

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Kasvihuoneen lämmitystekniikoiden tarkastelu

Lappeenranta 31.08.2021

Veikkolainen Roni

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Roni Veikkolainen

Kasvihuoneen lämmitystekniikoiden tarkastelu

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Esa Vakkilainen

Ohjaaja: Esa Vakkilainen

23 sivua

Hakusanat: Kandidaatintyö, Kasvihuoneen lämmittäminen, Energiatekniikka, Lämpöpumput, Maalämpö, Aurinkolämpö

Kasvihuoneiden käyttö maataloudessa on kasvussa, sillä kasvihuoneista saatava sato on suurempi kuin vastaavan kokoisella pellolla kasvatettu sato. Kasvihuoneissa suuri osa olosuhteiden hallinnasta muodostuu kasvatuslämpötilan hallinnasta. Tässä tekstissä käsitellään käytössä olevia kasvihuoneen lämmitykseen käytettyjä tekniikoita.

Erilaisten polttoaineiden käyttö lämmityksessä on yleisesti käytössä, mutta vähenevissä määrin, sillä ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja pyritään löytämään. Maa- ja ilmalämpöpumppujen käyttö kasvihuoneiden lämmittämisessä on lisääntynyt teknologian kehityksessä. Alueilla, joilla lämmöntarve on matala, voidaan hyödyntää passiivisia lämmitysjärjestelmiä kasvatusolosuhteiden optimoimiseen. Hyvän lämmitysjärjestelmän luomiseksi tulee hyödyntää yhdistelmää tässä tekstissä esiteltyjä järjestelmiä. Lämmitystä suunniteltaessa tulee huomioida myös mahdollinen jäähtymisen tarve.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLUSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	KASVIHUONEKASVATUS	6
2.1	Kasvihuonekasvatuksen edut.....	6
2.1.1	Kasvatuslämpötilan vaikutus	7
3	FOSSIILISET POLTTOAINEET	9
4	BIOPOLTTOAINEET	10
5	LÄMPÖPUMPUT	12
5.1	Maalämpöpumppu	13
5.2	Pintavesilämpöpumppu	15
5.2.1	Avoin vesikierto.....	15
5.2.2	Suljettu vesikierto	16
5.2.3	Pintavesilämpöpumput yhteenveto	16
5.3	Ilmalämpöpumppu.....	17
6	AURINKOLÄMPÖ	18
6.1	Kivipetilämmitys	18
6.2	Aurinko-neste-lämmönkeräin-järjestelmä	19
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	21
	LÄHTEET	22

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

Lämpötila	°C
Pinta-ala	ha, m ²
Pituus	m
Teho	W
Tilavuus	m ³

Lyhenteet

Cad	Kanadan dollari
CCHP	Combined Cooling, Heat and Power
CHP	Combined Heat and Power
COP	Coefficient Of Performance
HDPE	High-density polyethylene

1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään erilaisia tapoja lämmittää kasvihuoneita kasvuolosuhteiden parantamiseksi. Tekstissä käsitellään lämmitysmuotoja olemassa olevien esimerkkitapausten pohjalta. Tekstissä käsitellään pintapuolisesti myös, miksi lämmityksen käyttö kasvihuoneissa on hyödyllistä myös alueilla, joilla kasvatettavat kasvit kasvavat luonnollisesti. Työssä käsitellään lämmitysmuotoja pintapuolisesti, koska todellisen järjestelmän suunnittelu vaatii syvempää paneutumista aiheeseen. Työssä käytetyt lähteet tarjoavat hyvän aloituspisteen syvempään tutustumiseen ja todellisen järjestelmän suunnitteluun.

Työssä pääpaino on ympäristölle ystävällisten lämmitystapojen löytämisessä ja esittelyssä. Työssä käydään läpi fossiilisilla polttoaineilla ja biopolttoaineilla toimivat polttamiseen perustuvat järjestelmät, erilaiset lämpöpumppujen variaatiot ja aurinkoenergiaan perustuvat lämmitysjärjestelmät. Esitellyt lämmitysjärjestelmät ovat pääosin koekäytössä tai aktiivisessa käytössä Välimeren alueella tai Kiinassa. Näillä alueilla kasvattamiseen vaadittavat olosuhteet ovat luontaisesti suotuisimmat, kuin suurilla leveysasteilla, joten saatavilla oleva tutkimusmateriaali pohjautuu suurelta osin näille alueille.

2 KASVIHUONEKASVATUS

Kasvihuoneella tarkoitetaan pääosin suljettua tilaa, joka on suunniteltu hyötykasvien kasvatamiseen. Tässä tekstissä käsitellään pääosin maatalous-kokoluokan kasvihuoneita (0.3-7+ ha), mutta osa käsitellyistä asioista pätee myös kotitalous-kokoluokan kasvihuoneisiin. Kasvihuoneiden hyödyntäminen maataloudessa on lisääntynyt kasvavan tuotannon tarpeen takia ja maatalouskäyttöön soveltuvan maa-alan vähentymisen myötä. Kasvihuoneissa pystytään tuottamaan pinta-alaan nähden suurempi sato, jonka lisäksi pystytään hyödyntämään perinteiselle maataloudelle soveltumattomia alueita, esimerkiksi kerrostalojen kattoja. Kasvihuonekasvatuksella voidaan saavuttaa jopa 95 % säästö veden kulutuksessa, sekä 97 % vähenys maapinta-alan tarpeessa hyödyntämällä hydroponista kasvatusta. (Sparks 2015)

2.1 Kasvihuonekasvatuksen edut

Kasvihuoneiden ollessa liki suljetussa tilassa, on kasvihuoneissa mahdollista kontrolloida kasvien kasvuolosuhteita, eivätkä nämä olosuhteet ole suorassa yhteydessä sääolosuhteisiin tai vuodenaikaan. Kasvatusolosuhteiden räätälöiminen vaikuttaa kasvatettavien tuotteiden laatuun, kuten kasvien kokoon ja haluttujen kasvinosien määrä, kuten tomaattien määrään kasvia kohden. (Campra, Garcia et al. 2008) Kasvihuoneolosuhteissa kasvit kärsivät ulkokasvatusta pienemmästä määrästä tuholaishyönteisiä, rikkakasveja ja sairauksia. Näiden tekijöiden vaikutus voidaan nähdä pienentyneenä tarpeena käyttää erilaisia kemikaaleja kasvien suojaamiseen. Pienentynyt riski sadon metämisessä tuholaishyönteisille kasvattaa sadon arvoa, sillä rahaa ei kulu tuholaistorjunta-aineiden käyttöön. Tuholaistorjunnan käytön lopettaminen mahdollistaa geenimuunteluvapaan kasvatuksen, sillä kasvien ei tarvitse olla resilienttejä torjunta-aineille (Hsaio, 2015). Luomutuotettujen tuotteiden hinta on myös pääosin korkeampi kuin vastaavien ei luomutuotteiden (Yle 2011).

