kastelumäärien vaikutusta transpiraatioon ja havaittiin lisääntynyt vaikutus korkeimmissa kastelumäärissä. Tutkimuksessa kastelu käynnistettiin, kun se sai signaalin 40 %, 50 % sekä 60 % kasvualustan kosteuksissa. Tuloksista havaittiin, että korkeimmilla kastelumäärillä suureni lehtipinta-alan sekä kuivamassan lisäksi myös transpiraatio. [14.]

2.4.1 Vedenjohtavuus

Veden ja ravinteiden hallinnassa käytetään vedenjohtavuutta, jota mitataan yksikössä Siemens per metri (S/m). Se kertoo, kuinka paljon liuoksessa on suoloja, mukaan lukien viljelyssä käytetyt kasviravinteet. Johtavuuden määrää käytetään opastavana arvona kasvien ravinekonsentraatioiden annostelulle. Tuotteen kasvun ja laadun lisäksi vedenjohtavuus voi vaikuttaa kasvien transpiraatioon.

Optimaaliset vedenjohtavuusarvot vaihtelevat kasvuvaiheen mukaan. Esimerkiksi vihannespaprikalle on opastettu ylläpitämään 2,2 - 2,7 mS/cm taimikasvatuksen aikana ja noin 3,0 mS/cm istutuksen jälkeen [8]. Oppaassa johtavuutta neuvottiin nostamaan jopa 4,0 mS/cm:iin asti, mikäli transpiraatiota pyrittiin rajoittamaan [8]. Osmoottisen painemuutoksen takia vedenkulku hidastuu ravinekonsentraation noustessa [1]. Se vaikuttaa transpiraatioon, sillä kasvit pienentävät ilmarakojen aukinaisuutta vedenpuutteessa [15].

Eri vedenjohtavuusarvojen on havaittu myös tuottavan laadullisia eroja. Tomaatin kasvatukseen kohdistuneessa tutkimuksessa kokeiltiin kolmea eri johtavuusarvoa (2, 3,5 ja 5 mS/cm), muiden tekijöiden pysyessä vakiona. Tutkimuksessa korkeimman vedenjohtavuuden saaneissa tomaateissa havaittiin pienentyntä nestepitoisuutta ja massaa, mutta parhaat laadulliset arvot mm. maulle ja ulkonäölle. [16.]

2.4.2 Kasteluveden pH-arvo

Veden happamuus vaikuttaa ravinteiden liukenemiseen kasteluveteen ja kasvin kykyyn saada ravinteita. Lisäksi kasveilla on lajikekohtaisia optimiarvoja kasvualustan happamuudelle. Kasvihuonekasveille tyypillinen pH-arvo on yleisesti 5,5 - 6,5 [1]. Arvoon vaikuttaa mm. kasvualustan materiaali sekä käytetyt ravinteet.

Kasvialustat voivat materiaalista riippuen sisältää heikkoja happoja tai lisättyä kalkkia. Tämä luo puskurin kasvualustan pH-arvolle ja vaikeuttaa sen äkillistä muuttamista. Tällaisia materiaaleja ovat turpeet ja kivennäismaaseokset. Turve on luontaisesti liian hapanta kasvihuonekasveille, jolloin siihen lisätään kasvualustan valmistuksessa kalkkia happamuuden tasapainottamiseen. [1.]

Kastelujärjestelmissä, joissa käytetään inaktiivista kasvualustaa, kuten kiviviila-kuutiota tai soraa, pH-arvon tarkkailun merkitys korostuu. Tällöin myös lisätyn ravinteen laadulla on suurempi merkitys. Esimerkiksi erilaisten tyyppiyhdisteiden, kuten ammoniumtyypin (NH_3^+), tiedetään laskevan kasvualustan pH-arvoa. Lisäksi joidenkin kasvien juuret voivat tuottaa happamoittavia ioneja. [1.]

2.4.3 Kasteluveden lämpötila ja happipitoisuus

Veden lämpötila voi vaikuttaa liukenevan hapen maksimimäärään, patogeenien aktiivisuuteen ja tuotteen laatuun. Hapen määrä vedessä on merkityksellinen, sillä hapen lisäämisellä pystytään vaikuttamaan mm. tuotteen kuivaan massamäärään sekä laatuun. Kasteluveden lämpötila on huomioonotettava tekijä myös ilmastonhallinnassa, jos vesisäiliö sijaitsee kasvatusjärjestelmän sisällä.

Ilmakehän paineessa happipitoisuuteen vaikuttavia tekijöitä kasvatusjärjestelmän ympäristössä ovat veden lämpötila sekä suolapitoisuus. Esimerkiksi lämpötilan noustessa 15:sta 30 °C:seen maksimaalisen hapen määrä putoaa 25 % suolattomassa vedessä [17].

Lämpötilan tiedetään olevan myös vaikuttava tekijä joidenkin patogeenien aktiivisuuteen. Juurimätää aiheuttavien *Pythium*- sekä *Phytophthora*-patogeenien on havaittu tuottavan merkittävää haittaa salaattituotannon vertikaaliviljelmissä. Tutkimuksessa, jossa verrattiin patogeenien ilmenemistä eri lämpötiloissa, patogeeneja havaittiin 25 sekä 30 °C:ssa, mutta ei 15 °C:ssa [18]. Kastelujärjestelmissä, jossa edistyy patogeenien lisääntyminen, on suositeltu veden lämpötilan laskemista alle 20 °C:seen [18]. Tällaiset kastelujärjestelmät ovat esimerkiksi vesiviljelyjärjestelmiä, jossa kasveja ei istuteta orgaaniseen kasvualustaan (mm. *Nutrient film technique*- sekä *Aeroponic*-järjestelmät).

Kasteluveden korkean happipitoisuuden on havaittu kasvattavan eri kasvilajikkeiden laatua ja määrää. Esimerkiksi salaatin viljelyssä suoritetussa tutkimuksessa, jossa kokeiltiin kolmea eri happipitoisuustasoa (6,5, 7,5 sekä 8,5 mg/l) ja kolmea eri kasteluveden lämpötila-asetusta (16, 18, 20 °C), korkein liuenneen hapen määrä toi kasvua kaikille analyyseille. Lämpötilan pysyessä 18 °C korkein hapen määrä verrattuna matalimpaan lisäsi mm. kuivaa massaa 14,7 % sekä C-vitamiinipitoisuutta 39,9 %. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin kasvua lisäävää vaikutusta myös lämpimimmällä kasteluvvedellä. Happipitoisuuden pysyessä 7,5 mg/l, korkein lämpötila (20 °C) verrattuna matalimpaan (16 °C) lisäsi kuivaa massaa myös 14,7 % sekä C-vitamiinipitoisuutta 55,1 %. [19.]

3 Ilmastonhallintaan vaikuttavat tekijät

Ilmastonhallinnassa on selvitettävä lämpöenergian sekä vesihöyryjen virrat hallintamenetelmien määrittämiseksi. Suljetussa kasvatusjärjestelmässä, jossa sisä- ja ulkopuolen väliset lämpötilaerot ovat pienet, suurimmat lämpöenergian ja vesihöyryjen virrat johtuvat valaisimista sekä kasvien transpiraatiosta.

Valaisimien tuottama valosäteily voi vaikuttaa kasveista johtuviin vesihöyryvirtoihin. Lisäksi valaisimien virrankulutus välittyy osittain lämpöenergiana kasvuympäristöön. Valaisinlaitteissa esiintyy suurta vaihtelua niiden tuottamissa valosäteilyn laaduissa ja lämpöenergiavirroissa.

Kasvit voivat tuottaa vesihöyryä liiallisissa tai liian vähäisissä määrissä. Mahdolliset vesihöyryn määrät voi vaihdella eri kasvilajikkeiden, kasvuvaiheiden sekä olosuhteiden välillä. Lisäksi vesihöyryn tuottamiseen kulunut energia vaikuttaa lämpötiloihin alentavasti.

