



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

SIRKKAKASVATTAMOJEN OLOSUHTEIDEN HALLINTA JA ENERGIA TEHOKKUUS

Toni Myllyniemi

Opinnäytetyö
Joulukuu 2018
Talotekniikan koulutus
LVI-tekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutus
LVI-tekniikka

MYLLYNIEMI, TONI:

Sirkkakasvattamojen olosuhteiden hallinta ja energiatehokkuus

Opinnäytetyö 72 sivua, joista liitteitä 17 sivua
Joulukuu 2018

Työn tarkoituksena oli tutkia, minkätasoiset olosuhteet kotisirkan (*Acheta Domesticus*) kasvatus vaatii, miten ne saadaan ylläpidettyä, millaisia päästöjä kasvusta syntyy sekä mitä kuluja kasvatuksesta muodostuu. Pohjoismaisissa olosuhteissa kasvatusta ja tutkimuksia sen kannattavuudesta on vielä verrattain vähän. Olosuhteet ulkona ovat talvikautena haastavat ja asettavat ongelmia kasvatuksen tehokkuudelle ja kannattavuudelle.

Optimaalisin kasvilämpötila asettui +30 °C:n alueelle ja mahdollinen vaihtelualue oli +25 °C – +35 °C. Paras mahdollinen ilman suhteellisen kosteuden taso kasvulle oli 60 %, mutta vaihteluväli oli suhteellisen laaja, 80 %RH munille ja toukille sekä 40 %RH lähempänä täysikasvuisuutta oleville. Munat olivat erityisen herkkiä kosteudelle ja liian alhaisella tasolla kuoritudumista ei tapahtunut, mutta kasvuvaiheiden edetessä herkkyys kosteudelle ei ollut enää niin kriittinen. Suhteellisen kosteuden hyvänä rajana toimii 60 %, koska yli 70 %RH:n kosteudessa homeitiöt ja bakteerit alkavat kasvaa tilan korkean lämpötilan avustuksella.

Lämmitysenergian ja lisäkosteuden tarve oli suoraan verrattavissa kasvatustilan tiiviyyteen, rakenteiden laatuun sekä hyödynnettyihin kasvatusneliöihin. Sirkat tuottavat kasvaessaan lämpö- ja kosteuskuormaa, joka talvikautena auttaa olosuhteiden ylläpidossa. Joten mitä tehokkaammin neliöt on käytetty, sitä enemmän saadaan hyötyenergiaa käytettyä hyväksi ja säästettyä ostettua energiaa. Kesäkautena Suomessa ei normaalisti tule vastaan tilannetta, jolloin ulko-olosuhteet ylittäisivät kasvatustilan olosuhteet, jolloin yllämpenemisen ja kosteuden kanssa tulisi ongelmia.

Kasvatuksesta ja kasvusta syntyneet hiilidioksidi- sekä muut kasvihuonepäästöt laskettiin tutkimuksen lopputuloksena ja päästiin hyvään lopputulemaan kasvatuksen kannattavuudesta verrattuna tämän hetken vallitsevaan sika- ja nautatuotantoon. Syntyneet kasvihuonepäästöt eivät kuitenkaan ole ainut vaikuttava tekijä, vaan otettaessa huomioon myös tarvittava kasvatusala ja kasvatuksesta aiheutuneet maankäytölliset muokkaukset, aletaan päästä suurempiin vertailuviin eroihin.

Työn lopulliset tulokset ovat luottamuksellista tietoa ja ne on poistettu julkisesta raportista.

Asiasanat: sirkkojen kasvatus, energiatehokkuus, päästöt, acheta domesticus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC Building Services

MYLLYNIEMI, TONI:

Maintaining the Indoor Conditions for a Cricket Farm and the Energy Efficiency of the Facility

Bachelor's thesis 72 pages, appendices 17 pages
December 2018

The purpose of this research was to study the environmental conditions required for raising house crickets (*Acheta Domesticus*), how to maintain them, what kind of pollution growth and growing develops and what are the costs. In Northern hemisphere there's very little activity or research now about cost effectiveness focused on raising house crickets. Conditions outside are very challenging at winter and it creates problems for cost effectiveness and profitability.

Most optimal growth temperature is around +30 °C with a range between +25 °C and +35 °C. The best possible level of relative humidity for growing is 60 %, but the possible fluctuation was comparably wide, between 80 %RH for the eggs and hatchlings and 40 %RH for the crickets nearing adulthood. The eggs remained especially strict with the moisture level and at too low levels they wouldn't hatch, but with every passing development phase, the sensitivity for the humidity level decreased and wasn't so critical anymore. A good limit for relative humidity indoors was 60 %, because going above 70 %RH the mould and bacterium starts to grow with the help of high temperature.

The need for heating energy and extra moisturization was directly comparable to the air tightness of the growing facility, the quality of the materials used for construction and how effectively the growth area was used. Crickets produce heat and moisture as they are growing up, which help especially during winter months in maintaining the environmental conditions. So, how efficiently one uses the growing area, the less electric energy needs to be bought. During summer in Finland, one doesn't usually come across a situation in where the conditions outside would be higher than required inside and so create problems with overheating and too high air humidity.

Carbon dioxide and other greenhouse gasses generated by the growing and growth were calculated at the end of this research and the results were promising, compared to the dominating pig and bovine farming. Greenhouse gasses generated can't be the only deciding factor, but one must also consider the needed growth space and the changes required for landscaping, that's when the differences really start to show.

The results of this research are confidential information and has been removed from the released publication.

Key words: cricket farming, energy efficiency, emissions, acheta domesticus

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	OLOSUHTEIDEN HALLINTA JA MALLINNUS	9
2.1	Ilma	9
2.1.1	Ilman käyttäytyminen.....	11
2.2	Lämpö ja häviöt	12
2.3	Kosteus.....	14
2.3.1	Kosteuden käyttäytyminen.....	14
2.4	IDA-ICE.....	16
3	KASVATETTAVA KOHDE.....	18
3.1	Kotisirkka (<i>Acheta domestica</i>).....	18
3.1.1	Lajin vaatimat kasvuolosuhteet.....	19
3.1.2	Olosuhteiden vaihtelun vaikutus kasvuun.....	19
3.2	Muita mahdollisia sirkkalajeja.....	20
4	MITATTAVAT KOHTEET	21
4.1	Kohde 1	21
4.1.1	Tilan lämmitysmuoto	22
4.1.2	Olosuhteiden ylläpito	22
4.2	Kohde 2.....	22
4.2.1	Tilan lämmitysmuoto	23
4.2.2	Olosuhteiden ylläpito	23
4.3	Kasvatusyksikkö	23
4.3.1	Olosuhteiden ylläpito per yksikkö	24
5	SAATUJEN MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELYÄ.....	26
5.1	Mittaustulosten vienti IDA-ICE ohjelmaan.....	26
5.2	Olosuhteiden mallinnusta IDA-ICE ohjelmalla.....	27
5.2.1	Kasvatettavien mallinnus simulointeihin.....	30
5.3	Mallin toimivuuden tarkastelu.....	36
6	ENERGIAN KULUTUKSEN PIENENTÄMINEN	38
6.1	Sirkkojen kuluttama energia per tuotettu kilo.....	38
6.2	Kasvatusyksikön muokkaus.....	39
6.2.1	Kasvatusyksikköjen muokkauksen vaikutus kulutukseen	41
6.3	Lämmityksen ja kostutuksen optimointi.....	42
6.4	Ilmanjakotavan optimointi.....	44
6.5	Muokkauksien jälkeinen kulutus	45
7	TUOTANNOSTA SYNTYVÄT PÄÄSTÖT.....	47
7.1	Kasvusta ja kehittämisestä syntyvät kasvihuonepäästöt.....	47

7.2 Päästöt suuremmassa kuvassa.....	48
POHDINTA JA LOPPUSANAT	50
LÄHTEET	54
LIITTEET	56
Liite 1. Mollier-diagrammit	56
Liite 2. Simuloitujen ja mitattujen arvojen vertailua	58
Liite 3. Simulointimallista saatu energian kulutus ja CO ₂ päästöt.....	61
Liite 4. Simuloitujen ja laskennallisten CO ₂ -päästöjen käsittelyä	65
Liite 5. Muokkauksien vaikutus lämmitysenergian kulutukseen.....	69

LYHENTEET JA TERMIT

CO ₂ -ekv	Hiilidioksidiekvivalentti, termillä tarkoitetaan muiden kasvi-huonepäästöjen muuttamista vastaamaan hiilidioksidin vastaavaa määrää ilmastoa kuormittavana kaasuna.
ppm	Parts per million, vastaa yhtä miljoonaosaa eli 0,0001 % pitoisuutta.
U-arvo	Lämmönläpäisykerroin $W/m^2 \cdot K$, kuvaa rakennusten rakenteissa lämpöliikkeen nopeutta neliömetrin alueella tietyllä lämpötilaerolla.
%RH	Relative humidity, suhteellinen kosteus, eli ilman sisältämän veden osuus prosentteina kylläisestä pitoisuudesta lämpötilariippuvaisena arvona.

1 JOHDANTO

Elämme tällä hetkellä murrosvaiheessa, maailman väestön kasvaessa ja elintilan pienen-
tyessä täytyy alkaa etsiä ratkaisuja tulevaisuuden ruoan saannin takaamiseksi. Nykyisel-
lään, lihan tuotanto proteiinin saannin tarpeisiin kuormittaa ympäristöä kiihtyvällä tah-
dilla, sen vaatiman suuren kasvatusalan ja kasvatuksesta syntyvien kasvihuonepäästöjen
takia. Väestö kasvaa jatkuvasti ja jo nykyisellään on jouduttu hyvää metsä- ja viljely-
maata muokata karjan kasvatuksen tarpeisiin. Karja kuitenkin vaatii kasvaakseen rehu-
viljaa ja tästä päästäänkin tämän tutkimuksen perimmäiseen lähtöpisteeseen. Kuinka pie-
nennämme kasvatuksesta aiheutuvia ympäristövaikutuksia, samalla vapauttaen nykyiset
karjalaitumet takaisin viljely- ja metsätalouden käyttöön?

Hyönteisten mahdollisuus uudeksi proteiinin lähteeksi voisi olla varteen otettava vaihto-
ehto. Tässä tutkimuksessa keskitytään kotisirkan (*Acheta Domesticus*) mahdollisuuksiin
toimia tulevaisuuden proteiininlähteenä. Tarkoituksena on selvittää, millaisissa tiloissa ja
minkälaisissa olosuhteissa kyseistä lajia on mahdollisuus kasvattaa. Tutkittavana on myös
lajin kasvusta ja kasvatuksesta syntyvät kasvihuonepäästöt. Pohjoisen kylmillä alueilla
kasvatusta ei nykyisellään vielä ole laajalti, lainsäädännön ja ilmaston karujen ulko-olo-
suhteiden vuoksi. Tutkimustietoa ja laajempaa kasvatustoimintaa löytyy suurimmaksi
osaksi vain lämpimistä maista, joissa kasvatuksen olosuhteiden hallinta ei vaadi suurem-
pia toimia ja sitä on mahdollista toteuttaa jopa ulkoilmassa. Työn tuloksena on tarkoitus
saada ajatuksia pohjoisen talviolosuhteiden vaatimista toimista ja selvittää, onko kasvat-
uskustannus- sekä energiatehokkaasti mahdollista.

Työn selvitys aloitetaan tutkimalla, millaiset olosuhteet sirkkojen kasvatukseen vaatii, miten
olosuhteiden ylläpito voidaan toteuttaa ja kuinka paljon lämpö- ja sähköenergiaa siihen
kuluu. Apuna tutkimuksessa käytetään kahta erikokoista ja tyylistä sirkkojen kasvatusta
harjoittavaa kasvatustilaa. Toinen on pientuotantoon soveltuva tila, jossa olosuhteiden
ylläpito ei vaatinut monimutkaisia laitteita ja säädettävyys oli suhteellisen helppoa. Toi-
nen kohteista on isompi ja massiivisempaan tuotantoon soveltuva kasvatustila, jossa
olosuhteiden ylläpitoon vaadittiin enemmän toimia, eikä säädettävyys ollut yhtä helppoa
kuin pienessä tilassa.

Olosuhteiden ylläpidolla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa lämpötilan, kosteuden ja ilman hiilidioksidipitoisuuden hallintaa. Sirkat tarvitsevat luonnollista kasvuympäristöään vastaavat olosuhteet kasvaakseen tehokkaasti, eli korkeaa lämpötilaa ja kosteustasapainoa, joka tuo omat haasteensa järjestelmien suunnittelulle ja olosuhteiden hallinnalle, varsinkin talviolosuhteissa. Kahden case-kohteen sisäolosuhteista saatuja mittaustuloksia hyödynnetään IDA-ICE ohjelmassa ja sen avulla mallinnetaan minkä tasoisia kustannuksia ja millaisia päästöjä tilojen olosuhteiden ylläpidosta syntyy. Ohjelmalla myös mallinnetaan mahdollisia parannusratkaisuja ja saatujen tuloksien perusteella vertaillaan muutosten kannattavuutta alkuperäiseen tilanteeseen.

Energiatehokkuuden parantamiseksi olosuhteiden hallinnassa, keskityttiin pääasiassa tilan olosuhteiden hallinnan järjestelmiin ja niiden tehokkuuteen. Tilan olosuhteet ovat tärkeä osa kasvatusta ja tarkastelussa otetaan huomioon myös vaikutukset kasvatusyksiköissä ja miten niitä voidaan mahdollisesti parantaa. Loppujen lopuksi kasvatusta tapahtuu kasvatusyksikön sisällä ja pelkän tilan olosuhteiden pitäminen optimina, voi joissain tapauksissa jopa lisätä kokonaisenergian kulutusta. Tutkielman edetessä selviää myös mahdollisia jatkotutkimusta vaativia osa-alueita, joilla kokonaiskuvaa olisi mahdollista laajentaa.

Tarkasteltujen mittauskohteiden, laskettujen ja mallinnettujen tulosten sekä eri tutkimuslähteiden päätelmien avulla tehdään lopuksi johtopäätöksiä sirkoista mahdollisena proteiinin lähteenä. Millaisia kustannuksia kasvatusolosuhteiden ylläpidosta syntyy sekä millaisia ja kuinka paljon kasvihuonepäästöjä kasvusta ja kasvatuksesta syntyy. Työn tärkein osa-alue oli selvittää sirkoista syntyvien kasvihuonepäästöjen määrä ja paljonko olisi mahdollista vaikuttaa ympäristölle aiheutuvaan päästökuormaan. Tuloksia verrataan tämän hetken vallitsevista lihan tuotantomuodoista aiheutuviin päästöihin, jolloin saadaan vertailukelpoisia argumentteja ja selvennystä hyönteisten mahdollisesta potentiaalista tulevaisuuden ruuan lähteenä.

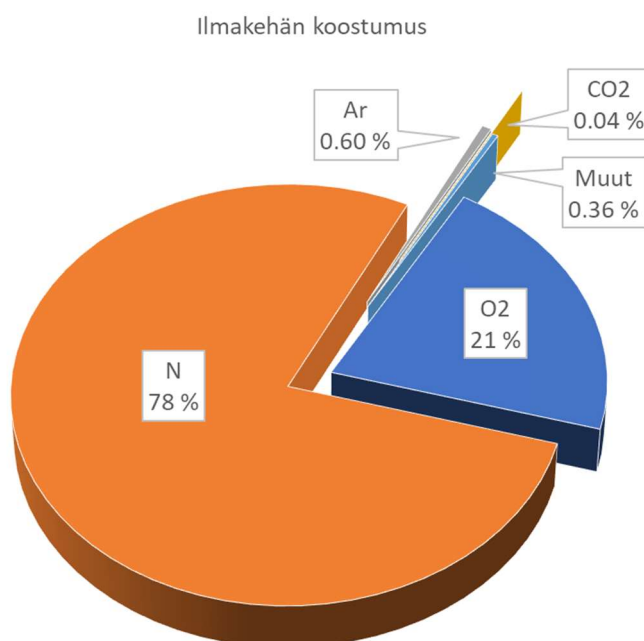
2 OLOSUHTEIDEN HALLINTA JA MALLINNUS

Kaikki elollinen tarvitsee tietyt olosuhteet selviytyäkseen ja kehittyäkseen. Lajien kehitys ja kannan kasvu on aina vaatinut tietyt otolliset olosuhteet, joka on evoluution kautta kehittynyt eri lajeilla erilaiseksi. Kuuma, kylmä, kostea tai kuiva, näiden yhdistelmistä on eri lajeille kehittynyt vaihtelevia luonnollisia kasvuympäristöjä. Koska eri alueilla vallitsevat olosuhteet pyrkivät aina tasapainotilaan, tarvitaan olosuhteiden hallintaa, haluttaessa muokata ja ylläpitää ympäröivästä ilmanalasta poikkeavaa olotilaa.

Olosuhteiden hallinnalla tässä tutkimuksessa tarkoitetaan sisäilman ja sen sisältämän kosteustasapainon, lämpötilan, sekä syntyvien päästöjen hallintaa ja muokkausta. Tutkimuksen kohteena olevien sirkkojen luonnollinen elinympäristö on suhteellisen kuuma ja kostea. Haluttaessa siirtää sirkkoja elinympäristön ulkopuolelle, täytyy muokata kasvuympäristön olosuhteita vastaamaan luonnollista elinympäristöä.

2.1 Ilma

Ilma on yksi elämän perusedellytyksistä sen sisältämän hapen takia. Suurin osa elollisista tarvitsee happea elämän ylläpitoon.



KUVA 1. Ilmakehän koostumus.

Kuivalla ilmalla tarkoitetaan kaasuseosta, mistä ilmakehä koostuu ja se sisältää 21% happea (O_2), 78 % typpeä (N), 0,6 % argonia (Ar), 0,04 % hiilidioksidia (CO_2) ja loput pieniä määriä eri kaasuja (kuva 1). Ilma sisältää myös aina jonkin verran vettä höyryn muodossa ja tällöin puhutaan kosteasta ilmasta. Ilmassa olevalla vesihöyryllä on suuri merkitys käsiteltäessä energiaa, koska vesihöyryn energiasisältö on paljon korkeampi verrattuna kuivan ilman sisältämään energiaan. Vesihöyryn korkea energiasisältö johtuu veden olosuhteen muutoksen energiatarpeesta. Kun vesi höyrystyy, tarvitaan 2260 kJ/kg energiaa ja puolestaan veden tiivistyessä vapautuu saman verran energiaa.

Ilmassa olevan kosteuden määrää voidaan kuvata kahdella tavalla, joko ilman suhteellisenä kosteutena %RH tai ilman absoluuttisena kosteutena kg/kg. Suhteellinen kosteus on sidottuna ilman lämpötilaan ja sen mahdollisuuteen varastoida vettä, eli prosentuaalinen osuus siitä kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä maksimiarvosta. Absoluuttinen kosteus on puolestaan paljon tarkempi kuvaamaan vesihöyryn määrää, koska se ei ole sidonnainen lämpötilaan, vaan on tarkka massamäärä, ilman sisältämästä vesihöyryn määrästä kiloina kilossa ilmaa. Ilman olosuhteiden ymmärtämiseen ja prosessien suunnitteluun käytetään Mollier-diagrammia, jota kutsutaan myös h-x-piirroksiksi. Mollier-diagrammi löytyy liitteestä 1 (kuva 11) ja sen esittely on hyvin kuvattu Esa Sandbergin kirjassa ”Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät”. Liitteen 1 kuvassa 12 on esitetty mahdollinen tarpeen tilanne, joka selventää vähän syytä siihen, miksi ilmanvaihto kannattaisi mitoittaa tarkasti. Ulkoilman ja kasvatustilaan halutun sisäilman välillä on suuri entalpiaero, joka johtaa helposti suuriin lämpöenergian tarpeisiin.

- Ilman absoluuttinen kosteus on vaaka-akselilla, kg vettä / kg kuiva ilmaa. Ilman tilan siirtyessä akselissa vasemmalle, poistetaan ilmasta vettä ja sen siirtyessä oikealle, lisätään ilmaan vettä.
- Kuivan ilman lämpötila °C, joka on lämpömittareissa oleva lukema, löytyy pystyakselilta.
- Ilman entalpia löytyy vino-asteikolta, kJ/kg. Tällä kuvataan ilman lämpöenergiasisältöä, joka on kuivan ilman lämpötilan ja sen sisältämän vesihöyryn summa tietyllä mittaushetkellä.
- Ilman kyllästyskäyrä on kuvattuna exponentiaalisena käyränä ja se näyttää pisteet, jossa ilma on kylläistä ja paljonko missäkin lämpötilassa on kosteuden maksimimäärä.

- Suhteelliselle kosteudelle löytyy prosentuaaliset käyrät 10 % välein. Jokainen käyrä kertoo ilman kosteuden prosentuaalisen osapaineen kyllästyspaineesta.

(Esa Sandberg 2016, 85)

2.1.1 Ilman käyttäytyminen

Ilma on kaasujen seos, joka liikkuu paine-erojen mukaan ja noudattaa luonnonlakeja. Ideaalikaasuille on olemassa ideaalikaasulaki

$$pV = nRT \quad (2.1)$$

(p) on ilmanpaine, Pa (Pascal).

(V) on alueen ilmatilavuus, m^3 (kuutiometri).

(n) on ainemäärä mooleina, mol (mooli).

(R) on yleinen kaasuvakio, $R = 8,3145 \text{ J/mol}\cdot\text{K} = 0,08314 \text{ bar}\cdot\text{dm}^3/\text{mol}\cdot\text{K} = 8,314 \text{ kPa}\cdot\text{dm}^3/\text{mol K}$.

(T) on ilman lämpötila, $^{\circ}\text{C}$ tai K (Celsiusaste / Kelvin).

