



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Sami Laiho

Merikontin ja siellä olevan pienkasvi- huoneen energiataseiden määrittämi- nen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

7.5.2021

Tekijä Otsikko	Sami Laiho Merikontin ja siellä olevan pienkasvihuoneen energiataseiden määrittäminen
Sivumäärä Aika	31 sivua + 1 liitettä 7.5.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	kemiantekniikka
Ohjaajat	projektipäällikkö Kaj Lindedahl lehtori Timo Laitinen
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli määrittää energiataseet pienkasvihuoneelle sekä merikontille, jossa pienkasvihuone on. Merikontti sekä pienkasvihuone sijaitsevat Metropolian ammattikorkeakoulussa olleessa Urbanfarmlab-tilassa.</p> <p>Opinnäytetyössä laskettiin merikontissa olevaan pienkasvihuoneeseen tulevat ja sieltä poistuvat energiavirrat kullakin hetkellä. Kasvihuoneen energiavirtojen lisäksi opinnäytetyössä huomioitiin myös merikontin energiavirrat. Energiavirtojen avulla työssä oli tarkoitus tutkia ovatko kasvihuoneen ja kontin energiavirrat stationääritilassa.</p> <p>Saatujen energiavirtojen avulla opinnäytetyössä oli tarkoitus verrata merikontissa olleen kasvihuoneen energiataseita muualle Suomeen sijoitetussa ulkokasvihuoneessa olleiden kurkun sekä tomaatin energiataseisiin. Samalla havainnollistettiin, mitä suuruusluokkaa merikontin energiahäviöt ovat.</p> <p>Energiataseisiin luettiin kaikki kasvihuoneessa olleet energialähteet sekä -häviöt. Kasvihuoneen energialähteisiin kuuluu led-lampuista saatu energia sekä kasvihuoneen yhteydessä olleen pumpun tuottama energia. Kontin energialähteisiin puolestaan kuuluu kasvihuoneen energiahäviöt. Niin kontin kuin kasvihuoneenkin energiahäviöihin puolestaan kuuluu säteily, johtuminen sekä haihtumisesta aiheutuva energia.</p> <p>Tuloksista havaittiin, että opinnäytetyössä esiintyvillä energiavirroilla kasvihuoneen sekä kontin energiavirrat eivät ole stationääritilassa. Vertailtaessa merikontissa olleen kasvihuoneen energiataseita ulkokasvihuoneessa olleiden kurkun ja tomaatin energiataseisiin huomattiin, että merikontissa olleen pienkasvihuoneen energiataseet ovat selvästi matalammat, kuin ulkokasvihuoneen energiataseet.</p>	

Avainsanat	kasvihuone, humala, pienkasvihuone, energiatase, säteily, johtuminen, haihtuminen
------------	---

Author Title	Sami Laiho Energy Balance Determination of a Container and a Small Greenhouse Located in the Container
Number of Pages Date	31 pages + 1 appendices 7 May 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Bio- and Chemical Engineering
Professional Major	Chemical Engineering
Instructors	Kaj Lindedahl, Project Manager Timo Laitinen, Principal Lecturer
<p>The purpose of the thesis was to define the energy balance of a small greenhouse and a container, where the small greenhouse is. The container and the small greenhouse are located in Urbanfarmlab in Metropolia University of Applied Sciences.</p> <p>The energy flow, which comes to the small greenhouse in the container and the energy flow which leaves the container were calculated. In addition to the energy flows of the greenhouse, the energy flows of the container were also considered. Using the energy flow calculations the purpose of this thesis was to examine whether the energy flows calculations of the greenhouse and those of the container would be stationary.</p> <p>Another purpose of the energy flow calculation was to compare the energy flows of the greenhouse in the container to those of an outdoor tomato and cucumber greenhouse which is located elsewhere in Finland. At the same time the main demonstrate the magnitude of energy losses of container.</p> <p>Energy balance was, in essence, the source of energy and energy loss. The source of energy of the greenhouse is generated by a led lamp and an energy-generating pump. The source of the greenhouse's energy is the energy loss of the greenhouse. The energy loss of the container as well as that of the greenhouse results mainly from radiation, conduction and evaporation.</p> <p>The results show that the energy balance of the greenhouse and that of the container are not stationary. When comparing the greenhouse, which is in the container to on outdoor greenhouse, where cucumber and tomatoes are grown, it was found that the energy balance of the small greenhouse which is in the container, is clearly lower than that of the greenhouse which is outside.</p>	

Keywords	greenhouse, hop, small greenhouse, energy balance, radiation, conduction, evaporation
----------	---

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Taseajattelu	1
2.1	Systeemi ja systeemin tila	1
2.1.1	Stationääritila	2
2.1.2	Dynaaminen tila	2
2.2	Energiamuodot	2
2.2.1	Sisäinen energia	2
2.2.2	Entalpia	3
2.2.3	Kineettinen energia	3
2.2.4	Potentiaalienergia	4
2.2.5	Gibbsin energia	4
2.2.6	Helmholtzin energia	5
2.3	Energiataseet	5
2.3.1	Energian säilymislause	5
2.3.2	Differentiaalisen ja integraalisen energiataseen ero	6
2.3.3	Kemiallisen reaktion huomioiminen energiataseessa	6
2.4	Ainetaseet	7
2.4.1	Aineen häviämättömyyden laki	7
2.4.2	Differentiaalisen ja integraalisen ainetaseen ero	8
2.4.3	Kemiallisen reaktion huomioiminen ainetaseissa	8
2.5	Taselaskut	9
2.5.1	Mitä taselaskuissa selvitetään	9
2.5.2	Taselaskujen vaiheet	9
2.5.3	Vapausasteiden merkitys taselaskuissa	10
2.6	Esimerkkejä taseiden käytön tuottamista hyödyistä	10
3	Lämmönsiirto	11
3.1	Johtuminen	11
3.2	Säteily	12
3.3	Konvektio	14
4	Haihtuminen	15
5	Opinnäytetyössä esiintyvän pienkasvihuoneen ja merikontin energiataseet	15

5.1	Kasvihuoneen energiataseet	16
5.1.1	Kasvihuoneen energialähteet	17
5.1.2	Kasvihuoneen energiahäviöt	18
5.2	Kontin energiataseet	19
5.2.1	Kontin energiahäviöt	20
5.2.2	Kontin energialähteet	22
6	Vertailu työssä esiintyvän pienkasvihuoneen energiatarkastelun ja vastaavan ulos sijoitetun kasvihuoneen välillä	22
7	Työn oletukset ja epävarmuudet	24
8	Yhteenveto ja johtopäätökset	25
	Lähteet	27

Liitteet:

Liite 1. Kasvihuoneen ja kontin energiamäärä kullakin hetkellä

Symbolit

- $A = \text{pinta - ala (m}^2\text{)}$
- $D = \text{halkaisija (m)}$
- $E_k = \text{kineettinen energia (J)}$
- $E_p = \text{potentiaali energia (J)}$
- F (symbolina käytetään usein myös A :ta) = Helmholtzin energia (J)
- $G = \text{Gibbsin energia}$
- $g = \text{putoamiskiikkyvyys (}\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\text{)}$
- $H = \text{entalpia (J)}$
- $h = \text{ominaisentalpia (}\frac{\text{J}}{\text{kg}}\text{)}$
- $k = \text{aineen termien konduktiivisuus (}\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\text{)}$
- $l = \text{korkeus (m)}$
- $m = \text{massa (kg)}$
- $n = \text{ainemäärä (mol)}$
- $\dot{m} = \text{massavirta (}\frac{\text{kg}}{\text{s}}\text{)}$
- $\dot{m}_1 = \text{tasealueeseen tuleva massavirta (}\frac{\text{kg}}{\text{s}}\text{)}$

- $\dot{m}_2 = \text{tasealueestoi poistuva massavirta } \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$
- $\dot{n} = \text{ainemäärävirta } \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}}\right)$
- $p = \text{paine (Pa)}$
- $Q = \text{energiasisältö (J)}$
- $q = \text{lämpövirta (W)}$
- $S = \text{entropia } \left(\frac{\text{J}}{\text{K}}\right)$
- $T = \text{lämpötila (K)}$
- $U = \text{sisäinen energia (J)}$
- $v = \text{virtausnopeus } \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$
- $V = \text{tilavuus (m}^3\text{)}$
- $W = \text{työ (J)}$
- $x = \text{matka (m)}$
- $\sigma = \text{Stefan – Boltzmannin vakio } \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}\right)$
- $\eta = \text{viskositeetti (Pa * s)}$

1 Johdanto

Urbanfarmlab-tila on Metropolia Ammattikorkeakoulussa sijaitseva luokkahuone, jossa eri yritykset saavat mahdollisuuden kehittää aeroponisia ja hydroponisia viljelytuotantoa. Samaan aikaan Metropolia Ammattikorkeakoulun opiskelijoille tarjoutuu mahdollisuus osallistua yritysten suunnittelu-, tutkimus- ja kehitystoimintaan.

Osana kasvihuoneen kasvuolosuhteiden optimointia tässä opinnäytetyössä pyrittiin määrittämään Urbanfarmlab-tilassa viljellylle humalan energiataseet. Humala on asetettu merikontissa olevaan kasvihuoneeseen, ja työn tarkoituksena oli katsoa, onko kasvihuoneeseen ja merikontin tulevat ja sieltä poistuvat energiataseet stationääritilassa.