3.1 SPNa- sekä LED-valaisimien vaikutus ilmastoon

Kasvihuoneissa tyypillisimmät valaisimet ovat suurpainenatrium (SPNa) sekä LED-valaisimet. SPNa-valaisimet tuottavat aallonpituuksia laajalta spektriltä, mutta omaavat SPNa-valaisimille tyypillisen aallonpituusalueiden painotuksen. LED-valaisimet ovat aallonpituusalueiltaan monipuolisempia ja pystyvät tuottamaan monenlaista valosäteilyä. Lisäksi valaisimissa on suuria eroja valosäteilyn tehokkuudessa, eli tuotetun PAR-säteilyn (μmol) sekä asennustehon (W) suhteessa. Valaisimet poikkeavat merkittävästi myös virrankulutuksesta johtuvan lämpöenergiavirtojen määrissä sekä lämpöenergian johtumisen tavoissa.

3.1.1 Valosäteilyn laatu ja tehokkuus

SPNa-valaisimissa suurin osa valosäteilystä on noin 550 - 650 nm aallonpituuden keltaista ja punaista säteilyä [20]. Niissä on vähemmän sinistä 400 - 510 nm valosäteilyä, kuin auringon tuottamassa valosäteilyssä [20]. Punaisen ja sinisen valosäteilyn suhde SPNa-valaisimissa voi olla esimerkiksi 90:10 [21]. Lisäksi SPNa-valaisimissa ei ole merkittäviä määriä kaukopunaista säteilyä. SPNa-valaisimilla voidaan saavuttaa 1,7 - 1,8 $\mu\text{mol/W:n}$ tehokkuus [22].

LED-valaisimilla on mahdollista tuottaa erillisiä aallonpituusalueita, kuten esim. sinistä 400 - 510 nm:n, punaista 610 - 700 nm:n tai kaukopunaista 700 - 800 nm:n säteilyä. LED-valaisin voi sisältää mm. yllä mainittujen

aallonpituusalueiden yhdistelmän, muodostaen ns. täysspektrivalaisimen. Lisäksi LED-valaisinjärjestelmissä voi olla mahdollisuus säätää tietyn aallonpituusalueen tehokkuutta, jolloin valaisinta kutsutaan säädettävän spektrin valaisimeksi. LED-valaisimilla voidaan yleisesti saavuttaa 2,4 $\mu\text{mol/W}$:n tehokkuus 2020-luvun raporttien mukaan [22].

Tutkimuskäyttöön soveltuvassa valaisinratkaisussa on mahdollisuus asettaa erilaisia valosäteilyn laatuja. Esimerkiksi Metropolia Ammattikorkeakouluun hankituissa LED-valaisimissa on mahdollisuus kuuteen eri valosäteilyn asetukseen. Yhdessä 256 W:n valaisimessa voi suunnata 162 W punaiseen, 52 W siniseen sekä 44 W kaukopunaiseen. Aallonpituusalueiden huiput ovat kohdissa 660 nm punaisessa, 453 nm sinisessä sekä 729 nm kaukopunaisessa. Valaisimessa on mahdollisuus kytkeä päälle aallonpituusalueet yhdessä, yksittäisinä tai yhdistelminä. Väitetyt tehokkuudet ovat 4,7 $\mu\text{mol/W}$ punaiselle ja 2,7 $\mu\text{mol/W}$ siniselle valmistajan (*Parus-europe*) mukaan.

3.1.2 Lämmöntuotto

SPNa- sekä LED-valaisimissa on suuria eroja tuotetun lämpöenergian määrissä sekä tavoissa, joilla lämpö johtuu valaisimista ilmaan. Suuri osa SPNa-valaisimeen kuluneesta energiasta välittyy infrapunasäteilynä. LED-valaisimet välittävät hyvin vähäisesti infrapunasäteilyä. Lisäksi valaisimissa on suuria eroja niiden hyötysuhteessa, joka viittaa virrankulutuksen sekä tuotetun fotosynteettisen valosäteilyn suhteeseen. Esimerkiksi 30 % hyötysuhteella 70 % virrankulutuksesta välittyy lämpöenergiana kasvuympäristöön.

SPNa-valaisimet toimivat korkeilla toimintalämpötiloilla 35 - 40 %:n hyötysuhteella. Lämpöenergia johtuu ilmaan suurimmaksi osin infrapunasäteilynä, jonka osuus virrankulutuksesta voi olla esim. 55 %. [22.]

LED-valaisimet puolestaan toimivat matalilla toimintalämpötiloilla 30 - 70 %:n välisellä hyötysuhteella. Lämpöenergia johtuu valaisimesta ilmaan joko passiivisella lämmönvaihdolla tai jäähdytysjärjestelmällä. [22.]

Ilman jäähdytysjärjestelmiä kasvatusjärjestelmän valaisimista johtuva lämpöenergia \dot{Q} voidaan karkeasti arvioida sen asennusteholla W ja hyötysuhteella η :

$$\dot{Q} \sim W * \eta \quad (6)$$

3.2 Kasvien transpiraation vaikutus ilmastoon

Kasvit vaikuttavat kasvatusympäristön ilmastoon transpiraatiolla, mistä aiheutuu lämpöenergian sekä vesihöyryn virtoja. Transpiraatioon vaikuttavia tekijöitä ovat mm. valosäteily, lämpötila, kyllästysvajaus, kasvualustan kosteus sekä vedenjohtavuus. Lisäksi transpiraatiossa ilmenee vaihtelua kasvin kasvuvaiheessa sekä kasvilajikkeissa [7].

Transpiraatiosta aiheutuvien vesivirtojen määrä voi olla liiallinen tai vajaa riippuen kasvuvaiheesta. Kasvien ollessa pieniä on mahdollista, että vesihöyryjen virta ei ole riittävä optimaalisten ilmankosteuksien saavuttamiseksi. Toisaalta täysikasvuisista kasveista täyttyvä kasvatusjärjestelmä voi luoda tarpeen suurten vesihöyryvirtojen hallitsemiselle.

Vaihtelu kasvilajikkeiden transpiraatiossa ilmenee kasvin sisäisen vastuksen myötä, johon sisältyy mm. ilmarakojen aukinaisuus. Erilaisissa ilmastoissa kehittyneet kasvilajikkeet reagoivat vaihtelevasti olosuhteisiin, aiheuttaen muutoksia ilmarakojen aukinaisuuteen [7]. Referenssiarvoja transpiraatiosta johtuvalle vesihöyryn virralle on mahdollista löytää lajikekohtaisesti. Eräässä vihannespaprikan tutkimuksessa suurin mitattu vesivirran määrä koko kasvukauden aikana oli $0,15 \text{ g/m}^2/\text{s}$ [11]. Määrät voivat kuitenkin vaihdella merkittävästi tutkimuksien välillä, sillä olosuhteet poikkeavat toisistaan. Olosuhteista tapahtuvat muutokset luovat tarpeen mallille, jolla voi arvioida haihdutusmääriä olosuhteiden funktiona.

Kasvien transpiraation laskemiseen on olemassa monia teoreettisia malleja, jotka on kehitetty esimerkiksi eri olosuhteiden tai lajikkeiden näkökulmasta. Haasteena on monien kasvutekijöiden vaikutus transpiraatioon. Eri olosuhteita

ja lajikkeita poissulkeva karkea arvio on kuitenkin mahdollista saavuttaa, kun transpiraatio lasketaan kaikista merkityksellisimmän tekijän, eli valosäteilyn funktiona [7]. Vesihöyrymäärien arvioimiseksi on ensin laskettava transpiraatioon kulunut lämpöenergia LE (yksikössä W/m^2), jonka karkea arvioiminen on mahdollista seuraavasti:

$$LE \sim 0.35 * I_s + 30 \quad (7)$$

jossa I_s on kokonaissäteily yksikössä W/m^2 [7]. Yhtälössä (7) on huomioitava, että se arvioi yhden kerroksen lehtipinta-alaa johon valosäteily kohdistuu täydellä tehokkuudella. Lehtipinta-alakerroksia voi kasvilajikkeesta riippuen olla useita. Niihin myös kohdistuu eriävät määrät valosäteilyä. Lisäksi transpiraatiota sekä siitä johtuvaa vesihöyryn määrää arvioidessa on otettava huomioon myös muista kasvutekijöistä johtuvat vaihtelut.