Ilman sisältämät kaasut eivät kuitenkaan ole ideaalikaasuja, vaan lain avulla voidaan päätellä ja arvioida suurpiirteisesti kaasujen käyttäytymistä. Ideaalikaasulakia on mahdollista käyttää, kun lämpötilat ja paine ovat suhteellisen pienet ja vaihtelut eivät ole radikaaleja. Avogadron laki auttaa kuvaamaan kaasujen käyttäytymistä paremmin tutkimuksen aiheena olevassa tilanteessa

$$\frac{V}{n} = \text{vakio} \quad (2.2)$$

ja tästä ideaalikaasulakia johtamalla päästään muotoon

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1 \cdot n_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2 \cdot n_2} = \text{vakio} \quad (2.3)$$

Tämän perusteella kaasut pyrkivät aina tasapainotilaan. Kun otetaan vielä huomioon kaava 2.2, voidaan todeta, että tilavuuden ja ainemäärän osamäärän ollessa vakio, vaikuttaa lopputulemaan vain lämpötila ja paine. Jos kahdessa eri tilassa olevilla kaasuilla on eri olosuhteet, ne pyrkivät tasapainotilaan. Tätä muutosta voidaan hidastaa valitsemalla ja rakentamalla ”esteitä” kaasujen liikkeen tielle, esimerkiksi talojen rakenteet.

Tämän seurauksena tarvitaan toimia ilman liikkeen hallitsemiseksi ja haluttujen olosuhteiden ylläpidon mahdollistamiseksi. Kun halutaan luoda epätasapainotilanne kahden tilan välille, kuten rakennetun tilan ja ulkoilman välille, täytyy miettiä ratkaisuja millä sisätilaan saataisiin luotua ja ylläpidettyä eri olosuhteita kuin ulkoilmalla. Tämän toteuttamiseen voidaan käyttää mm. jäähdyttimiä, lämmittämiä, ilman kostuttimia, ilman kuivaimia tai näiden yhdistelmiä.

Koska elolliset, jotka tarvitsevat ja kuluttavat happea, tuottavat myös eri kaasujen yhdisteitä kasvaessaan ja hengittäessään, tarvitsevat ne aina myös lisää happea ulkoilmasta ja tuotettujen kaasujen poistoa tilasta. Tästä syystä tiloihin on suunniteltava ilmanvaihto, johon on helppo yhdistää edellä mainittuja ilman olosuhteiden muokkaukseen tarvittavia laitteita.

2.2 Lämpö ja häviöt

Pääasiallinen lämmityksen tarve syntyy suureksi osaksi lämpöhäviöistä. Kasvatustilan lämpöhäviöt syntyvät mm. rakenteiden läpi johtumalla siirtyvästä lämmöstä, vuotoilmasta sekä ilmanvaihdosta. Lämmönsiirtyminen tapahtuu aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan, kuten tapahtuu kaasujenkin kanssa. Lämmön siirtymismuotoina puhutaan konvektiosta, johtumisesta sekä lämpösäteilystä. Näistä tärkeimpänä tekijänä hukkalämmölle on johtuminen, koska suurin osa lämmöstä johtuu rakenteiden kautta (Olli Seppänen ja Matti Seppänen 1996, 60).

Johtumista tapahtuu kiinteässä aineessa, joka on läpinäkymätöntä. Lämpöenergian siirtymisnopeus on suoraan verrannollinen lämpötilaeroon ja siirtopinnan pinta-alaan. Jokaisella aineella on oma lämmönjohtamiskykynsä, joka on yleisesti riippuvainen massasta. Kevyemmät aineet johtavat lämpöä huonommin kuin raskaat, eli kaasuilla on pienempi lämmönjohtokyky verrattuna esimerkiksi metalleihin. Konvektiolla tarkoitetaan lämmön

siirtymistä jonkin virtaavan aineen välityksellä, kuten ilma tai vesi. Jos kaasun tai nesteen ja kiinteän aineen välillä vallitsee lämpötilaero, siirtyy lämpöä konvektiolla suuremmasta pienempään. Konvektiosta puhuttaessa käytetään kahta eri ilmausta, luonnollinen ja pakotettu konvektio. Luonnollisen konvektion käsitettä käytetään silloin, kuin pinnan virtaus syntyy lämpötilaerojen vaikutuksesta. Pakotettu konvektio on jonkin ulkoisen voiman aikaansaama tehostus, kuten tuulen, puhaltimen tai pumpun virtausta lisäävä vaikutus. Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota tapahtuu koko ajan ja aina, riippumattomana väliaineesta. Kun lämpösäteily osuu toiseen kappaleeseen, absorboituu se osaksi tai kokonaan ja täten siirtää energiaa kappaleesta toiseen (Olli Seppänen ja Matti Seppänen 1996, 61-63).

Lämmönläpäisykerroin, U-arvo, on keskeisin tekijä laskettaessa ja määritettäessä rakennuksen lämpöhäviöitä. U-arvo saadaan rakenteen lämmönvastuksen käänteisluvun avulla ja lämmönvastus materiaalien lämmönjohtumiskertoimien käänteislukujen ja pintavastuksien avulla.

$$U - \text{arvo} = \frac{1}{R} \rightarrow R = r_s + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n} + r_u \quad (2.4)$$

(U-arvo) on rakenteen lämmönläpäisykerroin, $W/m^2 \cdot K$.

(R) on rakenteen kokonaislämmönvastus, $m^2 \cdot K/W$.

(r_s) on sisäpinnan pinnanvastus, $m^2 \cdot K/W$.

(l_n) on eristekerroksen paksuus, m.

(λ_n) on eristekerroksen materiaalin lämmönjohtavuus, $W/m \cdot K$.

(r_u) on ulkopinnan pinnanvastus, $m^2 \cdot K/W$.

Äkkiseltään voisi ajatella, että miksi ei eristetä paksuilla kerroksilla ja saada lämpöhäviöt kokonaan poistettua. Kaavasta 2.4 nähdään kuitenkin tällaisen tilanteen olevan taloudellisesti melkein mahdoton, koska lämmönvastus saadaan jakamalla materiaalin paksuuden lämmönjohtavuudella. Tällaisesta laskutoimituksesta muodostuu murtofunktiio, joka laskee alussa rajusti mutta tietyn pisteen jälkeen lasku hidastuu huomattavasti ja lopulta melkein tasaantuu, koskaan saavuttamatta nollapistettä (Olli Seppänen ja Matti Seppänen 1996, 65-66).

2.3 Kosteus

Vesi, kuten happikin, on yksi elämän edellytys kasvamiselle ja kehittymiselle. Kaikki elollinen koostuu osaksi vedestä ja sen saanti on välttämätöntä elämän jatkumiseksi. Ilmassa oleva vesi on kaasumaisessa muodossa, joten sitä ei voi nähdä vaikka sitä ilmassa aina on. Ilman suhteellisen kosteuden noustessa 100 prosenttiin, alkaa vesihöyry tiivistyä ja silloin ilmassa on nähtävissä vettä, jolloin se ei ole enää kaasumaisessa muodossa. Ilmassa olevan kosteuden määrä vaikuttaa osaltaan siihen, kuinka paljon vettä täytyy saada muilla keinoilla. Kun hengittää, ilman mukana saadaan myös vesihöyryä ja keho käyttää sitä hyödyksi pitäessään omaa kosteustasapainoaan yllä.

2.3.1 Kosteuden käyttäytyminen

Vesihöyry on ilman tavoin myös kaasu, joten se käyttäytyy ilman tavoin noudattaen samoja luonnonlakeja. Kosteus käyttäytyy kuitenkin eritavoin kuin ilma, tarkasteltaessa sen siirtymistä rakenteissa. Rakenteissa kosteus siirtyy vesihöyryn osapaine-eron aiheuttaman diffuusion avulla ja sen siirtymisnopeus riippuu rakenteen vesihöyrynvastuskertoimesta Z_p ($\text{m}^2\text{sPa/kg}$) (RIL 107-2012, 29). Vesihöyrynvastuskertoimia yleisimmille rakennusmateriaaleille löytyy edellä mainitusta RIL-käsikirjasta 107-2012. Kertoimien avulla pystytään laskemaan seinämateriaaleille vesihöyrynläpäisevyys ja tätä kautta rakenteen läpi kulkeutuva vesivirta.

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \rightarrow \delta_p = \frac{d}{Z_p} \quad (2.5)$$

$$g = \delta_p \cdot \frac{p_{v1} - p_{v2}}{d}, p_{v1} > p_{v2}$$

(d) on materiaalin paksuus, m

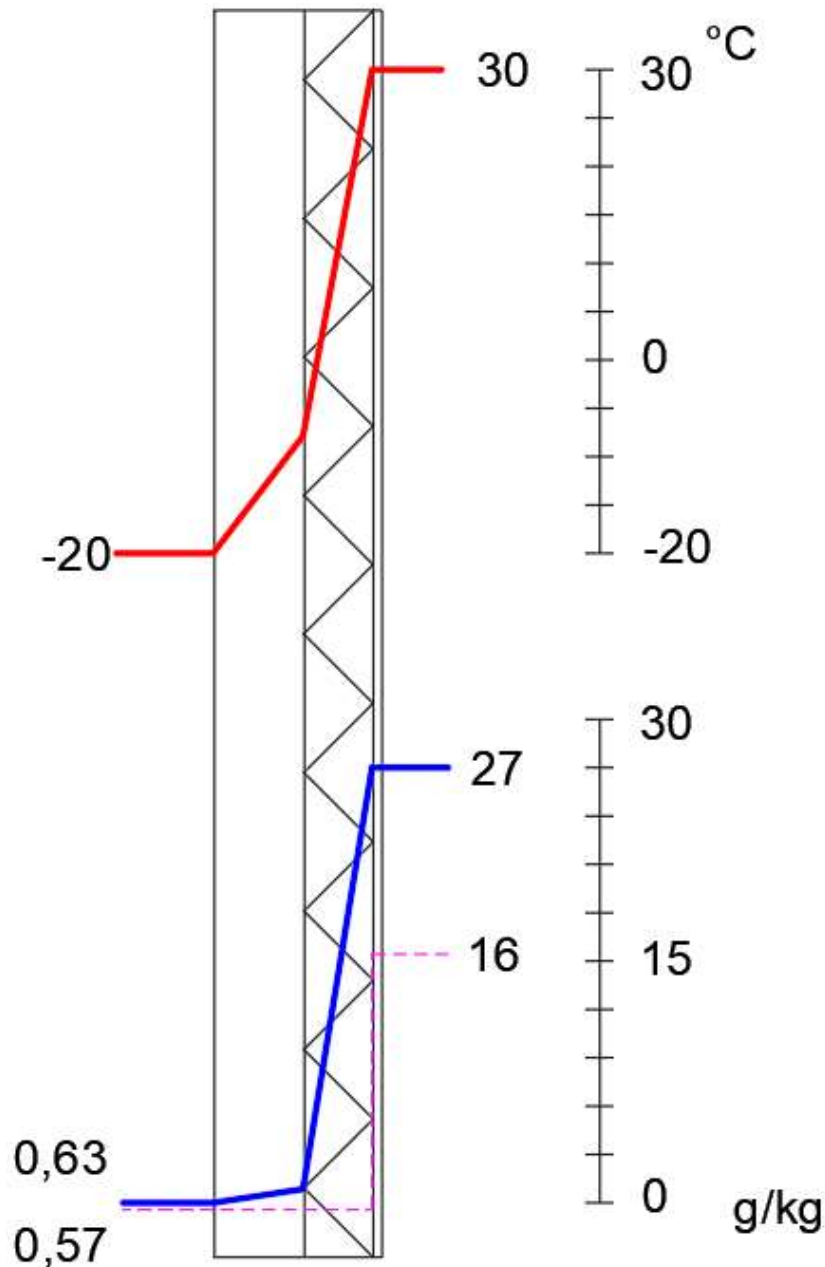
(δ_p) on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, $\text{kg/m}^2\text{sPa}$

(p_{vn}) on vesihöyryn osapaine materiaalin eri puolilla, Pa

(g) on kosteusvirran tiheys materiaalin läpi, $\text{kg/m}^2\text{s}$

(Rafnet-ryhmä 2004, 27)

Sisäpuolisten rakenteiden väliin asennetaan erilaisia höyrysulkuja, joiden vesihöyryn vastus on suuri. Tällä ratkaisulla estetään kosteuden pakenemista rakenteiden läpi ja vähennetään kosteusvaurion syntymisen riskiä rakenteissa. Kosteusvauriota rakenteissa voi syntyä, jos vesihöyryn osapaine ylittää kyllästyspaineen rakenteen sisällä. Eristemateriaalit vastustavat lämpöliikettä ja täten eri materiaalikerrosten välissä on eri lämpötila. Jos lämpötila laskee alle kastepistelämpötilan rakenteen sisällä, alkaa vesi tiivistyä materiaalikerrokseen. Höyrysuluilla voidaan laskea rakenteiden läpi menevän vesihöyryn osapainetta ja näin välttää kastepiste, kuten kuvasta 2 on mahdollista nähdä.



KUVA 2. Kosteuden käyttäytyminen rakenteessa johon on asennettu höyrysulku. Ylemmässä on lämpötilan muutos rakennekerrosten välillä. Alemmassa on sinisellä esitetty kastepiste rakenteessa, suoraan suhteessa lämpötilan muutoksiin, ja katkoviivalla höyrysulun vaikutus kosteuden liikkeeseen.

Riippuen rakenteiden materiaaleista ja rakentamisen huolellisuudesta, on myös mahdollista, että syntyy energiaa kuluttava ”kehä” joka pitää rakenteen kosteana ja kuluttaa tilan lämpöenergiaa jatkuvasti. Materiaalin ollessa huokoista, tapahtuu jatkuvaa diffuusiota, höyrystymistä, kondensoitumista sekä kapillaarista imua. Eristeen lämpimällä ja kylmällä puolella veden höyryn paine on eri lämpötilan vaikutuksesta. Kylmälle puolelle on mahdollista tapahtua tiivistymistä ja tällöin sisäpuolelta siirtyvä vesihöyry vie mukanaan lämpöenergiaa. Tiivistymisen jälkeen vesi siirtyy kapillaarisen imun avulla takaisin lämpimälle puolelle höyrystyäkseen uudelleen, jolloin samat ilmiöt jatkavat toistumistaan alusta (Olli Seppänen ja Matti Seppänen 1996, 81).

Elollisten koostuessa osaksi vedestä, voidaan päätellä, että myös kehoon sitoutunut vesi haluaa tasapainoon ympäristön kanssa. Tästä johtuu veden tarpeen lisääntyminen ympäristön kosteuden laskiessa. Osakseen siitä syystä, että ulos hengitettäessä poistuu vesihöyryä kehosta. Epätasapainotilan eron kasvaessa kosteuden haihtuminen kehosta myös nopeutuu. Moni laji myös käyttää kehon sisältämää vettä hyväkseen lämmön säätelyssä hikoilun avulla, joka puolestaan lisääntyy lämpötilan noustessa.

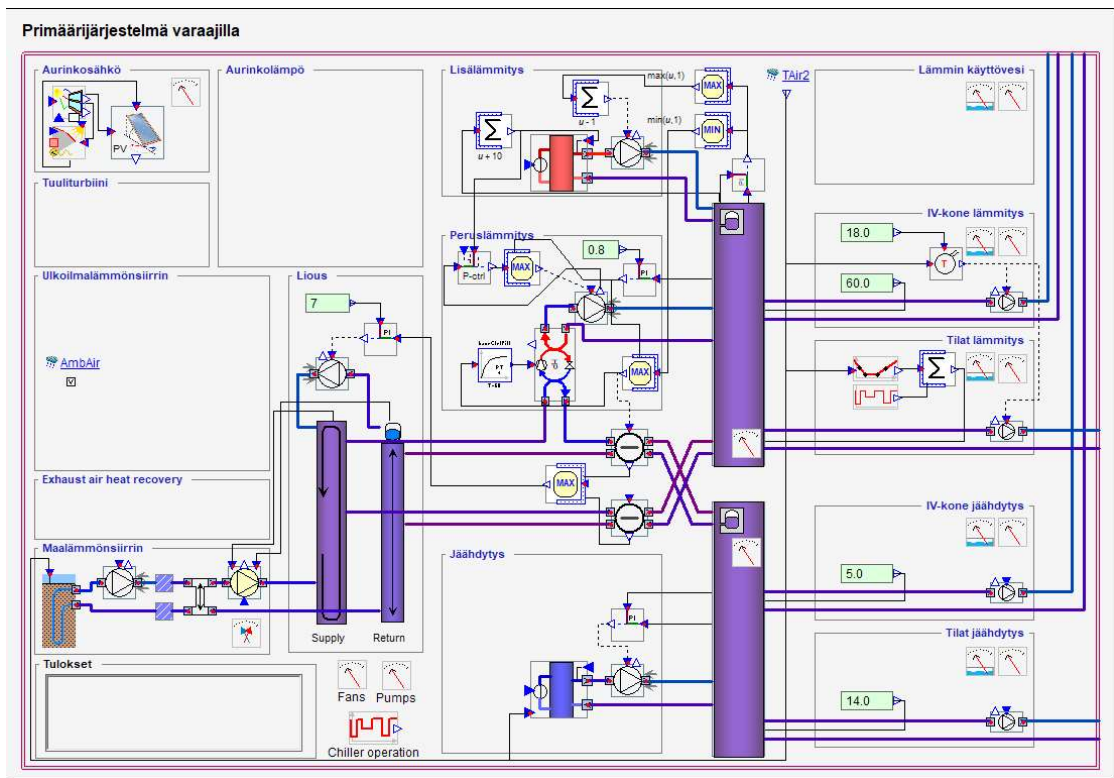
2.4 IDA-ICE

IDA-ICE on Equan kehittämä matemaattinen laskentaohjelma dynaamisten olosuhteiden simuloinnille ja mahdollistaa rakennusten käytön ja energiantehokkuuden optimoinnin. Simuloinneista saadaan tulosteena ulos esimerkiksi tarkasteltavan rakennuksen lämpötase ja energian kulutustiedot. Ohjelma käyttää säätilojen simuloimiseen luotettavien mittauslaitosten havaintoja ja tuloksia. Ohjelmassa on mahdollista luoda ja muokata yksinkertaisista malleista monimutkaisiin erikoismalleihin. Mahdollisuutena on tuoda arkkitehdin luoma malli simulointeja varten IFC-muodossa ja tarkentaa sitä tarvittavilta osin, tai rakennus ja sen tilat voidaan myös luoda kokonaan käyttäen mukana tulevia tilatyökaluja (Equa 2018).

IDA:n käyttöliittymä helpottaa ohjelmaan syötettävien arvojen asettamista oikeille ja tarpeenmukaisille muuttujille. Talotekniikan laitteiden toiminta-arvoja tai tilojen käyttöaikatauluja on esimerkiksi mahdollista asettaa vastaamaan todellista käyttöä, jotta tulok-

sista saataisiin tarkempia ja totuudenmukaisempia. Asetetut arvot ohjelma muuttaa matemaattiseen muotoon ja algoritmien avulla laskee olosuhteiden muutoksia ulkoilmassa, tiloissa ja sen järjestelmissä.

Mahdollisuus löytyy myös mallinuksissa tarvittavien erilaisten lisäosien lataukseen ja hyödyntämiseen malleissa. Ohjelman lisäosilla voidaan simuloida esimerkiksi päivänvaloa, maalämmön lämpökaivojen lämpökäyttötymistä, korkean tason virtausteknisiä simuloiteja (CFD) jne. (Equa 2018). Rakennuksessa olevia tai sinne suunniteltuja laitteita sekä järjestelmiä on mahdollista lisäillä ja muokkaila (kuva 3), joka mahdollistaa muutosten simuloinnin ja vaikutuksen energian kulutukseen tai sisäolosuhteiden muutoksiin.



KUVA 3. Primäärijärjestelmien säätökenttä.

3 KASVATETTAVA KOHDE

Tämän työn pääaiheena on keskittyä kotisirkkan (*Acheta domesticus*) kasvatukseen, sen vaatimiin kasvuolosuhteisiin, kasvatuksen aiheuttamiin kustannuksiin sekä kasvatuksesta aiheutuneisiin päästöihin. Monet tutkimukset ovat perehtyneet tämän hetkiseen tilanteeseen eläinperäisen proteiinin kasvatuksesta, kuten ”Edible insects: future prospects for food and feed security”, joka on kokoelmateos monelta tutkijalta. Voidaan todeta, että sika- ja nautakarjan kasvatusta ei ole ympäristörasitteiden kannalta toimiva ratkaisu nykypäivän kasvavassa yhteiskunnassa. Proteiinin ja ruuan tarve kasvaa vauhdilla ja on löydettävä vähemmän ympäristöä rasittavia vaihtoehtoja ruuansainnin turvaamiseksi myös tulevaisuudessa (Arnold van Huis, Joost Van Itterbeeck, Harmke Klunder, Esther Mertens, Afton Halloran, Giulia Muir sekä Paul Vantomme 2013).

3.1 Kotisirkka (*Acheta domesticus*)

Kotisirkka on väriltään rusehtava ja kasvaa noin 16-21 mm pituiseksi. Pää on väriltään vaalean ruskea ja siinä on kolme mustaa raitaa. Keho on myös väriltään vaalean ruskea ja siitä löytyy tumman ruskeita ja mustia kohtia.



KUVA 4. Kotisirkka, *Acheta domesticus*, naaras (Ray Lemke 2008).