Toinen merkittävä etu kasvihuonekasvatuksessa verrattuna peltokasvatukseen on mahdollisuus säädellä kasvatuksessa olevaa valaistusta. Tällä tarkoitetaan sitä, että kasvihuoneissa pystytään hyödyntämään keinotekoisia valoa tilanteissa, joissa luonnollinen valo ei ole riittävä optimaaliseen kasvuun. Toisaalta kasvihuoneiden valaistusta pystytään rajoittamaan käyttämällä erilaisia peitteitä valon kulkemisen vähentämiseksi. On myös mahdollista hyödyntää kasvihuoneen kattomateriaalia hajauttamaan valoa kasveille sopivampaan intensiteettiin.

Kasvit hyödyntävät energian saamiseen fotosynteesiä, jossa hiilidioksidista ja hapesta muodostuu vettä ja sokeria. Peltokasvatuksessa hiilidioksidin määrä on liki vakio, mutta kasvihuoneessa hiilidioksidin määrää kyetään muuttamaan, jotta saavutetaan korkeampi fotosynteesin taso. Tämä hiilidioksidin määrän muuttaminen voidaan suorittaa esimerkiksi vapauttamalla tilaan teollisesti tuotettua hiilidioksidia tai ohjaamalla tilaan osa pakokaasuista, jotka ovat muodostuneet lämmitykseen käytettyjen polttoaineiden poltosta. Kasvit hyödyntävät kasvussaan muitakin aineita kuin hiilidioksidia. (Leoni 2002) Useissa tapauksissa kasvihuoneissa kastelujärjestelmä hyödyntää kastelusta kierrätettyä vettä, joten näin ollen on yksinkertaista seurata paluuedessä olevien ravinteiden määrää, jonka perusteella voidaan tehdä arvio ravinnetilanteesta kasvatuksessa. Tämän arvion perusteella voidaan syöttövedessä olevaa ravinneseosta muuttaa siten, että kasveilla on saatavilla tarvittavia ravinneaineita sopivassa suhteessa. Yleisesti peltokasvatuksessa kasveja ravitaan ylimitoitetusti, sillä pellolla vallitsevat olosuhteet vaihtelevat alueittain ja halutaan olla varmoja, että kasveilla on riittävästi ravinneaineita hyvään kasvuun.

2.1.1 Kasvatustilanteen vaikutus

Kasvatustilanteen muuttamalla saadaan olosuhteet räätälöityä sopimaan tietyille kasville sekä tietyille kasvatus vaiheelle, joka vaikuttaa saadun sadon kokoon (Huete 2020) Kasvatustilanteen voidaan muokata muun muassa lämmittimillä, tuulettimilla, erilaisilla lämpösuojilla tai lisäämällä ilmankosteutta. Kasvatuksessa tulee huomioida eri kasvun vaiheisiin liittyvät lämpötilavaatimukset. Tutkimuksen mukaan jo muutaman asteen lämmön nousu voi vaikuttaa kasvatuksesta saatavan sadon kokoon useilla prosenteilla. (Gourdo, Fatnassi et al. 2019a) Tutkimuksissa on myös havaittu, että lämpötilan vaihtelu yön ja päivän välillä vaikuttaa kasvien kasvunopeuteen. Tämän perusteella voidaan todeta, että ainoastaan lämpötilan nostaminen ja ylläpitäminen korkealla ei takaa tehokasta kasvatusta. Tulee myös huomioida, että kasvit ja niiden kasvuolosuhteet ovat hyvin komplekseja systeemejä, joihin vaikuttavat useat muuttujat, jotka vaikuttavat myös toisiinsa. Esimerkiksi luonnollinen kuuma ilma usein lisää myös kuivuutta, joka vaikuttaa puolestaan kasvien kasvuun.

Marokossa suoritetussa tutkimuksessa todettiin tomaatin sadon kasvavan noin 22 % verrattuna perinteiseen kasvihuoneeseen tilanteessa, jossa kasvihuoneen lämpötilaa on tasattu

passiivisella aurinkolämpöjärjestelmällä. Kokeessa kokeellisen kasvihuoneen päivälämpötila oli noin 2,5 °C matalampi kuin perinteisessä kasvihuoneessa ja yöaikana kokeellisen kasvihuoneen lämpötila oli noin 3 °C korkeampi kuin perinteisessä kasvihuoneessa. Tämä lämpötilan tasoittuminen mahdollistaa kasvun lähempänä kasville optimaalista lämpötilaa alueilla, joilla tämä ei olisi luonnollisesti mahdollista, näin lisäten tuotantokapasiteettia. (Gourdo, Fatnassi et al. 2019)

3 FOSSIILISET POLTTOAINEET

Kasvihuoneet vaativat suuren määrän lämpöä toimiakseen tehokkaasti alueilla, joilla luontaisesti lämpötila ei olisi soveltuva valitun kasvin kasvattamiseen. Kasvihuoneen käyttökustannuksista jopa 50 % voi muodostua lämmityskustannuksista. Useissa tapauksissa ainoastaan lämmittäminen ei riitä saavuttamaan ympärivuotista kasville ihanteellista lämpötilaa, sillä kesäkuukausina päivälämpötila saattaa nousta korkeammaksi kuin kasvatettavalle kasville olisi suotuisaa. Useissa tapauksissa on edullisinta käyttää ilmaa lämmittävää järjestelmää kasvihuoneen lämmittämiseksi, sillä näiden järjestelmien investointikustannukset ovat yleisesti edulliset. CHP:n (combined heat and power, lämmön ja sähkön yhteistuotanto) käyttäminen kasvihuoneiden pääasiallisena lämmitysjärjestelmänä on alkanut muodostua taloudellisesti kannattavaksi vaihtoehdoksi. CHP:ssa etuna kaasupolttimella toimivaan ilma-
lämmitykseen on se, että CHP:lla saadaan kasvihuoneissa oleva sähkön tarve tyydytettyä lämmittämisen yhteydessä. CHP-järjestelmien kokonaishyötysuhde on korkea, jopa 90 % (Wu, Wang 2006). Tämän lisäksi on mahdollista käyttää CCHP (combined, cooling, heat and power, lämmön, jäähdytyksen ja sähkön yhteistuotanto) -järjestelmää, joita on käytetty joissain teollisissa kohteissa, mutta jäähdytyksen hyötysuhde on heikko tämän kaltaisissa järjestelmissä verrattuna jäähdytykseen käytettäviin lämpöpumppuihin. CCHP:n COP (tehokerroin) on hyvässä järjestelmässä 0.7–0.8 ja lämpöpumppujen COP on noin 3–6. CHP-järjestelmän käyttäminen kasvukauden pidentämiseen Pohjois-Kreikassa olevalla koekasvihuoneella todettiin taloudellisesti kannattavaksi 19 % tuotolla investoinnille vuosittain. (Tataraki, Kavvadias et al. 2019)