Opinnäytetyössä tehtiin liitteessä 1 oleva Excel-tiedosto, johon on määritelty kasvihuoneeseen tuleva ja sieltä poistuva energiamäärä kullakin hetkellä. Excel-tiedostoon on koottu kasvihuoneen energialähteet- ja häviöt. Energiahäviöihin kuuluu säteily, johtuminen ja haihtuminen. Lisäksi energiahäviöihin lasketaan, oven ollessa auki tapahtuva, konvektioon tarvittava energian määrä, vaikkakaan tässä työssä sitä ei ole huomioitu. Energia lähteisiin kuuluu pumpuista tuleva energia sekä kymmenestä 28 W:n Valoya Led-lampuista saatu energia.

Opinnäytetyössä tarkasteltiin kasvihuoneen energiataseiden lisäksi liitteessä 1 olevasta Excel-tiedostosta löytyvän merikontin ja ympäristön välisiä energiataseita. Kasvihuoneen energiahäviöt toimivat samalla kontin energialähteinä. Kontin energiahäviöihin kuuluu kontin ja ympäristön välinen johtuminen, säteily, haihtuminen sekä kontin oven ollessa auki tapahtunut konvektio.

2 Taseajattelu

2.1 Systeemi ja systeemin tila

Suljetussa systeemissä tasealueeseen ei tule eikä sieltä poistu ainetta. Vastaavasti avoimeen systeemiin tulee tai/ja sieltä poistuu ainetta sekä energiaa. (1, s. 3.) Vastaavasti

eristetty systeemi tarkoittaa systeemiä, johon ei pääse ainetta eikä energia. Tämä on mahdollista vain, jos systeemi on riittävän kaukana muista systeemeistä tai jos systeemi ei ole vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa (2). Suljettu ja eristetty systeemi eroaa toisistaan siinä, että suljetun systeemin ja ympäristön välillä energian siirto on mahdollista, mutta eristetyn systeemin kohdalla ei ole. Systeemin kertymä voidaan laskea kaavalla 1. (1, s. 2.):

$$Kertymä = \text{Sisään tuleva} - \text{Ulos menevä} + \text{Tasealueella syntyvä virtaus} \quad (1)$$

2.1.1 Stationääritila

Stationääritilasta puhuttaessa tarkoitetaan tilaa, jossa kertymä saa arvoksi nolla. Stationääritilassa systeemin intensiiviset ominaisuudet eivät riipu ajasta missään kohtaa tasealuetta. (1, s. 3.)

2.1.2 Dynaaminen tila

Dynaaminen tila puolestaan tarkoittaa tilaa, jossa kertymän arvo ei ole nolla. Silloin systeemin intensiiviset ominaisuudet muuttuvat ajan suhteessa. (1, s. 3.)

2.2 Eri energiamuodot

Energia on hyvin laaja käsite, joka jakautuu useaan eri muotoon. Näitä ovat muun muassa potentiaalienergia, sisäinen energia, entalpia, kineettinen energia, Gibbsin energia ja Helmholtzin energia.

2.2.1 Sisäinen energia

Sisäisellä energialla tarkoitetaan energiaa, joka on suljettu aineen sisälle. Toisin sanoen sillä tarkoitetaan aineen molekyylien sidos- ja värähtelyenergiaa. Makroskooppisella tasolla, tällä ei kuitenkaan ole merkitystä. Siirrettäessä koko systeemiä systeemin sisäinen energia pysyy samana. (3.) Esimerkiksi voidaan nostaa tietyllä nopeudella liikkuva esine, jolla on tietty kineettinen energia, mutta esineen sisäinen energia pysyy vakiona.

Aineen sisäisen energian määrä riippuu ainemäärän lisäksi myös aineen lämpötilasta. Ideaalikaasun sisäinen energia lasketaan kaavalla 3 (3):

$$U = \frac{3}{2} * n * R * T \quad (3)$$

jossa:

n = ainemäärä, $R = 8,3145 \frac{J}{m \cdot K}$ ja T = lämpötila

2.2.2 Entalpia

Entalpia on aineen termodynaaminen ominaisuus. Aineen entalpialla tarkoitetaan systeemin kykyä tehdä ei-mekaanista työtä, jonka lisäksi entalpia ilmaisee reaktion kyvyn vapauttaa tai sitoa lämpöä. Reaktiota kutsutaan eksotermiseksi silloin, kun reaktio vapauttaa lämpöä ja endotermiseksi silloin, kun reaktio sitoo lämpöä. Entalpia lasketaan alla kaavalla 2. (4.):

$$H = U + p * V \quad (2)$$

jossa:

U = sisäinen energia, p = paine ja V = tilavuus

Yhtälössä ei esiinny lämpötilaa, vaikka lämpötilan nosto näkyikin samalla myös aineen entalpian kasvuna. Tämä johtuu siitä, että lämpötilan nosto lisää samalla myös molekyylien liikehdintää ja täten aineen sisäisen energian kasvua. (5.)

2.2.3 Kineettinen energia

Kineettinen energia on liikettä, jonka eri aineet omaavat. Siihen kuuluu useita erilaisia muotoja kuten värähtelyliike, pyörimisliike tai translaatioliike. (6.) Translaatioliike on liikettä, joka syntyy, kun esine liikkuu paikasta toiseen (7). Kineettinen energia lasketaan kaavalla 4 (6):

$$E = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (4)$$

jossa:

m = kappaleen massa, v = kappaleen nopeus

2.2.4 Potentiaalienergia

Potentiaalienergia on esineen sijaintiin liittyvää esineeseen varastoitunutta energiaa. Tästä esimerkkinä voidaan pitää purkukoneen purkupalloon varastoitunutta energiaa, kun sitä pidetään korotetussa asennossa. Kun pallo päästetään ja pallo ottaa tavanomaisen asentonsa potentiaalienergia purkautuu esineestä. (8.)

Gravitaatioon perustuva potentiaalienergia on ehkä keskeisin potentiaalienergiamuoto. Potentiaalienergiaa varastoituu esineeseen, kun se nostetaan tiettyyn korkeuteen. Energia vapautuu, kun esine lasketaan alkuperäiseen asentoonsa. Potentiaalienergiaan vaikuttaa myös kappaleen massa. Potentiaalienergia lasketaan kaavalla 5. (8.):

$$E = m * g * h \quad (5)$$

jossa:

m = kappaleen massa, g = 9,81 $\frac{m}{s^2}$, h = korkeus

2.2.5 Gibbsin energia

Gibbsin energia määrittää tarvitseeko reaktio ulkoista energiaa vai ei. Reaktion Gibbsin energia lasketaan vähentämällä reaktion tuotteiden puolella olevien aineiden Gibbsin energian summasta reaktion lähtöaineiden Gibbsin energian summa. Mikäli Gibbsin energian arvoksi tulee negatiivinen arvo, reaktio tapahtuu spontaanisti, eli reaktio ei tarvitse ulkoista energiaa. Mikäli taas Gibbsin energia saa negatiivisen arvon reaktion aikaan saamiseksi tarvitaan ulkoista energiaa. Gibbsin energia määritellään entalpijan ja entropian avulla. Gibbsin energiamuutos lasketaan kaavalla 6 (9.):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6)$$

jossa:

ΔH = entalpiain muutos, T = lämpötila ja ΔS = entropian muutos

2.2.6 Helmholtzin energia

Kuten luvussa 2.2.6 mainittiin, sisäinen energia kuvaa energiaa, mikä on suljettu järjestelmän sisälle. Sisäinen energia ei siis ota huomioon järjestelmän ympärillä olevaa lämpötilaa eikä tilavuutta. Koska kuitenkin osa energiasta saadaan spontaanilla energian siirrolla ympäristöstä järjestelmään, tämä otetaan huomioon Helmholtzin energian avulla. Helmholtzin energia lasketaan kaavalla 7 (10.):

$$F = U - T * S \quad (7)$$

Mikäli Helmholtzin energia muuttuu, tämä otetaan huomioon kaavalla 8 (11.):

$$\Delta F = \Delta U - S\Delta T \quad (8)$$

2.3 Energiataseet

2.3.1 Energian säilymlause

Energian säilymlauseeseen mukaan energiaa ei koskaan synny eikä häviä, se voi ainoastaan muuttaa muotoaan. Sama asia voidaan esittää kaavalla 9. (12.):

$$\Delta U = Q - W \quad (9)$$

jossa:

Q = systeemin lämpöenergia, W = systeemin tekemä työ

2.3.2 Differentiaalisen ja integraalisen energiataseen ero

Energiataseille on määritelty sekä differentiaalinen, että integraalinen tase. Kuten niistä voimme päätellä integraalinen energiatase kuvaa energiatasetta tietyllä aikavälillä. Tämän takia se sopii paremmin panostamiseen reaktioon. Integraalinen energiatase suljetussa systeemissä voidaan laskea kaavalla 10. (13.):

$$U_{out} - U_{in} + E_{k_{out}} - E_{k_{in}} + E_{p_{out}} - E_{p_{in}} = \int_{in}^{out} Q dt - \int_{in}^{out} W dt \quad (10)$$

jossa:

U_{out} = sisäinen energia tasealueen ulkopuolella, U_{in} = sisäinen energia tasealueen sisällä, $E_{k_{in}}$ = kineettinen energia tasealueen sisäpuolella, $E_{k_{out}}$ = kineettinen energia tasealueen ulkopuolella, $E_{p_{in}}$ = kineettinen energia tasealueen sisäpuolella, $E_{p_{out}}$ = kineettinen energia tasealueen ulkopuolella, Q = systeemin lämpö, W = systeemin tekemä työ