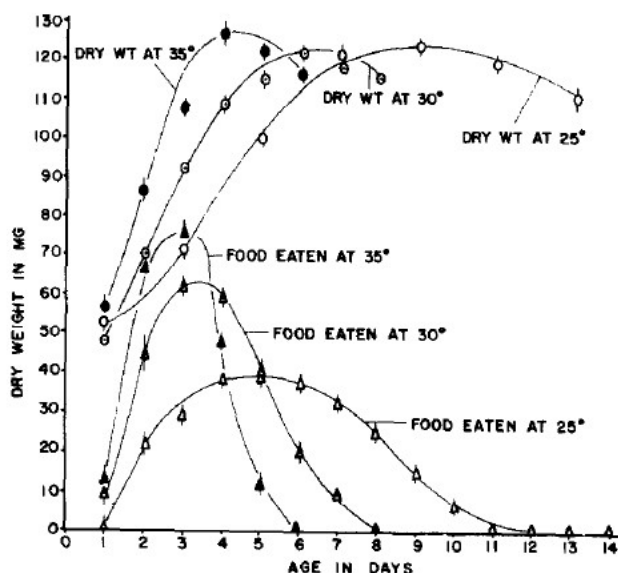
Urokset ja naaraat näyttävät muuten samalta, mutta naaraalla on noin 12 mm pituinen ”munienasetin” peräpäässä (kuva 4). Munienasetin on tumman ruskea ja siitä lähtee kaksi muuta uloketta. Uroksilla taas puolestaan on vähän isommat sekä selvemmin erottuvat peräpään tuntosarvet ja vain ne pitävät ääntä sirityksellään (Robin McLeod 2005).

3.1.1 Lajin vaatimat kasvuolosuhteet

Kotisirikkaa on kasvatettu monia vuosia itämaissa ja kasvatuksen vaatimista olosuhteista on jo paljon kokemus- sekä tutkimusperäistä tietoa saatavilla. Kotisirikan luonnollinen kasvuympäristö on suhteellisen lämmin ja kostea, muttei kuitenkaan märkä. Vaaditut kasvuolosuhteet eivät niinkään ole se oleellinen ja pulmallinen asia, vaan se miten ne saadaan ylläpidettyä tasaisena ympäröivien olosuhteiden muuttuessa ja pyrkiessä tasapainoon kasvutilan kanssa. Kotisirikan kasvatukselle otollisin lämpötila on yhden lähteen mukaan +28 °C ja suhteellinen ilmankosteus 50-60 % välillä (Arnold van Huis and Jeffery K. Tomberlin 2017, 280).

3.1.2 Olosuhteiden vaihtelun vaikutus kasvuun

Kasvuolosuhteet vaikuttavat kotisirikan kasvuun, mutta lopputulokseen niillä on pienempi vaikutus kuin kasvuun vaadittavaan aikaan (Richard M. Roe, C. W. Clifford and J. P. Woodring 1980, 643). Tutkimuksessa selvitettiin lämpötilan vaikutusta toukkien viimeisen vaiheen kasvuun +25 – 35 °C välisellä alueella. Tutkimuksessa olevasta kuvaajasta voidaan nähdä, kuinka nopeasti +35 °C kasvatetut sirkat saavuttivat maksimipainonsa, verrattuna +25 tai +30 °C lämpötilassa (kuvaaja 1). Suurta vaikutusta lopulliseen massaan lämpötilalla ei ollut, mutta sen saavuttamiseen tarvittu aika pidentyi alemmilla lämpötiloilla. Kasvuun vaadittu aika lyheni huomattavasti lämpötilan noustessa +25 asteesta +30 asteeseen ja vain hieman nostettaessa +30 asteesta +35 asteeseen.



KUVAAJA 1. Kumulatiivinen painon nousu ja ruoan kulutus viimeisen vaiheen sirkoilla (Richard M. Roe ym. 1980, 641).

Samaisesta aiheesta on tehty monta tutkimusta ja kaikkien tulokset viittaavat samaan suuntaan. Bowling C. C. vuonna 1955 tutki kotisirikkojen biologiaa tutkimuksessaan ”The biology of the house cricket *Acheta Domesticus*” ja tuli siihen lopputulemaan, että +35 °C kasvatetut sirkat vaativat lyhimmän ajan kehittyäkseen. Ghouri A. S. K. ja McFarlane J. E. vuonna 1958 julkaisussaan ”Observation on the development of crickets” huomasivat, että lämpötilan ylittäessä +35 °C selviytyvien sirkkojen osuus alkoi laskea.

3.2 Muita mahdollisia sirkkalajeja

Heinäsirikkojen (acridids, lyhyt sarviset heinäsirkat) kanssa on myös tehty koekasvatuksia ja tutkittu niiden vaatimia kasvuolosuhteita. Heinäsirkoilla on kotisirikkaan verrattuna vaativammat kasvuolosuhteet, lämpötila-alueen ollessa +30-35 °C ja ilman suhteellisen kosteuden 70-80% paikkeilla (Huis & Tomberlin 2017, 129). Nämä kasvuolosuhteet luovat homeelle ja bakteereille otollisen kasvuympäristön, joten hygienian ylläpito nousee erityisen tärkeäksi.

Kotisirikan sukulainen trooppinen kotisirikka (*Grylloides sigillatus*) on myös mahdollinen vaihtoehto kasvatettavaksi kohteeksi. Sen vaatimat kasvuolosuhteet vastaavat kotisirikan vaatimia olosuhteita. Erona näiden kahden välillä on lopputuotteen koostumus, käytös sekä ruokavalio (Huis & Tomberlin 2017, 274).

4 MITATTAVAT KOHTEET

Jotta saataisiin tutkimukseen tarkempia ja totuudenmukaisempia tuloksia, otettiin mukaan olosuhteiden mittausta kahdessa erityyillisessä kohteessa. Toinen on pientuotantoon sopiva, jossa mahdolliset muutokset ja sen vaikutukset prosessiin tullaan suorittamaan, sekä toinen suurempi kohde, joka sopii paremmin teolliseen ja suuremman mittakaavan tuotantoon. Molempiin kohteisiin vietiin mittarit ulkoilman sekä sisäilman olosuhteiden seurantaan varten. Mittaukseen valittiin Netatmon *Smart Home Weather Station* järjestelmää, jonka mittareiden avulla saatiin tutkimuksessa tarvittavia arvoja mitattua.

4.1 Kohde 1

Ensimmäinen kohde sijaitsee Kokemäellä ja kasvatustilana toimii pieni koppi hallirakennuksen sisällä. Kopin olosuhteita on helpompi hallita ja muutokset näkyvät nopeammin pienen sisätilavuuden vuoksi. Tämä kuitenkin aiheuttaa pieniä ongelmia tilaan kulkemisen kanssa, koska muutokset tapahtuvat nopeasti, kun kulkuovi avataan ja kosteus sekä lämpötila alkavat virrata ulos.

Kasvatustila on rakennettu vanhan hirsihallin sisään ja rakenteina kopissa on käytetty perinteisiä rakenneratkaisuja, jotka ovat kuvattuna taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Kasvatustilan rakenteet.

Rakenteet ja niiden paksuudet	Lueteltu rakenne ulkoa sisäänpäin
Seinät	130 mm hirsi, 100 villa, höyrinsulku, 12,5 mm kipsilevy
Katto	300 mm selluvilla, höyrinsulku, 12,5 mm kipsilevy
Lattia	50 mm styrox-levy, 100 valettu betoni, 30 mm uretaanilevy, höyrinsulku, 12,5 mm kipsilevy
Ovi	26 mm puulauta, 28 mm uretaanilevy, höyrinsulku, 12,5 mm kipsilevy

4.1.1 Tilan lämmitysmuoto

Tilan lämmitykseen käytetään öljytäytteistä sähköpatteria, jonka virrankulutusta seurataan sähkönkulutusmittarilla. Öljytäytteinen patteri säilyttää lämpönsä kauemmin ja luovuttaa sen tasaisemmin, kuin tavallinen sähköpatteri, jolloin sen ei tarvitse napsua päälle ja pois jatkuvasti. Valaistus sekä sirkat tuottavat myös lämpökuormaa, joka auttaa tilan lämpötilan ylläpidossa. Valaisimina tilassa käytettiin loisteputkia, jotka luovuttavat tilaan kohtalaisen määrän lämpöenergiaa. Sirkat taas puolestaan tuottavat lämpöä liikkeessaan ja kasvaessaan, kuten kaikki elolliset.

4.1.2 Olosuhteiden ylläpito

Olosuhteiden ylläpidossa otetaan huomioon tilan lämmitys, kostutus sekä ilmanvaihto. Lämmityksessä käytetään patteria, joka pitää lämpötilan tasaisena termostaatin avulla. Tilan kostutukseen käytetään ultraäänikostutinta, joka värähtelee niin korkealla taajuudella että vesi muuttuu mikroskooppisen pieniksi hiukkasiksi. Hiukkaset käyttävät ilmassa olevaa lämpöenergiaa olomuodon muutokseen höyryksi ja tilan kosteustason nostoon. Ilmanvaihto on toteutettu painovoimaisena. Ulkoseinän puolella on lattian rajassa tuloilmalle 125 mm halkaisijaltaan oleva ilmanvaihtokanava ja katossa toisella puolella tilaa on poistoilmalle saman kokoinen ilmanvaihtokanava. Painovoimainen ilmanvaihto toimii paine-erojen avulla.

4.2 Kohde 2

Toinen mitattavista kohteista sijaitsee Kurikassa ja sirkkojen kasvatus tapahtuu vanhan sikalan tiloissa, jotka on restauroitu uuden käyttötarkoituksen vaatimiksi. Tila tässä kohteessa on isompi ja olosuhteet vaikeammin hallittavissa kuin ensimmäisessä. Tämä kohde oli pääasiassa referenssikohteena ja seurantaa tehtiin, jotta voitaisiin tuloksia vertailla objektiivisesti, sekä saada parempi käsitys siitä kuinka vaikea olosuhteita todella on pitää yllä isossa mittakaavassa.

4.2.1 Tilan lämmitysmuoto

Tila lämpenee lämpökattilan avulla ja lämmitys tapahtuu vesikiertoisella järjestelmällä lämpöputkien avulla. Järjestelmänä on käytetty hyväksi vanhan kasvatustilan tekniikkaa, jolloin investointikustannukset aloittaessa saatiin pidettyä kohtuullisina. Vesikiertoisessa järjestelmässä on se hyvä puoli, että säädettävyys on helppoa ja kohtuullisen tarkkaa, jolloin välttyään perinteiseltä laitteistoa rasittavalta on-off säädöltä ja lämpötila pysyy tasaisempana. Säättöä kun voidaan ohjata joko lämpökattilan teholla, vedenkierron nopeudella tai kehittyneemmissä sovelluksissa sekoitusventtiilin avulla. Kasvatettavana tilassa on suuri määrä sirkkoja, joista myös syntyy paljon lämpöenergiaa kasvun aikana, joka on talviolosuhteissa hyvä lisä, mutta saattaa kesällä luoda ylikuumenemisen riskin lämpimänä kautena.

4.2.2 Olosuhteiden ylläpito

Olosuhteiden ylläpidossa on samoja hallittavia elementtejä kuin 1. kohteessa. Lämpökattilassa polttoaineesta saadaan lämpöenergiaa, jolla putkistossa kiertävä vesi lämpiää ja kuljettaa tuotetun lämpöenergian kasvatustilaan. Ilmanvaihto tilassa hoituu kattoluukkuja ja ovea avaamalla. Kosteuden ylläpito hoidetaan kastelemalla koko kasvatusalueen betonilattia siivouksen ja pesun yhteydessä. Lattialle jäänyt vesi alkaa haihtua käyttäen tilassa olevaa lämpöenergiaa hyväkseen ja kosteus tilassa nousee. Tässä työmenetelmässä on kuitenkin omat puutteensa, kuten jatkuva lattian kastelun tarve ja suuri höyrystymiseen tarvittava lämpöenergian lattiasta, joka osaltaan hukkaa lämpöä maahan.

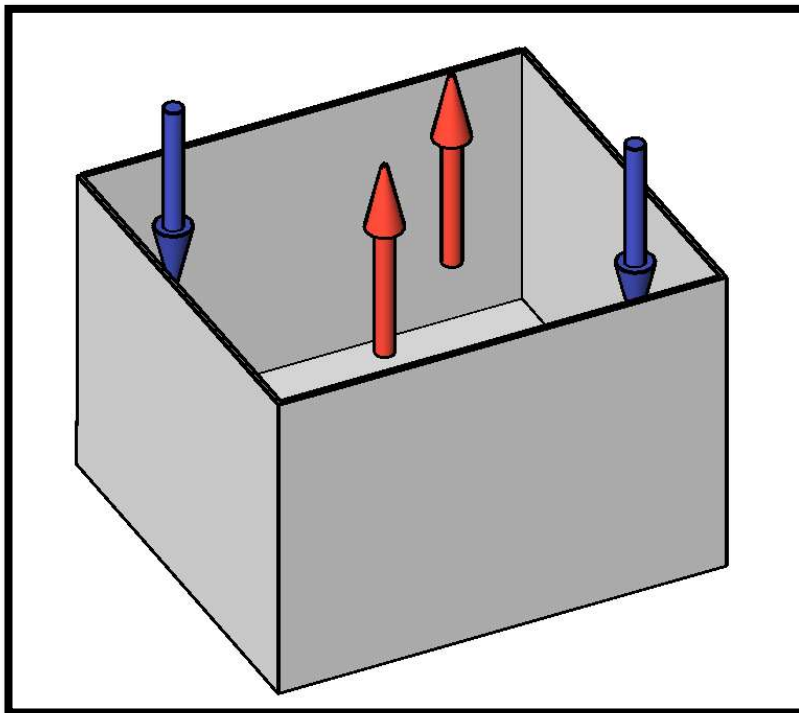
4.3 Kasvatusyksikkö

Sirkkojen kasvatukseen voidaan periaatteessa käyttää mitä vain laatikon tapaista, josta ne eivät pääse helpolla pakenemaan, kuten muovilla vuorattuja pahvilaatikoita, muovilaatikoita tai vaikka betonista viemärirenkasta (Huis & Tomberlin 2017, 277). Yleisesti käytetään erikokoisia muovilaatikoita niiden kestävyys, helpon puhtaanapidon ja huokean hinnan takia. Laatikoiden pohjalle asetellaan yleensä kananmunakennoja kasvatuspinta-alan lisäämiseksi ja samalla luodaan sirkoille mahdollisuus kiipeilyyn.

Kasvuvaiheen aikana on mahdollista pitää kasvatustilat avoimina ilman kantta, joka helpottaa huoltotoimenpiteitä ja ilman vaihtumista. Viimeisen kasvuvaiheen aikana sirkoille kasvaa siivet ja ne karkaavat helposti ja nopeasti kasvuympäristöstään, jos laatikkoa ei peitetä kannella. Kansi ei saa kuitenkaan olla täysin suljettu, jotta laatikon ilma vaihtuu. Tästä syystä laatikon kantena käytetään yleisesti tiheään punottua verkkoa, joka on asennettu kanteen leikattuun aukkoon tai isommissa laatikoissa kehykseen asennettua verkkoa.

4.3.1 Olosuhteiden ylläpito per yksikkö

Kasvatustilassa olosuhteet tasoittuvat lähelle samaa tasoa kasvatustilan kanssa. Tilaan tuodaan kostutusta ja lämpöä, joka epätasapainotilan vallitessa virtaa pienemmän energian ja sisällön suuntaan. Ongelma kuitenkin tässä tilanteessa syntyy helposti siitä, että olosuhde-erot kasvatustilan sisällä ja ulkopuolella ovat yleensä aika marginaalisia, jolloin yksikön ilman vaihtuvuus on hidasta. Sirkat tarvitsevat kasvaessaan happea ja tuottavat hiilidioksidia sekä muita kaasuja, lämpöä ja kosteutta. Sirkoista syntynyt lämpöenergia normaalisti nostaa laatikossa vallitsevaa lämpötilaa kasvatustilaa korkeammalle ja tätä kautta ilman vaihtuvuus nopeutuu (kuva 5).



KUVA 5. Kasvatustilan ilman vaihtuminen tapahtuu suurimmaksi osaksi tilan ja kasvatustilan lämpötilaerojen avulla.

Koska kasvatustilassa koitetaan ylläpitää noin +30 °C lämpötilaa ja 60 % suhteellista kosteutta, on homeitiöille otolliset kasvuolosuhteet lähellä. Jos kasvatusyksikön ilma ei vaihdu tarpeenmukaisesti, voi sen sisään syntyä sirkkojen kasvuille epäedulliset olosuhteet. Kun lämpö ja kosteus saattaa pysytellä pohjalla ja kulmissa, luo se haluttua korkeamman kosteustasapainon ja täten edesauttaa homeen sekä bakteerien kasvua. Tällaisissa tilanteissa joissa homeitiöt alkavat lisääntyä, voi kasvatettavalle kohteelle syntyä kasvua hidastava ja kuolleisuutta lisäävä rasite. Homeella on paljon orgaanista kasvualustaa yksikön sisällä ja otollisissa tapauksissa voi itiöitä alkaa kehittyä, jos kosteustasapaino nousee yli 70 % (RIL 250 2011, 154).

Ilman vaihtuessa passiivisesti voi myös kehittyä sellainen tilanne, jossa hiilidioksidin tuotto ylittää ilman vaihtuvuuden mukanaan vievän kaasuvirran ja pitoisuudet alkavat kohota. Tutkimuksia joissa olisi otettu kantaa hiilidioksidin vaikutuksesta kasvuun ei löytenyt sirkkojen kohdalla, mutta muista kasvatettavista hyönteisistä löytyi muutama. Esimerkiksi Aloisio Coelho junior ja José R. P. Parra tutkivat nousseiden hiilidioksidipitoisuuksien vaikutusta jauhomatoihin (*Anagasta kuehniella*). Mielenkiintoisin kohta tutkimuksessa oli hiilidioksidin vaikutuksella munintaan. Hiilidioksidipitoisuuden ollessa alle 1500 ppm, tuottivat naaraat keskimäärin 22 % enemmän munia kuin yli 1500 ppm pitoisuuksissa. Tästä suuremmissa pitoisuuksissa munien määrässä ei näkynyt merkittävää eroa mittausten 1763 ppm ja 4425 ppm välillä (Aloisio Coelho junior and José R. P. Parra 2012, 826-827). Kasvun nopeuteen tai elinaikaan ei kohonneilla hiilidioksidipitoisuuksilla tutkimuksen pohjalta näyttänyt olevan vaikutusta.

5 SAATUJEN MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELYÄ

Mittaus tulosten saamiseen ja rekisteröimiseen kohteista käytettiin Netatmon *Smart Home Weather Station* järjestelmää. Seurannan kohteena oli sisäolosuhteet ja ulko-olosuhteet. Ulko-olosuhteita tarvittiin IDA-ICE mallinnusohjelman säätietoja varten, jotta mallinuksen kohde saataisiin mahdollisimman tarkasti vastaamaan todellista. Sisäolosuhteiden mitattuja arvoja käytettiin mallinnuksesta saatujen tulosten vertailukohteena.

Mittausyksiköt ovat sylinterin mallisia, halkaisijaltaan 45 mm sekä korkeudeltaan 155 mm (sisäyksikkö) ja 105 mm (ulkoyksikkö). Mittareiden mittaustarkkuudet ovat esiteltyinä taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Netatmo mittareiden ominaisuudet (Netatmo, tekninen esite).

	Sisäyksikkö	Ulkoyksikkö
Lämpötilan mittausalue	0 – +50 ± 0,3 °C	-40 – +65 ± 0,3 °C
Kosteuden mittausalue	0 – 100 ± 3 %RH	0 – 100 ± 3 %RH
Hiilidioksidin mittausalue	0 – 5000 ± 50 ppm tai 5 %	Ei mittausta
Ilmanpaineen mittausalue	260 – 1260 ± 1 mbar	Ei mittausta
Äänen mittausalue	35 – 120 dB	Ei mittausta

Sisäyksikössä on langaton lähetin WiFi-verkkoa varten, jonka avulla tiedot pystytään siirtämään ja tallentamaan pilvipalveluun. Palvelusta on helppo seurata mittausdataa ja mitattujen tulosten muunto sekä käyttöön tuonti Excel-tilukon muodossa saatiin palvelusta.

5.1 Mittaus tulosten vienti IDA-ICE ohjelmaan

IDA käyttää virallisia säätiedostoja olosuhteiden simulointeihin, mutta siinä on myös mahdollista käyttää omia mitattuja säätietoja simulointien suorittamiseen. Käytössä ollut mittausyksikkö mittasi ulkoilmasta vain lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. IDA-ICE tarvitsee kuitenkin simuloinneissa tietoja tuulesta ja auringosta, joten tuuli- ja aurinkotietoina käytettiin lähimmän mittausaseman dataa. Tässä kohtaa tehtiin oletus, ettei mittausaseman ja todellisen sijainnin välillä ole niin suurta eroa, että se vaikuttaisi radikaalisti

tutkimuksen alla oleviin kohteisiin. Mittauksesta saatiin tulokset aikavälille 26.2.2018 – 30.9.2018 (217 päivää), joten simulointien aikavälinä tullaan käyttämään kyseistä aikaväliä tulosten vertailtavuuden kannalta.