Tällä hetkellä käytössä on useita erilaisia tapoja tuottaa CHP-energiaa. Yleisimmät näistä tekniikoista ovat höyryturbiini, polttomoottori, kaasuturbiini, mikroturbiini ja stirling-moottori (Wu, Wang 2006). Näissä käytettävät polttoaineet ja saavutettavat hyötysuhteet vaihtelevat, tarkemman vertailun löytää Wu:n ja Wang:in raportista (Wu, Wang 2006). Kaikki mainitut tekniikat ovat käyttökelpoisia kasvihuonekäytössä, varsinkin teollisen kokoluokan kasvihuoneissa (7+ ha), jolloin lämmön tarve voi nousta yli 12 MW (Chau, Sowlati et al. 2009a). Kasvihuoneen lämmitystä suunnitellessa tulee huomioida, ettei lämmöntarve ole tasainen ympäri vuoden, jolloin on investoinnin edun mukaista, jos valitulla lämmittimellä on hyvä hyötysuhde kun toimitaan osakuormalla.

4 BIOPOLTTOAINEET

Ilmastonmuutoksen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen rajoittamisen myötä biopolttoaineiden suosio on kasvanut. Fossiilisten polttoaineiden verotuksen kasvun myötä bioperäiset sekä kevyemmin verotetut polttoaineet ovat muodostuneet taloudellisesti kannattavammaksi vaihtoehdoksi. Biopolttoaineissa alkuinvestointi on huomattavasti korkeampi kuin vastaavan tehoisessa maakaasulla toimivassa järjestelmässä. Korkea alkupääoman tarve lisää epävarmuutta investointiin, sillä investoinnin takaisinmaksuaika on pitkä, jolloin polttoaineen hinnan muutoksia on vaikea arvioida investointia suunnitellessa. (Chau, Sowlati et al. 2009) Hyvänä esimerkkinä toimii vuoden 2020 tilanne, jossa Kanadan maakaasun hinta on laskeutunut noin 2.5 Cad:iin sen oltua 8.5 Cad vuonna 2009, jolloin biopolttoaine järjestelmä oli kannattavuuden rajoilla sen tuottaessa 60 % tarvittavasta kokonaislämmöstä (Government of Canada, Canada Energy Regulator 2021) (Chau, Sowlati et al. 2009). Biopolttojärjestelmän kannattavuutta tutkiessa tulee huomioida maantieteellinen sijainti, mutta raportista voidaan olettaa biopolttojärjestelmän olevan kannattava, kun käytettävän biopolttoaineen hinta on alle neljäsosa maakaasun hinnasta, olettaen että muut investointikulut ovat pysyneet suhteessa samoina vuodesta 2009 asti. (Chau, Sowlati et al. 2009)

Biopolttoaineissa polttoaineen kosteus on suurempi, kuin fossiilisissa polttoaineissa, joka johtaa siihen, että bioperäisillä polttoaineilla useimmissa tapauksissa energiatiheys on matalampi kuin fossiilisilla polttoaineilla. Biopolttoaineet koostuvat myös osittain palamattomasta materiaalista, joka vaikuttaa käytössä oleviin polttotekniikoihin. Bioperäisiä polttoaineita on useita erilaisia, mutta yleisimmät ja edullisimmat ovat kiinteitä puuperäisiä polttoaineita. Biopoltolla voidaan lämmittää kasvihuoneessa kiertävää vesikäyttöistä lämmitysjärjestelmää tai vaihtoehtoisesti kasvihuoneen ilmaa. Biopolttoaineita käytettäessä päästöjen puhdistaminen haitallisista aineista on suuremmassa roolissa kuin fossiilisia polttoaineita käytettäessä. Kasvihuoneen tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, ettei poltosta syntyviä palokaasuja voida suoraan hyödyntää kasvihuoneessa olevan hiilidioksidin lähteenä. Tämä puolestaan vaikuttaa saatavaan satoon tai kasvattaa kasvihuoneen käyttökuluja. Agrikulttuurin ollessa pienillä marginaaleilla toimiva ala, voi tämäläpaiset lisäkulut muodostua projektin kannattavuuden kaataviksi esteiksi. Polttotekniikoilla toimivat lämmitysjärjestelmät ovat kannattavuudeltaan valmiiksi lähellä katkaisupistettä ja ovat kannattavia ainoastaan suurissa kasvihuoneissa (7 ha ja isommat). Biopolttoainesta biokaasu vaikuttaa tulevaisuudessa

järkevimmälle vaihtoehdolle, sillä biokaasua voidaan hyödyntää pienillä muutoksilla jo olemassa oleviin lämmitysjärjestelmiin. Tällä hetkellä biokaasun tuotantokustannukset ovat suuremmat kuin maakaasulla, mutta voidaan olettaa, että tämä tilanne tulee muuttumaan tulevaisuudessa teknologian ikääntyessä. (Chau, Sowlati et al. 2009b) (Chau, Sowlati et al. 2009)

5 LÄMPÖPUMPUT

Lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöenergiaa luonnollisista lähteistä lämpöä hyödyntäviin kohteisiin, kuten rakennuksiin tai veden lämmitykseen. Tämä lämmönsiirto tapahtuu luonnolliselle lämmönsiirrolle vastaiseen suuntaan, eli lämpöä siirretään kylmästä tilasta lämpimään tilaan. Lämpöpumppujen lämmönsiirtokierto on mahdollista kääntää toimimaan myös toiseen suuntaan, jolloin teollista tilaa viilennetään, ja lämpöä siirretään luonnolliseen lähteeseen, kuten rakennuksen ulkopuoliseen ilmaan. Lämpöpumput ovat monimuotoinen lämmityksen tai jäähdytyksen muoto, sillä lämpöpumpulla kyetään hyödyntämään useita erilaisia lämmönlähteitä, riippuen siitä mitä on saatavilla ja mikä on edullisin tapa tuottaa haluttu määrä lämpöä kohteeseen. Lämpöpumppujen monipuolisten käyttömahdollisuuksien puolesta puhuu myös mahdolliset variaatiot lämmönlähteen ja lämmön käyttökohteen suhteen (neste-ilma, neste-neste ja ilma-ilma). Lämpöpumpun lämmönlähteenä useissa tapauksissa käytetään jotain seuraavista: maalämpö, pintavesilämpö, pohjavesilämpö, hukkalämpö tai ilmalämpö, mutta myös muita lämmönlähteitä voidaan hyödyntää esimerkiksi aurinkolämpöä. (Kavanaugh, Rafferty 2014)