Avoimessa systeemissä kaava on hieman monimutkaisempi (13.):

$$U_{out} - U_{in} + E_{k_{out}} - E_{k_{in}} + E_{p_{out}} - E_{p_{in}} = \int_{in}^{out} U_{out} - U_{ib} + \int_{in}^{out} E_{k_{out}} - \int_{in}^{out} E_{k_{in}} + \int_{in}^{out} E_{p_{out}} - \int_{in}^{out} E_{p_{in}} + \int_{in}^{out} Q dt - \int_{in}^{out} W dt \quad (11)$$

Differentiaalinen energiatase puolestaan kuvaa energiatasetta tietyllä hetkellä. Tämän vuoksi se sopii hyvin jatkuvatoimiseen reaktioon. Differentiaalinen energiatase suljetussa systeemissä lasketaan kaavalla 12. (13.):

$$U_{out} - U_{in} + E_{k_{out}} - E_{k_{in}} + E_{p_{out}} - E_{p_{in}} = Q - W \quad (12)$$

2.3.3 Kemiallisen reaktion huomioiminen energiataseessa

Energiataseiden kohdalla jokaisessa kemiallisessa reaktiossa on oma reaktiolle tyypillinen energiamäärä, mitä reaktio vaatii. Kemialliset reaktiot joko päästävät tai sitovat

energiaa itseensä riippuen siitä, onko kyse ekso- vai endotermisestä reaktiosta. Energian säilymislauseen mukaan energiaa ei kuitenkaan synny eikä häviä, joten reaktiot joko sitovat sitä ympäristöstä tai vapauttavat sitä ympäristöön. Energiataseiden yhteydessä tämä energia on yleisimmin lämpöä, mutta se saattaa sisältää joskus myös valoa, sähköä ja ääntä. (14.)

Jokaiselle molekyytille on määritelty kyseiselle molekyytille ominainen muodostumisentalpia. Siten reaktion vaatima kokonaisenergiämäärä reaktion aikaan saamiseksi saadaan laskettua vähentämällä reaktiotuotteiden puolella olevien molekyylien muodostumisenergioiden summa lähtöaineiden puolella olevien molekyylien muodostumisenergioiden summalla. Muodostumisentalpiat on muistettava kertoa reaktioyhtälössä esiintyvällä kertoimella. (15.)

On syytä muistaa, että muodostumisentalpia on taulukoitu perustilan paineessa ja lämpötilan ollessa 25 °C (16, s.769). Tämän vuoksi reaktion energiämäärän laskeminen jossain muussa lämpötilassa ja paineessa tapahtuu kolmessa eri vaiheessa. Ensin pitää laskea energian muutos lähtötilanteen olosuhteista 25 °C:n ja normaaliin ilmanpaineeseen. Sen jälkeen lasketaan kyseisen reaktion energiämäärä 25 °C:n lämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa. Viimeisessä vaiheessa lasketaan energian muutos reaktion loppu lämpötilaan ja paineeseen. Reaktion kokonaisenergian määrä on näiden energioiden summa. (16, s. 772.)

2.4 Ainetaseet

2.4.1 Aineen häviämättömyyden laki

Aineen häviämättömyyden laki edellyttää, että eristetyssä systeemissä massa ei pysty lisääntymään tai vähenemään riippumatta eristetyssä systeemissä esiintyvien aineiden järjestyksestä tai asennosta (17).

2.4.2 Differentiaalisen ja integraalisen ainetaseen ero

Kuten energiataseilla myös ainetaseiden kohdalla on erikseen määritelty differentiaalinen ja integraalinen ainetase. Ainetaseissa niin differentiaalisen kuin integraalisenkin taseen idea on sama kuin energiataseilla, eli integraalisen ainetaseen ideana on kuvata ainetasetta tietyllä aikavälillä. Ainetase voidaan laskea kaavalla 13. (12.):

$$dt * \frac{dm}{dt} = dt * \dot{m}_2 - dt * \dot{m}_1 + dt * G - dt * C \quad (13)$$

jossa:

\dot{m}_2 = massavirta lopussa, \dot{m}_1 = massavirta alussa, G ja C tarkoittaa tasealueen sisällä tuotetun ja kulutetun aineen määrää

Yhtälö voidaan muuttaa muotoon (12.):

$$m_2 - m_1 = \int_1^2 \dot{m}_2 * dt - \int_1^2 \dot{m}_1 * dt + \int_1^2 G * dt - \int_1^2 C * dt \quad (14)$$

Differentiaalinen ainetase puolestaan kuvaa ainetasetta tietyllä hetkellä. Tämän takia se sopii paremmin jatkuvatoimiseen reaktoriin. Ainetase pystytään laskemaan kaavalla 15. (12.):

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 + G + C \quad (15)$$

2.4.3 Kemiallisen reaktion huomioiminen ainetaseissa

Kemiallisen reaktion yhteydessä täytyy muistaa aineen häviämättömyyden laki eli se, että alkuaineita ei häviä eikä synny. Esimerkkinä voidaan nostaa metaanin ja hapen reaktio hiilidioksidiksi ja vedeksi. (16, s. 226.):



Reaktiossa lähtöaineiden puolella esiintyy kaksi happimolekyyliä ja tuotteiden puolella kaksi vesimolekyyliä, koska silloin lähtöaineiden sekä tuotteiden puolelle saadaan neljä happiatomia ja neljä vetyatomia. (16, s. 226.)

2.5 Taselaskut

2.5.1 Mitä taselaskuissa selvitetään

Ehkä keskeisin asia taseajattelun käytölle on siinä, että sillä pystytään selvittämään tuntemattomia arvoja massa-, energia- tai ainemäärä laskuissa. Tässä tosin on tärkeä muistaa, että tuntemattomien lukujen määrittäminen on mahdollista vain, jos taseiden vapausasteiden lukumäärä on nolla tai pienempi. Opinnäytetyössä vapausasteista kerrotaan enemmän jäljempänä tässä luvussa. (18, s. 9.)

2.5.2 Taselaskujen vaiheet

Taselaskujen työvaiheiden tunteminen on tärkeä osa insinöörin työtaitoja. Vaikka taselaskuja on useita erilaisia, taselaskut kaikissa näissä tapauksissa etenevät pääpiirteittäin samalla tavalla. (1, s. 2.):

1. Piirretään kuva tasealueesta
2. Listataan laskuihin liittyvät oletukset
3. Listataan taseisiin liittyvät yhtälöt
4. Ratkaistaan tuntemattomat termit
5. Tarkistetaan se, mitä kysyttiin

2.5.3 Vapausasteiden merkitys taselaskuissa

Vapausasteiden tarkoitus taselaskujen kohdalla on määrittää, onko taseisiin liittyvissä yhtälöissä esiintyvät tuntemattomat luvut ratkaistavissa. Vapausasteet lasketaan kaavalla 17 (18, s. 9.):

$$\textit{Tuntemattomien lukujen lukumäärä} - \textit{Yhtälöiden lukumäärä} = \textit{Vapausasteet} \quad (17)$$

Kuten aiemmin todettiin taselaskuihin liittyvät tuntemattomat luvut ovat ratkaistavissa vain, jos vapausasteiden määrä on nolla tai vähemmän. Mikäli vapausaste saa arvoksi positiivisen luvun kaikkia taseissa esiintyviä tuntemattomien lukujen arvoja ei pystytä ratkaisemaan ja tämän takia sanotaan, että taseet ovat alimääriteltäviä. Jos puolestaan vapausasteen arvoksi saadaan negatiivinen luku, sanotaan, että vapausaste on ylimääriteltä. (18, s. 9.)

2.6 Esimerkkejä taseiden käytön tuottamista hyödyistä

Esimerkkeinä taseiden käyttöön liittyvistä hyödyistä voidaan nostaa UPM:n uusiutuviin polttoaineisiin tähtäävä projekti. Projektissa UPM pyrkii massataseita hyväksi käyttäen varmistamaan, että tuotannossa käytetyistä raaka-aineista väitetty määrä on uusiutuvia raaka-aineita ja loppukäyttäjille koituu täysi hyöty UPM:n käyttämistä kestävästä ympäristövalinnoista. (19.)

Energiataseiden puolella esimerkiksi voidaan nostaa Juvan Bioson Oy:n biokaasulaitoksen energiataseen määrittäminen. Taseessa on esitetty kaikki prosessissa esiintyvä energiahukka. Tähän on sisällytetty syötteiden kuljetuksessa kulunut energiahukka, biokaasulaitoksen käyttämä sähkö- ja lämpöenergia. Sähkö- sekä lämpöenergiasta on eritelty verkosta ostettu sähkön määrä. (20. s. 20–23.)

Energiataseeseen on myös sisällytetty biokaasulaitoksen tuottama sähkö- ja lämpöenergia (20, s. 23). Tuotoissa on eritelty laitoksen itselleen tuottaman sähkön määrä sekä myyntiin menevä sähkömäärä (20, s 24).

Työssä saatuja arvoja verrattiin mitattuihin arvoihin. Työssä todettiin, että aiemmin mitattuihin arvoihin verrattuna syötteiden kuljetukseen kulunut energia on pieni. Sen sijaan laitoksen kuluttama energiamäärä niin sähkön, kuin lämmönkin osalta vastaa oletettua. (20, s. 52.) Laitoksen tuottama energia kuitenkin on arvioitua alhaisempi. Taseiden perusteella kuitenkin selvisi, että kokonaistase laitoksessa on positiivinen, eli laitoksen energiatase on kannattava. (20, s. 53.)

3 Lämmönsiirto

Lämmönsiirrossa on kyse energian siirtymisestä suurempienergisestä matalampaan lämpöenergiaan. Lämpö voi siirtyä johtumalla, säteilyllä tai konvektiolla. Useimmiten lämpö siirtyy kaikkien kolmen lämmönsiirtomuodon avulla samanaikaisesti (21, s. 102.)