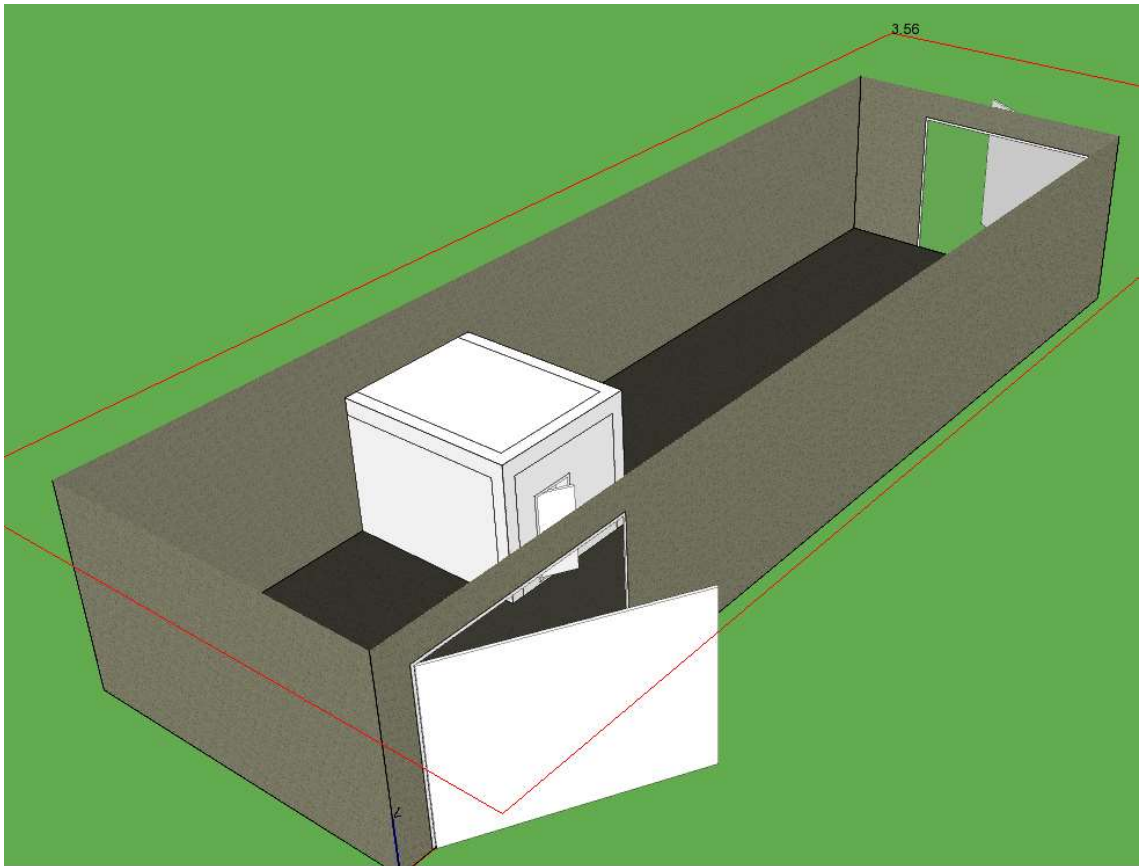
5.2 Olosuhteiden mallinnusta IDA-ICE ohjelmalla

Ennen mallinnuksen aloitusta, täytyi rakentaa kasvatustilasta malli haastattelun ja mittailujen perusteella. Mallinnuksessa käytettiin kohdetta numero 1, sen pienen koon ja helpomman hallittavuuden takia. Kohteesta numero 2 saatujen tulosten pohjalta voidaan todeta, että olosuhteiden ylläpito on ollut haasteellista tilassa ja siellä on enemmän keskittytty kasvatusyksiköiden olosuhteiden hallintaan.

Uusi projektitiedosto avattiin IDA-ICE ohjelmaan ja ensimmäiseksi aseteltiin rakenteiden oletusarvot, jotka lueteltiin kohdassa 4.1. Seuraavaksi määriteltiin kohteen maantieteellisen sijainnin koordinaatit ja aseteltiin oma säätiedosto oletukseksi. Rakennus suunnattiin ilmansuunnassa oikeaan ja aseteltiin seinien painekertoimet tuulelle. Vuotoilma, eli rakenteiden ilmaläpäisevyys, oli aluksi täysi arvoitus ja siihen arvattiin luku $1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2 \text{ ulkovaippa})$, paine-erolla 50 Pa.

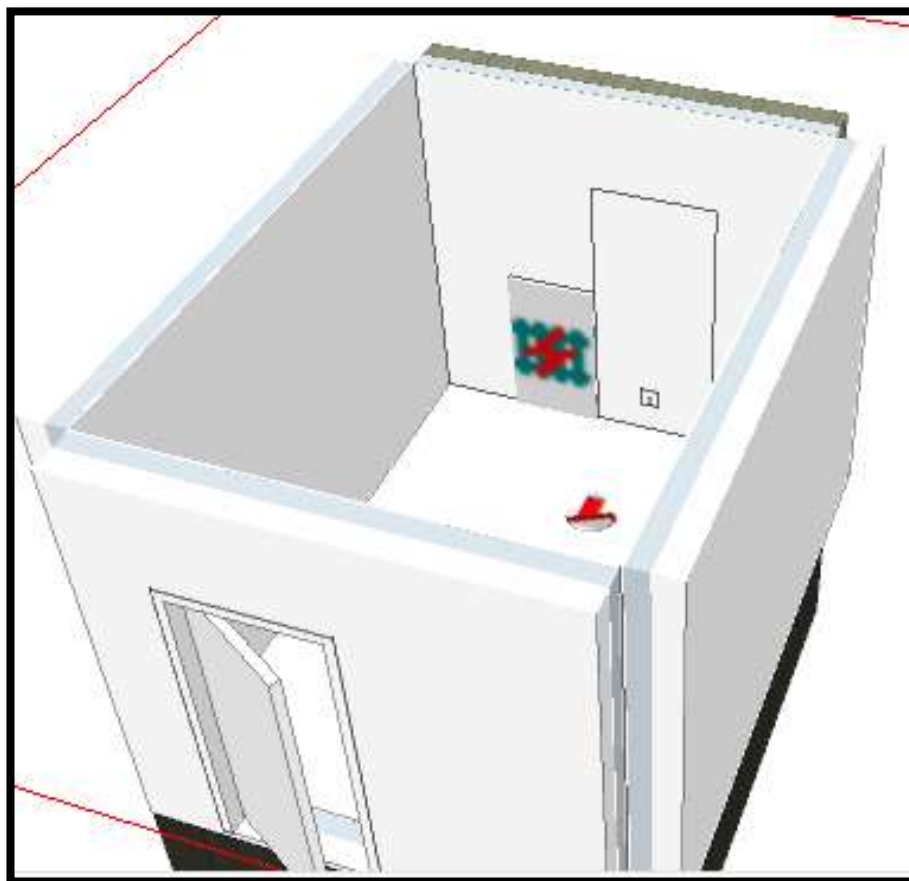
Kohteessa 1 oleva kasvatustila mallinnettiin käyttäen apuna ohjelman tilojenluontityökalua. Aluksi täytyi luoda hallin ulkoraamit ja sen sisälle tila pituusmittausten pohjalta (kuva 6). Tilaan koitettiin aluksi mallintaa myös kasvatuslaatikoita, mutta onnistuminen oli suhteellisen hankalaa. IDA ei näytä olevan suunniteltu mikrotason mallinnukseen, jolloin tilojen alat ovat alle neliömetrin luokkaa. Kasvatusyksikön mallinnus lopulta onnistui tilaan ja sen kanssa oli mahdollista tehdä mallinnus. Tästä saatuja simulointituloksia käsitellään myöhemmin tutkielmassa luvussa 6.2.

Kasvatustilaan aseteltiin valaistuksen tiedot ja ilmankostutus simuloimaan luotiin kierätysilmakone, johon liitettiin absorptiokostutin 100 % hyötysuhteella. Todellisuudessa absorptio ei ole koskaan näin tehokas, mutta tilassa oli ultraäänikostutin, joka periaatteessa puhaltaa hienojakoista vesihöyryä tilaan. Ohjelmasta ei löytynyt mahdollisuutta tällaiselle laitteelle, joten soveltamalla saatiin toimiva laite, jonka tulosarvot verrattuna todelliseen ultraäänikostuttimeen, olivat kohtalaisen lähellä todellista.



KUVA 6. Kasvatustila mallinnettuna hallirakennuksen sisään.

Tilan ilmanvaihto on painovoiman avulla toimiva ja paine-erojen avulla virtaava. Ulkoilmaa vasten oli vain yksi seinä, jolle öljytäytteinen patteri oli sijoitettuna. Ulkoseinällä oli myös korvausilma-aukko, josta ilmanvaihdon ilmavirta tuli sisään. Patteri oli sijoitettu tämän aukon eteen, jolloin sisään tulevaa ilmaa saadaan lämmitettyä tehokkaasti. Haastattelujen perusteella selvisi, että kasvattaja oli täyttänyt korvausilmareian villalla talven kylminä kuukausina. Tällä saatiin vältettyä turha lämmön sekä kosteuden karkaaminen tilasta ja näin ollen pidettyä energiankulutus ja olosuhteet aisoissa. Tällaista tilannetta oli kohtalaisen vaikea saada toteutettua, joten aukkoa simuloimaan luotiin minikokoinen ovi, joka vastasi pinta-alaltaan korvausilma-aukkoa. Ovelle asetettiin aikataulu ja ilmanvastuskerroin, jolloin talven simulointeihin oli mahdollista saada suurempi ilmanvastus ja lämmön eristävyys ja kesälle pienempi vastus ilman eristettä. Kuvassa 7 kasvatustila ja sinne asetellut laitteet ovat selvemmin nähtävissä.



KUVA 7. Kasvatustilan malli lähemmin tarkasteltuna.

Seinien materiaalien ja niiden paksuuksien perusteella aseteltiin kasvatustilalle oikeat seinämateriaalit. IDA laski automaattisesti seinien, lattian, katon ja oven U-arvot sen perusteella, mitä materiaalia ja kuinka paksu kerros oli missäkin välissä (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Rakenteiden U-arvot ja neliöalat kasvatustilassa.

Rakenteiden U-arvot	U-arvo	Määrä m ²
Seinät	0,290 W/m ² K	22,25 m ² josta 4,98 m ² ulkoilmaa vasten
Lattia	0,470 W/m ² K	6,99 m ²
Katto	0,176 W/m ² K	6,99 m ²
Ovi	0,782 W/m ² K	1,28 m ²

Rakenteiden lisäksi täytyi myös ottaa huomioon liitoskohtien vaikutus lämpöhäviöön (kuva 8). Liitokset eivät ole saman materiaalin saumattomia jatkumoina, joten lämpö pääsee eri vastuksen arvolla liikkumaan sauman kohdassa. Liitoksen lämmönjohtumisen

arvo riippuu rakentamisen huolellisuudesta ja liitoksissa käytetyistä tekniikoista sekä tiivistämateriaaleista.



KUVA 8. Kylmäsiltojen asetusarvot eri kulmatyypeille.

5.2.1 Kasvatettavien mallinnus simulointeihin

Kasvatettavia sirkkoja simuloimaan luotiin tilaan ”laitteita”, joille oli mahdollista antaa erilaisia asetusarvoja kuormista. Todellisuudessa arvot poikkeavat asetelluista, koska aktiivisuustasoa ja kasvatuserien suuruutta on mahdotonta arvioida tarkasti. Asetusarvot aseteltiin eri tutkimuslähteiden tutkimustietojen perusteella ja tutkittavana oli lämmön-, kosteuden- sekä hiilidioksidintuotto.

Lämpökuorman tuoton arvioinnin kanssa lähdettiin liikkeelle tutkimalla sirkkojen kuluttamaa ruuan määrää kasvaessaan. Tutkimuksien avulla arvioitiin, paljonko kulutetusta energiasta kului kasvuun ja kuinka paljon aktiivisuuteen, joka vaikuttaa syntyvään lämpökuormaan. J. P. Woodring, C. W. Clifford ja B R. Beckman olivat tutkineet julkaisussaan ”Food utilization and metabolic efficiency in larval and adult house crickets” (1979), miten sirkat syövät viimeisen kasvuvaiheen aikana sekä aikuistuttuaan. Tutkimus oli

laaja-alainen ja tuloksia tuli hiilihydraattien ja proteiinien imeytymisestä ruuan määrään ja kehon kykyyn hyödyntää ravintoa. Tutkimuksen tulosten perusteella kasvavat sirkat käyttävät hyödynnetystä energiasta noin 32 % päivittäiseen energiatarpeeseen ja noin 28 % kasvamiseen. Täysikasvuissa sirkoilla vastaavat lukemat olivat painottuneet päivittäiseen energian tarpeeseen 41 % ja 25 % kasvamiseen (J. P. Woodring ym. 1979, 908).

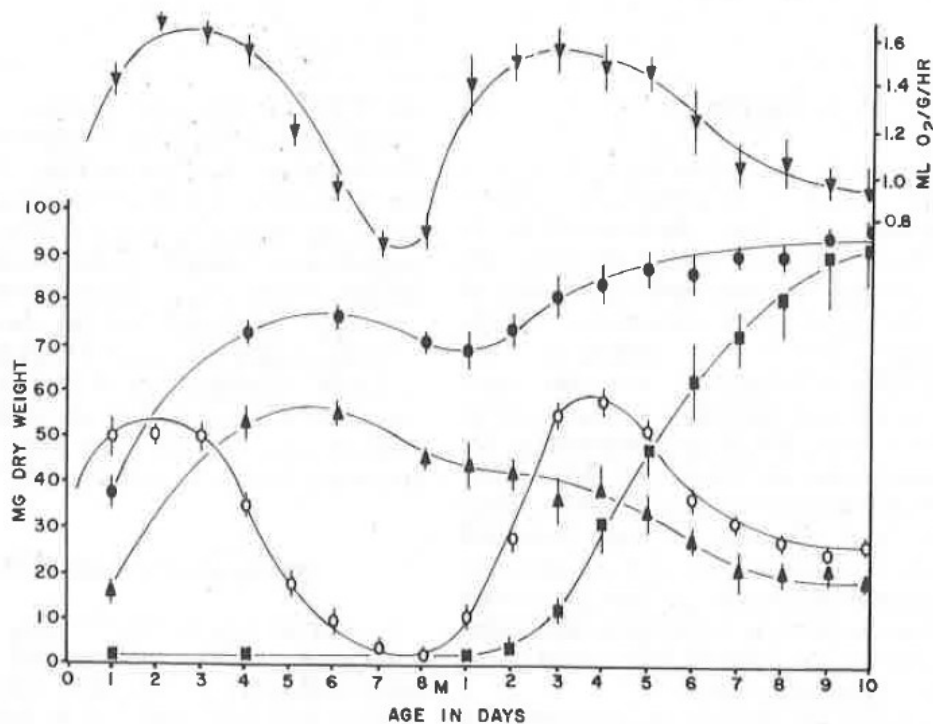
Woodring ja Clifford julkaisivat vuotta myöhemmin uuden tutkielman yhdessä Richard M. Roen kanssa “The effect of temperature on feeding, growth, and metabolism during the last larval stadium of the female house cricket, *Acheta Domesticus*” (1980). Tässä pääaiheena oli tutkia lämpötilan vaikutusta kehon aineenvaihduntaan, kasvuun ja ruuan kulutukseen viimeisessä kasvuvaiheessa. Tutkimustuloksia on kolmelta eri lämpötila-alueelta, +25 °C, +30 °C sekä +35 °C ja näistä vertailtiin +30 °C alueelta saatuja tuloksia, koska edellinen tutkimus oli toteutettu tässä lämpötilassa. Molemmissa tutkimuksissa oli todettu aineenvaihdunnan tehokkuuden olevan 42 % kasvavilla sirkoilla, mutta tässä tutkimuksessa kasvamiseen kului 30 % hyödynnetystä energiasta (Richard M. Roe, C. W. Clifford and J. P. Woodring 1980, 641). Yhden sirkan ruuan kulutus (218 mg) ja ulosteen määrä (65 mg) täsmäsivät myös tutkimusten kesken. Pieni ero voi hyvinkin johtua monesta eri syystä, mutta eron ollessa pieni voidaan olettaa saatujen tulosten olevan oikean suuntaisia.

Simulointikohteeseen nämä tulokset saatiin käännettyä haastattelemalla kasvattajaa ja saatiin selville viimeiseen kahdeksan kasvupäivän, eli viimeisen vaiheen, aikana annostellun ruuan määräksi keskimäärin 210 g per päivä kasvatusyksikköä kohden. Ruokana käytetty rehuseos ei ollut tarkasti tiedossa, joten useiden eri rehuseosten sisällön tutkimisen jälkeen voidaan todeta, että keskiarvoisesti rehuseosten energiasisällössä on 11 MJ/kg muuntokelpoista energiaa. Tästä laskien päästään 2,31 MJ päivittäiseen energian tarpeeseen viimeisen kasvuvaiheen sirkoille per kasvatusyksikkö. Lämpökuormaa selvitettäessä täytyy tulos vielä eritellä sekuntipohjaiseksi, jotta saadaan selville teho.

$$\frac{2,31 \frac{\text{MJ}}{\text{d}} \cdot 1000 \frac{\text{kJ}}{\text{MJ}} \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{kJ}}}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{d}}} = 26,7361 \dots \frac{\text{J}}{\text{s}} \cdot 31 \% \approx 8,2894 \text{ W} \quad (5.1)$$

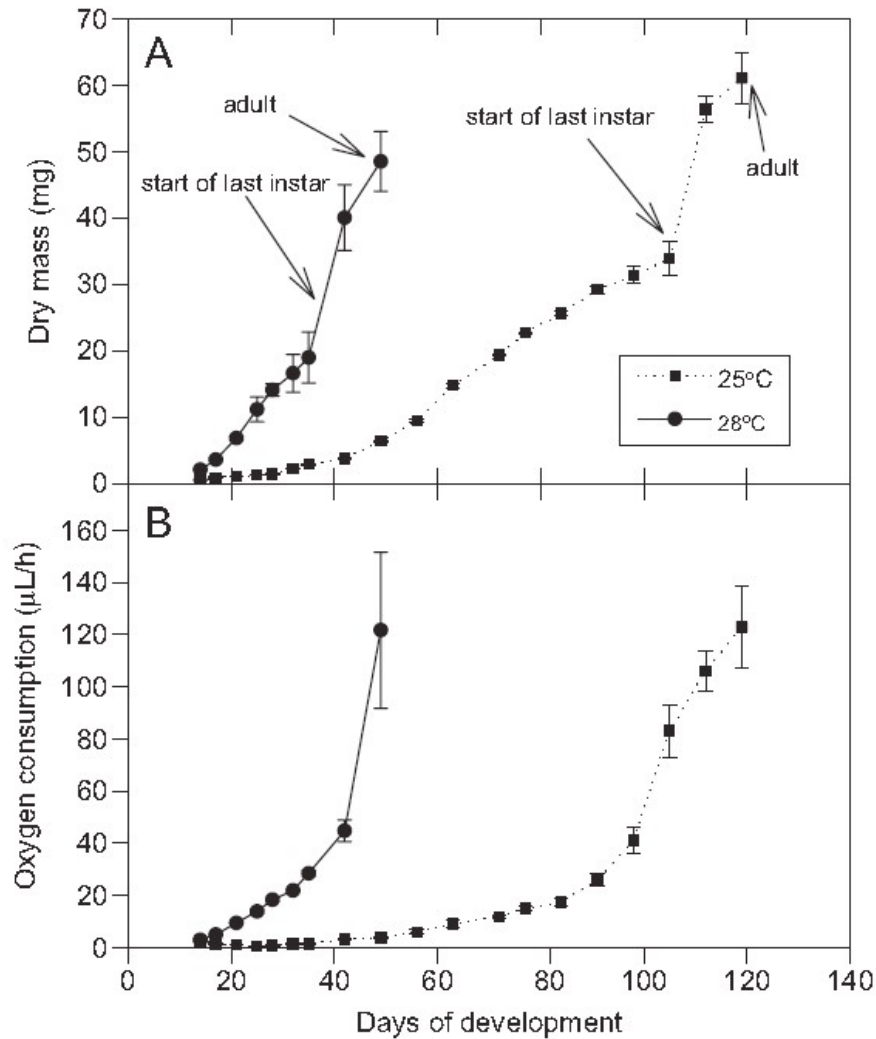
Ottamalla tuloksesta päivittäiseen energiantarpeeseen kuluva tutkimustulosten keskiarvo 31 %, saadaan tulokseksi 8,2894 W per kasvatusyksikkö.

Kasvaminen tapahtuu monessa vaiheessa ja jokaisessa vaiheessa kulutus on tietenkin eri, koska lähtökohtana on neulanpään kokoinen toukka, josta kasvaa noin 20 mm kokoinen sirkka. Tätä eroa lähdettiin selvittämään hapenkulutuksen kautta. Ruuan hajottaminen käyttökelpoiseksi energiaksi tarvitsee mm. happea avuksi ja ajatuksena oli tarkastella yhteyttä hapenkulutuksen ja energian saannin välillä. J. P. Woodring ym. (1979) olivat tutkimuksessaan sisällyttäneet kuvaajan hapen- ja ruuan kulutuksesta (kuvaaja 2).



KUVAAJA 2. Ruuan- ja hapenkulutus verrattuna toisiinsa. Kuvaajassa ruuan kulutus on kuvattuna valkoisilla palloilla ja hapen kulutus kärki alaspäin olevilla kolmioilla (J. P. Woodring ym. 1979, 904).

Tässä kuvaajassa oli selvä yhtäläisyys näiden kahden välillä, kun ruuan kulutus laski, laski myös hapen kulutus samassa suhteessa. David T. Booth ja Kirsty Kiddel tutkimuksessaan ”Temperature and the energetics of development in the house cricket (*Acheta Domesticus*)” (2017) olivat sisällyttäneet myös kuvaajan, jossa oli kuvattuna kehon massan nousu ja hapen kulutus (kuvaaja 3).



KUVAAJA 3. Sirkkojen painon nousu ja hapenkulutus (David T. Booth and Kirsty Kiddel 2007, 952).

Näillä oli samanlainen yhtäläisyys kuin ruuan ja hapen kulutuksen suhteella. Samaa vauhtia, kun massaa tuli lisää, kasvoi myös hapenkulutus. Kuvaajassa oli hyvin myös kuvattuna kasvun eksponentiaalisuus. Suurin harppaus massan suhteen tapahtui juuri tuon viimeisen kasvuvaiheen aikana. Tästä saatiin mahdollisuus arvioida myös alkukasvun vaiheiden kulutuksia ja kuvaajia tulkitsemalla oletetaan kulutuksen pienentyvän ensin yhteen kolmasosaan, sitten yhteen neljäsosaan ja ensimmäisen vaiheen olevan yksi kahdeksasosa viimeisen vaiheen arvoista.