Lämpöpumput toimivat suljetussa kierrossa, joka koostuu neljästä osasta. Ensimmäisenä höyrystynyt matalapaineinen kylmäaine siirtyy kompressoriin, jossa kylmäaineen paine nousee, ja kaasu muuttuu ylikriittiseksi. Toisessa vaiheessa kylmäaine siirtyy kondensaattorille, jossa kaasu luovuttaa lämpöä ja kondensoituu nesteeksi. Kolmannessa vaiheessa korkeapaineinen neste kulkee paisuntaventtiilin läpi, joka muuttaa nesteen osittain kaasuksi ja laskee kaasu-neste-seoksen painetta. Neljännessä vaiheessa kaasu-neste-seos kulkee höyrystimen läpi, jossa seokseen sitoutuu lämpöä ja loppuosa nesteestä höyrystyy kaasuksi. Lämpöpumpuissa kondensaattori ja höyrystin toimivat lämmönsiirtiminä, jotka voivat siirtää lämpöä nesteeseen tai kaasuun riippuen saatavilla olevasta lämmönlähteestä ja tilasta johon lämpöä halutaan siirtää. Esimerkiksi maalämpöpumppu voi siirtää lämpöä rakennuksen ilmastointi-ilmaan, jolloin maalämpökierrossa oleva neste lämmittää kondensaattoria ja höyrystin lämmittää ilmastointi-ilmaa. Vastaavasti kierto voi toimia päinvastaiseen suuntaan, jolloin rakennusta viilennetään ja maalämpökierron ympärillä olevan maa-ainekseen säästeetään lämpöenergiaa ajaksi, jolloin sitä tarvitaan. (Lun, Tung 2020)

5.1 Maalämpöpumppu

Yksi yleisimmistä maalämmön hyödyntämisen muodoista on pystyporakaivo u-putki-maalämpöpumppu. Tässä maalämmön hyödyntämisen muodossa maaperään porataan useimmissa tapauksissa 50–100 metriä syvä reikä, jonne upotetaan muovista (HDPE) valmistettu putki, joka toimii lämmönvaihtimena porakaivossa. U-putken upottamisen jälkeen porakaivo täytetään hyvin lämpöä johtavalla massalla, kuten maalämpöön kehitetyllä betonilla. Porattavan reiän syvyyteen vaikuttaa vaadittu lämmitys- tai jäähdytystehon määrä, maa-aineksen laatu, saatavilla oleva täyteaines ja porakaivon ympäröivän maan lämpötila ennen maalämmön käyttöönottoa. Maa-aineksissa esimerkiksi graniitin lämmönjohtavuus on kolme kertaa suurempi verrattuna saviperäiseen maa-ainekseen. Porakaivon täyttäminen parantaa lämmönjohtuvuutta u-putkesta ympäröivään maa-ainekseen ja vaikutus porattavaan syvyyteen voi olla jopa yli 30 % hyvin lämpöä johtavan täyteaineksen ja heikosti lämpöä johtavan aineksen välillä. (Chiasson 2016)

Yksi maalämpöpumpun eduista verrattuna suoraan maalämpöön on se, että maalämpöpumppua käytettäessä maalämpölähteen lämpötilan ei tarvitse olla kovin korkea. Jos haluttaisiin hyödyntää suoraa maalämpöä kasvihuoneen lämmittämiseen, tulisi lämmönlähteen olla 30–75 °C, kun taas lämpöpumppua käytettäessä riittää, että lämmönlähde on yli 0 °C. Suoraa maalämpöä käytettäessä mahdollisuus viilennykseen, silloin kun sille olisi käyttöä, on hyvin rajallista, useissa tapauksissa olematonta, sillä ilman lämpöpumppua lämpöenergia ei siirry korkeammasta lämpötilasta matalampaan lämpötilaan. Toinen maalämmön hyödyntämisen suuria etuja on sen ympäristöystävällisyys. (Chiasson 2016) Esimerkiksi neljän huoneen asunnon lämmitysjärjestelmän muuttamisella maalämmön hyödyntämiseen voidaan saavuttaa 2 100-12 100 kg:n hiilidioksidipäästösäästöt vuosittain. (Vekony 2021)

Haasteena maalämpöjärjestelmää suunnitellessa on saada tarkkaa tietoa lämmönlähteen laadusta. Suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon porattavan alueen pohjavesitilanne, sillä useimmissa tapauksissa pyritään siihen, ettei porakaivoon kertyisi vettä, vaikkakin tämä voi olla hyväksyttävää joissain tilanteissa, jos se on huomioitu suunnitteluvaiheessa. (Kavanaugh, Rafferty 2014) Maalämmössä käytettyjen porakaivojen poraaminen aiheuttaa suuren aloituskulun projektille, joka saattaa pienemmissä projekteissa johtaa siihen, ettei maalämpö ole taloudellisesti kannattava investointi. Esimerkiksi Britanniassa porakaivon poraaminen

maksaa 60-100 puntaa per metri ja muodostaa noin 50% maalämpöprojektin asennuskustannuksista, jolloin voidaan todeta, että kokonaisuudessaan projektin työkustannukset voivat olla jopa 20 000 puntaa 100 m porakaivolla. Tämän lisäksi maalämpöprojektiin sisältyy myös laitekustannukset, jolloin kokonaiskustannukset voivat olla jopa 35 000 puntaa. (Ve-kony 2021) Porakaivomaalämpöä suunniteltaessa tulee huomioida lämmöntarpeen ja jäähdytyksen tarpeen suhde. Jos lämmöntarve tai jäähdytyksen tarve on suurempi kuin toinen, eli vuosittainen nettoenergian hyödyntäminen lämmönlähteestä on epätasapainossa, lämmönlähteen lämpötila tulee muuttumaan ajan kuluessa, joka puolestaan voi vaikuttaa hyödynnettävissä olevaan lämpöön tai jäähdytykseen. Tämä efekti on huomattavampi järjestelmissä, joissa käytetään useita porakaivoja, koska tällöin porakaivojen välisen maa-aineksen lämpötila muuttuu herkemmin. (Kavanaugh, Rafferty 2014)