3.1 Johtuminen

Johtuminen on lämmönsiirtoa molekyylien, atomien ja elektronien välityksellä (22, s. 17). Kullakin aineella on siten aineelle ominainen lämmönjohtavuus, mikä määrittää sen, kuinka nopeasti lämpö siirtyy kussakin aineessa. Lämmönjohtavuuden yksikkö on $\frac{W}{m \cdot K}$, eli se kuvaa lämmön muutosta tietyllä matkalla. On aineita, joilla on korkea lämmönjohtavuus sekä aineita, joiden lämmönjohtavuus on huono. (22, s. 9.) Lämmönjohtumista esiintyy kiinteiden aineiden lisäksi myös nesteillä sekä kaasuilla (23, s. 25). Näillä tosin lämmönjohtavuus on huonompi, kuin kiinteillä aineilla (22, s. 9).

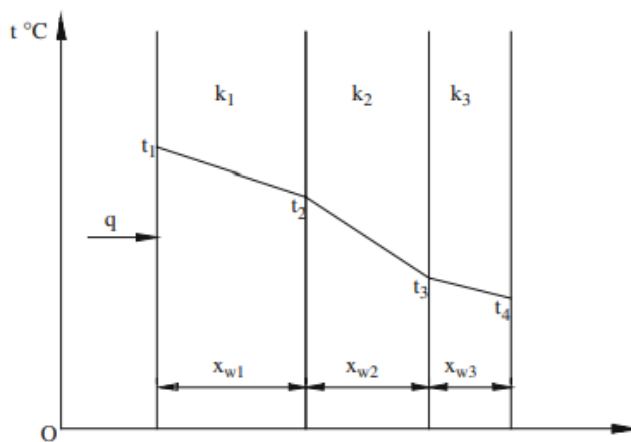
Lämmönjohtavuutta tasoseinän läpi kuvaava yhtälö (23, s. 13):

$$q = -k * A * \left(\frac{dT}{dx}\right) \quad (18)$$

jossa:

k = aineen termien konduktiivisuus, A = lämmön läpäisyypinta-ala, $\frac{dT}{dx}$ = lämpötilan muutos matkan funktiona. Miinusmerkki tulee siitä, kun lämpötila laskee energian läpikulun aikana

Kuva 1 havainnollistaa lämpötilan laskua lämmön siirtyessä monikerrosseinän läpi (23, s. 17). Vastaava ilmiö tapahtuu, vaikka seinä olisi rakennettu vain yhdestä materiaalista, joskin siinä materiaaleja on vain yksi ja täten myös lämmönjohtavuus on sama lämmönsiirron aikana. Kuva osoittaa, että lämpö siirtyy ensin seinään k_1 ja läpäisee eri lämmönsiirtokertoimien omaavat seinät poistuen lopuksi seinästä k_3 viilentyneenä. (23, s. 29.)

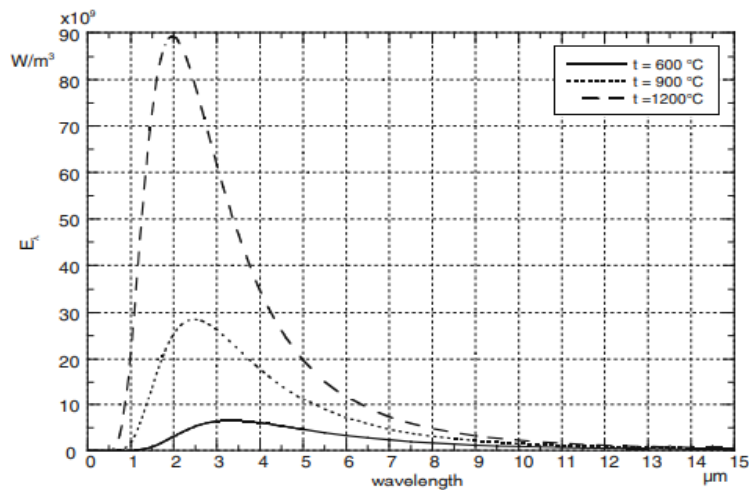


Kuva 1. Lämpötilan (T) muutos monikerrosseinän (k) paksuuden (x_w) funktiona lämmön (q) johtuessa monikerrosseinän läpi (23, s. 17).

3.2 Säteily

Lämpösäteily on infrapunasäteilyä (24), johon kuuluu kaikki reaalilämpötilassa olevat kappaleet, eli toisin sanoen kaikki kappaleet, joiden pintalämpötila on suurempi, kuin absoluuttinen nolapiste. Lämpimämpi kappale siis emittoi osan energiastaan, jonka viileämpi kappale absorboi joko osittain tai kokonaan (26, s. 102). Ero muihin lämmönsiirtomekanismeihin näkyy siinä, ettei säteily vaadi väliainetta energian siirtoon. Lämpösäteily on siis nimenomaan sähkömagneettista säteilyä, joka on riippumaton väliaineesta. (23, s. 139.)

Säteilyn intensiteetti näyttää säteilyn tehon tiettyä pintaa vastaan, eli sen yksikkö on $\frac{W}{m^2}$. Aineet lähettävät lämpötilansa mukaista säteilyä, jonka maksimi-intensiteettiä vastaava aallonpituus lyhenee lämpötilan kasvaessa. (25, s. 11.) Tämän seurauksena säteilyn intensiteetti on sitä suurempi, mitä suurempi lämpötila on (22, s. 189). Kuva 2 näyttää, miten mustan kappaleen säteilyn intensiteetti kasvaa ja maksimi-intensiteettiä vastaava aallonpituus pienenee lämpötilan kasvaessa (23, s. 140.) Monokromaattinen säteily on säteilyä, jolla on vain yksi aallonpituus ja taajuus. Tässä on tosin syytä muistaa, että mikään näkyvä valo ei ole täysin monokromaattinen. Jopa laservalo ei ole täysin monokromaattista, vaikkakin se on reaali maailmassa olevista valoista kaikkein lähinnä monokromaattista valoa. (27.)



Kuva 2 Mustan kappaleen säteilyn intensiteetin kasvaminen ja maksimi-intensiteettiä vastaavan aallonpituuden siirtyminen kohti pienempiä aallonpituuksia lämpötilan kasvaessa (23, s. 141).

Mikäli aine absorboi kaiken aineeseen tulevan säteilyn ainetta kutsutaan mustaksi kappaleeksi, joskaan reaali maailmassa mikään kappale ei ole täysin musta (23, s. 139). Tämän seurauksena reaali maailmassa jokainen kappale absorboi sekä emittoi säteilyä, mikä on lähtöisin muista lähteistä. Se emittoiko vai heijastaako kappale kuinka ison osan kappaleesta lähtevästä energiasta riippuu kappaleen pintamateriaalista. (24.)

Säteilyn aallonpituus sähkömagneettisten aallonpituuden alueelle vaihtelee 0,8–400 μm. Vertailun vuoksi voidaan nostaa vaikkapa näkyvän valon aallonpituus, mikä on välillä 0,35–0,75 μm. Näkyvän valon osuus lämpösäteilyssä vaihtelee siis lämpötilan mukaan.

Alhaisilla lämpötiloilla näkyvän valon osuus on niin pieni, ettei sitä ihmissilmin kyetä havaitsemaan. Korkeammissa lämpötiloissa asia on kuitenkin eri. Hehkulamppu on hyvä esimerkki siitä, että korkeammissa lämpötiloissa näkyvän valon aallonpituudella on suurempi rooli. (22, s. 189.)

Lämpösäteilyn luonteen takia eri aaltoalueilla lämpösäteily käyttäytyy huomattavan eri tavalla. Säteilyenergia on muun muassa merkitsevä. Lisäksi mittauskaistan ollessa keskiaaltoisella alueella, emissiivisyyden vaihtelu on huomattavasti suurempaa. (24.) Lämpösäteilyn takia tapahtunut lämpöhäviö voidaan laskea kaavalla 19 (21, s. 150):

$$q = \sigma * A * \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right) \quad (19)$$

jossa:

T_1 ja T_2 kuvaavat lämmönsiirtopintojen lämpötiloja, q (W) kuvaa tehoa, A (m^2) kuvaa kappaleiden välistä kohtisuoraa pintaa ja $\sigma = 5,672 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$

3.3 Konvektio

Konvektio on lämmönsiirtoa fluidissa. Konvektio voi olla joko pakotettua tai vapaata. Vapaassa konvektiossa liikkeellepaneva voima on fluidin tiheyserot, sillä konvektiossa kuuma vähäpaineinen aine nousee ylöspäin ja viilentynyt aine laskeutuu alaspäin. Vapaassa konvektiossa lämpö siirtyy siis virtaavan fluidin mukana ja se voi syntyä joko kahden eri lämpöisen fluidin tai seinän ja fluidin välillä. Lämpötilaerosta aiheutuva nestetiheysero saa aikaan voiman, joka synnyttää liikkeen. Pakotettu konvektio puolestaan syntyy ulkoisen voiman ansiosta. (28, s. 32.) Kaava 20 kuvaa konvektiolla tapahtuvaa lämmönsiirtoa (29.):

$$q = h_c * A * dT \quad (20)$$

jossa:

q (W) = teho, $h_c \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ = konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, dT (K) = lämpötilaero ja A (m^2) = lämmönsiirtopinta-ala

4 Haihtuminen

Haihdutuksen tarkoituksena on saada haihtuva liuos erotettua haihtumattomasta liuoksesta nostamalla lämpöä tai alentamalla painetta. Tällöin erotettava aine haihtuu erotettavasta aineesta höyrynä. Haihdutuksen sekä haihtuvan aineen lauhdutuksen tarkoituksena on joko erottaa aineet tai väkevöittää seos. (30.) Haihdutusta käytetään myös seoksen puhdistamiseen (31).