Sirkoista haihtuu nestettä, kuten ihmisistäkin, lämmönsäätelyn helpottamiseksi. Haihtuvan kosteuden selvityksessä käytettiin apuna tutkimustietoa ja kasvattajan antamia anostelumääriä kurkuille, joita syömällä sirkat saivat tarvitsemansa veden. Sirkkojen kulltamalle vesimäärällä päivässä saatiin arvoja kahdesta tutkimuksesta. Ensimmäisessä veden kulutuksen keskiarvona oli 83 mg/sirkka/päivä (Richard M. Roe ym. 1980, 642) ja

toisessa mitattuna kehosta poistuneen veden määränä noin 55 mg/sirkka/päivä (Neil F Hadley ja Michael Quinlan, 1982, 344).

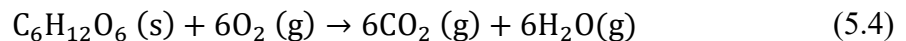
Kurkkuja viimeisen vaiheen sirkat söivät keskimäärin 180 g päivässä. Kurkun vesipitoisuus on noin 96 %, joten päivän annoksessa oli 172,8 g vettä. Kasvatuserien keskimääräinen koko oli 940 g ja sirkan painon oletettiin olevan yleinen 0,4 g täysikasvuaisena, joten erän suuruus oli keskimäärin noin 2350 sirkkaa. Jakamalla kurkun sisältämä vesimäärä, muodostuu tutkituille kohteille noin 74 mg/sirkka/päivä saantiannos. Tämä asetuu hyvin tutkimustulosten arvojen väliin, jolloin voidaan saada valideja arvoja simuloinneista käyttäen veden haihtumisarvona saadun tuloksen ja tutkimustulosten keskiarvoa 71 mg/sirkka·d.

$$\frac{71 \frac{\text{mg}}{\text{sirkka} \cdot \text{d}} \cdot 2350 \text{ sirkkaa}}{24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{d}}} = \frac{1,93113 \frac{\text{mg}}{\text{s}}}{1000 \frac{\text{mg}}{\text{g}} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} \approx 1,93 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (5.2)$$

Hiilidioksidia syntyy uloshengityksessä, kun keho on käyttänyt happea hyväksi ruuan sulatuksessa, eli energian muuttamisessa kehon tarvitsemaan muotoon. Ruuaksi käytetyssä rehussa on runsaasti hiilihydraatteja, koska siitä on nopein ja helpoin saada kehon hyväksikäyttämää energiaa. Seoksessa on tietenkin myös rasvaa, proteiinia ja erilaisia mineraaleja sekä hivenaineita. Rehuseoksissa olevat hiilihydraatit ovat pääasiassa viljojen sisältämää tärkkelystä, jonka ruuansulatuselimistö pilkkoo hydrolyysissä glukoosiksi.

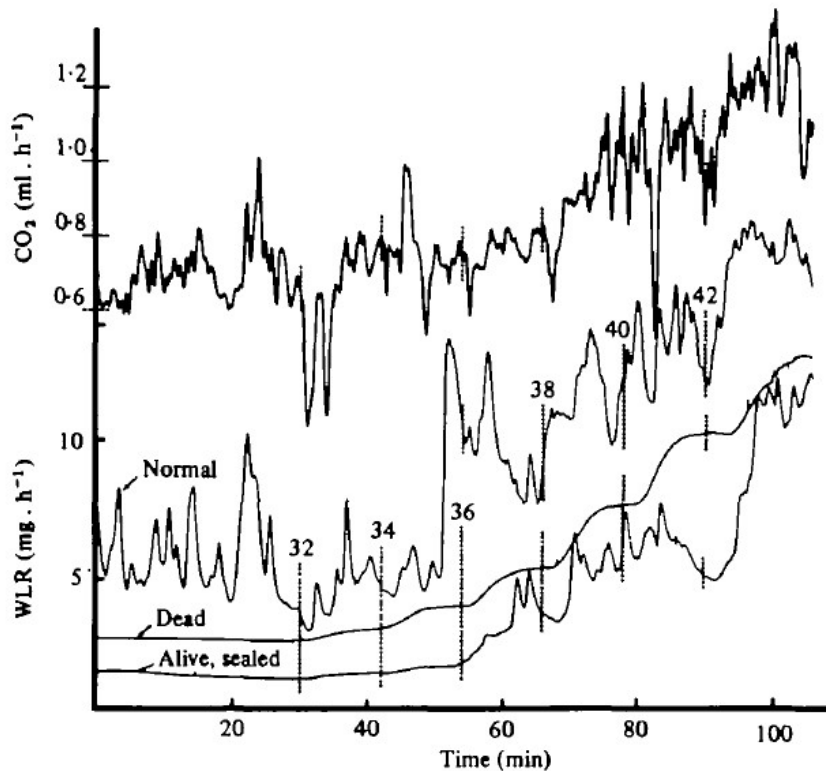


Glukoosin hapetusreaktiosta voidaan todeta,



että kiinteää (s) glukoosia varten tarvitaan kaasumaista (g) happea, jotta reaktio voi syntyä. Reaktioyhtälöstä nähdään myös, että hiilidioksidia vapautuu saman verran, kuin happea kuluu. Muiden ravintoaineiden reaktiot ovat monimutkaisempia, eikä niitä ole tarpeenmukaista käsitellä tässä tutkimuksessa, mutta todettakoon että suurin hiilidioksidimäärä syntyy hiilihydraattien hapetusreaktiosta.

Rehuseoksen tarkkaa koostumusta ei tiedetä ja erissä on varmasti pieniä vaihteluja sekoitussuhteissa, joten siitä laskemalla on melkein mahdotonta arvioida syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Työtä varten löytyi kaksi tutkimusta, jotka olivat perehtyneet aiheeseen ja niiden kautta on mahdollista saada suuntaa antava keskiarvo. Ensimmäisessä tutkimuksessa oli kuvaaja, jossa oli kuvattuna hiilidioksidin tuotto ja hikoilun aiheuttama veden menetys kehosta (kuvaaja 4).



KUVAAJA 4. Nousevan lämpötilan vaikutus kehon veden menetykseen ja hiilidioksidin tuotantoon (Neil F. Hadley and Michael Quinlan 1982, 344).

Tulkitsemalla kuvaajaa, voidaan arvioida hiilidioksidin tuotannon olevan keskimäärin 0,63 ml/h/sirkka (N.F. Hadley and M. Quinlan 1982, 344). Toinen perehtyi tarkemmin eri eläinlajien tuottamiin päästöihin ja taulukosta saatiin päästölukema 68 ± 10 g/kg BM/päivä (Dennis G. A. B. Oonincx, Joost van Itterbeeck, Marcel J. W. Heetkamp, Henry van den Brand, Joop J. A. van Loon, Arnold van Huis 2010, 3)

Jotta tutkimustuloksia voitaisiin vertailla keskenään, täytyy muuntaa molemmat samaan muotoon.

$$68 \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{d}} \cdot \left(\frac{0,4 \frac{\text{g}}{\text{sirkka}}}{1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}} \right) \cdot 1000 \frac{\text{mg}}{\text{g}} = 27,2 \pm 4 \frac{\text{mg}}{\text{d}} \quad (5.5)$$

$$0,63 \frac{\text{ml}}{\text{h} \cdot \text{sirkka}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 1,98 \frac{\text{mg}}{\text{ml}} (\text{CO}_2) = 29,9376 \frac{\text{mg}}{\text{d}}$$

Hadleyn ja Quinlanin mitattu arvo osuu sopivasti Oonincx ja kumppaneiden laskemaan keskiarvoon, joten ottamalla näistä tuloksista keskiarvo 28,5688 mg/d, päästää luultavasti lähelle todellista arvoa. Saatu arvo muutetaan vielä IDA-ICE:n vaatimaan muotoon ja saadaan pyöristettynä 0,777 mg/s/kasvatusyksikkö (2350 sirkkaa).

Kosteuden kehitykselle ja hiilidioksidipäästöille sovellettiin samaa periaatetta, kuin ruuan suhteen eri kasvuvaiheiden välillä. Kuormien selvityksen jälkeen haastattelujen pohjalta alettiin arvioimaan keskiarvoa kulloisellekin hetkelle eri kasvatusvaiheessa oleville sirkoille. Selvityksen pohjalta saatiin kesäkuukausille suurin kasvatusmäärä, joten luotiin kaksi eri ryhmää sirkkoja, pienempi ja lisääntyvä määrä aloitushetkelle, sekä isompi määrä kesän pyrähdykselle. Pieni muokkaus tehtiin myös aktiivisuustason oletukseen, että pimeän aikana liikehdintä ja kulutus olisi noin 80 prosenttista. Valot kun oli säädetty kohteessa aikataululle 12 h valoisaa ja 12 h pimeää.

5.3 Mallin toimivuuden tarkastelu

Liitteestä 2 löytyy mitattujen ja simuloinneista saatujen tulosten yhteensovituskuvaajia, joiden avulla suurin osa mallin alkuperäisestä säädöstä tehtiin. Ensimmäisessä kuvaajassa (kuvaaja 6) oli vertailtuna suhteellisen kosteuden arvoja mitattujen ja mallinnetun kesken. Kuten voidaan tarkastelusta todeta, alussa ja kesä kautena oli suurimmat heitot arvoissa. Monella eri mallinnusparametrilla yritettiin saada tuloksia täsmäämään, mutta on miltein mahdotonta mallintaa ihmisen käyttäytymistä ja sirkkojen todellista toimintaa. Mittauksien alussa suhteellinen kosteus heitteli 70 ja 80 % välissä. Aluksi arveltiin anturin paikan olleen ongelmallinen, tai kalibroinnin heittävä. Kasvattajan haastattelun perusteella pystyttiin kuitenkin toteamaan mittarin olleen kunnossa ja sijoituspaikan kohdallaan, koska kasvatustilan kosteuden kanssa oli ollut alussa ongelmia ja jopa homekasvustoa pääsi syntymään. Ongelman todelliseen syyhyn ei saatu varmaa selvyyttä, mutta mahdollinen ongelman syy arveltiin johtuneen kostuttimesta. Laitteessa

on voinut olla viallinen kosteusanturi, tai sitä ei oltu kytketty päälle, jolloin kostutus oli koko ajan täydellä teholla.

Suhteellisen kosteuden ollessa täysin sidonnainen lämpötilaan ja lämpötilamittausten ollessa oikean suuntaiset, ei lämpötilan laskua voi syyttää prosenttiosuuden noususta. Kostuttimessa on myös rajattu vesitilavuus, jonka loppuessa laite sammuu ja kostutus loppuu. Arvojen säätörajan alapuolella heittäily voi osaltaan tietyissä tilanteissa johtua myös tästä. Kesäkautena kosteudessa oli myös pitkään jatkunut korkea jakso, joka oli simuloinneissa saman suuntainen mitattujen tulosten perusteella. Tähän ilmiöön kyllä selvisi selitys tilassa olleesta suuresta kosteuskuormasta, joka lähti suurista kasvatuseristä, mutta oli vaikea simuloida todelliseksi vaihtelevien eräsuuruuksien vuoksi.

Tilan lämpötilan kanssa päästiin myös lähelle mitattuja tuloksia (kuvaaja 7), muutamia piikkejä lukuunottamatta. Nämä piikit johtuivat edellä mainituista kasvatuserien suuruudesta. Kun kasvatuserät ovat suuret, syntyy niistä lämpökuormaa simuloinneissa käytettyä erän keskiarvokokoa enemmän. Mittaustuloksissa on selvemmin nähtävissä rauhalliset lämpötilojen nousut ja laskut, toisin kuin simuloinneissa. Lämmitykseen käytettiin öljytäytteistä lämpöpatteria, joka luovuttaa lämpöä tasaisesti tilaan ja lämpeää rauhallisesti tarpeen tullen. Simuloinneissa käytetty sähköpatteri lämpeni heti kuumaksi ja termostaatin suljettua virran kylmeni myös nopeasti, joka oli syynä lämpötilan jyrkkään sahaamiseen. Simulointeihin ei öljytäytteistä patteria saanut mallinnettua ja todellisuudessa sillä ei tutkimuksen kannalta ollut suurta merkitystä. Tällä tarkoitetaan, että tarkastelun kohteena oli sähköenergian kulutus lämmitykseen, joka on todellisuudessa lähes identtinen, oli tila lämmitetty perinteisellä sähköpatterilla tai öljytäytteisellä mallilla.

Hiilidioksidipitoisuuden suhteen (kuvaaja 8) suurin merkitys oli vuotoilmalla ja painovoimaisen ilmanvaihdon tehokkuudella. Alussa on nähtävissä simulointituloksissa mittaustuloksia suurempia arvoja, joka osaltaan johtui kosteuden noususta ja homeitiöiden vaikutuksista kasvuun. Simuloinnit tehtiin olettamuksella, että erät ovat tasakokoisia ja kuolleisuutta ei esiinny, joka todellisuudessa vähän vääristää tuloksia. Kannustavaa on kuitenkin kesäkauden tulosten yhteensopivuus, jolloin erät olivat keskivertoa suurempia ja tasaisempia kasvuajan suhteen.

6 ENERGIAN KULUTUKSEN PIENENTÄMINEN

Kaikkien tuotteiden prosesseissa täytyy ottaa huomioon sen valmistamiseen kulunut energia. Energian kulutus on suoraan kytkettynä tuotteen katteeseen ja sitä kautta sen hintaan ja kannattavuuteen. Kasvattamon suurin haaste on Suomen talviolosuhteet, kun sisä- ja ulkotilan välillä oleva erot ovat todella huomattavat. Kylmänä talvipäivänä lämpötilaero voi nousta jopa 59 asteeseen ja kosteusero ulkoilman ja sisäilman välillä olla 16 g/kg. Lämpötila sitoutuu hyvin rakenteisiin, jolloin tilassa käymisestä ei ole niin suurta haittaa lämmön karkaamiselle, verrattuna kosteuden menetykseen. Kosteus ei varastoidu tilaan ja rakenteisiin lämpötilan tavoin, vaan on sitoutuneena ilmaan ja kun ovi avataan, pakenee suurin osa kosteudesta ulos ilmapirran mukana.

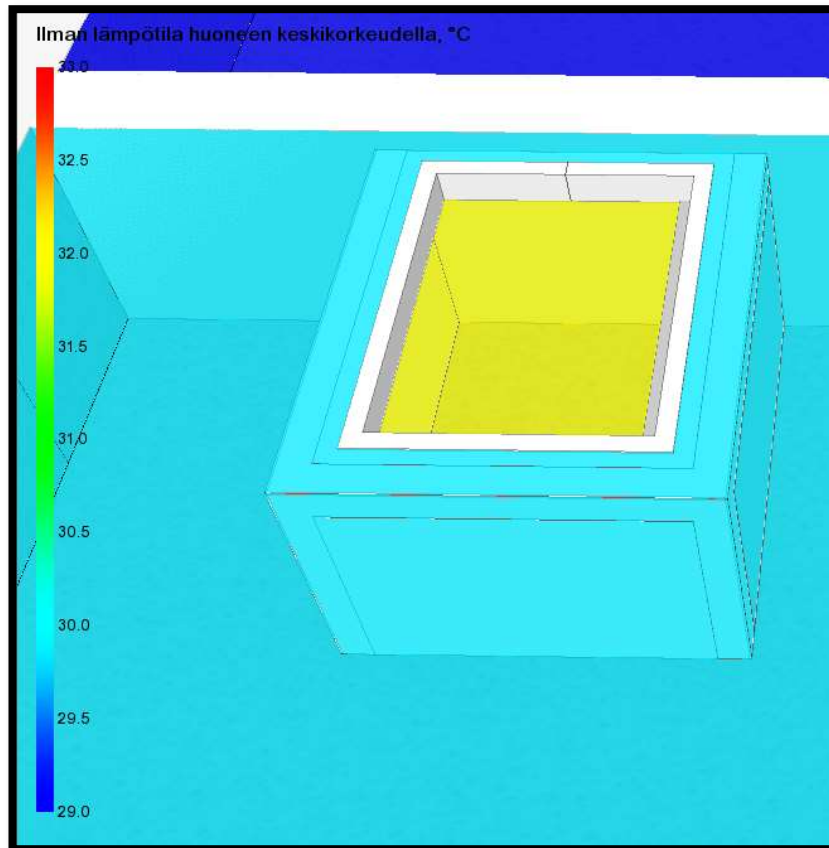
6.1 Sirkkojen kuluttama energia per tuotettu kilo

Kun tarkastellaan kasvatuksen kuluttamaa energiaa verrattuna tuotettuihin kiloihin, täytyy ensin ottaa huomioon, millaisella termillä painoa käsitellään. Tuotettua kiloa kun voidaan käsitellä joko elopainona, eli sirkkan todellisena painona, tai niistä todellisuudessa saatuna hyötypainona, eli kuivapainona. Tutkimuksissa yleensä puhutaan sirkkojen elopainosta, koska se helpottaa tuloksien vertailtavuutta ja antaa tarkempaa kuvaa kasvun vaihteluista. Kuivapainosta on poistettu kehon sisältämä vesi kuivaamalla, jolloin saadaan taas tarkempi kuva siitä, kuinka paljon ravinnollista hyötyä yhdestä sirkasta saadaan käyttöön.

Kasvattajalta saatujen sähkönkulutustietojen ja mallinnustulosten pohjalta vertailtiin sähkön kulutustietoja ja päästiin melkein samoihin tuloksiin mallin virityksen jälkeen. Sähkön kulutuksesta oli mitattu vain tilan lämmitykseen kulutettu sähköenergia pistokelasurilla. Tämän laitteen heikkous oli kuitenkin tulosten nollaantuminen sähkökatkoksen sattuessa, joita oli kymmenkunta mittausjakson aikana. Tulosten kirjaus oli kuitenkin jokapäiväistä ja mitatuista kulutustiedoista oli mahdollista laskea keskimääräinen tuntikulutus, jonka avulla kompensoitiin sähkökatkoksissa menetettyä tarkkuutta. Mitattu sähköenergian kulutus mittausjaksolle oli 1198,5 kWh ja sähkökatkoissa menetetyn tarkkuuden laskennalla kompensoitu kulutus 1235,2 kWh. Simulointimallin ja mitattujen tulosten vertailua löytyy liitteestä 2 ja kulutustietoja simulointituloksista on taulukoitu tarkemmin liitteessä 3.

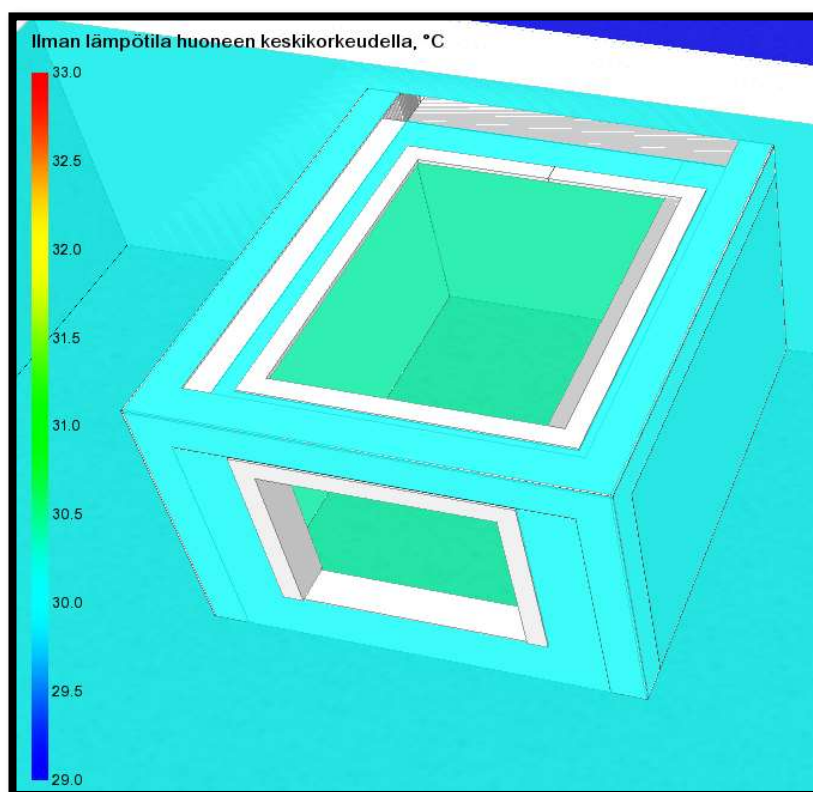
6.2 Kasvatusyksikön muokkaus

Alkuperäinen ja yleisesti käytössä oleva kasvatusyksikkö on laatikon mallinen, jossa ilmanvaihto ja huoltotoimenpiteet tapahtuvat yläpuolelta. Tämä saattaa aiheuttaa ilman pakkaantumista kulmiin ja ilmanvaihdon tehottomuutta, kun kaiken pitäisi tapahtua yläkautta pienien fysikaalisten erojen avulla. Mahdollisuutena on myös laatikon sisälämpötilan nousu ympäristöä korkeammaksi ja näin ollen luo mahdollisen ylilämpenemisriskin.



KUVA 9. Kasvatusyksikön ja ympäristön lämpötilaero.

Kuvasta 9 voidaan todeta kasvatusyksikön lämpötilan nousevan ajoittain korkeammaksi, kuin kasvatustilassa vallitseva lämpötila. Ensimmäiseksi, laatikon ilmanvaihdon tehostamisen kannalta täytyisi laatikossa olla ilmalle mahdollisuus päästä kulkeutumaan helpommin laatikon sisäpuolelle. Tähän tarkoitukseen helpoin ratkaisu olisi muuttaa yksi laatikon laidoista osaltaan kannen tyyliseksi verkkorakenteeksi, jotta ilma pääsisi kiertämään vapaammin. Simulointi suoritettiin muokatulla kasvatusyksiköllä ja kuvasta 10 näkee, kuinka lämpötila kasvatustilan kanssa on tasaisempi verrattuna alkutilanteeseen.