Toinen yleisesti käytössä oleva maalämmön hyödyntämisen muoto on horisontaalinen maalämpökierto. Horisontaalisessa maalämpökierrossa porakaivon sijasta maalämpöputket upotetaan noin 2 metrin syvyyteen. Useissa tapauksissa horisontaalinen maalämpö on edullisempaa asentaa kuin vertikaalinen maalämpö, sillä maanpinnan materiaali on yleensä pehmeämpää kuin materiaali syvemmillä maaperässä. Lähemmäksi maanpintaa tehty asennus aiheuttaa myös haasteita, sillä ympäristön lämpötila vaikuttaa herkemmin käytettävissä olevaan energian määrään, sillä maa-aineksen lämpötila vaihtelee vuodenajan mukaan jopa 5 °C kesän ja talven välillä alueella, jolla maaperän lämpötila 10 metrin syvyydessä on 10 °C. Koska maaperä on lämpimillään kesällä, jolloin jäähdytyksen tarve on suuri, vaikuttaa lämpötilan vaihtelu suoraan maalämpöpumpun hyötysuhteeseen. Talviolosuhteissa vaikutus on sama, sillä kun lämmityksen tarve on suuri, niin silloin maaperän lämpö on matalimmillaan. (Chiasson 2016)

Vertikaalisessa eli porakaivomaalämmössä vastaava vuodenaikojen välinen lämpötilan vaihtelu ei ole huomattavaa. Horisontaalisessa maalämmössä maaperän hyödyntäminen vuodenaikojen välisenä lämpövarastona on lähes mahdotonta edellä mainitun pointin johdosta, kun taas vertikaalisessa maalämmössä kallioperä toimii pienissä määrin lämpövarastona, jos vuotuinen lämmityksen ja jäähdytyksen tarve on lähes tasapainossa. Erilaisista asennustyyleistä johtuen kulurakenne on erilainen, ja horisontaalinen maalämpö on

edullisempi sekä asentaa että laajentaa kuin vertikaalinen, mutta vertikaalisessa saadaan taiseimmalla tehonkulutuksella lämpöä.

5.2 Pintavesilämpöpumppu

Pintavedeksi yleisesti luetaan kuuluvaksi kaikki vesilähteet, jotka ovat suorassa yhteydessä ilmakehään. Näitä ovat esimerkiksi järvet, joet, lammet ja meret. (Chiasson 2016) Pintaveden hyödyntäminen lämmön ja jäähdytyksen lähteenä ei ole aivan uusi idea, mutta on kasvattanut suosiotaan viime vuosikymmeninä lämpöpumppujen yleistyttyä ja ilmastotietoisuuden lisääntyttyä. (Chiasson 2016) (Kavanaugh, Rafferty 2014) Pintavettä lämmönlähteenään käyttäviä lämpöpumppujärjestelmiä on onnistuneesti otettu käyttöön useissa paikoissa. Päätyypit tällaisissa järjestelmissä ovat avoimen ja suljetun kierron järjestelmät, joista avoimen kierron järjestelmää käytetään lähes yksinomaan jäähdytystarkoituksessa. Vesistöjen lämpötilojen vaihteluiden arvioiminen on huomattavasti haastavampaa kuin maaperän lämpötilojen vaihtelun arvioiminen, jolloin vesistöä lämmönlähteenä käyttävien järjestelmien suunnittelussa tulee olla huolellinen ja tehdä perusteellinen arvio lämmitysjärjestelmän ympäristövaikutuksista. (Kavanaugh, Rafferty 2014)

5.2.1 Avoim vesikierto

Avoimella kierrolla toimivassa järjestelmässä vettä pumpataan suoraan lämmönvaihtimelle, josta lämpöä siirretään haluttuun tilaan. Viileämmän ilmaston alueella pintavesien lämpötila rajoittaa avoimen kierron järjestelmän käytön ainoastaan viilennystarkoitukseen. Tukholmassa sijaitsevassa voimalaitoksessa tuotetaan 80 °C käyttövettä 180 MW nimellisteholla, tällöin laitoksen lämpöpumppuihin pumpataan Itämerestä 3 °C merivettä, joka palautetaan mereen 0.5 °C lämmössä. (Chiasson 2016) Muissakin tämän tapaisissa sovelluksissa lämpötilan lasku sisään tulevan ja uloslähtevän veden välillä on noin 3,5 °C. Tilanteissa, joissa paluuveden lämpötila lähestyy nollaa, jään muodostuminen paluuputken ympärille aiheuttaa ongelmia. Pientä vesivarantoa käytettäessä todella matalalämpöisen veden palauttaminen laskee myös saatavilla olevan veden lämpötilaa, jolloin järjestelmän joutuu sulkemaan, sillä lämmönlähteestä ei ole saatavissa lisää lämpöä. Jäähdytyksen kannalta on hyödyllistä hyödyntää vesilähteen pohjalla olevaa vettä, sillä vesi on raskaimmillaan 4 °C lämpötilassa ja avoimen kierron järjestelmä toimii tehokkaimmillaan jäähdytystarkoituksessa, jolloin veden ottaminen pohjalta on tehokkainta. (Kavanaugh, Rafferty 2014)

5.2.2 Suljettu vesikierto

Toinen yleisesti käytössä oleva versio, jossa lämpöä siirretään jokin väliainetta hyödyntäen, on suljettu vesikierto. Suljetussa kierrossa lämmönlähteenä käytettävään vesistöön upotetaan lämmönsiirrin, yleensä silmukoilla oleva putki tai metallinen rivotettu lämmönsiirrin. Useimmissa tapauksissa lämmönsiirtimenä toimii HDPE-putki, joka on kiepeillä, mikä vähentää kokonaiskuluja projektissa. Suljetussa kierrossa voidaan käyttää lämmönsiirtonesteinä esimerkiksi glykoli-vesi-seosta, jolloin nesteen jäätympiste on matalampi kuin puhtaalla vedellä. (Chiasson 2016) Alueilla, joilla pintavesien lämpötila on matala (alle 6 °C), lämmön siirtäminen veteen on edelleen haastavaa, sillä suljetun kierron systeemissä ei haluta aiheuttaa jäätymistä lämmönsiirtimelle. Lämmönsiirtimen läheisyydessä tapahtuva jäätyminen voi aiheuttaa lämmönsiirtimen siirtymistä pois paikaltaan jään aiheuttaman nosteen mukana. Veteen sijoitettu lämmönsiirrin toimii vapaavirtausperiaatteella. Olisi toiminnan kannalta hyödyllistä, että lämmönsiirrinputkien lämpötila olisi muutaman asteen erilainen, kuin ympäröivän veden lämpötila, jotta konvektiota tapahtuu lämmönsiirtimen läheisyydessä. Suljettua järjestelmää käytettäessä on mahdollista, että vesistö aiheuttaa lämmönsiirtimeen vaurioita. (Kavanaugh, Rafferty 2014)