Haihtuminen on siis prosessi, missä nestemäisessä tilassa olevat molekyylit muuttuvat kaasumaiseen muotoon. Tähän tarvitaan riittävä määrä energiaa. Tästä syystä myös haihtuminen on sitä nopeampaa, mitä suurempi lämpötila on. (32.) Lisäksi koska höyrystyminen vaatii energiaa kyseinen energiamäärä ei korota jäljellä oleva nesteen lämpötilaa. Entalpian muutos vakiopaineessa lasketaan kaavalla 21 (33.):

$$\Delta H_{vap} = h * m \quad (21)$$

jossa:

h = ominaisentalpia ($\frac{J}{kg}$), ΔH_{vap} = entalpian muutos (J) ja m = massa (kg)

Entalpian määrä on myös riippuvainen paineesta. Entalpian määrää pienenee paineen noustessa, mistä huolimatta höyrystymispiste kasvaa. Esimerkiksi veden haihdutuserntalpia normaalissa ilmanpaineessa on $2257 \frac{kJ}{kg}$. (33.)

5 Opinnäytetyössä esiintyvän pienkasvihuoneen ja merikontin energiataaseet

Opinnäytetyössä tehtiin liitteessä 1. esiintyvä Excel-tiedosto, jolla tutkittiin, ovatko systeemiin tulevat ja sieltä poistuvat energiataaseet stationääritilassa eli toisin sanoen onko

energiataseiden summa nolla. Tiedostossa on laskettu kunkin lämmönsiirtomuodon energian määrä ja määritelty kokonaisenergian niiden avulla.

5.1 Kasvihuoneen energiataseet

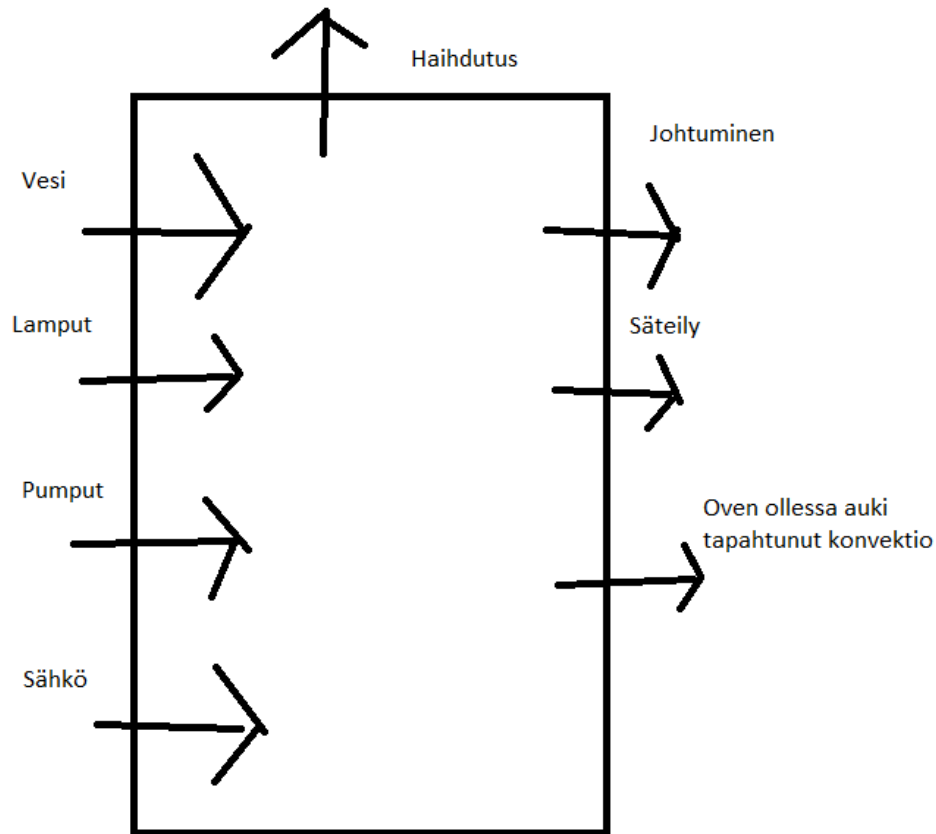
Työssä on tarkoitus tarkistaa, ovatko kuvassa 3 olevan kasvihuoneen energialähteiden ja energiahäviöiden summat yhtä suuria. Eli toisin sanoen onko kasvihuone stationääri-tilassa.



Kuva 3. Kontissa oleva Metalcraft minikasvihuone

Kasvihuoneen energia lähteisiin vaikuttaa, sähkö, lamput ja pumpput. Energiahäviöihin kuuluu lämpöhäviöt sekä haihdutukseen tarvittava energia. Tämän vuoksi laskuissa pätee yhtälö 22:

$$\textit{kasvihuoneen energialähteet} = \textit{kasvihuoneen energiahäviöt} \quad [22]$$



Kuva 4. Kasvihuoneen energiataseet.

5.1.1 Kasvihuoneen energialähteet

Kasvihuoneeseen on asennettu 10 W:n pumppu, joka pumppaa vettä putkea pitkin kasvihuoneeseen (34). Pumppu saa energiansa sähköverkostosta pistorasian kautta.

Pumpun vuorokaudessa sähköverkostosta ottama energia on siis 0,24 kWh. Kasvihuoneeseen on myös sijoitettu kymmenen 28 W:n Valoya LED-lamppua. Eli lamppujen yhteenlaskettu teho on 280 W. Kyseisissä lampuissa ei esiinny lämpöhäviötä, mikä on myös syy siihen, että kaikki lampun saama energia esiintyy nimenomaan valoenergiana. (35.) Mikäli lamppuja pidetään päällä vain 23 h vuorokaudessa, pumpun vuorokaudessa sähköverkosta ottaman energian määrä on 6,44 kWh. Edellä mainittujen energiamäärien perusteella kasvihuoneen kokonaisenergiälähteet ovat 6,68 kWh.

5.1.2 Kasvihuoneen energialahäviöt



Kuva 5. Pienkasvihuoneeseen sijoitetut humalan taimet

Työssä humala viljellään 0,75 m²:n kasvihuoneessa. Kasvihuoneen leveys 1290 mm, korkeus on 1400 mm ja syvyys on 580 mm (36.) Kasvihuoneen seinät on rakennettu 4 mm:stä kennotetusta polykarbonaatti-muovista (37). Polykarbonaatti-muovin lämmönjohtavuus on $0,21 \frac{W}{m \cdot K}$ (38). Kasvihuoneen lämpötila on suljettuna noin 25,9 °C ja kontin lämpötila 24,8 °C (34). Kasvihuoneen seinien sekä lattian, että katon pinta-ala on 5,98 m².

Johtumisen kautta tapahtuva lämpöhäviö löytyy liitteessä 1. olleen Excel-tiedoston solusta E17:

$$0,21 \frac{W}{m \cdot K} * 5,98 m^2 * \frac{299,05 K - 297,95 K}{0,004 m} * 24 h = 8\,290 Wh \quad [5]$$

Johtumalla tapahtuva lämmönsiirto saa siis arvon 8,29 kWh.

Säteilyn kautta tapahtuva lämpöhäviö puolestaan löytyy liitteen 1. olleen Excel-tiedoston solusta E21:

$$\frac{5,672 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} * 5,98 m^2 * \left(\left(\frac{298,65 K}{100} \right)^4 - \left(\frac{297,95 K}{100} \right)^4 \right)}{1000} * 24 h = 9,53 * 10^{-6} Wh \quad [6]$$

Edellä huomattiin, että säteilyn kautta tapahtuva lämpöhäviö on vain $9,53 * 10^{-9} kWh$. Säteilyn vaatima energia on niin pieni johtumisen energiaan nähden, että se voidaan jättää huomiotta. Samoin kasvihuoneen ja kasvihuoneen lattian lämpötilojen arvo on suunnilleen yhtä suuri, minkä vuoksi sekin voidaan jättää huomiotta.

Opinnäytetyössä arvioitiin aluksi, että haihtumalla tapahtuva energiahäviö on 1,00 kWh. Tällöin energiahäviöiden summa on:

$$1,00 kWh + 9,53 * 10^{-9} kWh + 8,29 kWh = 9,29 kWh \quad [7]$$

Mikäli taseet ovat stationääritilassa kasvihuoneen energialähteiden ja energiahäviöiden summan pitää olla yhtä suuri. Kuten edellisestä laskusta huomataan, energialähteiden ja energiahäviöiden summa ei ole yhtä suuri. Koska kuitenkin taseet halutaan stationääritilaan haihtumalla tapahtuvaa energiahäviötä jouduttaisiin laskemaan $-1,61 kWh$:iin, Kyseinen arvo löytyy liitteen 1. solussa E22.