Yhtälöstä 7 saadaan transpiraatioon kuluneen lämpöenergian virran määrä, joka vaikuttaa kasvatusympäristön energiatasapainoon sekä kasvien haihdutuksesta johtuviin vesihöyryn virtoihin. Viitteitä transpiraation vaikutuksesta lämpötiloihin voidaan nähdä taulukosta 1 (luku 4.3), jossa on arvioitu veden höyrystymisestä johtuva suurin mahdollinen lämpötilanlasku tietyssä lämpötilassa ja il-
mankosteudessa. Esimerkiksi 24 °C lämpötilassa ja 80% ilmankosteudessa lehtien pinta voisi enimmillään olla noin $2,64\text{ °C}$ kasvuympäristön ilmaa alhaisempi. Taulukon arvot olisivat kuitenkin epätodennäköisiä sellaisissa ilmankosteuksissa, joissa kasvien haihdutus olisi vähäistä.

Ilmastonhallinnassa tavoiteltu transpiraation tuottama vesihöyryn massavirta \dot{m} voidaan karkeasti arvioida veden höyrystymislämmön avulla yhtälöllä 8, jossa h_{fg} on veden höyrystymislämpö (2257 J/g):

$$\dot{m} = \frac{LE}{h_{fg}} \quad (8)$$

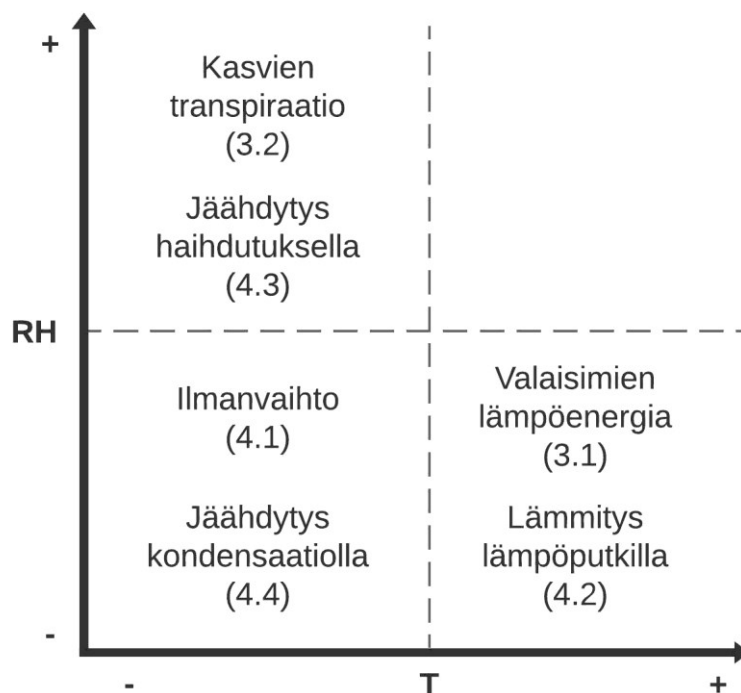
jolloin esim. 200 W :n lämpöenergian virran määrällä saavutetaan

$$200 \text{ J/s/m}^2 / 2257 \text{ J/g} = 0.0886 \text{ g/m}^2/\text{s} \quad (9)$$

4 Ilmastohallintamenetelmät

Ilmastohallintaan vaikuttavien tekijöiden tasapainottamiseen sekä lämpötilojen ja ilmastokosteuksien hallitsemiseen on määriteltävä laitteet, jotka pystyvät vaikuttamaan lämpöenergian sekä vesihöyryjen virtoihin. Lisäksi on tärkeää kyetä määrittämään laitteiston kapasiteettitarve ilmastohallintaan vaikuttaviin tekijöihin sekä tavoitteisiin suhteutettuna.

Ilmastohallintamenetelmien tutkimuksessa on pyritty hankkimaan tietoa yleisimmistä kasvihuoneissa käytetyistä ilmastohallintamenetelmistä. Tutkimukseen sisältyvät menetelmät ovat ilmanvaihto, lämmitys lämpöputkilla, jäähdytys haihdutuksella ja kondensaatiolla sekä hiilidioksidilannoitus. Lämpöenergia- ja vesihöyryvirtoja säätelevä menetelmä voi vaikuttaa sekä lämpötilan että ilmastokosteuden arvoihin samanaikaisesti (kuva 3). Tästä johtuen joissakin ilmastohallinnan tarpeissa voi joutua hyödyntämään kahta ilmastohallintamenetelmää samanaikaisesti.



Kuva 3. Ilmastohallintamenetelmien vaikutus lämpötilaan (T) ja suhteelliseen kosteuteen (RH).

4.1 Lämpötilan ja ilmankosteuden hallinta ilmanvaihdolla

Suljetussa kasvatusympäristössä voidaan hallita lämpötiloja sekä ilmankosteuksia ilmanvaihdolla. Menetelmässä poistetaan kasvatusympäristön sisältä ilmaa koneellisesti ja korvataan poistettu tilavuus kasvatusympäristön ulkopuolisella ilmalla. Ilmanvaihdon vaikutus kasvatusympäristön olosuhteisiin on riippuvainen sekä kasvihuoneen että sisääntuloilman lämpötilasta ja ilmankosteudesta. Ilmanvaihdolla vaikutetaan sekä lämpötiloihin että ilmankosteuksiin samanaikaisesti, jolloin menetelmä voi luoda haasteita hienovaraiseen ilmastohallintaan. Ilmanvaihto on kuitenkin erinomainen keino poistamaan liiallista lämpöenergiaa tai vesihöyryjä muiden menetelmien puuttuessa. Lisäksi ilmanvaihdolla lähestytään ulkoilman hiilidioksidipitoisuuksia, mistä johtuen ilmanvaihto on välttämätön ilmastohallintamenetelmä hiilidioksidilannoituksen puutteessa.

Lämpöenergian virran määrä ilmanvaihdossa \dot{Q} (W), ilman vesihöyryjen ja lämpöenergioiden vuorovaikutusta, voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$\dot{Q} = c_p \rho_{air} V (T_i - T_o) \quad (10)$$

jossa, c_p on ilman ominaislämpö, ρ_{air} on ilman tiheys, V on ilmanvaihdon määrä, T_i on kasvihuoneen sisäinen lämpötila sekä T_o sisään virtaavan ilman lämpötila [23].

Lämpötilanhallinnassa yhtälön 10 voi kääntää ilmaisemaan tarvittavaa ilmanvaihtoa, jos tiedetään kasvihuoneen sisään virtaava lämpöenergian määrä. Esimerkiksi, jos sisään virtaava energiamäärä on valaisimista johtuva lämpöenergian virta $\dot{Q}_{valaisin}$, tarvittava ilmanvaihtomäärä voidaan arvioida seuraavasti:

$$V = \frac{\dot{Q}_{valaisin}}{c_p \rho_{air} (T_i - T_o)} \quad (11)$$

Ilmankosteudenhallinnassa tarvittava ilmanvaihdon määrä V (m^3/s) on arvioitava seuraavasti:

$$V = \frac{\phi_{trans} - \phi_{cond}}{w_i - w_o} \quad (12)$$

jossa, ϕ_{trans} on kasvien haihdunnan vesihöyryvirta, ϕ_{cond} on kondensoituvan vesihöyryvirta, w_i sekä w_o ovat vesihöyryyn massasuhteet kasvihuoneen sisä- ja ulkopuolella [23].

Kosteuden massasuhdetta w (kg/kg) voidaan esittää seuraavasti:

$$w = \frac{m_{höyry}}{m_{ilma}} \quad (13)$$

jossa $m_{höyry}$ sekä m_{ilma} ovat vesihöyryyn ja ilman massamäärät tietyssä olosuhteessa [23].

Vesihöyryn massasuhde w voidaan laskea myös Daltonin lakia soveltaen seuraavasti:

$$w = 0.622 \frac{p}{P-p} \quad (14)$$

jossa p on veden höyrypaine (yhtälö 3, luku 2.2.2) ja P on ilmanpaine yksikössä mb (millibaari) [24].

4.2 Lämmitys lämpöputkilla

Lämpöputkien avulla voidaan nostaa lämpötiloja tietyssä osassa kasvatusjärjestelmää, vaikuttaen mm. ympäristön lämpötilaan, ilmankosteuteen sekä ilmavirtoihin. Lisäksi lämpöputkilla voidaan tasapainottaa haihdutukseen tai kondensatioon kulunutta lämpöenergiaa. Lämpöputkia voidaan asettaa useita kiertoja eri korkeuksiin. Ne toimivat lämmönvaihtimina, joista johtuva energiamäärä on karkeasti arvioitavissa putken materiaalin ja paksuuden, sekä lämpötilaerojen perusteella.