5.2.3 Pintavesilämpöpumput yhteenveto

Edellä esiteltyjen pintavettä lämmönlähteenään hyödyntävien lämpöpumppujen välillä on joitain eroavaisuuksia, jotka vaikuttavat siihen, kumpi on tilanteeseen sopivampi ratkaisu. Avoin kierto on useimmissa tapauksissa pääomavaatimukseltaan edullisempi ratkaisu kuin suljetulla kierrolla toimiva järjestelmä, varsinkin tilanteessa, jossa avoimella kierrolla toimivaan järjestelmään ei tarvitse sisällyttää lämpöpumppua järjestelmän toimiessa suorana lämmönsiirtona. Laitteiston likaantuminen on haasteena molemmissa tapauksissa, avoimessa systeemissä putkisto likaantuu herkästi, jos käytetty vesi ei ole täysin puhdasta suodattimesta huolimatta varsinkin, jos käytetty vesi on suolaista. Toisaalta suljetun systeemin lämmönsiirrinyksikkö likaantuu epäpuhtaassa vedessä. Likaantuminen aiheuttaa putkistossa haittaa virtaukselle ja lämmönsiirtimen pinnalla heikentää lämmönsiirtohyötysuhdetta. Suljetussa kierrossa käytetyt lämpötilat ovat hieman matalammat kuin vastaavassa avoimen kierron järjestelmässä, joka johtaa siihen, että avoin kierto on hyötysuhteeltaan parempi kuin suljettu kierto. Avoin kierto sopii suljettua paremmin matalille vesistöille, joihin lämmönsiirtimen upottaminen aiheuttaisi haasteita. (Kavanaugh, Rafferty 2014)

5.3 Ilmalämpöpumppu

Ilmalämpöpumppu on lämpöpumpuista yksinkertaisin, sillä lämmönlähteenä hyödynnetään ilmaa, kun vastaavasti muissa lämpöpumpputeknologioissa hyödynnetään haastavammin hyödynnettävissä olevia lämmönlähteitä. Ilmalämpöpumpussa matalassa lämpötilassa olevaa ulkoilmaa hyödynnetään kehittämään lämpöä haluttuun tilaan, tai vaihtoehtoisesti toisinpäin, lämmintä tilaa viilennetään. Ilmalämpöpumpulla on mahdollista lämmittää tilassa olevaa ilmaa, lämmintä käyttövettä tai lämmitysjärjestelmässä kiertävää lämmitysnestettä. Ilmalämpöpumput ovat Suomessa kotitalouskäytössä yleistyneet nopealla tahdilla, vuonna 2005 Suomessa oli alle 100 000 ilmalämpöpumppua ja vuonna 2019 asennettiin noin 100 000 kappaletta (Toshiba 2020). Ilmalämpöpumpuissa on saatavilla useita eri kokoja, joiden hinta on kohtuullinen verrattuna vastaavan tehoisiin vaihtoehtoisiin lämmitysvaihtoehtoihin. Esimerkiksi lämpöpumppu, jolla voidaan lämmittää tai jäähdyttää 1 000 m³ tilaa maksaa noin 2 500 euroa (Panasonic 2021). Nykyään ilmalämpöpumput ovat myös erinomaisia muuttamaan sähköenergiaa lämmöksi, eli niiden COP on korkea. COP (coefficient of performance) suorituskykykerroin kertoo montako yksikköä lämpöenergiaa saadaan jokaista laitteeseen syötettyä energiayksikköä kohden. Nykyisissä lämpöpumpuissa matalassa lämpötilassa toimiessa COP on noin 3,16 ja optimaalisemmissä olosuhteissa voi nousta jopa 6,43 (Panasonic 2021)

6 AURINKOLÄMPÖ

Aurinkoenergian hyödyntäminen kasvihuoneissa on hyvä tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä ja kasvattaa kasvihuoneen satoa ja tätä kautta tuottoa. Aurinkolämpö toimii tehokkaimmin alueilla, joilla lämmityksen tarve on pieni ja olosuhteet kasville ovat saavutettavissa pienellä lämpötilan lisäyksellä. (Gourdo, Fatnassi et al. 2019) Aurinkoenergiaa hyödyntäessä tulee myös huomioida, että auringon säteilyn intensiteetti laskee, kun lähestytään napoja, näin ollen lähempänä päiväntasaajaa olevat alueet ovat paremmat aurinkolämmön hyödyntämiseen kuin lähempänä napoja olevat alueet, mistä johtuen useat koelaitokset sijaitsevat Välimeren alueella. Aurinkoenergiassa on tarjolla hyviä vaihtoehtoja, joiden ylläpitokustannukset ovat erittäin matalat, mutta tuotto sijoitukselle on hyvä.

6.1 Kivipetilämmitys

Kivipetilämmityksellä tarkoitetaan järjestelmää, jossa päivisin kuuman ilman lämpöenergiaa sidotaan kivimateriaaliin, jotta kivistä hohkaavaa lämpöä voidaan käyttää yöllä kasvihuoneen lämpimänä pitämiseen. Kivipetilämmitys toimii hyvin alueilla, joilla yön ja päivän väliset lämpötilaerot ovat suuret. Tämän kaltaisilla järjestelmillä saadaan tasattua yön ja päivän välisiä lämpötilaeroja, joka auttaa pitämään kasvihuoneen lämpötilan suuremman osan ajasta kasvin kasvulle optimaalisena. Kivipeti ei varsinaisesti ole lämmitysjärjestelmä sanan perinteisessä merkityksessä, vaan kivipeti toimii kasvihuoneen lämpövarastona. Kivipetilämmitystä hyödyntämällä maaperän lämpötila 400 mm syvyydessä pysyy tasaisemmin noin 20 °C kuin kasvihuoneessa, jossa ei hyödynnetä kivipetiä. Tämä tasainen lämpötila on kasvien juuristolle parempi kuin vaihteleva lämpötila. (Gourdo, Fatnassi et al. 2019)