5.2 Kontin energiataseet

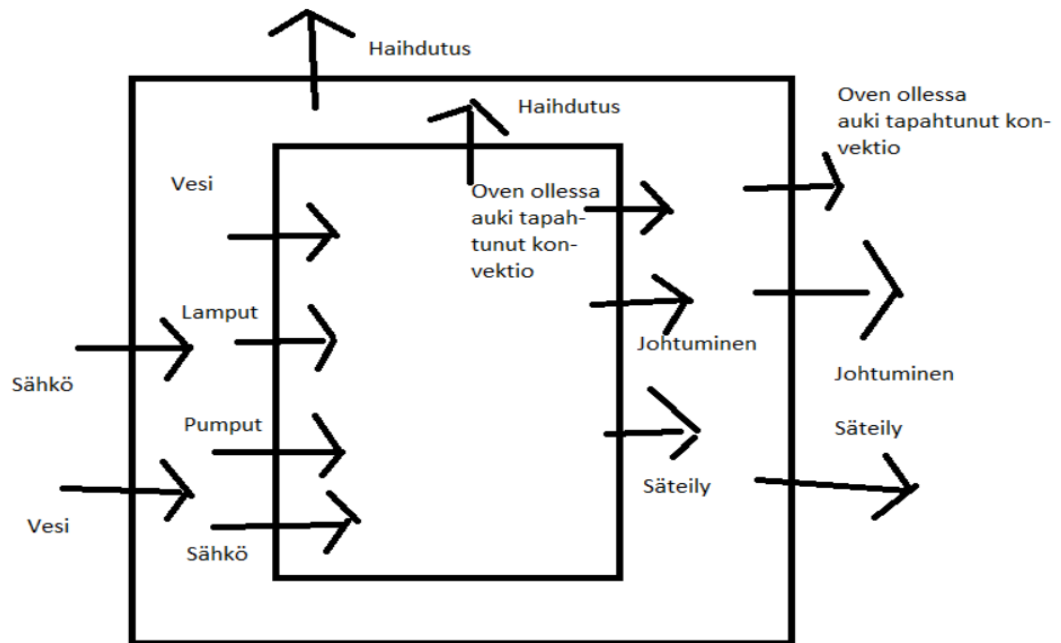
Kuten kasvihuoneen kohdalla, myös kontin energiataseet oli tarkoitus saada stationääritilaan. Laskuissa kasvihuoneen energiahäviöt esiintyvät kontin energialähteinä. Kasvihuoneeseen menevän virtauksen aikana vesiputken läpi tapahtuva johtuminen sekä säteily oletetaan mitättömäksi, minkä vuoksi kontin energialähteisiin kuuluu vain kasvihuoneen lämpöhäviöt. Energiahäviöihin puolestaan kuuluu kontin lämpöhäviöt:

$$\textit{kontin energialähteet} = \textit{kasvihuoneen energiahäviöt} \quad (22)$$

Yllä olevan kaavan lisäksi kontin energiahäviöiden summa on yhtä suuri kontin energiahäviöiden kanssa, jolloin laskuissa pätee alla oleva yhtälö:

$$\textit{kontin energialähteet} = \textit{kontin energiahäviöt} \quad (23)$$

Kuvaan 6 on piirretty kontti, jonka sisälle on sijoitettu kasvihuone. Piirustukseen on sijoitettu kaikki kontissa sekä kasvihuoneessa esiintyvät energiataseet:



Kuva 6. Kasvihuoneen ja kontin energiataseet

5.2.1 Kontin energiahäviöt



Kuva 7. Kontti

Kasvihuone on sijoitettu konttiin, minkä sisäseinät on tehty 10 mm paksuisesta vanerista (37). Vanerin lämmönjohtavuus kasvaa vanerin kosteuden kasvaessa (39). Opinnäytetyössä oletetaan, että vaneri on valmistettu männystä (39), jolloin vanerin lämmönjohtavuus männyn syitä vastaan kohtisuorassa on $0,14 \frac{W}{m \cdot K}$ ja männyn syiden suunnassa $0,22 \frac{W}{m \cdot K}$ (39). Opinnäytetyössä oletetaan, että vaneri on valmistettu männyn syitä vastaan kohtisuorassa.

Kontin ulkoseinissä on kaksi 50 mm:n paksuista polyuretaani eristettä (37), jonka lämmönjohtavuus on $0,024 \frac{W}{m \cdot K}$ (41). Katto puolestaan on rakennettu havuvanerista (40). Kontin korkeus kontin sisällä on 2100 mm, leveys on 2060 mm ja pituus on 4400 mm (34). Niin kuin aiemmin todettiin, kontin lämpötila on 24,8 °C. Huoneen lämpötila on 22,5 °C. Kontin ja kontin lattian välillä ei tapahdu lämmönvaihtoa. Kontin katon pinta-ala on $9,064 m^2$, kontin pinnalla olevan vanerin lämmönläpäisy pinta-ala on $27,132 m^2$.

Vanerin sekä polyuretaanilevyjen läpi kulkee sama määrä energiaa, minkä vuoksi lämpötila vanerin ja polyuretaanilevyjen välissä saadaan laskettua alla olevalla tavalla:

$$0,14 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} * 27,132 m^2 * \frac{297,95 K - T}{0,01 m} = 0,023 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} * 27,132 m^2 * \frac{T - 295,65 K}{0,01 m} \quad [11]$$

Edellä olevan yhtälön mukaan lämpötila vanerin ja polyuretaanilevyn välissä saa arvon 297,91 K, joten johtumisen kautta tapahtunut lämpöhäviö löytyy liitteessä 1. olleen Excel-tiedoston solusta E41:

$$\left(0,14 \frac{W}{m \cdot K} * 27,132 m^2 * \frac{297,95 K - 297,91 K}{0,01 m} + 0,14 \frac{W}{m \cdot K} * 9,064 m^2 * \frac{297,95 K - 295,63 K}{0,01 m} \right) * 24 h = 7\,344 Wh \quad [12]$$

Kuten edellä laskettiin johtumisen kautta tapahtunut lämpöhäviö on 7,34 kWh.

Lämpösäteilyn kautta tapahtunut lämpöhäviö löytyy liitteessä 1. olleen Excel-tiedoston solusta E46:

$$5,672 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} * 36,2 m^2 * \left(\left(\frac{297,95 K}{100} \right)^4 - \left(\frac{295,65 K}{100} \right)^4 \right) * 24 h = 3,73 * 10^{-4} Wh \quad [13]$$

Säteilyn kautta tapahtuva lämpöhäviö on $3,73 * 10^{-6} kWh$. Tämä lämpöhäviön ero on johtumiseen nähden niin pieni, että sen voi jättää huomiotta. Samoin johtumiseen kulunut energia kontin kohdalla voidaan olettaa olevan niin pieni, että sen voi jättää huomiotta.

Haihduksen kautta tapahtuva lämpöhäviö puolestaan arvioitiin aluksi olevan 0,50 kWh. Tällöin kokonaisenergiähäviö on:

$$0,50 kWh + 7,34 kWh + 3,73 * 10^{-7} kWh = 7,84 kWh \quad [14]$$

Koska kasvihuoneen energialähteiden oli tarkoitus olla yhtä suuret, kuin energiahäviöt eli 6,68 kW ja kuten edellisestä laskusta huomataan, energialähteiden sekä energiahäviöiden summa ei ole yhtä suuri. Koska kuitenkin taseet halutaan stationääritilaan haihtumalla tapahtuvaa energiahäviötä joudutaan laskemaan $-0,66 kWh$:iin, mikä löytyy liitteessä 1. olleen Excel-tiedoston solusta E39.

5.2.2 Kontin energialähteet

Kasvihuoneen energiahäviöt ovat samalla kontin energialähteitä. Näiden suuruuksia on käsitelty kohdassa 5.1.2.

6 Vertailu työssä esiintyvän pienkasvihuoneen ja vastaavan ulos sijoitetun kasvihuoneen välillä

Vertailtaessa pienkasvihuoneen lämpöhäviöitä Suomeen sijoitetun ulkona sijaitsevaan kasvihuoneeseen, nähdään, että ulkona sijaitseva kasvihuoneen energiataseessa vuodessa oleva auringon välityksellä tapahtuva energian lähde on $700 \frac{kWh}{m^2}$, lämmityksen kautta saatu energia on $100 \frac{kWh}{m^2}$ ja valaistus on noin $1100 \frac{kWh}{m^2}$. Lämpöhäviöissä puoles-

taan jäähtymisen kautta tapahtuva lämpöhäviö on $500 \frac{kWh}{m^2}$, johtumalla tapahtuva lämpöhäviö on $800 \frac{kWh}{m^2}$ ja haihtumalla tapahtuva lämpöhäviö on $700 \frac{kWh}{m^2}$. (42, s. 18.) Koska kyseiset arvot kertovat vuodessa esiintyvän lämpöhäviön, voidaan laskea johtumalla tapahtuvan lämpöhäviön olevan vuorokaudessa:

$$\frac{800 \frac{kWh}{m^2}}{365 \text{ vrk.}} = 2,192 \frac{kWh}{m^2 * \text{vrk.}} \quad [15]$$

Vuorokaudessa haihtumalla tapahtuvan lämpöhäviön suuruus on laskettu alla:

$$\frac{700 \frac{kWh}{m^2}}{365 \text{ vrk.}} = 1,918 \frac{kWh}{m^2 * \text{vrk.}} \quad [16]$$

Eli pienkasvihuoneen kokoisessa kasvihuoneessa haihtumisen suuruus on vuorokaudessa:

$$1,918 \frac{kWh}{m^3 * \text{vrk.}} * 6,73 \text{ m}^3 = 12,91 \frac{kWh}{\text{vrk.}} \quad [17]$$

Vastaavan kokoisessa kasvihuoneessa johtumalla tapahtuva lämpöhäviön suuruus vuorokaudessa puolestaan on:

$$2,192 \frac{kWh}{m^3 * d} * 6,73 \text{ m}^3 = 14,75 \frac{kWh}{\text{vrk.}} \quad [18]$$

Lämpösäteilyllä tapahtuvan lämpöhäviön osuus on mitätön johtumalla ja haihtumalla tapahtuvaan lämpöhäviöön verrattuna, minkä takia sitä ei huomioida laskuissa.