KUVA 10. Kasvatusyksikkö sivuaukolla varustettuna.

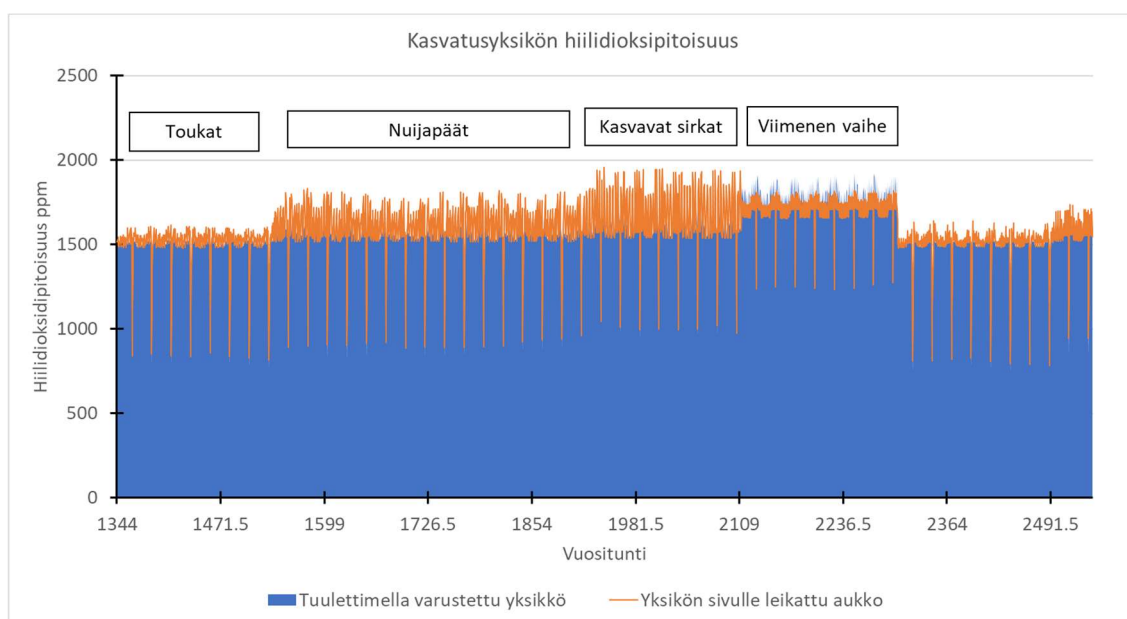
Oman haasteensa laatikon muokkauksessa tuo se, että kasvavat sirkat ovat alle millimetrin kokoisia toukkavaiheensa aikana ja täten voivat päästä karkuun, jos aukon rakenteeseen ei kiinnitetä tarpeeksi huomiota. Alkuvaiheessa toukat liikkuvat kyllä paljon, mutta eivät vielä kiipeile ahkerasti. Asettamalla mahdollisen sivuleikkauksen alareunan sen verran ylös, että toukat eivät pääse ryömimään sen läpi, vältettäisiin turhat menetyksen kasvatuskannassa ja saataisiin silti tehostetumpi ilmavirtaus. Kun toukat ovat kasvaneet aktiivisen kiipeilyn tasolle, ovat ne jo tarpeeksi isoja, eivätkä pääse verkon väleistä karkuun.

Isommissa kasvatusyksiköissä voisi mahdollisuutena olla myös pienen tuulettimen lisäys sivuaukkoon virtauksen parantamiseksi. Haitallista liian korkeaa ilman virtausnopeutta voitaisiin tasoittaa asettamalla tuuletin vähän kauemmaksi laidasta ja pienellä kaulurilla laajentaa virtausalaa. Mahdollisuutena olisi myös suuremmissa laitoksissa yhdistää tällainen osaksi kiertoilmajärjestelmää. Asettamalla kasvatusyksiköihin ilman sisään virtaus kiertoilmajärjestelmästä, olisi mahdollista kontrolloida yksiköiden olosuhteita tarkemmin ja pitää ne tasaisempina. Tällaisella järjestelmällä pystyttäisiin vähentämään kasvatusyksikön sijainnin vaikutusta kasvatuslaitoksessa. Laitoksessa on eriävät olosuhteet, kun verrataan rakennuksen nurkkakohtia keskikohdan kanssa, jolloin nurkissa olevissa yksiköissä on eriävät olosuhteet verrattuna keskelle sijoitettuihin.

6.2.1 Kasvatusyksikköjen muokkauksen vaikutus kulutukseen

Kasvatusyksikön teknilliset muokkaukset vaikuttavat sähkön kulutukseen jonkin verran verrattuna alkuperäiseen tilanteeseen, jossa kaikki tapahtui fysikaalisten ilmiöiden avustuksella ja siihen vaikutti tilan olosuhde-erot. Vaikka energian kulutus vähän kasvaa vertaillaessa alkuperäiseen tilanteeseen, niin täytyy ottaa huomioon, että sähköenergiaa käytetään ilman liikuttamiseen, joka puolestaan takaa tasaisemmat ja paremmat olosuhteet kasvatettavalle kohteelle. Tämä voi lopulta johtaa kulutuksen pienenemiseen ja kasvatushyötysuhteen paranemiseen, tasaisemman kasvutuloksen ja pienenevän kuolleisuuden yhteisvaikutuksesta.

Simulointeja tehtiin kasvatusyksikölle eri muokkauksilla ja saatiin selville lisääntyneestä sähköenergian kulutuksesta saatavat hyödyt. Erot eivät ole suuria verrattuna alkutilanteeseen, mutta voivat olla merkittäviä mietittäessä isoja tiloja, joissa kasvatettavia sirkkoja on reilusti enemmän kuin simulointikohteessa. Olosuhteiden pieniltä vaikuttavien erojen tutkiminen tuotantoon olisi mielenkiintoinen jatkotutkimuksen aihe. Tutkittu tuulettimen virtaus oli asetettu 5 l/s ja kuvaajasta 5 on nähtävissä tuulettimesta saatu hyöty kasvatusyksikön ilman vaihtuvuuteen. Kaikissa muissa kasvuvaiheissa tuuletin onnistui pitämään hiilidioksidipitoisuuden tasaisena paitsi viimeisessä, jolloin sirkat synnyttivät suurimman osan hiilidioksidista.



KUVAAJA 5. Kasvatusyksikön hiilidioksidipitoisuus aukolla ja tuulettimella.

6.3 Lämmityksen ja kostutuksen optimointi

Ensimmäisenä ideana, jo ennen minkään mallinnustulosten saamista todettiin, että tilassa käytetty ultraäänikostutin pitää saada vaihdettua. Henkilökohtaisten kokemusten pohjalta voitaneen todeta, että ultraäänien avulla toteutettu kostutus on toimiva ja halpa ratkaisu kosteustasapainon ylläpitoon, mutta laitteessa on myös muutama ultraäänitekniikan rajoite. Kun kostutettaessa vettä ei kuumenneta, kaikki siinä mahdollisesti olevat epäpuhtaudet leviävät veden mukana ilmaan. Koska kostuttimessa käytetään yleisesti vesijohtovettä, sisältää se myös paljon mineraaleja. Kun mineraalipitoinen vesi laitetaan liikkeelle ultraäänien avulla, rikkoontuu veden rakenne todella pieneksi ja vie mukanaan myös mineraalit. Veden haihtuessa ja yhtyessä ilman kanssa, jää jäljelle siinä olleet mineraalit ja ne kerääntyvät pinnoille valkoisen harmaana pölynä. Kasvatettavien kohteiden koon huomioiden voidaan todeta, että tällainen mineraalipöly ja mahdolliset muut vedessä olleet epäpuhtaudet, eivät välttämättä ole parasta kasvamisympäristön puhtauden kannalta.

Parhaana mahdollisena kostutusratkaisuna kasvatustiloille olisi höyrykostutin. Höyrykostuttimessa vesi kuumennetaan lähelle kiehumispistettä, joka tuhoaa siinä mahdollisesti olleet taudinaiheuttajat ja vedessä olleet mineraalit myös jäävät kostuttimen sisälle, eikä siirry höyryn mukana tilaan. Hinta pienillä kostuttimilla, pieniin tiloihin, ei ole korkea verrattuna ultraääneen ja hyödyt korvaavat kyllä suuremman hintalapun. Suurempiin tiloihin ja isommille laitteille puhutaan jo isommista investoinneista, muuta täytyy ottaa huomioon, että muilla kostutusratkaisuilla ei välttämättä enää päästä niin suuriin tehoihin ja kosteustasapainon ylläpito ei onnistu. Erona höyrykostutuksella ja ultraäänikostutuksella on myös lämpöenergian muutokset. Ultraäänikostutus jäähdyttää tilaa ja vaatii suurempaa lämmitystehoa, kun höyrykostutus puolestaan samalla lämmittää myös tilaa.

Tarkoituksena oli tutkia myös millaisia vaikutuksia lämpötilan muutoksilla olisi kasvuun ja tehokkuuteen mahdollisten kasvuolosuhteiden ääripäissä +25 ja +35 °C. Suurin osa löydetyistä, asiaa selvittävistä tutkimuksista perehtyivät tarkemmin vain viimeisen kehitysvaiheen pituuden muutoksiin. Kaikissa luetuissa tutkimuksissa oli kuitenkin samankaltaisia havaintoja lämpötilan vaikutuksista ja korkeammissa lämpötiloissa oli selvästi lyhyempi kehitysjakso. Lämpötilan nosto vaikutti merkittävästi aineenvaihdunnan nopeuteen ja tätä kautta kasvun nopeuteen. Selvästi noussut massan kehitysnopeus vaikutti kuitenkin olevan tuloksien valossa kannattava investointi, koska kaiken kaikkiaan ruokaa

kului vähemmän merkittävästi lyhentyneiden kasvuaikeiden seurauksena. Energian kulutus päivässä oli +25 °C noin 11 J/kuivapaino g ja +28 °C 12 J/kuivapaino g, mutta tämä muutettuna koko kasvu aikaan tarvittavaan energiamäärään, päästään mielenkiintoisiin lukuun 1351 J +25 asteessa ja 580 J +28 asteessa (David T. Booth and Kirsty Kiddell 2007, 951-952). Tämä ero kolmen lämpöasteen välillä tuntuu vaikuttavan ruuan kulutukseen jo tarvittavan määrän puolituksella.

Booth ja Kiddell onneksi perehtyivät tutkimuksessaan alhaisen lämpötilan vaikutukseen kasvu aikaan. Lämpötilan ollessa kasvualueen alarajalla +25 °C, oli kehittymisaika jopa 119 päivää, verrattuna tutkimuksessa olleeseen +28 °C lämpötilaan ja 49 päivän kasvu aikaan (David T. Booth and Kirsty Kiddell 2007, 951). Cliffording ja Woodringin tutkimuksessa (1979, 643) on viittaus toisen tutkijan, Bowling C. C. vuonna 1955 tekemään tutkimukseen, jonka mukaan lämpötilan nosto 29,4 asteesta 35 asteeseen vähensi kehittymisaikaa 28 päivällä. Samaisessa artikkelissa oli lähemmin tutkittu viimeisessä vaiheessa kehittyviä kotisirikkoja ja kyseessä olevien ala- ja ylärajan lämpötilojen välillä oli kasvussa 7 päivän ero, 13 päivää alarajalla ja 6 päivää ylärajalla. Vertailtaessa Bowlingin tutkimuksen väitteitä Boothin ja Kiddellin saamiin tuloksiin, antavat ne vähän ristiriitaisia väitteitä. Jos +28 °C kasvu aika olisi noin 49 päivää, tarkoittaisi se +35 °C lämpötilassa vain 21 päivän kasvu aikaa kuoriutumisen alkuaikasta. Seurattavana ollessa Kokemäen kohteessa keskimääräinen kasvu aika oli 40 päivää lämpötilan ollessa noin +30 °C.

Lämmityksen optimointia voisi lähteä pohtimaan sitä kautta, mitä järjestelmiä kiinteistöllä jo ennestään on. Onko mahdollisesti kattilalämmitystä ja ehkä mahdollisuutta vesikiertoiseen lämmitysratkaisuun. Vesikiertoisella lämmitysjärjestelmällä olisi sähköä huomattavasti helpompi hallita lämpötilaa kokonaisuutena. Tilojen lattiat ovat yleensä jokaisessa tapauksessa maata vasten, suoraan tai ilmavälin kautta. Tämä aiheuttaa lattiaan viileämmän lämpötilan ja kylmää ilmaa pääsee säteilemään tilaan lattiasta, joka luo epätaisaista lämpötilakerrostumaa. Vesikiertoisella lattialämmityksellä alapuoli saataisiin pidettyä tasaisempaan ja lähempään tilaan haluttua lämpötilaa, ilman suurta lämpöenergian kulutusta. Tietenkin samat toimenpiteet voitaisiin toteuttaa lämpökaapeleilla, mutta verrattuna hyötylaitoksiin, joissa sähköstä saatu hyötysuhde on moninkertainen, ei pelkällä sähköllä tuotettu lämpö ole taloudellisesti kannattavaa pitkällä aikavälillä.

6.4 Ilmanjakotavan optimointi

Pienemmissä tiloissa ilmanvaihtokone ei ehkä tule kysymykseen tilantarpeen ja investointikustannusten takia. Tarvittavat tulo- ja poistoilmavirrat kun ovat todella pienet, ei koneen investointi maksaisi itseään elinkaaren aikana takaisin. Suurempiin tiloihin ilmanvaihtokoneen hankinta saattaakin tulla jo harkinnan arvoiseksi ratkaisuksi. Pakettia voidaan muokata asiakkaan tarpeiden mukaan, joten kaikki ilman olosuhteiden hallintaan tarvittava pystyttäisiin liittämään osaksi ilmanvaihtoa. Liitettäessä höyrykostutin osaksi pakettia, saataisiin kosteustasapaino tilassa pysymään tasapainossa jokaisessa nurkassa. Kierrätysilmakoneella myös säästyisi energiaa, koska ilmaa kierrätettäisiin tilassa ja raitista ilmaa otettaisiin vain tarvittava määrä.

Pieniin tiloihin, joissa tarvittavat raitisilmamäärät ovat pienet, mahdollinen poistoilmapuhallin ja sen erilaiset säätömuodot olisi yksi ratkaisu. Mahdollisuutena olisi asentaa korvausilmakanavaan myös moottoritoiminen sulkupelti, joka avautuisi vain tarpeen mukaan ja näin ollen pitäisi hukkavirtauksen minimissään. Poistoilmapuhallinta voisi ohjata joko vakiovirtauksella, tai liittämällä sen ohjaukseen mahdollisia antureita riippuen tarpeesta. Ohjaus voisi tapahtua lämpötilan, kosteuden ja / tai hiilidioksiditason mukaan.

Talvella tilaan halutaan mahdollisimman pieni ilmavirta, koska häviöt ovat todella suuret ulko- ja sisäilman olosuhteiden isojen erojen takia. Tilassa kuitenkin vierailaan joka päivä huoltotoimenpiteiden takia, joten onko tarvetta ilmanvaihdolle muuta kuin kesällä? Kohdassa 4.3.1 oli maininta hiilidioksidipitoisuuden vaikutuksesta jauhomatoihin ja pohdintaa, voisiko sirkkoihin olla pitoisuudella samanlaisia vaikutuksia. Jos hiilidioksidipitoisuus pidettäisiin alle 1500 ppm ja oletettaisiin muninnan olevan noin 20 % tehokkaampaa, niin kattaisiko tehokkuus suuremman energiantarpeen?

TAULUKKO 4. Ilman hiilidioksidipitoisuuden vaikutus jauhomatoihin (Aloisio Coelho junior and José R. P. Parra 2012, 827).

Naaraiden paino (mg)	Munien määrä per naaras k.a.	Elinaika (d)		Maksimi CO ₂ pitoisuus (ppm)
		koiraat	naaraat	
21.08 ± 0.64	427.55 ± 23.67	12.25 ± 0.58	7.47 ± 0.24	1195
22.04 ± 0.49	328.65 ± 14.07	13.50 ± 0.61	8.00 ± 0.44	1763
21.89 ± 0.63	343.15 ± 22.09	7.70 ± 0.48	8.05 ± 0.41	4425

Samaisessa kappaleessa oli myös mielenkiintoinen huomio yli 1500 ppm tilanteista, jolloin nousseella pitoisuudella ei enää ollut suurempaa merkitystä. Taulukossa 4 on kuitenkin mielenkiintoinen huomio korkean hiilidioksidipitoisuuden vaikutuksesta koiraiden elinaikaan. Lisääntyjinä käytettyjä ei välttämättä voida kuoleman jälkeen käyttää enää ravinnoksi, joten elinajalla on pientä merkitystä mietittävässä yhtälöissä. Olisiko siis mahdollisuutena talvella vaihtaa ilmaa vain tilassa vierailun ja oven avaamisen avulla ja keksällä poistaa vain mahdollista yllilämpöä ja kosteuskuormaa?

Nämä ovat mielenkiintoisia kysymyksiä ja energian säästön kannalta voisi olla myös jatkotutkimuksen arvoista. Jos tilan ilmaa ei tarvitsisi jatkuvasti vaihtaa, varsinkaan talvella, säästettäisiin mahdollisesti merkittäviä määriä energiaa. Simulointi matemaattisilla ohjelmilla ei kuitenkaan tällaista pohdintaa tee yksinkertaiseksi tai helpoksi mallintaa, kun todellista tai tarkkaa vaikutusta kohonneista CO₂ pitoisuuksista ei tutkimuksen kohteena olevaan sirkkalajiin tiedetä. Monet tutkimukset kyllä perehtyivät todella korkeisiin hiilidioksidipitoisuuksiin, joita käytetään eläinten nukuttamiseen ja tainnuttamiseen, eli yli 40 % CO₂ pitoisuuksia. Tällaiset pitoisuudet eivät voisi normaalitilanteessa olla mahdollisia kasvatustiloissa, koska ihmisillekin alkaa olla vaarallisena rajana jo yli 3 % hiilidioksidipitoisuudet (Aloisio Coelho junior and José R. P. Parra 2012, 828).

6.5 Muokkauksien jälkeinen kulutus

Tehtäessä muokkauksia olemassa oleviin tiloihin tai valittaessa kalliimmat järjestelmät uusia rakennettaessa, täytyy aina miettiä sijoituksen kannattavuutta ja saatua hyötyä. Sirkkatuotanto on tällä hetkellä vielä lähtökuopissaan ja useissa järjestelmävalinnoissa voidaan puhua jopa kymmenien vuosien takaisinmaksuajasta, joten aloittelevilla kasvattajilla on tällä hetkellä vaikeita päätöksiä edessä riskien kannalta ajateltuna.

Simulointituloksista saatiin suuntaa antavaa tietoa mahdollisesta säästöpotentiaalista tilojen olosuhteiden hallinnan suhteen. Sähköenergian kulutuksen lisäksi täytyy myös miettiä energian tuotannosta syntyviä päästöjä. Nykypäivänä päästörajoitukset tiukentuvat kovaa vauhtia ja päästöverot kiristyvät. Kulutettu sähköenergia siis vaikuttaa suoraan tuotannosta syntyviin hiilidioksidipäästöihin ja otettaessa huomioon tuotannon taseeseen, antaa mahdollisen kilpailuvaltin tällä hetkellä vallitsevaan lihatuotantoon verrattuna.

Suomen olosuhteissa sirkkatuotannon päästöistä syntyy yli puolet tilan olosuhteiden ylläpidosta, joten mitä pienempää kulutusta onnistutaan pitämään yllä, sitä suurempi hyöty rahallisesti ja kilpailun kannalta on mahdollista saada. Liitteestä 5 löytyy vertailukuvaajia eri mallinnustulosten väliltä. Kokeiluun otettiin tilan höyrykostutus, vakiovirta poistoilmapuhallin, muuttuvavirta poistoilmapuhallin sekä höyrykostutuksen ja muuttuvavirtaisen poiston yhdistelmä. Paras hyöty näistä saatiin höyrykostuttimen ja muuttuvavirtaisen poiston yhdistelmällä, jolloin energian kulutusta saatiin pienennettyä noin kolmanneksella. Jopa halvimmalla ja yksinkertaisemmalla ratkaisulla, eli vakiovirtaisella poistoilmapuhaltimella, saatiin säästettyä noin viidesosa.

Kulutuksen seuranta ei voi kuitenkaan olla ainut seurattava muuttuja, koska kasvuolosuhteet on kuitenkin pidettävä yllä ja ilmaa vaihdettava. Täysin tiivis tila olisi energian kulutuksen kannalta täydellinen paketti, mutta sirkat kuitenkin tuottavat päästöjä ja kuluttavat happea, joten oikea suhde päästöjen poistolle ja uuden raikkaan ilman lisäämiselle on helpoin energian säästötoimi. Helpoin ei kuitenkaan tarkoita yksinkertaista, koska olosuhteet muuttuvat kasvatuserien ja kasvuvaiheen mukaan. Mallinuksissa oli siis käytetty samoja rajoitteita tilan olosuhteiden vaatimuksille. Alkuperäisestä mallista otettiin referenssi säätöarvoille, jolloin hiilidioksidin, kosteuden tai lämpötilan ei annettu heitellä optimaalisen kasvualueen ulkopuolelle.