Kivipetilämmitys muodostuu maahan upotetusta kivipedistä ja puhaltimesta, jolla saadaan ilmaa siirrettyä lämmitettävän tilan ja lämpövaraston välillä. Kivipedin materiaaliksi tulee valita kiviä, joilla on hyvä lämmönjohtokyky. (Campra, Garcia et al. 2008) Tämän lisäksi kivien tulisi olla muodoltaan hieman pyöreitä, halkaisijaltaan 40–80 mm. Kivien pyöreä muoto mahdollistaa ilman kulkemisen kivien välistä, sillä pyöreät ja keskenään lähes samankokoiset kivet eivät muodosta tiivistä tilaa ja lisää ilman kanssa kosketuksissa olevaa pinta-alaa. Kivipetilämmitystä hyödyntämällä on saavutettu positiivisia tuloksia sadon koon sekä

tuotettujen kasvien laadun suhteen. Kivipetiä käyttävässä kasvihuoneessa kyetään saavuttamaan 22 % kasvu tuotossa perinteiseen kasvihuoneeseen verrattuna ja vain 10 % tuoton lasku verrattuna polttoöljy- tai maakaasukäyttöisiin lämmittämiin. (Kürklü, Bilgin et al. 2003)

Kivipetilämmitys on edullinen vaihtoehto polttoaineita käyttäville lämmitysmuodoille, sillä kivipetilämmityksessä ainoat käyttökustannukset muodostuvat puhaltimen tai puhaltimien käytöstä. Kivipetilämmitys on myös skaalattavissa erikokoisille kasvihuoneille muuttamalla kivipedin kokoa. Uusien kasvihuoneiden kohdalla kivipedin sisällyttäminen rakennusvaiheessa on helpompaa, kuin jälkikäteen rakentaminen, sillä kivipeti voidaan sisällyttää kasvihuoneen pohjarakenteeseen. Suurin ongelma kivipetilämmityksen käyttämisessä on se, ettei tällä lämmitystavalla voida nostaa kasvihuoneen lämpötilaa ulkolämpötilaa korkeammalle päiväaikana ja yöaikana lämpötilan nousu on vain 1–3 °C (Gourdo, Fatnassi et al. 2019). Tämä haaste rajoittaa kivipetien hyödyntämisen alueille, joissa päivisin vaaditaan jäädytystä ja ainoastaan öisin lisälämmitystä. Alueilla, joilla kivipedin hyödyntäminen on mahdollista, kuten Marokossa, kivipedin käyttö polttoainepohjaisten lämmitysmuotojen sijaan vähentää hiilidioksidipäästöjä ja lisää tuottoa lämmittämättömään kasvihuoneeseen verrattuna (Kürklü, Bilgin et al. 2003).

6.2 Aurinko-neste-lämmönkeräin-järjestelmä

Aurinkolämpökeräimessä hyödynnetään lämmönkeräiminä putkia, joissa kiertää tehokkaasti lämpöä sitovaa nestettä, useissa tapauksissa vettä. Tähän putkissa kiertävään nesteeseen saadaan sidottua auringon säteilystä energiaa, joka voidaan siirtää nesteen mukana toiselle alueelle, missä keräin on. Aurinkokeräimellä saadaan tuotettua pieni määrä matalatasoista lämpöenergiaa, matalalla käyttökustannuksella. Yksinkertaisimmillaan järjestelmä voi toimia yhdellä pumpulla, joka kierrättää nestettä aurinkokeräimen ja lämmitettävänä olevan lämmönsiirtimen välillä, mutta useimmissa tapauksissa hyödynnetään kahta pumppua ja nestesäiliötä kahden kierron välillä. Kahden erotellun kierron systeemi mahdollistaa paremman kontrollin lämmönkeruun ja lämmönvapautuksen välille. Suurempaa lämmitystehoa vaadittaessa voidaan järjestelmään lisätä lämpöpumppu vesisäiliön ja lämmönsiirtimen väliin.

Shanghai alueella olevassa koeyksikössä on saavutettu 30 m² lämmönkeräimellä 5–10 °C lämmön nousu 700 m³ kasvihuoneessa, kun ulkolämpötila on ollut 0–5 °C. Shanghai

koeyksikössä hyödynnetään maahan upotettuja u-putkia päivällä kerätyn lämmön säilömiseksi, ja sen vapauttamiseksi yöllä, jolloin ulkolämpötila laskee matalammalle kuin päivällä. (Zhang, Xu et al. 2015) Tämä järjestelmä ei ole täysin puhdas aurinkolämpöjärjestelmä, vaan hybridi maalämmön ja aurinkolämmön välillä.

Marokossa sijaitsevassa koeyksikössä saavutettiin samankaltaisia tuloksia kuin Shanghain yksikössä. Marokon yksikössä yöllisen lämpötilan nousu oli testijakson aikana 1,7–1,9 °C ulkolämpötilaa korkeampi. Matalampi lämpötilannousu on osaltaan selitettävissä sillä, että tässä yksikössä käytettiin lämmönkeräimiä, jonka pinta-ala on 4,68 m². Marokossa sijaitsevassa koeyksikössä ei hyödynnetty maahan upotettuja u-putkia, sen sijaan yksikössä käytettiin kahta 250 litran vesisäiliötä lämmön säilömiseen päivällä. Tässä koeyksikössä kasvatettiin meloneja ja kokeessa havaittiin, että lämmityksen avulla saavutettiin 42 % kasvu melonisadossa. Vuonna 1996 suoritettujen taloudellisten laskelmien perusteella koejärjestelmän kaltainen järjestelmä on taloudellisesti kannattava neljän vuoden takaisinmaksuajalla. (Bargach, Dahman et al. 1999)

Lämpöpumpputeknologiaa hyödyntämällä saadaan huomattavastasi korkeampi lämpötila lämmönsiirtimelle, jolloin kasvihuoneessa ylläpidettävä maksimilämpötilakin on korkeampi kuin järjestelmissä, joissa ei ole lämpöpumppua. Lämpöpumpun lisääminen järjestelmään lisää myös käyttö- ja asennuskustannuksia, sillä lämpöpumppu vaatii enemmän sähkötehoa toimiakseen kuin ainoastaan nesteen siirtämiseen tarkoitettu pumppu. Turkissa suoritettussa kokeessa aurinkolämmönkeräimellä ja lämpöpumpulla saavutettiin kondensaattorin ulostulosta yli 32 °C ulostulolämpötila ulkoilman lämpötilan ollessa -10 °C (Bakirci, Yuksel 2011). Kokeessa aurinkokeräimissä muodostunut lämpötilan nousu oli noin 7 °C ja lämpöpumpun COP 3,8 (Bakirci, Yuksel 2011).