Kun aiempiin laskuihin otetaan huomioon tomaatin ja kurkun vuodessa tarvitsema energiamäärä nähdään, että luonnonvalo tuotannon avulla tomaatin tarvitsema energiamäärä on vain $23 \frac{kWh}{kg}$, kun tomaatin sadossa on päästy arvoon $30 \frac{kg}{m^3}$. Kurkun kohdalla vastaavat arvot ovat $18 \frac{kWh}{kg}$ ja $40 \frac{kg}{m^3}$. (42, s. 19.) Opinnäytetyössä olleen kasvihuoneen kokoisella alueella tomaatin vuorokaudessa tarvitsema energiamäärä on laskettu alla:

$$\frac{23 \text{ kWh}}{365 \text{ kg*d}} * 30 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6,73 \text{ m}^3 = 12,72 \frac{\text{kWh}}{\text{vrk.}} \quad [19]$$

Kurkun kohdalla vastaava arvo on:

$$\frac{18 \text{ kWh}}{365 \text{ kg*d}} * 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6,73 \text{ m}^3 = 13,28 \frac{\text{kWh}}{\text{vrk.}} \quad [20]$$

Tuloksista nähdään, että pienkasvihuoneen lämpöhäviöiden suuruus on pieni ulos sijoitettuun kasvihuoneeseen verrattuna. Syynä tähän voidaan pitää lämpötilaeroa, sillä Suomen keskilämpötila Helsingissä vuosina 1981-2010 oli 5,9 °C, kun taas merikontin lämpötila oli 24,8 °C, eli merikontin ja kasvihuoneen välinen lämpötilaero on selvästi pienempi, kuin ulkoilman ja kasvihuoneen välinen lämpötilaero. (43.) On myös tärkeä muistaa, että vertailukasveina ei käytetä humalaa.

Ulkona sijaitsevassa kasvihuoneessa oleva haihtumalla tapahtuva lämpöhäviö on suurempi, kuin merikontissa sijaitsevassa kasvihuoneessa oleva haihtumalla tapahtuva lämpöhäviö. Tästä syystä voidaan olettaa, että ulkona olevan kasvihuoneen veden massa on selvästi suurempi, kuin merikontissa sijaitsevan kasvihuoneen veden massa.

7 Työn oletukset ja epävarmuudet

Laskuissa on oletettu, että niin kasvihuone, kuin konttikin on eristetty ympärillä olevista esineistä, eivätkä ne ole vuorovaikutuksessa ympärillä olevien esineiden kanssa. Reaalimaailmassa systeemi on kuitenkin myös vuorovaikutuksissa ympärillä olevien esineiden kanssa. Laskuissa ei myöskään ole huomioitu kasvihuoneessa olevia esineitä, jotka myös absorboivat tai emittoivat energiaa.

Laskuissa ei ole huomioitu humalalle vettä kuljettavan vesiputken läpi johtuvaa lämpöä. Lisäksi laskuissa on oletettu, että kasvihuoneen ja kasvihuoneen lattian välillä ei ole lämmönsiirtoa, mikä ei pidä paikkaansa. Edellä mainituilla asioilla ei kuitenkaan ole merkittävää vaikutusta systeemiin, minkä vuoksi ne onkin voitu jättää huomiotta.

Merkittävin epävarmuutta aiheuttava tekijä on luokkahuoneen lämpötilan vaihtelu, mikä laskuissa on oletettu vakioksi. Toinen kohtalaisen merkittävä, mutta samalla melko epä-todennäköinen asia, mitä laskuissa ei ole huomioitu on luokkahuoneessa, johon kasvi-huone on sijoitettu, mahdollisesti tapahtuvat sähkökatkot.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli määrittää energiataseet Metropolian ammattikor-keakoulussa sijaitsevassa Urbanfarmlab-tilassa olleessa merikontissa ja siinä olleelle pienkasvihuoneessa viljellylle humalalle. Opinnäytetyön alku sisältää taseisiin ja läm-mönsiirtoon liittyvää teoriaa, minkä jälkeen siirrytään opinnäytetyössä olevan kasvi-huoneen energiataseisiin.

Pienkasvihuoneen energialähteisiin vaikuttaa kasvihuoneeseen vettä pumppaavan pumpun teho ja aika, jolloin pumppu on käynnissä. Toinen energialähteisiin vaikuttava tekijä on kasvihuonetta valaisevan LED-lampun teho sekä käynnissä olo aika. Kontin energialähteisiin puolestaan kuuluu pienkasvihuoneen energiahäviöt. Pienkasvihuoneen sekä merikorikontin energiahäviöihin puolestaan kuuluu säteily, johtuminen sekä haihtu-misesta johtuva energiahäviö.

Laskuista nähdään, että valoenergia on ylivoimaisesti suurin energian lähde kasvi-huoneessa. Valoenergialla on vaikutusta muun muassa yhteyttämisessä ja sen myötä teh-tävässä esiintyvien hiilidioksiditaseiden kohdalla.

Johtuminen on suurin energiahäviö. Haihdutuksen osuus on murto-osa johtumiseen ver-rattuna ja säteilyn osuus on mitätön johtuen siitä, että lämpötilaerot ovat melko pienet.

Opinnäytetyössä myös verrattiin merikontissa olevaa pienkasvihuonetta ulkona sijaitse-vaan kasvihuoneeseen. Tuloksista huomattiin, että pienkasvihuoneen energiataseet ovat selvästi matalammat kuin ulos sijoitetun kasvihuoneen energiataseet.

Koska opinnäytetyössä lähdettiin siitä, että energiataseet pitäisi olla stationääritilassa, haihtumisen vaatiman energian määräksi tulisi negatiivinen arvo, mikä kuitenkin ei ole

realistista. Tämän takia onkin tärkeää, lähteä tekemään jatkotutkimuksia tämän opinnäytetyön sisältämien arvojen pohjalta. On tosin hyvä muistaa, että vaikka työssä oletettiin, että taseet ovat stationäärisiä, se ei välttämättä pidä paikkansa. Tämän vuoksi tasealueeseen tulevien ja sieltä poistuvien virtausten erotus ei välttämättä ole nolla. Samalla tämä myös aiheuttaa pientä virhettä laskuihin, minkä vuoksi se pitää aiemmin mainittujen seikkojen lisäksi muistaa työn epävarmuuksissa.

Lähteet

- 1 Seuranen, T. 2015. Taseet. Luentomoniste. Metropolian ammattikorkeakoulu
- 2 Helmenstein, A. M. 2019. Isolated System Definition in Sciences. ThoughtCo. <<https://www.thoughtco.com/definition-of-isolated-system-605270>>. Luettu: 30.10.2020
- 3 Anonyymi. The First Law of Thermodynamics. Lumen Physics. <<https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/15-1-the-first-law-of-thermodynamics/>>. Luettu: 17.4.2021
- 4 Helmenstine, A, M. Enthalpy Definition in Chemistry and Physics. Thought Co. <<https://www.thoughtco.com/definition-of-enthalpy-605091>>. Luettu: 3.4.2021
- 5 Hurley, K & Shamieh, J. Enthalpy. Chemistry. <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Thermodynamics/Energies_and_Potentials/Enthalpy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/Energies_and_Potentials/Enthalpy)>. Luettu: 3.4.2021
- 6 Anonyymi. Kinetic Energy. the Physics Classroom. <<https://www.physicsclassroom.com/class/energy/Lesson-1/Kinetic-Energy>>. Luettu: 16.4.2021
- 7 Anonyymi. Example of Kinetic Energy in Everyday Life. <<https://studiousguy.com/example-of-kinetic-energy-in-everyday-life/>>. Luettu: 16.4.2021
- 8 Anonyymi. Potential Energy. the Physics Classroom. <<https://www.physicsclassroom.com/class/energy/Lesson-1/Potential-Energy>>. Luettu: 16.4.2021
- 9 Doan, C. Gibbs (Free) Energy. Chemistry LibreTexts. <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Energies_and_Potentials_Free_Energy/Gibbs_\(Free\)_Energy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Energies_and_Potentials_Free_Energy/Gibbs_(Free)_Energy)>. Luettu: 19.4.2021

- 10 Helmholtz Free Energy. HyperPhysics. <hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermohelmholtz.html>. Luettu: 19.4.2021
- 11 Anonyymi. Helmholtz Free Energy and its Significance. QS Study. <<https://qsstudy.com/chemistry/hehmholtz-free-energy-significance>>. Luettu 19.4.2021
- 12 Anonyymi. The First Law of Thermodynamics. Lumen Physics. <<https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/15-1-the-first-law-of-thermodynamics/>>. Luettu: 17.4.2021
- 13 Anonyymi. Energy Balances. The Pillars curriculum for chemical engineering. <http://pillars.che.ptt.edu/student.slide.cgi?course_id=12&slide_id=34.0>. Luettu: 25.10.2020
- 14 Anonyymi. The Nature of Energy. Michican State University. <<https://www2.chemistry.msudu/faculty/reusch/virtxtjml/energy1.htm>>. Luettu: 28.10.2020.
- 15 Anonyymi. Formation reactions. BCcampus. <<https://opentextbc.ca/introductorychemistry/chapter/formation-reactions-2/>>. Luettu 30.10.2020
- 16 Himmelblau, D. M. Riggs, J. B. 1986 Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering. Upper Saddle River. New Jersey: Prentice Hall.
- 17 Anonyymi. Law of Conservation of Matter. Nuclear Power. <<https://www.nuclear-power.net/laws-of-conservation/law-of-conservation-of-matter/>>. Luettu 28.10.2020
- 18 Bhatia, A. B. E.. 2012. Introduction to Material and Energia Balance. PDHonline. <<https://pdhonline.com/courses/m239/m239content.pdf>>. Luettu: 30.10.2020