Ilman lämmitessä sen tiheys laskee, jolloin se nousee tiheimmän kylmän ilman yläpuolelle. Lisäksi ilman lämmitessä suhteellinen kosteus laskee. Tällöin lämpöputket voivat olla keino hallitsemaan esim. kasvuston alapuolelle kasaantunutta viileää ja kosteaa ilmaa.

Lämpöputkista johtuva energiamäärä \dot{Q} (W) voidaan esittää seuraavasti:

$$\dot{Q} = 2\pi Lk \frac{\Delta T}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (15)$$

jossa L on putken pituus, k on materiaalin lämmönjohtavuuden keskiarvo, ΔT on putken sisäpinnan ja ulkopinnan välinen lämpötilaero ja r_1 sekä r_2 ovat putken säteet sisä- sekä ulkopinnasta. [25.]

4.3 Jäähdytys haihdutuksella

Jäähdytys haihdutuksella on menetelmä, jossa nesteen muodossa oleva vesi muutetaan vesihöyryksi ilmasta saadun lämpöenergian avulla. Olomuodon muutos tarvitsee energiaa, eli ns. latenttilämpöä. Ilman menetettyä lämpöenergiaa sen lämpötila laskee. Haihdutusta voidaan tuottaa esimerkiksi sumutus ja *evaporative cooling pad* -laitteilla. Menetelmä on erityisen tehokas silloin, kun ilma on kuumaa ja kuivaa. Tällöin ilmastoon voidaan tuottaa sekä tarvittava lämpötilan lasku että vesihöyrymäärien nousu. Saavutettava lämpötilanlasku haihdutuksella, eli märkälämpötila, on riippuvainen lämpötilojen sekä ilmankosteuden lähtökohdista.

Märkälämpötila on lämpötila, johon tietyssä lämpötilassa ja ilmankosteudessa on mahdollista laskea lämpötilaa haihdutuksen avulla. Märkälämpötila voidaan mitata mittareilla, mutta ilmastonhallinnan suunnitelmassa se olisi hyvä laskea lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden funktiona. Märkälämpötilan laskemien teoreettisella yhtälöllä on haastavaa, mistä johtuen sen laskemiseen on kehitetty mittaustuloksiin perustuva yhtälöratkaisu 1 atm paineessa ja $\pm 0,3$ °C tarkkuudella:

$$T_{wb} = T * \operatorname{atan} (0.151977 * (RH + 8.313659)^{\frac{1}{2}}) + \operatorname{atan}(T + RH) - \operatorname{atan}(RH - 1.676331) + 0.00391838 * RH^{\frac{3}{2}} * \operatorname{atan}(0.023101 * RH) - 4.686035 \quad (16)$$

jossa T_{wb} (taulukko 1) on märkälämpötila, T on lämpötila (°C), RH on suhteellinen kosteus ja arctan on arkustangentti. [26.]

Taulukko 1. Yhtälöllä 16 saavutettu mahdollinen lämpötilalasku tietystä lämpötilasta ja suhteellisesta ilmankosteudesta ($T-T_{wb}(T,RH)$):

<i>T, RH</i>	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
24 °C	10.16	8.43	6.86	5.40	3.99	2.63
26 °C	10.65	8.80	7.14	5.60	4.13	2.71
28 °C	11.14	9.18	7.42	5.80	4.27	2.79
30 °C	11.63	9.55	7.70	6.00	4.40	2.87
32 °C	12.12	9.92	7.98	6.21	4.54	2.95
34 °C	12.61	10.30	8.26	6.41	4.68	3.03

Märkälämpötiloista saa viitteitä haihdutuslaitteista ja kasvien transpiraatiosta johtuviin lämpötilalaskuihin. Lisäksi märkälämpötilaa tarvitaan laitteiden jäähdytystehokkuuslaskelmissa.

4.3.1 Sumuttimet

Sumutuslaitteet jakautuvat matalan ja korkean käyttöpaineen sumuttimiin. Olenaiset erot sumuttimien välillä ovat niiden tuottamat pisarakoot sekä tarvittava käyttöpaine. Pisarakoot vaikuttavat laitteen jäähdytys- sekä haihdutustehokkuuteen. Korkeapainesumuttimet tuottavat huomattavasti pienempiä pisarakokoja kuin matalapainesumuttimet, mutta vaativat korkeaa käyttöpainetta, puhdasta vettä ja enemmän huoltoa [1]. Käyttöpainet (Pa) sekä pisarakoot (μm) vaihtelevat tyypillisesti 300 - 410 kPa ja 50 - 100 μm välillä matalapainesumuttimille sekä 3,5 - 7 MPa ja 2 - 60 μm välillä korkeapainesumuttimille [27].

Kasvihuoneen lämpötilanlasku sekä lisääntynyt vesihöyryn määrä on arvioitava sumutuslaitteen jäähdytys- sekä haihtumistehokkuudella. Siihen vaikuttaa myös sumutetun vesivirran määrä pinta-alaa kohti, joka voi erittäin kuivissa ja kuumissa olosuhteissa olla jopa 0,4 l/m²/h [28].

Jäähdytystehokkuus η_{cool} voidaan laskea seuraavalla laskukaavalla:

$$\eta_{cool} = \frac{t_{unfog} - t_{fog}}{t_{unfog} - t_{wb,fog}} \quad (17)$$

jossa, t_{unfog} on sumuttamattoman tilan lämpötila, t_{fog} on sumutetun tilan lämpötila sekä $t_{(wb,fog)}$ on sumutettavan tilan märkälämpötila [27]. Yhtälön 17 avulla voidaan myös arvioida lämpötilanmuutokset, jos laitteesta tiedetään sen jäähdytys-tehokkuus.

Haihtumistehokkuus η_{evap} on arvioitavissa seuraavasti:

$$\eta_{evap} = \dot{m}_e / \dot{m} \quad (18)$$

jossa \dot{m}_e ja \dot{m} ovat vesihöyryn sekä sumutetun veden virta ($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) vastaavasti. [27.]

Vesihöyryn virta \dot{m}_e , kun tilassa ei ole muita vesihöyryn lähteitä, voidaan laskea seuraavasti:

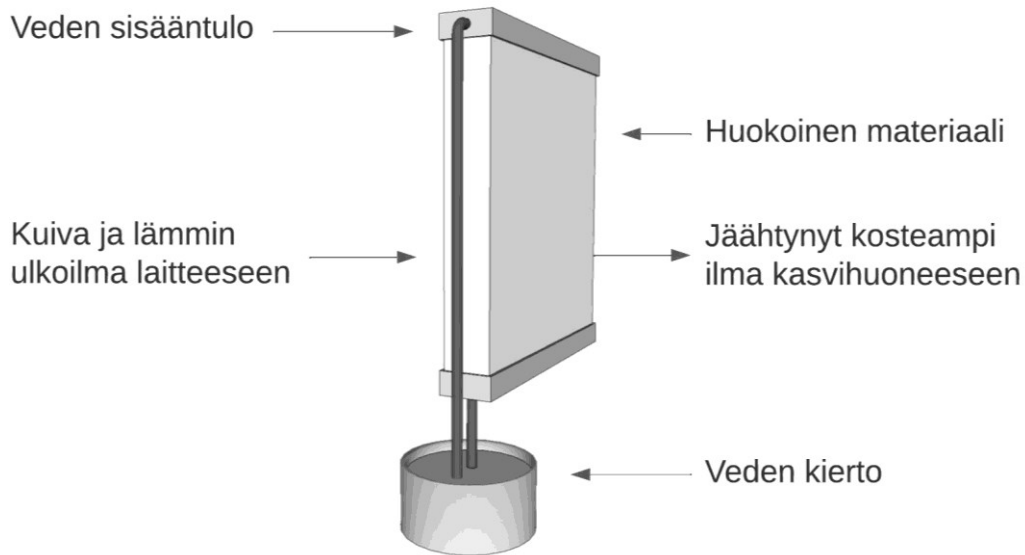
$$\dot{m}_e = Q(w_i - w_o) \quad (19)$$

jossa Q on ilmanvaihdon määrä ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$) ja w_i sekä w_o ovat vesihöyryn konsentraatiot (g/m^3) tilan sisä- ja ulkopuolella vastaavasti. [27.]