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Maapallon väestön kasvaessa tehokkaan maanviljelyn merkitys korostuu ja näin ollen tulee pyrkiä kehittämään tapoja, joilla saadaan hyödynnettyä maatalouteen käytössä olevaa maapinta-alaa mahdollisimman tehokkaasti. Erilaisia kasvihuoneiden lämmitystekniikoita tarkastellessa huomataan, että sopivan lämpötilan ylläpitäminen on kasvien kasvun kannalta erittäin merkityksellistä. Tämä lämmön vaikutus on huomattavissa kasvatuksesta saatavassa sadossa.

Lämmitys kasvihuoneissa voidaan toteuttaa useilla tavoilla, mutta taloudellisesti tehokkain tapa toteuttaa lämmitystä on raportissa esitettyjen tapojen yhdistelmä. Polttoaineen polttamista hyödyntävissä tekniikoissa on etuna se, että niistä saadaan hiilidioksidia kasvun avuksi, mutta ongelmaksi muodostuu lämmön ja hiilidioksidin tarpeen ristiin menevä sykli-syys. Lämpöpumpputekniikat vaikuttavat ympäristöystävälliselle vaihtoehdolle polttotekniikoihin nähden. Maalämpöä hyödynnettäessä maaperää voidaan hyödyntää vuodenaikojen välisenä lämpövarastona, joka parantaa lämpöpumpun hyötysuhdetta. Pintamaalämmössä, ilmalämmössä ja vesilämmössä hyötysuhde on hieman matalampi, sillä kun lämmityksen tarve on korkea, silloin lämmönlähteen lämpötila on matala. Aurinkolämpöjärjestelmien käyttö suurilla leveysasteilla on haastavaa, sillä auringon intensiteetti on matalampi ja lämmityksen tarve on suurempi kuin pienillä leveysasteilla. Tämän raportin perusteella yhdistämällä aurinkolämpöä ja maalämpöä kyetään saavuttamaan paras kokonaishyötysuhde investoinnille.

LÄHTEET

- BAKIRCI, K. and YUKSEL, B., 2011. Experimental thermal performance of a solar source heat-pump system for residential heating in cold climate region. *Applied Thermal Engineering*, **31**(8), pp. 1508-1518.
- BARGACH, M.N., DAHMAN, A.S. and BOUKALLOUCH, M., 1999. A heating system using flat plate collectors to improve the inside greenhouse microclimate in Morocco. *Renewable Energy*, **18**(3), pp. 367-381.
- CAMPRA, P., GARCIA, M., CANTON, Y. and PALACIOS-ORUETA, A., 2008. Surface temperature cooling trends and negative radiative forcing due to land use change toward greenhouse farming in southeastern Spain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**(D18),.
- CHAU, J., SOWLATI, T., SOKHANSANJ, S., PRETO, F., MELIN, S. and BI, X., 2009a. Economic sensitivity of wood biomass utilization for greenhouse heating application. *Applied Energy*, **86**(5), pp. 616-621.
- CHAU, J., SOWLATI, T., SOKHANSANJ, S., PRETO, F., MELIN, S. and BI, X., 2009b. Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry. *Applied Energy*, **86**(3), pp. 364-371.
- CHIASSON, A.D., 2016. *Geothermal heat pump and heat engine systems : theory and practice*. Chichester, West Sussex ;: John Wiley & Sons, Inc.
- GOURDO, L., FATNASSI, H., TISKATINE, R., WIFAYA, A., DEMRATI, H., AHAROUNE, A. and BOUIRDEN, L., 2019a. Solar energy storing rock-bed to heat an agricultural greenhouse. *Energy*, **169**, pp. 206-212.
- GOVERNMENT OF CANADA, CANADA ENERGY REGULATOR, -08-04, 2021-last update, NEB – Commodity Prices and Trade Updates. Available: <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-commodities/commodity-prices-trade-updates/> [Aug 23, 2021].
- HUETE, J., 2020. *Advantages of a greenhouse*.
- KAVANAUGH, S.P. and RAFFERTY, K.D., 2014. *Geothermal heating and cooling : design of ground-source heat pump systems*. Place of publication not identified: ASHRAE.
- KÜRKLÜ, A., BILGIN, S. and ÖZKAN, B., 2003. A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renewable Energy*, **28**(5), pp. 683-697.
- LEONI, C., 2002. *4 - Improving the nutritional quality of processed fruits and vegetables: the case of tomatoes*. Elsevier Ltd.

LUN, Y.H.V. and TUNG, S.L.D., 2020. *Heat Pumps for Sustainable Heating and Cooling*. 1 edn. Cham: Springer International Publishing.

PANASONIC, 2021-last update, Ilmalämpöpumppu Panasonic VZ9-SKE. Available: <https://www.netrauta.fi/ilmalampopumppu-panasonic-vz9-ske> [Aug 23, 2021].

SPARKS, B., 2015. *Gotham Greens Expands Into Chicago With New Rooftop Greenhouse*.

TATARAKI, K.G., KAVVADIAS, K.C. and MAROULIS, Z.B., 2019. Combined cooling heating and power systems in greenhouses. Grassroots and retrofit design. *Energy*, **189**, pp. 116283.

TOSHIBA, -03-06T10:10:49+00:00, 2020-last update, Suomessa on miljoona lämpöpumppua - 5 syytä, miksi sinunkin kannattaa hankkia lämpöpumppu. Available: <https://www.toshibasuomi.fi/suomessa-on-miljoona-lampopumppua/> [Aug 23, 2021].

VEKONY, A.T., 4.8., 2021-last update, Cost of Ground Source Heat Pumps - Compare Prices. Available: <https://www.greenmatch.co.uk/heat-pump/ground-source-heat-pumps-in-the-uk/ground-source-heat-pump-prices> [Aug 13, 2021].

WU, D.W. and WANG, R.Z., 2006. Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, **32**(5), pp. 459-495.

YLE, 9.3., 2011-last update, Hintavertailu: Luomu kolmanneksen kalliimpaa. Available: http://yle.fi/uutiset/hintavertailu_luomu_kolmanneksen_kalliimpaa/5095605 [Apr 6, 2021].

ZHANG, L., XU, P., MAO, J., TANG, X., LI, Z. and SHI, J., 2015. A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. *Applied Energy*, **156**, pp. 213-222.