- 19 Anonyymi. Hyödynnäme olemassa olevia raaka-aineita kestävästi. UPM. <<https://www.upmbiofuels.com/fi/kestava-valinta/kestavat-raaka-aineet>>. Luettu: 25.10.2020
- 20 Arola, J. 2017. Keskitetyn biokaasulaitoksenenergiatase. Opinnäytetyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/47995/Arola_Johanna.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu: 30.10.2020
- 21 Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka. Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. Tampere: Juvenes Print.
- 22 von Böckh, P & Heat Transfer. 2012. Heat Transfer. Karlsruhe, Saksa: Springer
- 23 Annaraton, D. 2010. Engineering Heat Transfer. Milano, Italia: Springer
- 24 Anonyymi. Lämpösäteily & Infrapuna. Infradex. <<https://www.infradex.com/lamposateily-ja-lampokamera>>. Luettu 22.9.2020
- 25 Anonyymi. Kuumaa lämpöoppia huippuluokan eristekykyn. Vicover. <<http://www.vicover.fi/teknologia/kuumaa-lampooppia-huippuluokan-eristekykyn>>. Luettu 22.9.2020
- 26 Ikonen, K. 2013. Säteilylämmönsiirron laskennasta. VTT. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2013/T116.pdf>>. Luettu 14.9.2020
- 27 Klein, B. Monochromaticity: the spectrum of a laser or other light source. Georgia Tech. <<https://bklein.ece.gatech.edu/laser-photonics/monochromaticity-the-spectrum-of-a-laser-or-a-other-light-source/>>. Luettu 16.4.2021
- 28 Seuranen, T. 2018. Prosessitekniikka lämmönsiirto. Luentomoniste. Metropolian ammattikorkeakoulu

- 29 Anonyymi. Convective Heat Transfer. The Engineering ToolBox. <https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html>. Luettu 15.4.2021
- 30 Abeysena, I & Darrington, R. Understanding Concentration and Evaporation Technology: Part 1: Principles and Commonly Used Evaporation Techonoloques. American Laboratory. <<https://www.americanlaboratory.com/914-Application-Notes/130187-Understanding-Concentration-and-Evaporation-Technology-Part-1-Basic-Principles-of-Commonly-Used-Evaporation-Techniques/>>. Luettu 17.4.2021
- 31 Bewick, S & Parsons, R. 2.8 Methods for Separating Mixtures. Chemistry Libretexts. <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Book%3AIntroductory_Chemistry_\(CK-12\)/02%3A_Matter_and_Change/2.08%3A_Methods_for_Separating_Mixtures](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Book%3AIntroductory_Chemistry_(CK-12)/02%3A_Matter_and_Change/2.08%3A_Methods_for_Separating_Mixtures)>. Luettu 17.4.2021
- 32 Anonyymi. Evaporation. ScienceDaily. <<https://sciencedaily.com/terms/evaporation.htm>>. Luettu 21.9.2020
- 33 Anonyymi. What is Enthalpy of Vaporization – Definition. <<http://www.thermal-engineering.org/what-is-enthalpy-of-vaporization-definition/>>. Luettu 27.9.2020
- 34 Leihikoinen, J. 2020 [Sähköpostihaastattelu] 21.9.2020. Haastattelijana Sami Laiho
- 35 Anonyymi. Powerful Led Tubes. Minimal Heat Produced. Valoya. <<https://www.valoya.com/l-series-led-grow-lights/>>. Luettu 28.9.2020
- 36 Anonyymi. Minikasvihuone Metalcraft 0,75m² 4 mm kennolevyllä parvekkeelle. Taloon.com. <<https://www.taloon.com/kasvihuone-metalcraft-0-75m-kennolevya-parvekkeelle>>. Luettu 22.9.2020

- 37 Leihikoinen, J. 2020 [Sähköpostihaastattelu] 23.9.2020. Haastattelijana Sami Laiho
- 38 Anonyymi. PC, polykarbonaatti. Fluorotech. <<https://fluorotech.fi/sivu.php?id=156>>. Luettu 21.9.2020
- 39 Anonyymi. 2020. Puutieto | Puunominaisuudet Lämpötekniisiä ominaisuuksia. Puuinfo. <<https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lampoteknisia-ominaisuuksia/>>. Luettu: 6.10.2020
- 40 Korpela, J. 2020 [Sähköpostihaastattelu] 22.9.2020. Haastattelijana Sami Laiho
- 41 Anonyymi. Polyuretaanista (PUR/PIR) valmistetut lämmöneristeet. Pu Nordic. <http://www.pu-nordic.fi/files/pu-nordic/pdf/81228_PU_Nordic_lammoneriste_esite_spread_LR.pdf>. Luettu: 6.10.2020
- 42 Keitaanpää, T. 2011. Kannattavuuteen vaikuttavat tekijät suljetun kierron kaupallisessa vihanneskasvihuoneessa. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/26465/Keitaanpaa_Teemu.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu: 18.2.2021
- 43 Anonyymi. Vuositilastot. Ilmatieteenlaitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>>. Luettu 18.2.2021

Kasvihuoneen ja kontin energiamäärä kullakin hetkellä

Liitteenä Excel-tiedosto, jolla voi seurata kunkin vuorokauden energiamäärää valituissa lämpötilassa ja tilanteissa, joissa valoja on pidetty auki haluttu määrä:

	A	B	C	D	E	F	G
1		Alle on määritetty kasvihuoneen	ja ympäristön v.	veden tiheys = ρ		998,023 kgm ⁻³	
2				Stefan-Boltzmannin vakio = σ		5,672E-08 W/(m ² K ⁴)	
3		Kasvihuoneeseen menevä				Kasvihuoneesta ulos tuleva	
4	tilavuusvirtaus litraa tuntia kohti= m (l/h)	650 l/h					
5	tilavuusvirtaus kuutiometriä sekuntia kohti= m (m ³ /s)	0,00018 m ³ /s					
6	virtausnopeus = v	0,58 m/s					
7	Pumpun pumppaama veden massa virtausjakson aikana = m_1	75,83 kg					
8	Pumpun pumppaama veden massa vuorokaudessa = m_2	303,33 kg					
9	putken säde = r_1	0,01 m					
10	putken poikkipinta-ala = A	0,00031 m ²					
11				Leveys_kasvihuone		1,29 m	
12				Pituus_kasvihuone		0,58 m	
13	E(light(max))	6,72 kWh		Korkeus_kasvihuone		1,4 m	
14	osuus_kun_valo_päällä_vuorokaudessa	0,95		Kasvihuoneen seinien ja katon pinta-ala = S_1		5,98 m ²	
15	E(light)	6,44 kWh		seinän paksuus (kasvihuone) = x_1		0,004 m	
16				lämmönjohtavuus (kasvihuone) = λ_1		0,21 W/(mK)	
17	Pumpun teho	10 W		E(out)_kasvihuone(ohjuminen)		8,29 kWh	
18	E_pump	0,24 kWh		T(kasvihuone)_in		299,05 K	
19	E(in)_kasvihuone(konvektio)			T(kasvihuone)_out		297,95 K	
20				T_1(kasvihuone_sisä)		299,05 K	
21				E(out)_kasvihuone(säteily)		9,53E-09 kWh	
22				E(out)_kasvihuone(hahtuminen)		-1,61 kWh	
23							
24							
25		6,68 kWh				6,68 kWh	
26							
27		Konttiin menevä		Kok.energiat yhtä suuret, koska systeemi stationääritilassa			
28	kok. energia			Kontista ulos tuleva energia			
29	haidutusentalpiat on määritetty niin, että kasvihuoneen ja kontin	energiataseet					
30	ovat tasapainossa. Lämpötila kontin vaneerin ja polyuretaanin välissä saatu Solverin avulla						
31		Alle on määritetty kontin ja ympäristön välillä tapahtuvat energiahäviöt kontin oven ollessa kiinni:				Ulos tuleva	
32							
33				paksuus (vaneri) = x_2		0,01 m	
34		Sisään menevä:		polyuretaanilevyjen yhteen laskettu paksuus = x_3		0,1 m	
35				katon sisäpinta-ala = S_3		9,064 m ²	
36				Pinta-ala (vaneriosuus kontin seinissä) = S_2		27,13 m ²	
37	E(in)_kontti(hahtuminen)	-1,61 kWh		vanerin lämmönjohtavuus (vaneri) = λ_2		0,14 W/(mK)	
38				lämmönjohtavuus (polyuretaani) = λ_3		0,023 W/(mK)	
39	E(in)_kontti(ohjuminen)	8,29 kWh		E(out)_kontti(hahtuminen)		-6,64E-01 kWh	
40	T(kasvihuone)_in	299,05 K		E(out)_kontti(konvektio)			
41	T(kasvihuone)_out	297,95 K		E(out)_kontti(ohjuminen)		7,34 kWh	
42				lämpötila (kontti) = T_2		297,95 K	
43				lämpötila vanerin ja polyuretaanikerroksen välissä = T_3		297,91 K	
44				lämpötila (ympäristö) = T_4		295,65 K	
45	E(in)_kontti(säteily)	9,53E-09 kWh		E(out)_kontti(säteily)		3,73E-06 kWh	
46							
47	kok. energia	6,68 kWh				6,68 kWh	
48							