7 TUOTANNOSTA SYNTYVÄT PÄÄSTÖT

Päästöistä puhuttaessa kiinnitetään usein suurin huomio hiilidioksidipäästöihin. Eläimet tuottavat kuitenkin muitakin kaasuja, kuten ammoniakkaa (NH_3), metaania (CH_4) ja dityppioksidia (N_2O). Tässä luvussa keskitytään sirkkojen kasvattamisesta syntyviin kasvihuonepäästöihin ja tuloksiin otetaan mukaan mallinnoista saadut tulokset, jotka löytyvät liitteestä 3.

7.1 Kasvusta ja kehitymisestä syntyvät kasvihuonepäästöt

Kuten aiemmin mainittiin, niin sirkat, kuten muutkin eläimet, tuottavat monia eri kasvihuonekaasuja. Dennis G. A. B. Oonincx ym. tutkivat ja vertailivat eri eläinlajien kasvatuksesta aiheutuvia päästöjä. Sivulla neljä heidän vuonna 2010 julkaistussa tutkimuksessaan, oli hyvin eritelty eri kasvatettavien eläinlajien vertailtuja päästöjä. Kotisirkasta syntyy hiilidioksidipäästöjen lisäksi myös vähän dityppioksidia, ammoniakkaa sekä merkityksetön määrä metaania.

TAULUKKO 5. Eri kasvatettavien synnyttämien kasvihuonekaasujen määriä (Dennis G. A. B. Oonincx ym. 2010, 4).

Kasvihuonepäästöt	Sirkka	Sika	Nauta
Dityppioksidi N_2O	0,1 ± 0,13 mg/paino kg·d	2,7 – 85,6 mg/paino kg·d	Ei tulosta
Ammoniakki NH_3	5,4 ± 3,4 mg/paino kg·d	4,8 – 75 mg/paino kg·d	14 – 170 mg/paino kg·d
Metaani CH_4	0,00 ± 0,002 g/paino kg·d	0,049 – 0,098 g/paino kg·d	0,239 – 0,283 g/paino kg·d

Näitä lukuja verrattaessa yleisesti vertailussa olleisiin sikoihin ja nautaan, niin ollaan ihan eri tuloksissa (taulukko 5).

Eri kasvihuonekaasujen vaikutusta ympäristöön on vaikea verrata suoraan keskenään, joten vertailun helpottamiseksi ne yleensä muutetaan ilmastovaikutuksen mukaan hiilidioksidiekvivalentiksi. Tällä tarkoitetaan sitä, että kuinka paljon hiilidioksidia pitäisi tuottaa, että se vastaisi samaa kasvihuonevaikutusta kuin vertailtava päästö. Näistä kolmesta

vertailtavasta dityppioksidi on suurimman vaikutuksen omaava kasvihuonekaasu ja sillä on 298 kertainen vaikutus hiilidioksidiin verrattuna. Samainen vaikutus metaanilla on 25 kertainen, eli 1 kg metaania vastaisi 25 kg hiilidioksidipäästöjä (Tilastokeskus 2018). Muuttamalla edellisessä kappaleessa käsitellyt päästöluvut hiilioksidipäästöjä vastaavaksi (taulukko 6), saadaan paljon selkeämpi kuva eri eläinlajien vaikutuksesta ilmastoon.

TAULUKKO 6. Kasvihuonekaasut muutettuna hiilidioksidiekvivalentiksi (Dennis G. A. B. Oonincx ym. 2010, 3-4).

Päästöt	Sirkka	Sika	Nauta
CO ₂ -ekv	0,05 ± 0,04 g/kg·d	2,03 – 27,96 g/kg·d	5,98 – 7,08 g/kg·d
CO ₂ + CO ₂ -ekv	68,05 ± 10,04 g/kg·d	23,63 – 57,56 g/kg·d	11,01 – 14,08 g/kg·d

Vertailtaessa näitä päästöarvoja, täytyy muistaa, että kaikki vertailtavat eläinlajit ovat selvästi eri kokoisia ja painoisia. Tätä eroa poistamaan ja vertailun helpottamiseksi on ehkä hyvä vielä kääntää kaikki päästöarvot vastaamaan kasvukiloja, jolloin todellinen vertailtavuus alkaa selventyä. Kotisirkalle yhdistetyt hiilidioksidipäästöt painokilon nousua kohden on 1469,57 ± 972,8 g/kg·d, sioille 944,59-2324 g/kg·d ja nautojen kasvulle 5685 g/kg·d (Dennis G. A. B. Oonincx ym. 2010, 3-4). Tarkempia laskennallisia päästöarvoja ja simulointituloksista saatuja arvoja käsitellään tarkemmin liitteessä 4.

7.2 Päästöt suuremmassa kuvassa

Edellä käsitellyissä päästöarvoissa on otettu huomioon vain kasvusta syntyvät eläinten omat päästöt, mutta todellisuudessa ne ovat vain pieni osa kokonaisuutta. Todellisia päästöjä vertailtaessa täytyy ottaa paljon enemmän muuttujia huomioon ja kokonaisuuden laskemisesta tulee todella monimutkaista ja miltei mahdotonta tietyn pisteen jälkeen. Huomioon otettavia asioita ovat esimerkiksi ruoka, energia, tilantarve, logistiikka, jalostus ym. Vaikka edellisissä tuloksissa näytti siltä, että sikojen kasvaessa syntyy yhteenlaskettuja hiilidioksidipäästöjä suurin piirtein saman verran kuin sirkoilla, täytyy muistaa katsoa isompaa kokonaisuutta. Täysikasvuiset ja kerätyt sirkat ovat todella helppo kuljettaa ja niissä on vähän jatkojalostuksen tarvetta verrattuna sikoihin.

Kasvatus vaatii ruokintaa ja ruokana käytetty rehu vaikuttaa suoraan omalta osaltaan kasvatuksen päästöihin. Tilannetta tietenkin kompensoi, jos kasvattaja pystyy tuottamaan

tarvittavan rehun itse. Tästä huolimatta pelloilla kasvatetusta viljastakin aiheutuu kasvi-huonepäästöjä, mutta kuljetuksesta aiheutuvat päästöt saadaan tällöin vähennettyä ta-seesta. Viljasta voidaan käyttää hyväksi priimatavaran lisäksi joissain tapauksissa myös jäljelle jääneet osat, joita ei välttämättä muuten hyödynnettäisi.

Veden saamiseksi, kasvattajat käyttävät esimerkiksi kurkkua sen suuren vesipitoisuuden ja runsaan sekä helpon saatavuuden vuoksi. Tästä kuitenkin tulee lisää hiilidioksiditaseeseen ja se täytyy ottaa huomioon lopputulosta laskettaessa, josta löytyy lisää liitteessä 4. Kasvatusyksiköihin ei voi laittaa vesikiphoa, joka olisi helpoin ratkaisu, koska sirkat huk-kuvat helposti käydessään juomassa. Kasvattaja käytti aluksi kurkkua, mutta se toi mu-kanaan omia haasteitaan, kuten pienien hedelmäkärpästen määrä alkoi lisääntyä tilassa ja kurkun kanssa toimiessa oli aina oma vaivansa vaihtaa joka päivä tuore satsi. Kurkun tilalle vaihdettiin kokeeksi vedellä imeytetty vanu, josta sirkkojen oli mahdollista saada veden tarpeensa, ilman hukkumisen riskiä. Vaihdoksen jälkeen oli yllättävää huomata, että pienet kärpäset olivat kadonneet kokonaan ja vanun vaihtamisesta oli lisäksi vähem-män vaivaa kuin kurkusta.

POHDINTA JA LOPPUSANAT

Maailma muuttuu, väestö lisääntyy ja ruuan tarve kasvaa. Tulevaisuuden suunnittelun ja ravinnon saannin turvaamisen kannalta on täytynyt lähteä tutkimaan vaihtoehtoisia ratkaisuja tämän hetken vallitsevaan tilanteeseen. On yleisessä tiedossa, ja monet tutkimukset myös ovat aiheeseen perehtyneet, että eläinperäisen proteiinin kasvatus nykyisellään ei ole toimiva ratkaisu. Eläinperäisellä ruualla tarkoitetaan tässä vallitsevaa sika- ja nautatuotantoa. Sikojen ja nautojen kasvatus vaatii paljon tilaa, rehua sekä vettä ja niistä syntyy suuret määrät kasvihuonepäästöjä.

Itämaissa sirkkoja on kasvatettu jo vuosikymmeniä, mutta vasta nyt tähän on alettu reagoida länsimaissa. Suomeen ilmiö on vasta rantautumassa ja vaikka aiheesta on paljon tutkimustietoa, on se niukkaa maamme kaltaisten kasvatusalueiden osalta. Itämaissa kasvatus on ollut järkevä ja suhteellisen helppo ratkaisu, koska olosuhteet siellä ovat sirkkojen normaalin elinympäristön kaltaiset eivätkä vaadi juurikaan muokkaamista. Pohjoisen kylmillä alueilla kasvatus ja olosuhteiden ylläpito on haastavaa, muttei mahdotonta, ja oikeilla ratkaisuilla saavutettavissa.

Kasvatustilojen energiatehokkuuden parantamiseksi tai uusien rakennettavien tilojen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon järjestelmävalinnat. Liitteessä 5 on esitelty mahdollisia energian säästämahdollisuuksia eri ratkaisujen välillä. Näistä voidaan vetää johtopäätöksenä, että yhtenä tärkeimmistä energian kulutukseen vaikuttavista tekijöistä on ilmanvaihto. Optimoimalla ilmanvaihto mahdollisimman pieneksi, saadaan lämpöenergiakukka ja paennut ilmankosteus pidettyä minimissään. Rakentamisen laatu ja valitut rakenteet vaikuttavat myös ratkaisevasti tilan energiatarpeeseen. Veden höyrystymiseen tarvittava energia on moninkertainen verrattuna ilman lämpötilan ylläpitoon, joten tuotetun kosteuden pysyessä tilassa saadaan hukattua energiaa vähennettyä.

Sirkkojen kasvatus on tämän tutkimuksen perusteella varteenotettava vaihtoehto tulevaisuuden proteiinin kasvatuksen lähteeksi. Aaron T. Dossey, Juan A. Morales-Ramon ja M. Guadalupe Rojas julkaisussaan ”Insects as Sustainable Food Ingredients: Production, Processing and Food Applications” vuodelta 2016, käsittelevät eri lajeja ja niiden ravintoarvollisia koostumuksia. Kuivattu kotisirkka sisältää 100 g kohti 66,6 g proteiinia, 22,1 g rasvaa ja 10,2 g kuitua, kun esimerkiksi naudassa on 17,37 g proteiinia, 17,07 g rasvaa eikä lainkaan kuitua (Aaron T. Dossey, Juan A. Morales-Ramon ja M. Guadalupe Rojas

2016, 65-67). Täytyy ottaa kuitenkin huomioon, että naudanlihan ilmoitettu koostumus on tuoreessa kuivaamattomassa lihassa, kun taas sirkkojen koostumus on ilmoitettu kuivatuille yksilöille. Tutkimuksessa todettiin sirkkojen sisältävän noin 70 % vettä, joten muutettuna arvot paremmin vertailtaviksi märkäpainoksi, saadaan kotisirkalle arvot 19,98 g proteiinia, 6,63 g rasvaa ja 3,06 g kuitua 100 g kohti. Tämän perusteella voitaisiin proteiinin tarpeen osalta päätellä, että sirkkoja tarvitaan noin 87 g verrattuna 100 g:n nau-taa.

Sirkkojen kasvatus vaatii tilaa suhteellisen vähän kasvatettua kiloa kohden ja kasvatus-neliöt on mahdollista käyttää tehokkaasti. Kasvusta syntyvät kasvihuonepäästöt ovat si-koihin ja natoihiin verrattuna alhaisemmat tuotettua kiloa kohden, mutta loppupuolella tutkimusta selvisi myös, että tulokset ovat aika tulkinnanvaraisia. Tuloksia vertailtaessa täytyisi olla tarkasti määritelty mitä kaikkea otetaan huomioon CO₂-ekv laskettaessa. Liit-teessä 4 on päästötuloksia laskettu ja on selvästi nähtävissä, että syntyneiden päästöjen ilmoitus riippuu täysin tarkasteltavasta näkökannasta. Täysikasvuisen sirkan painosta hyödyksi saatu osuus on noin 30 %, joten tulokseen vaikuttaa erittäin paljon, ilmoite-taanko syntyneet päästöt märkä- vai kuivapainon mukaan. Tulokseen vaikuttaa myös merkittävästi, otetaanko huomioon myös ruoan tuotannosta syntyneet tai kasvatustilan käyttämän sähköenergian tuotosta syntyneet päästöt.

Laskettaessa kasvatettavalle kohteelle syntyvien päästöjen arvoa on vaikea yrittää saada mitään tasaista keskiarvoa, koska jokaisen tilan olosuhteiden ylläpitoon käytetyt järjes-telmät ja kasvatustilan sijainti vaikuttavat oleellisesti syntyviin päästöihin. Kuinka ympä-ristöystävällistä sirkkojen kasvatus on, riippuu suurimmaksi osaksi kasvattajan valin-noista. Jos kohteessa käytetään esimerkiksi maalämpöjärjestelmää, saadaan käytetystä sähköenergiasta parhaimmillaan yli nelinkertainen hyöty. Tällä tarkoitetaan maaläm-pöjärjestelmän lämpökerrointa, jolla käytetyllä kilowatilla sähköenergiaa on mahdollista tuottaa yli neljä kilowattia lämpöenergiaa. Sijainnilla on myös merkitystä ja pystyykö kasvattaja kasvattamaan ruokarehun itse. Sijainti vaikuttaa siis oleellisesti logistiikasta syntyviin päästöihin, jotka lopullisessa vertailussa tulisi myös ottaa huomioon.

Jatkotutkimukselle olisi mahdollisuuksia ja mahdollisesti myös tarvetta liittyen kasvatus-tilojen suunnitteluun. Mikä olisi standardimallinen kasvatustila, mitä järjestelmiä sinne tulisi asentaa ja missä kokoluokassa olisi järkevää lähteä hanketta tekemään? Standar-

doinnin tuloksena olisi mahdollista laskea keskiarvoja ympäristöystävällisyyden puolesta. Todettua on, että kasvatustilan tulisi olla mahdollisimman tiivis, jotta kosteus, suurimpana energian kuluttajana, saataisiin pidettyä mahdollisimman tehokkaasti sisällä. Tähän tarkoitukseen rakenteeksi olisi mahdollista harkita esimerkiksi pelti-uretaani-pelti elementtejä tai vaikka eristettyjä merikontteja.

Merikontin kaltaisissa, tai elementeistä rakennetuissa rakennuksissa voi syntyä myös kesällä auringon vaikutuksesta yllämpenemisen riski jolloin syntyy tarve jäädytykselle. Jäädytykseen ensisijaisesti käytetään tuuletusta, jonka huonona puolena on kosteuden pakeneminen tilasta ilmavirran mukana. Tilojen jäädytys puolestaan saattaa tulla yllättävän kalliiksi ja syödä helposti suuren osan katteesta. Millainen mahdollisuus olisi maalämpö? Kesällä olisi mahdollisuus tiloja jäädyttää tarpeen vaatiessa hyvällä hyötysuhteella, kun yllämpöä siirrettäisiin ja varastoitaisiin maahan. Lämmitystarpeen tullen maasta saataisiin energiatehokkaasti tilan tarvitsemaa lämmitysenergiaa.

Tilojen tiiviydelle on myös muita syitä, kuin olosuhteiden energiatehokas ylläpito. Kaikilla on hyönteisiä, ötököitä ja jopa pieniä tuhoeläimiä, kuten hiiret. Sirkkoja kasvatetaan elintarvikkeeksi, joten hygienia on erityisen tärkeä huomioon otettava asia. Pienet tuhoeläimet huonoimmassa tapauksessa saattavat päästä kasvatustilaan ja syödä tai tuhota kasvatettavana olevat sirkat. Ne eivät kuitenkaan ole suurin huolenaihe kasvattajille. Ötökät ja pienet hyönteiset pääsevät kasvatustiloihin yllättävän pienistä koloista ja varsinkin kasvuvaiheessa ollessaan pieniä. Jos kasvatusyksikköihin pääsee eri eliölajeja saastuttamaan kasvukantaa, voivat seuraukset olla vakavat. Vieraslajeja on vaikea huomata pienissä määrin ja levittäytyminen eri yksikköjen välillä voi tapahtua todella helposti mahdollisesti avoimena olevien kansien takia.

Mielenkiintoisena jatkotutkimuksen arvoisena aiheena olisi tilojen ja kasvatuksen mahdollinen automatisointi. Mitä enemmän prosessia saadaan automatisoitua, sitä tehokkaammaksi ja katteeltaan paremmaksi koko kasvatustila on mahdollista kehittää. Ensinnäkin, olosuhteiden ylläpito vaatii jo yksinkertaisemmassakin tapauksessa jonkinasteista automaatiota. Suurin keskittymisen kohde kannattaisi suunnata juuri kasvatusyksiköihin. Kasvatustila kun tapahtuu yksiköiden sisällä, joten miksi koko kasvatustilassa pitäisi olla samat olosuhteet? Tutkimuksien perusteella voidaan olettaa, että sirkat ovat alkutaipaleellaan erityisen herkkiä olosuhteiden vaihteluille ja vaativat mahdollisimman lähellä optimaalisen kasvuympäristön, kun taas viimeisien vaiheen sirkoille kosteustasolla ei

ole enää niin suurta merkitystä. Kuinka paljon siis energiaa ns. tuotetaan turhaan, kun vain osa kasvatusvaiheesta vaatii tarkat olosuhteet lämpötilan ja kosteuden osalta? Kuinka paljon olisi mahdollista säästää lämpöenergian tuotannossa tai varsinkin kosteuden tuotannossa, olosuhteiden hallinnan siirtyessä kasvatusyksiköihin ja muuntuvan kasvuvaiheiden mukaan?

Normaalissa tilanteessa ja suuremmissa kasvatustiluksissa kasvatusta tapahtuu isoissa yksiköissä, jotka pysyvät yleisesti paikoillaan kasvukierro ajan. Kuinka paljon kasvatustilustusta olisi mahdollista automatisoida? Sirkat tarvitsevat periaatteessa kasvaessaan vain vettä ja rehua. Rehunsaanti voisi olla mahdollista automatisoida tietynlaisen annostelijan avulla, jossa jokaisessa kasvatusyksikössä olisi säädettävä syöttöputki, jolloin annosteltavan rehun määrää olisi mahdollista muuttaa tarpeen ja kasvuvaiheiden mukaan. Veden saannille voisi olla myös mahdollista kehittää automaattisia syöttöjärjestelmiä. Kasvatustilustukseen ei voi annostella vettä suoraan, hukkumisriskistä johtuen, joten mahdollisuutena voisi olla esimerkiksi jonkun vettä imevän materiaalin jaksottainen kastelu. Yksiköiden huolto voi osoittautua automatisoinnin kannalta hankalaksi, mutta jos ruokinnan automatisoinnilla olisi mahdollista helpottaa kasvattajan työmäärää huomattavasti.

Työ oli lopulta vain pieni pintaraapaisu kokonaisuuteen ja mahdollisuuksia jatkotutkimuksille ja aiheen laajentamiselle löytyy moneen eri suuntaan. Kokonaisuudessaan tutkimuksen suoritus oli silmiä avaava kokemus. Maailman muuttuessa täytyy ihmistenkin muuttua, jos haluamme koittaa ylläpitää elämälle suotuisat olosuhteet maapallolla. Yhtenä esteenä olen tutkimuksen aikana käytyjen keskustelujen pohjalta todennut, että ihmisten mielikuvat rajoittavat vielä mahdollisuutta käyttää hyönteisiä ravintona. Väestönkasvu luo omat ongelmansa ruuan kasvatukseen suhteeseen, eikä kasvatettu määrä ja sen nopeus voi olla enää ainut määräävä tekijä ilmansaasteiden lisääntyessä ennätysvauhtia.

LÄHTEET

Booth David T. and Kiddel Kirsty 2007. Temperature and the energetics of development in the house cricket (*Acheta domesticus*). *Journal of Insect Physiology* 53, 950-953.

Coelho Aloisio junior and Parra José R. P. 2012. Effect of Carbon dioxide (CO₂) on mortality and reproduction of *Anagasta kuehniella* (Zeller 1879), in mass rearing, aiming at the production of *Trichogramma* spp. *Anais da Academia Brasileira de Ciência* (2013) 85(2), 823-831.

Dossey Aaron T., Morales-Ramos Juan A. and Rojas M. Guadalupe 2016. *Insects as Sustainable Food Ingredients: Production, Processing and Food Applications*. Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier.

Equa, IDA Indoor Climate and Energy. Julkaistu 2018. Luettu 7.12.2018.
<https://www.equa.se/fi/ida-ice>.

Hadley Neil F. and Quinlan Michael 1982. Simultaneous measurement of water loss and carbon dioxide production in the cricket, *Acheta Domesticus*. *Journal of Experimental Biology* 101, 343-346.

Huis, A. V. & Tomberlin, J. K. 2017. *Insects as food and feed: From production to consumption*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers.

Lemke Ray, kuva kotisirkasta. Julkaistu 13.12.2008. Kuva haettu 14.11.2018.
<https://bugguide.net/node/view/245341>.

McLeod Robin, Species *Acheta domesticus* - House Cricket. Julkaistu 11.09.2005. Päivitetty 05.06.2016. Luettu 23.09.2018. <https://bugguide.net/node/view/31207>.

Motiva, CO₂ päästökertoimet. Julkaistu 2016. Päivitetty 26.4.2018. Luettu 14.11.2018.
https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet.

Netatmo, Smart Home Weather Station's technical specifications. Luettu 14.11.2018.
<https://www.netatmo.com/en-us/weather/weatherstation/specifications>.

Oonincx Dennis G. A. B., van Itterbeeck Joost, Heetkamp Marcel J. W., van den Brand Henry, van Loon Joop J. A. and van Huis Arnold 2010. An Exploration on Greenhouse Gas and Ammonia Production by Insect Species Suitable for Animal or Human Consumption. *Plos One* 5 (12).