4.3.2 Evaporative cooling pad -haihdutusjäähdytin

Kuumissa ja kuivissa ilmastoissa yleinen ilmastonhallintamenetelmä on ns. *evaporative cooling pad* -haihdutusjäähdytin (kuva 4), jolla voidaan laskea sisääntuloilman lämpötilaa sekä nostaa sen sisältämää vesihöyrymäärää. Laitteen toiminta perustuu ulkoilman ohjaamiseen kastetun huokoisen materiaalin läpi kasvihuoneeseen koneistetun ilmanvaihdon tuottaman alipaineen avulla. Yleisimpiä materiaaleja ovat selluloosasta rakennetut aallotetut materiaalit, sillä ne on jäykkyydeltään ja kestävyydeltään helppo tukea, eivätkä ne välitä partikkeleita ilmarinnan mukana [29]. Laite on erityisen tehokas silloin, kun sisääntuloilma on

kuivaa ja sisältää runsaasti lämpöenergiaa. Tällöin mahdollinen lämpötilan lasku (märkälämpötila) on suurimmillaan ja ilma saadaan samalla kosteammaksi.



Kuva 4. *Evaporative cooling pad* -haihdutusjäähdytintä kuvaava piirros

Laitteesta kasvatusympäristöön välittynyt vesihöyryn määrä WU_{PW} (l/m^2) on laskettavissa seuraavasti:

$$WU_{PW} = \frac{\Delta T_{PW} * C_V * \rho_{AIR} * \phi}{\Delta H_{VAP} * \rho_W} \quad (20)$$

jossa ΔT_{PW} on laitteen sisääntulon ja ulostulon välinen lämpötilaero, ΔH_{VAP} (kJ/kg) on höyrystymislämpö, ρ_W (kg/l) on veden tiheys, C_V on ilman ominaislämpö (kJ/kg*K), ρ_{air} (kg/m³) on ilman tiheys ja ϕ on ilmavirta laitteen läpi (m³/m²). [28.]

Laitteen sisääntulon sekä ulostulon välisen lämpötilaeron ΔT_{PW} voi laskea laitteen jäähdytystehokkuudella ja sisääntuloilman olosuhteilla:

$$\Delta T_{PW} = \eta * (T_{out} - T_{OUT,WB}) \quad (21)$$

jossa η on laitteen jäähdytystehokkuus, T_{OUT} on laitteeseen saapuva ulkoilma ja $T_{(OUT, WB)}$ on ulkoilman märkälämpötila. [28.]

4.4 Jäähdytys kondensaatiolla

Kasvatusympäristöä voidaan jäähdyttää menetelmin, jotka laskevat samalla il-
mankosteutta. Tietyn suhteellisen kosteuden omaavalla ilmalla on ns. kastepis-
telämpötila, jolloin ilmassa on enemmän vesihöyryä kuin siihen mahtuu. Kun
kastepistelämpötila on saavutettu, ilma kyllästyy ja ylimääräinen vesihöyry kon-
densoituu. Kastepistelämpötilaa voidaan hyödyntää lämmönvaihtimissa ja läm-
pöpumpuissa siirtämään liiallista vesihöyryä ulos kasvatusjärjestelmästä. Vesi-
höyryn siirto perustuu ilmapirran lämpötilan laskemiseen, jolloin se myös jääh-
dyttää kasvatusympäristöä.

Kastepistelämpötilan T_d (taulukko 2) laskemiseen on arvioitava ensin veden
höyrypaine P_w yhtälöllä 3 (luku 2.2.2), jonka jälkeen kastepistelämpötila on arvi-
oitavissa seuraavasti:

$$T_d = \frac{T_n}{\frac{m}{\log\left(\frac{P_w}{A}\right)} - 1} \quad (22)$$

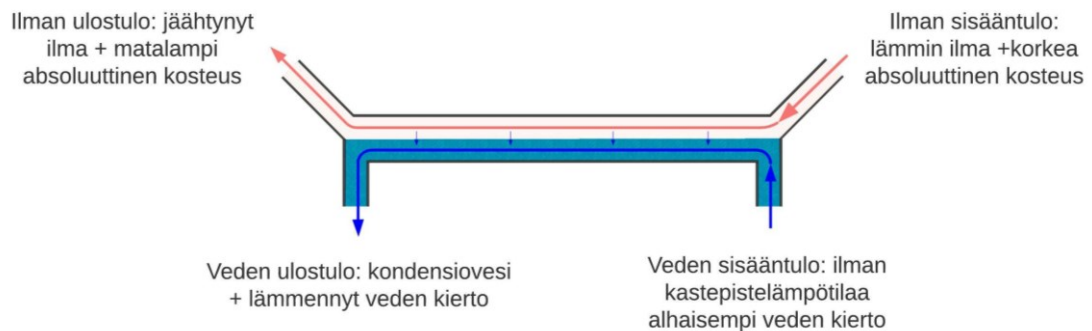
jossa A , m , T_n ovat yhtälössä (3) käytetyt lämpötilakohtaiset vakiot. [12.]

Taulukko 2. Yhtälöllä 22 saavutetut kastepistelämpötilat 24 - 34 °C lämpötilan ja
40 - 90 % suhteellisen kosteuden välillä (T_d (T,RH)):

T, RH	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %
24 °C	9.57	12.94	15.76	18.19	20.34	22.26
26 °C	11.36	14.77	17.63	20.10	22.28	24.23
28 °C	13.14	16.61	19.51	22.02	24.22	26.20
30 °C	14.93	18.44	21.39	23.93	26.17	28.18
32 °C	16.71	20.27	23.26	25.84	28.11	30.15
34 °C	18.49	22.11	25.13	27.75	30.06	32.12

Kastepistelämpötiloilla voidaan myös arvioida vesihöyryjen kondensoitumista kasvatusympäristön rakenteisiin, mikäli rakenteiden lämpötilat ovat kasvatusympäristöä alhaisemmat.

Ilman lämpötilan lasku vesihöyryn kondensaatiolla voidaan saavuttaa esimerkiksi lämmönvaihtimilla ja lämpöpumpuilla. Lämmönvaihtimissa kostea ja lämmin ilma tuodaan kosketukseen sen kastepistelämpötilaa alhaisempaan pintaan tai nesteeseen. Lämpöpumpuissa yleisintä on hyödyntää jäähdytysnesteitä vastaavalla tavalla. Kondensaatiomenetelmien oleellisin ero saattaa olla niiden kyky lämmön talteenottoon. Lämpöpumput pystyvät palauttamaan kondensaatiossa siirtyneen lämpöenergian takaisin kasvihuoneeseen [23]. Kylmään vesivirtaan perustuva lämmönvaihtojärjestelmä (kuva 5) puolestaan ottaa lämmön talteen vesivirran mukana.



Kuva 5. Kylmään vesivirtaan perustuvaa lämmönvaihdinta kuvaava piirros

Kondensaation avulla poistetun kosteuden määrä \dot{m} (kg/s) voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$\dot{m} = \rho_{ilma} V_{ilma} (\omega_i - \omega_o) \quad (23)$$

jossa ρ on ilman tiheys, V on ilmavirran määrä ja ω_i sekä ω_o ovat höyryn massasuhteet (yhtälö 14, luku 4.1) laitteen sisään- ja ulostulossa vastaavasti. [23.]

4.5 Hiilidioksidilannoitus

Hiilidioksidipitoisuuksia voidaan lisätä erilaisia lähteitä hyödyntäen. Hiilidioksidia saadaan esimerkiksi puhdistetuista teollisuuden savukaasuista tai nesteytetystä hiilidioksidista [1]. Lähteenä voi toimia myös pelkästään ulkoilma, sillä kasvihuoneessa on kasvien yhteyttämisestä johtuen ulkoilmaa pienempi hiilidioksiditaso. Mikäli lannoitusta tarvitaan, annostelussa on arvioitava kasvihuoneen sisäinen hiilidioksidipitoisuus, johon vaikuttaa ilmanvaihto, ulkoilman hiilidioksidipitoisuus sekä nettoyhteyttäminen.

Kasvuympäristössä, jossa ilmankosteutta ja lämpötiloja hallitaan ilmanvaihdolla, hiilidioksidipitoisuutta voi arvioida yhtälöllä 24, jossa CO_2^{in} ja CO_2^{out} ovat hiilidioksidipitoisuudet kasvuympäristön sisä- ja ulkopuolella yksikössä ppmv, A_{net} on kasvin nettoyhteyttäminen yksikössä $mg/m^2/s$, h on kasvihuoneen korkeus yksikössä m sekä n on kasvuympäristön ilman korvaantuminen tunnissa ($V_{kasvihuone}/V_{ilmanvaihto/h}$) [13]:

$$CO_2^{in} = CO_2^{out} - \frac{1800}{h} \frac{A_{net}}{n} \quad (24)$$

Ilmanvaihdon sekä nettoyhteyttämisen muuttujilla on määriteltävissä mahdollinen hiilidioksidilannoituksen tarve. Mikäli tavoite on hiilidioksidipitoisuuden ylläpitäminen ulkoilman tasolla, ilmanvaihtoa sisältävässä kasvihuoneessa on annosteltava nettoyhteyttämisen suuruinen hiilidioksidilannoitus [13]. Korkeampien hiilidioksidipitoisuuksien ollessa tavoitteena on ilmanvaihtoa pidettävä mahdollisimman vähäisenä tai olemattomana. Tällöin tietyn hiilidioksidipitoisuuden saavutettua tarvittava annostelun määrä on yhtä suuri kuin nettoyhteyttäminen.

Tarvittavia annostelumääriä varten hiilidioksidin ppmv on hyödyllistä muuttaa yksikköön $g/m^2/h$. Avogadron laki antaa hiilidioksidille muunnoksen $1 \text{ ppmv} \cong 2 \text{ mg/m}^3$ [13]. Muunnosta hyödyntäen tarvittava hiilidioksidiannostelua C_{annos} yksikössä $g/m^2/h$ voidaan kuvailla yhtälöä 25 hyödyntäen seuraavasti:

$$C_{annos} = (CO_2^{tavoite} - CO_2^{in}) * 2 * 10^{-3} \quad (25)$$

Hiilidioksidiannostelussa on kuitenkin huomioitava sen muuntuminen hyödynnettäväksi kuiva-aineeksi sekä kemialliset reaktiot kosteassa ilmassa, jolloin todellinen annostelun tarve on noin kaksinkertainen teoreettiseen annostelumäärään verrattuna [13]. Huomioitavaa on myös hiilidioksidin tasainen jakautuminen, sillä se on noin 1,5 kertaa ilmaa painavampaa [1].

5 Ilmastonhallintamalli

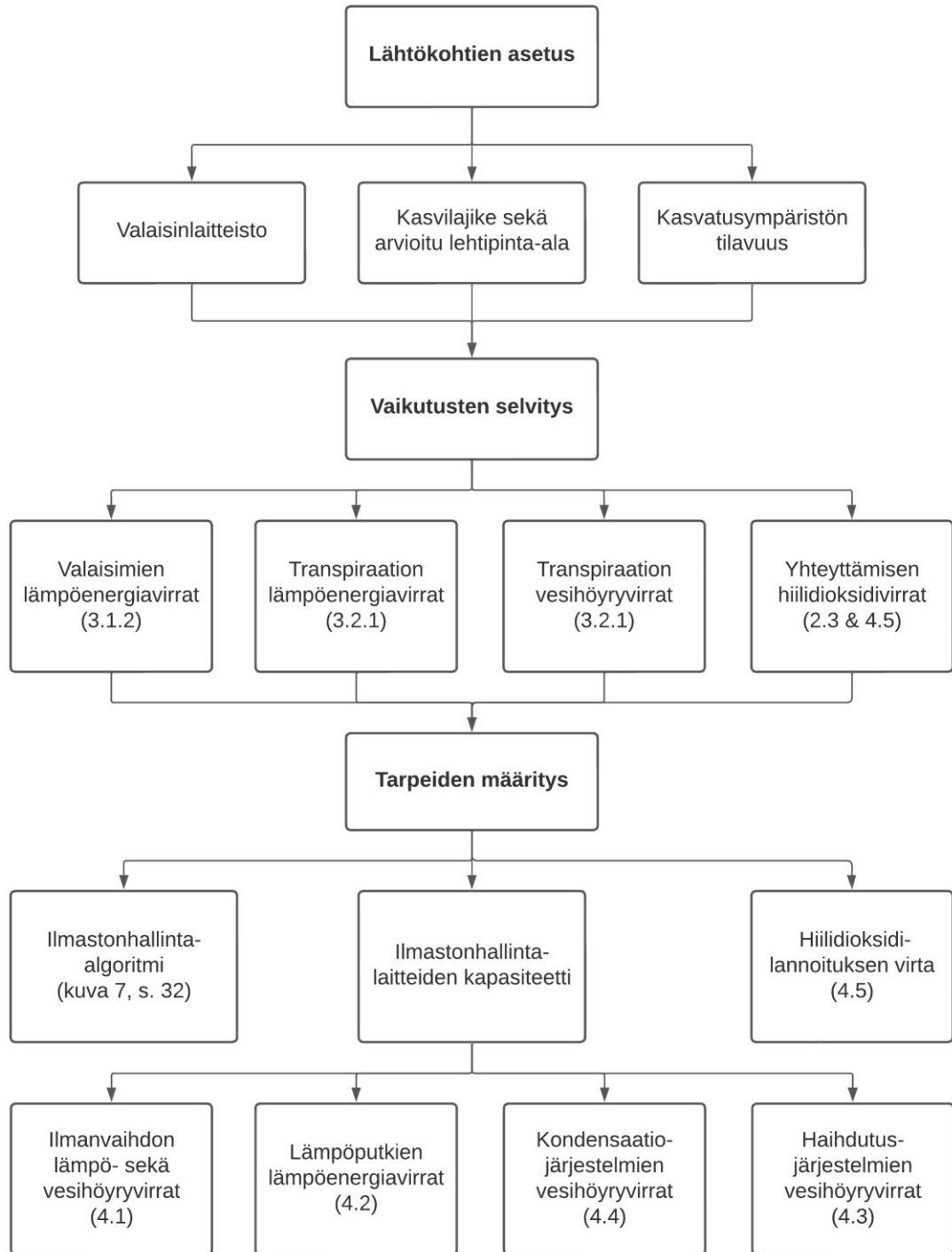
Tutkimusympäristön ilmastonhallinnassa on tärkeä selvittää, kuinka suuria lämpöenergian ja vesihöyryn virtoja on odotettavissa tarpeellisen ilmastonhallintamenetelmien hankkimiseksi tai kehittämiseksi. Ilmastonhallintamallin ehdotus (kuva 6) koostuu kasvatusympäristön lähtökohtien asetuksista, lähtökohtien vaikutusten selvityksestä ilmastonhallinnan näkökulmasta sekä ilmastonhallintatarpeiden määrittämisestä.

Kasvatusympäristön lähtökohdat ovat valaisinlaitteisto, kasvatettava kasvilajike, arvioidut lehtipinta-alat sekä kasvatusympäristön tilavuus. Valaisinlaitteiston asetuksissa on selvitetty lämpöenergian virtaukset sekä arvioitu säteilyn laadun vaikutukset transpiraatioon. Kasvilajikkeesta on selvitetty vähintään arvio suurimmasta saavutettavasta lehtipinta-alasta sekä lehtipinta-alan kerroksista. Transpiraatiomallista riippuen voidaan joutua selvittämään myös muita tekijöitä, kuten lehtien sisäinen resistanssi. Lopuksi kasvihuoneen tilavuudella voidaan arvioida, kuinka suuria määriä lämpöenergian sekä vesihöyryn virtoja tarvitaan, jotta saavutetaan tietyt olosuhteet.