Rafnet-ryhmä 2004. *Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille, Rafnet-oppimateriaalin teoriaosan osio K (Kosteus)*.

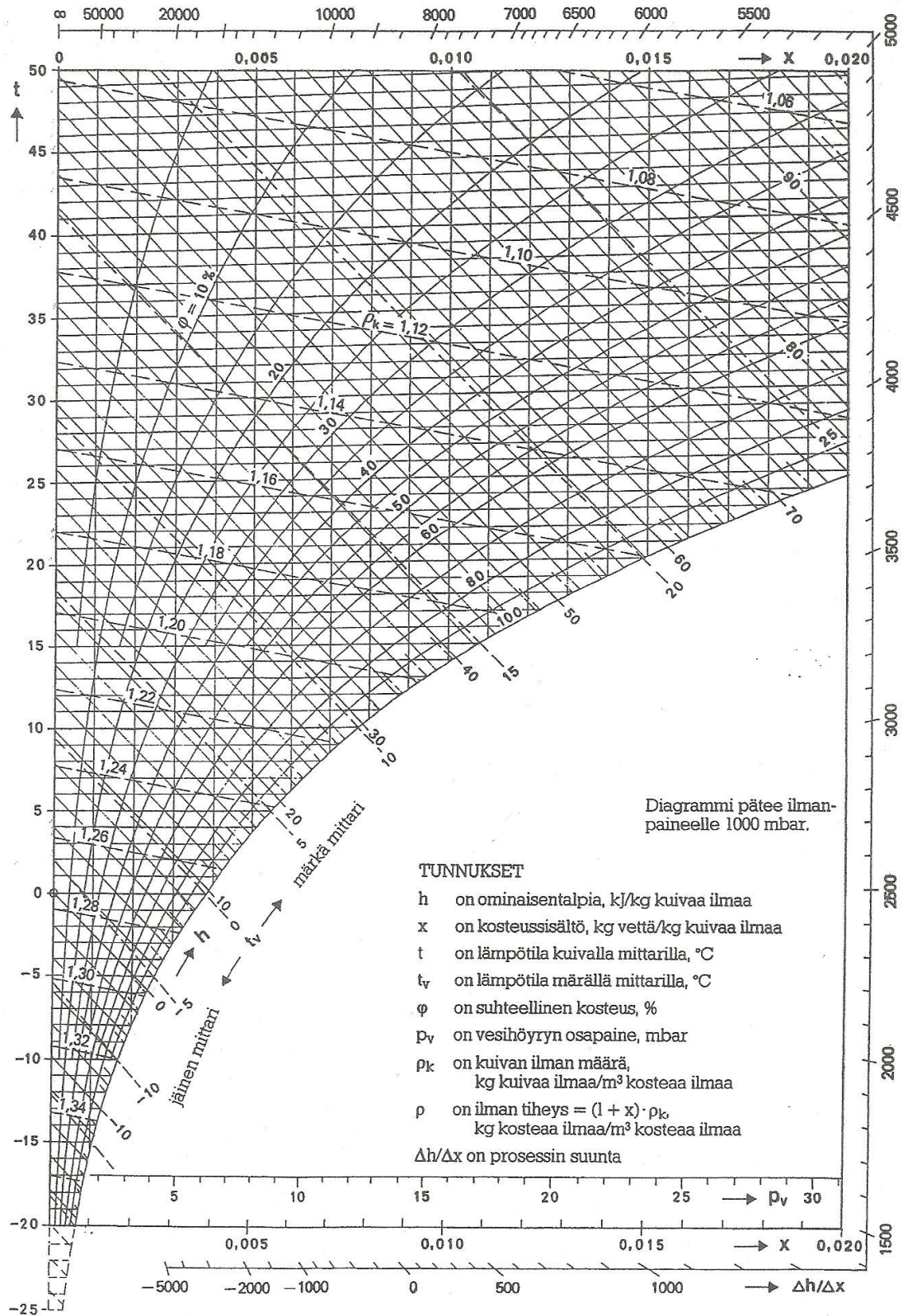
RIL 2012. *Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet*. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.

- Roe Richard M., Clifford C. W. and Woodring J. P. 1980. The effect of temperature on feeding, growth, and metabolism during the last larval stadium of the female house cricket, *Acheta domesticus*. *Journal of Insect Physiology* 26, 639-644.
- Sandberg Esa (toim.) 2016. Ilmastointitekniikka: Osa 1, Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät: perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Toinen painos. Helsinki, Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- Seppänen Olli ja Seppänen Matti 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Sisäilmayhdistys.
- Tilastokeskus, Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2017. Julkaistu 2018. Päivitetty 24.5.2018. Luettu 12.11.2018. https://tilastokeskus.fi/til/khki/2017/khki_2017_2018-05-24_kat_001_fi.html.
- van Huis Arnold, van Itterbeek Joost, Klunder Harmke, Mertens Esther, Halloran Afton, Muir Giulia and Vantomme Paul 2013. Edible insects: future prospects for food and feed security. Wageningen: Wageningen university & Research.
- Viljelyopas 2012. Raisioagro 02/2012
- Viljelyopas 2014. Raisioagro 01/2014
- Woodring J. P., Clifford C. W. and Beckman B. R. 1979. Food utilization and metabolic efficiency in larval and adult house crickets. *Journal of Insect Physiology* 24, 903-912.
- Woodring J. P., Clifford C. W., Roe R. M. and Beckman B. R. 1978. Effects of CO₂ and anoxia on feeding, growth, metabolism, water balance, and blood composition in larval female house crickets, *Acheta domesticus*. *Journal of Insect Physiology* 24, 499-509.
- Woodring J. P., Roe R. M. and Clifford C. W. 1976. Relation of feeding, growth, and metabolism to age in the larval, female house cricket. *Journal of Insect Physiology* 23, 207-212.
- Yrjänäinen Heli, Silvenius Frans, Kaukoranta Timo, Nikkilä Juha, Särkkä Liisa ja Tuhkanen Eeva-Maria 2013. MTT Raportti 83, Kasvihuonetuotteiden ilmastovaikutuslaskenta. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus (MTT).

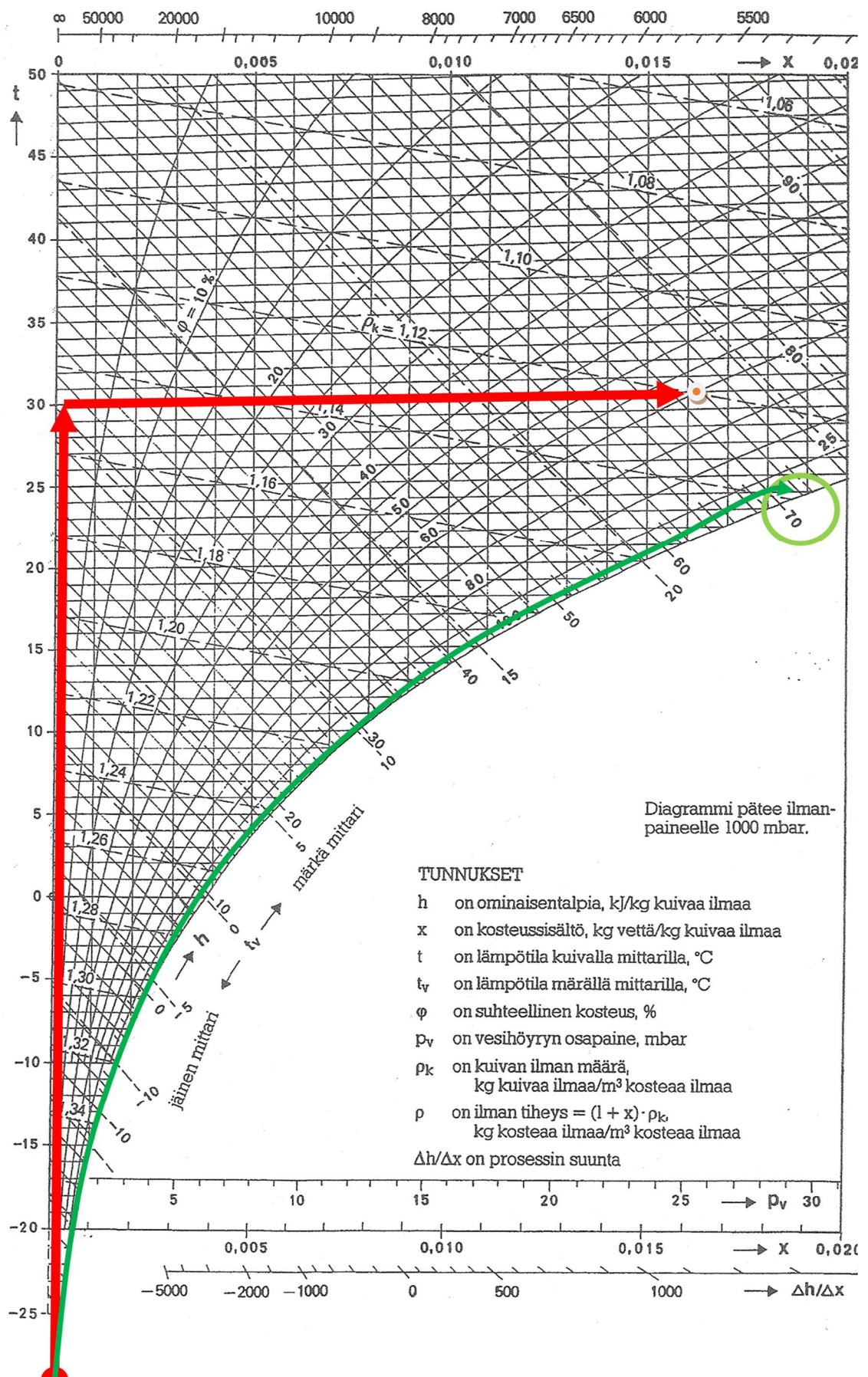
LIITTEET

Liite 1. Mollier-diagrammit

1 (2)



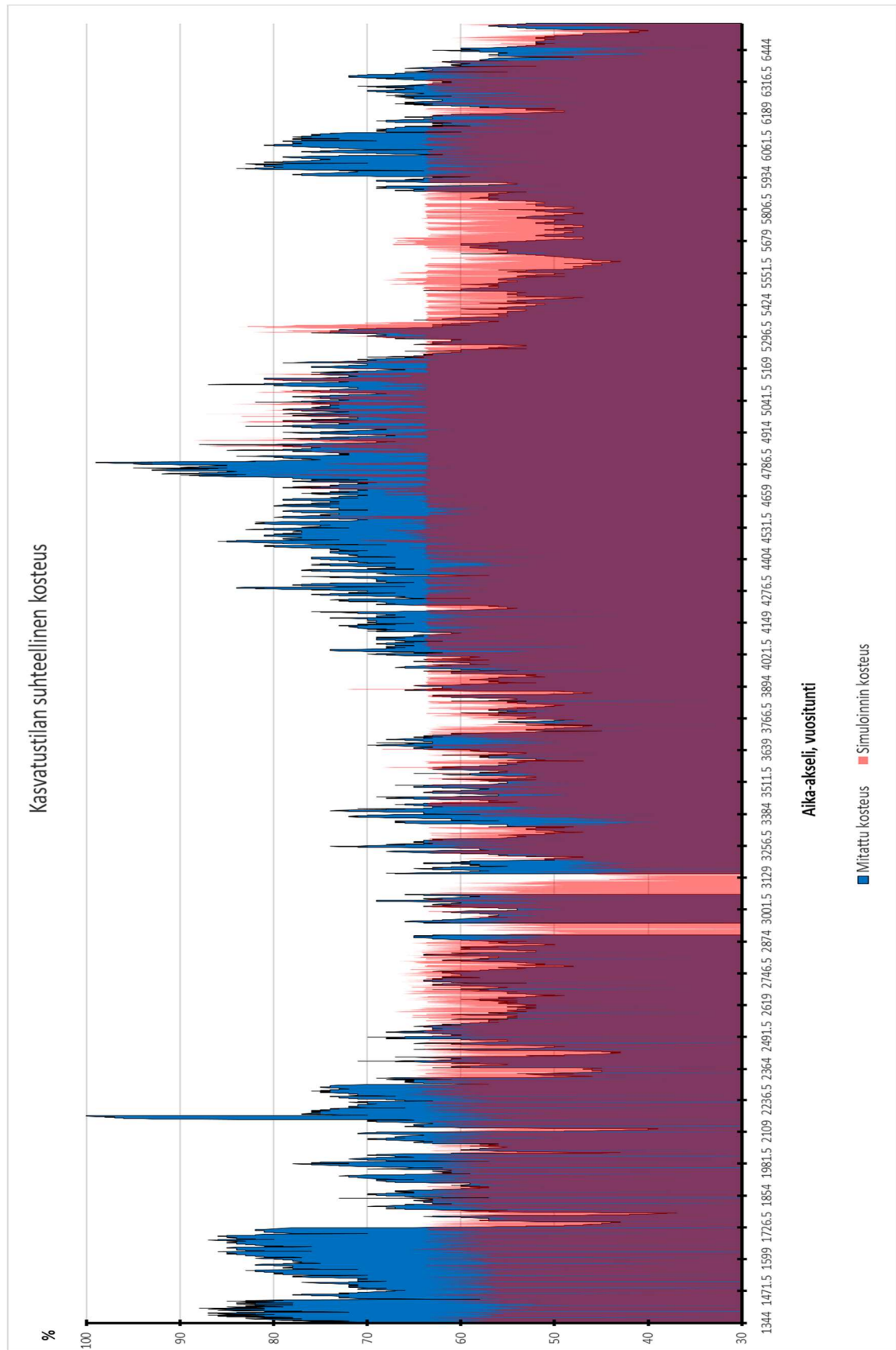
KUVA 11. Mollier-diagrammi ilman olosuhteiden ja muutosten tarkasteluun.



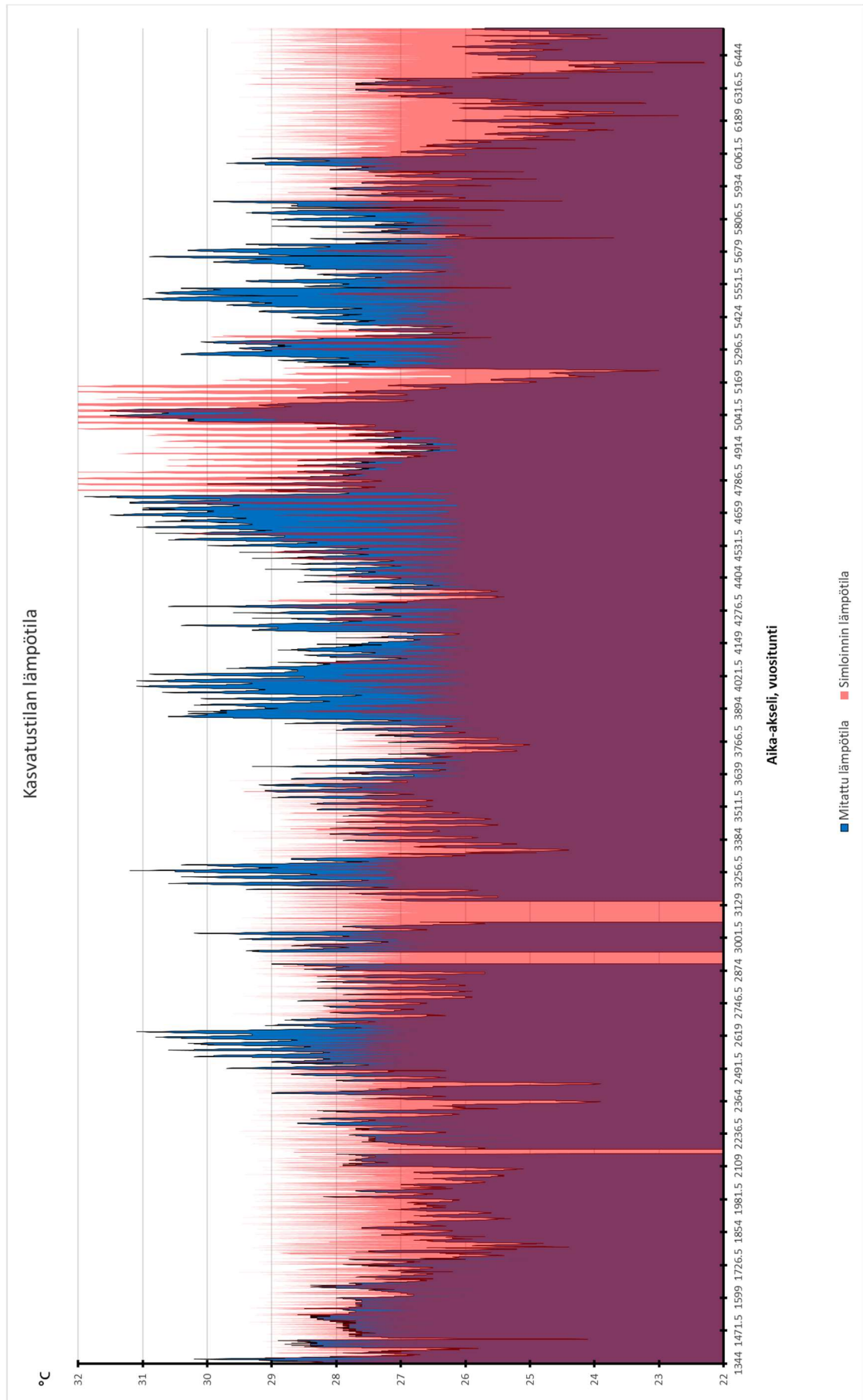
KUVA 12. Mollier-diagrammi, piirrettynä ulko- ja sisäilman mahdollinen ero talvella.

Liite 2. Simuloitujen ja mitattujen arvojen vertailua

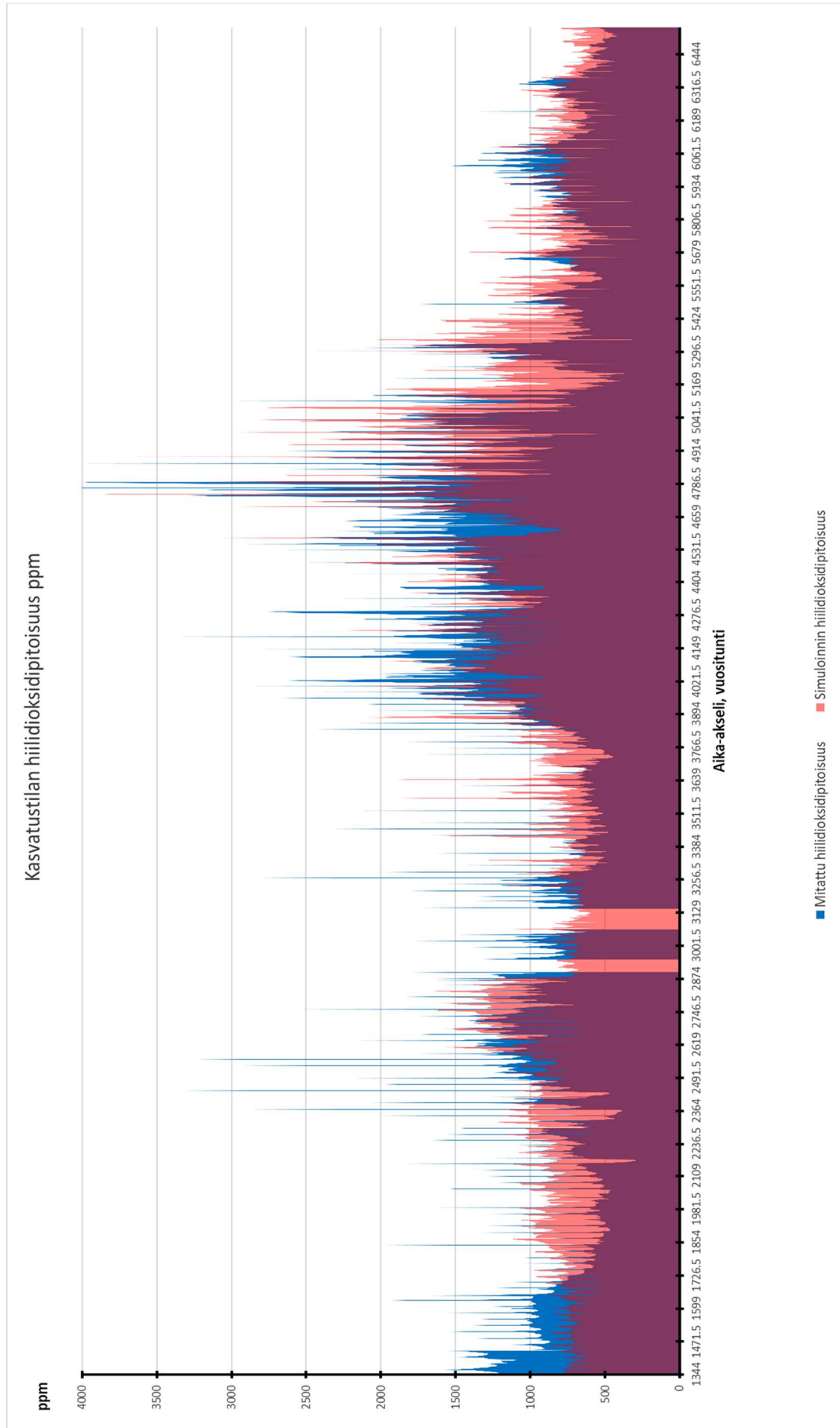
1 (3)



KUVAAJA 6. Mittausten ja simuloinnin suhteellisen kosteuden vertailu.



KUVAAJA 7. Mittausten ja simuloinnin lämpötilän vertailu.



KUVAAJA 8. Mittausten ja simuloinnin hiilidioksidipitoisuuden vertailu.