Lähtökohtien asettamisen jälkeen on arvioitava niistä aiheutuvat epätasapainot kasvuympäristön lämpöenergiassa ja vesihöyryssä. Valaisimien lämpöenergiavirrat sekä transpiraation lämpöenergian ja vesihöyryjen virrat on selvitettävä tarvittavan laitteiston kapasiteetin määrittämiseksi. Lisäksi yhteyttämisen hiilidioksidivirrat ovat merkittävä tekijä ilmastonhallintatarpeiden määrittämiselle, sillä hiilidioksidilla on oltava jokin sisäänvalo kasvuympäristössä.

Kasvatusympäristölle välttämättömien lämpöenergian ja vesihöyryn virtoihin perustuen määritellään ilmastonhallinnan tarpeet, sisältäen ilmastonhallintalaitteiden kapasiteettimäärityksen, ilmastonhallinta-algoritmin (kuva 7) sekä hiilidioksidilannoitusvirran määrityksen. Määrityksessä päätetään ensin hiilidioksidin lähde, sillä se voi rajoittaa ilmastonhallintamenetelmien kannattavuutta. Esimerkiksi, jos kasvatusjärjestelmä ei sisällä hiilidioksidilannoitusta, ilmanvaihtomenetelmän hyödyntäminen on välttämätöntä. Käänteisesti hiilidioksidilannoituksen sisältyessä kasvatusjärjestelmään ilmanvaihto voi hankaloittaa pitoisuuksien ylläpitämistä ja tuottaa tappiota hiilidioksidipitoisuuksissa.

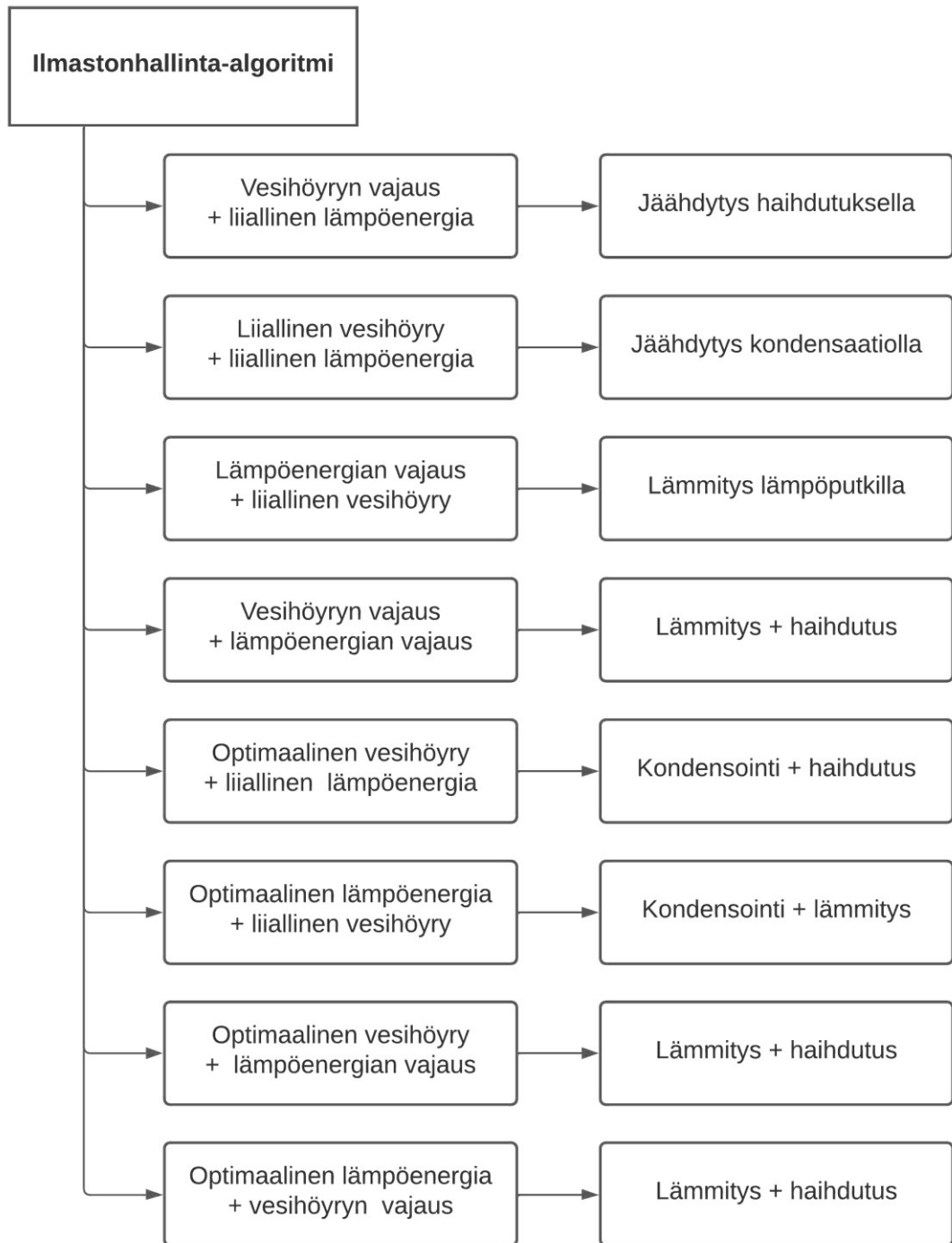
Tarpeiden määritykseen perustuen arvioidaan tarvittavien laitteiden kapasiteetit (kuva 6). Ilmastonhallintamenetelmien laskutoimenpiteitä ja suunnitellun laitteen ominaisuuksia hyödyntäen määritetään ilmanvaihdosta johtuvat lämpöenergian sekä vesihöyryn virrat, lämpöputkien lämpöenergiavirrat, kondensaatiojärjestelmien vesihöyryvirrat sekä haihdutusjärjestelmien vesihöyryvirrat.



Kuva 6. Ilmastohallintamalli vesiviljelyn tutkimusympäristöön

Ilmastohallinta-algoritmi (kuva 7) toimii esimerkkinä laitteiston hallinnalle tietyissä kasvatusjärjestelmän olosuhteissa ja hallintatarpeissa. Algoritmi on luotu näkökulmasta, jossa on päätetty hyödyntää hiilidioksidilannoitusta, jolloin se ei

sisällä ilmanvaihtoa hallintamenetelmänä. Algoritmin sisääntuloina toimivat mitausdataan ja olosuhdeasetuksiin perustuvat ilmastonhallintatarpeet. Ulostulot sisältävät ilmastonhallintalaitteen tai usean laitteen päälle kytkemisen. Esimerkiksi tilanteessa, jossa lämpötilat ovat kohdillaan mutta ilmankosteuden arvot ovat liian alhaiset, voidaan tasapainottaa haihdutukseen kulunut lämpöenergia lämpöenergian lähteellä.



Kuva 7. Ilmastohallinta-algoritmin esimerkkikaavio

6 Pohdinta

Kasvatusjärjestelmän ilmastoon vaikuttavien tekijöiden ja ilmastohallintamenetelmien määrittäminen sekä niihin perustuva ilmastohallintamalli soveltuvat pienen kasvihuoneen lämpöenergian sekä vesihöyryvirtojen karkeaan arvioimiseen. Lisäksi voidaan arvioida tarvittava laitteisto ja sen kapasiteetti. Mitä suurempi kasvatusjärjestelmä on, sitä merkityksellisemmäksi muuttuu tarkkojen mallinnuksien hyödyntäminen esimerkiksi kasvien transpiraatioissa. Huomioitavaa on myös, ettei malli itsessään tuo ratkaisua kasvatusympäristön ilmastohallintaan, vaan työkaluja sen luomiseen. Lisäksi lämpöpumppujen käyttökelpoisuus ilmastohallinnassa ei saanut ansaitsemaansa painotusta tässä tutkimuksessa. Ilmastohallinnassa on esitetyn ilmastohallintamallin lisäksi tärkeää huomioida mm. mittausteknologia ja ilmavirtauksien hallinta, ilmastohallintalaitteiden ominaisuudet ja ohjaaminen sekä lämpöenergianlähteet.

Mittausteknologialla saadaan tietoa lämpötiloista, ilmankosteuksista sekä hiilidioksidipitoisuuksista. Muuttujien tasaisuutta voidaan hallita hyvällä kasvatusympäristön suunnittelulla ja ilmavirtauksilla. Esimerkiksi vertikaaliviljelmissä on hyödyllistä suunnitella kasvatusympäristö siten, että ilmastohallinnan muuttujat jakautuvat tasaisesti jokaisessa viljelykerroksessa. Suunnittelu on mahdollista toteuttaa esimerkiksi Solidworks-ohjelmistolla, jolla voidaan mallintaa ja simuloida kasvatusympäristöä. Ilmavirtauksia voidaan ohjata mm. lämpöputkilla, jolloin lämmitetyn ilman tiheys laskee ja muutos saa aikaan lämpimämmän ilman siirtymisen tiheämmän ilman yläpuolelle.

Ilmastohallintalaitteiden kapasiteettien lisäksi laitteiden ominaisuudet on tunnistettava tai rakennettava tarpeellisten tarkkuuksien ja vaikutusnopeuksien mukaan. Esimerkiksi kylmiin vesivirtoihin perustuvaa laitetta hyödyntäessä on minimoitava viive sekä käytön jälkivaikutus. Lisäksi laitteiden ohjausjärjestelmä vaatii ohjelmointia sekä automaatiota.

Kasvihuoneteknologiassa lämpöenergian lähteet ovat olennaisia kustannustehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden kannalta. Pohjoismaissa lämmitykseen

käytetyn energian kustannukset voivat olla hyvin suuret kasvihuoneissa. Lämmityskustannukset voivat olla esteenä ympäristöystävälliselle ruoantuotannolle. Ilmastonhallinnassa sekä ilmastonhallinnan kehittämisessä on pyrittävä luomaan lämmönvaihtokeinoja kustannustehokkaiden ja kestävien lämpöenergianlähteiden, kuten hukkalämpölähteiden, hyödyntämiseen.

Lähteet

- 1 Järvinen, Mika; Karjalainen, Kaisa & Vuollet, Arto. 2016. Kasvihuoneviljely Tuotantotekniikan Perusteet. Helsinki: Opetushallitus ja tekijät.
- 2 Brown, Christopher; Schuerger, Andrew & Sager, John. 1995. Growth and Photomorphogenesis of Pepper Plants under Red Light-emitting Diodes with Supplemental Blue or Far-red Lighting. *Journal of the American Society for Horticultural*, Volume 120, Issue 5
- 3 Zhang, Y-ting; Zhang, Yuqi; Yang, Qi-chang & Li Tao. 2019. Overhead Supplemental Far-Red Light Stimulates Tomato Growth Under Intra-Canopy Lighting With LEDs. *Journal of Integrative Agriculture*, Volume 18, Issue 1.
- 4 Karimi, Masumeh; Ahmadi, Nima, & Ebrahimi, Morte. 2022. Red LED Light Promotes Biomass, flowering and secondary metabolites accumulation in hydroponically grown *Hypericum perforatum* L. *Industrial Crops and Products*, Volume 175.
- 5 Kim, Hye-Ji; Lin, Meng-Yang & Mitchell, Cary A. 2019. Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes. *Environmental and Experimental Botany*, Volume 157.
- 6 Verheul, Michèl J; Maessen, H.F.R; Panosyan, A; Naseer, Muhammad; Paponov, M. & Paponov, Ivan. 2020. Effects of supplemental lighting and temperature on summer production of tomato in Norway. *ISHS Acta Horticulturae 1296: International Symposium on Advanced Technologies and Management for Innovative Greenhouses: GreenSys2019*.
- 7 Stanghellini, Cecilia. 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. Institute of Agricultural Engineering (IMAG).
- 8 Salonen, Kai. 2004. Paprikan viljely. Helsinki: Kauppapuutarhaliitto.
- 9 Voipio, Irma. 2000. Vihannekset - lajit, viljely ja sato. Helsinki: Puutarhaliiton julkaisu nro. 316, Opas nro 46.
- 10 Zabri, A.W. & Burrage, S.W. 1997. The effects of vapour pressure deficit (vpd) and enrichment with CO₂ on water relations, photosynthesis, stomatal conductance and plant growth of sweet pepper (*Capsicum Annum* L.) grown by nft. *ISHS Acta Horticulturae 458: International Symposium on Water Quality & Quantity-Greenhouse*.

- 11 Nederhoff, E.M; Rijdsdijk, A.A. & de Graaf, R. 1992. Leaf conductance and rate of crop transpiration of greenhouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide. *Scientia Horticulturae*, Volume 52, Issue 4.
- 12 Humidity Conversion Formulas B210973EN-F. 2013. Helsinki: Vaisala.
- 13 Stanghellini, Cecilia; Incrocci, Luca; Gázquez, Juan Carlos & Dimauro, Biagio. 2008. Carbon dioxide concentration in mediterranean greenhouses: How much lost production?. *Acta Horticulturae* 801, GreenSys2007.
- 14 Tai, Nguyen Huy; Park, Jong Seok; Shin, Jong Hwa; Ahn, Tae In & Son, Jung Eek. 2014. Analyses of Transpiration and Growth of Paprika (*Capsicum annuum* L.) as Affected by Moisture Content of Growing Medium in Rockwool Culture. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, Volume 32, Issue 3.
- 15 Seginer, Ido. 2002. SE—Structures and Environment: The Penman-Monteith evapotranspiration equation as an element in greenhouse ventilation design. *Biosystems Engineering*, Volume 82, Issue 4.
- 16 Cliff, Margaret A; Li, Jackie B; Toivonen, Peter M.A. & Ehret, David L. 2012. Effects of nutrient solution electrical conductivity on the compositional and sensory characteristics of greenhouse tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology*, Volume 74.
- 17 Mtaita, Tuarira Abduel. 2003. Food. Field Guide to Appropriate Technology, Chapter 3.
- 18 Alhussaen, Khalaf. 2006. *Pythium and Phytophthora associated with root disease of hydroponic lettuce*. Sydney: University of Technology, Faculty of Science.
- 19 Ouyang, Zan; Tian, Juncang; Yan, Xinfang & Shen, Hui. 2020. Effects of different concentrations of dissolved oxygen or temperatures on the growth, photosynthesis, yield and quality of lettuce. *Agricultural Water Management*, Volume 228.
- 20 Guo, Xiabin; Hao, X; Zheng, J; Little, C. & Khosla, S. 2016. Response of greenhouse mini-cucumber to different vertical spectra of LED lighting under overhead high pressure sodium and plasma lighting. *ISHS Acta Horticulturae* 1134: VIII International Symposium on Light in Horticulture.
- 21 Craver, Joshua K; Boldt, Jennifer K. & Lopez, Roberto G. 2019. Comparison of Supplemental Lighting Provided by High-pressure Sodium Lamps

- or Light-emitting Diodes for the Propagation and Finishing of Bedding Plants in a Commercial Greenhouse. *HortScience*, Volume 54, Issue 1.
- 22 Katzin, David; van Mourik, Simon; Kempkes, Frank & van Henten, Eldert J. 2020. GreenLight - An open source model for greenhouses with supplemental lighting: Evaluation of heat requirements under LED and HPS lamps. *Biosystems Engineering*, Volume 194.
 - 23 Amani, Mohammad; Foroushani, Sepehr; Sultan, Muhammad & Bahrami, Majid. 2020. Comprehensive review on dehumidification strategies for agricultural greenhouse applications. *Applied Thermal Engineering*, Volume 181.
 - 24 Razak, A. M. Y. 2007. *Industrial Gas Turbines: Performance and Operability*, Chapter 14. Boca Roca: Taylor & Francis inc.
 - 25 Çengel, Yunus; Cimbala, John & Turner, Robert. 2012. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education; 2012.
 - 26 Stull, Roland. 2011. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 50, Issue 11.
 - 27 Li, S. & Willits, D.H. 2008. Comparing low-pressure and high-pressure fogging systems in naturally ventilated greenhouses. *Biosystems Engineering*, Volume 101, Issue 1.
 - 28 Tsafaras, I; Campen, J; Stanghellini, C; de Zwart, H; Voogt, W. & Schefers, K. et al. 2021. Intelligent greenhouse design decreases water use for evaporative cooling in arid regions. *Agricultural Water Management*, Volume 250.
 - 29 Franco, A; Valera, D.L; Peña, A. & Pérez, A. 2021. Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 76, Issue 2.