

VIS-tyhjiöeristysjärjestelmä Aalto-yliopiston TUTL-projekti

Vapaamuotoinen loppuraportti

VIS-teknologia (Vacuum Insulation System)

VIS on täysin uusi teknologia perustuen suureen puurunkoiseen rakennuselementtiin, joka on suunniteltu kestäämään alipaineistamisen lähelle nollaa baaria. VIS-elementin sisäinen geometria on optimoitu samalla johtamaan lämpöä lävitseen mahdollisimman vähän. Elementti päällystetään ilmatiiviiksi ja elementtiin voidaan kiinnittää milloin vain tyhjiöpumppu, jonka avulla elementin sisällä voidaan saavuttaa niin alhainen paine, jossa puurunkoon sitoutunut ylimääräinen kosteus saadaan muuttumaan höyryksi ja poistettua tyhjiöpumpun kautta ulos elementistä. Metodia kutsutaan yleisesti tyhjiökuivaamiseksi. VIS on maailmassa ensimmäinen teknologia, jossa puun tyhjiökuivaaminen on yhdistetty kokonaiseen rakennuselementtiin. Alla on esitetty kuva ensimmäisestä teolliseen mittakaavaan skaalatusta VIS-elementistä, joka valmistui TUTL-projektin aikana Otaniemessä kesällä 2019.



Kuva 1. Teolliseen mittakaavaan skaalattu VIS-elementti (puurunko päällystetty ohuilla alumiinilevyillä).

Elementtien puurunkoihin asennettiin kosteusantureita, joiden avulla todistettiin elementtien tyhjiökuivaamisen olevan mahdollista. VIS-elementtejä tyhjiökuivattiin sekä sisätiloissa elementtien kokoonpanon aikana (2019 – 2020) että realistisissa ulko-olosuhteissa (kesä 2021). Molemmissa olosuhteissa elementtien puurunkojen kosteuspitoisuuksia kyettiin alentamaan tyhjiökuivauksen avulla useita painoprosentteja (esimerkiksi kosteuspitoisuudesta MC 14,6 kosteuspitoisuuteen MC

8,4), mikä tässä elementtikokoluokassa vastaa noin 70 litraa elementtirungosta poistunutta vettä. Tällainen huoltotoimenpide vei aikaa kymmenen päivää. Tulevaisuudessa tyhjiökuivausta on mahdollista yhä nopeuttaa elementin jatkokehityksellä. Tyhjiökuivauksessa on kyseessä siis eräänlainen huoltotoimenpide, joka voidaan toteuttaa aina tarpeen mukaan. Elementin pysyessä kuivana ei kuormaa kantavassa puumateriaalissa pääse tapahtumaan biohajoamista, minkä johdosta elementille voidaan olettaa erityisen pitkää elinkaarta. Auringon UV-säteilyn vaikutuksilta elementin puurunkoa suojaa säteilyä vahvasti heijastava alumiinipinnoitus, mutta teknologia ei kuitenkaan ole lukkiutunut alumiinin käyttämiseen pinnoitusratkaisuna.

VIS-teknologiassa yhdistyvät puun luonnollisesti vahvat ominaisuudet: 1) korkea lujuus, 2) alhainen lämmönjohtavuus ja 3) alhainen hinta. VIS-elementin runkoa ei esimerkiksi kannattaisi valmistaa metallista, koska lämpöä johtuisi optimoitua metallirunkoa pitkin liikaa elementin lävitse. Muovituotteilla puolestaan ongelmaksi muodostuu joko riittämättömät lujuusominaisuudet verrattuna lämmönjohtavuuteen tai liian korkea materiaalin hinta. Esimerkiksi polykarbonaatilla lujuusominaisuudet sekä lämmönjohtavuus riittäisivät melko tasaiseen kilpailuun puutuotteita vastaan, mutta hinta ei mahdollista kaupallista kilpailua. Lisäksi puutuotteiden työstettävyyden on erinomaista, minkä avulla saavutetaan suurta hyötyä optimoimalla elementin sisäistä geometriaa.

VIS-teknologia on jatkokehitystä [VSI-teknologiasta](#) (Vacuum Super Insulation), jota hyödynnetään pääosin erittäin kylmien ja kuumien nesteiden sekä kaasujen säilytykseen. VSI-teknologiassa sisäkkäin asennetaan kaksi metallista, lieriön muotoista tankkia ja näiden välinen tila alipaineistetaan lähelle tyhjiötä vastaavaa painetilannetta. VSI-tankissa sisäkkäisten metallitankkien välinen tila täytetään laajennetulla perliitillä, joka on vulkaanista alkuperää olevaa kevyttä, edullista ja vähäpäästöistä kivijauhetta. Laajennettu perliitti omaa mikrohuokoisen rakenteen, jonka avulla ilman lämmönjohtavuus saadaan alennettua lähelle nollaa noin 0,1 millibaarin paineessa. Lisäksi laajennetun perliitin avulla saadaan merkittävästi hidastettua lämpösäteilyn siirtymistä metallitankkien välillä. Laajennettu perliitti yhdessä riittävän alhaisen painetilanteen kanssa mahdollistaa [lämmönjohtavuuden](#) suuruudeltaan 0,007 W/(mK) (referenssilämpötila 50 astetta), mikä esimerkiksi tarkoittaa noin viisi kertaa matalampaa arvoa verrattuna mineraalivillaan vastaavassa lämpötilassa. Itse laajennettuun perliittiin ei tule kohdistaa puristuskuormitusta, tai eristekerroksen lämmöneristävyyden heikkeneminen radikaalisti johtamalla enemmän lämpöä kasaan painunutta perliitin kiinteää ainetta pitkin. VIS-elementissä puinen runkorakenne kantaa siis puristuskuormituksen, minkä johdosta laajennettu perliitti ei puristu kasaan alipaineistuksen johdosta.

VSI-teknologia on rajoittunut metallisen runkorakenteen käyttämisestä johtuen sylinterimäiseen geometriaan, mutta VIS-teknologian puurunkoisen ratkaisun avulla on VSI-teknologian lämmöneristävyyden potentiaali tulevaisuudessa mahdollista siirtää myös rakennusteollisuuteen lähes täysimääräisenä. Tämä kehitysloikka kuitenkin vaatii vielä kehitystyötä VIS-elementin pinnoituksen ilmatiiveyden parantamiseksi, jotta vaadittavan alhainen painetilanne elementtien sisällä voidaan ylläpitää pitkäaikaisesti ilman jatkuvaa tyhjiöpumpun käyttämistä. Tämä kehitysaskel toisaalta tulee pidentämään myös VIS-elementtien tyhjiökuivauksen huoltoväliä. TUTL-projektin aikana tehtyjen havaintojen perusteella yli vuoden pituinen huoltoväli on nykyisellä ratkaisulla jo kuitenkin saavutettu kaikissa valmistuneissa VIS-elementeissä. Lämmöneristävyyden alipaine-efekti tulee myös mahdollistamaan ns. dynaamisen lämmöneristävyyden, jonka avulla olisi mahdollista säätää rakenteen vaipan lämmöneristävyyttä muuttamalla elementtien sisällä olevaa painetilaa. **Tällä hetkellä saavutettu VIS-teknologian taso on siis VIS-elementtien tyhjiökuivaamisessa**, mutta elementtien lämmöneristävyys on siitä huolimatta jo hyvällä tasolla U-arvon ollessa alle 0,20 W/(m²K).

VIS-elementin puurungon sisäilmalle haitalliset VOC-päästöt (Volatile Organic Compound), kuten liimojen formaldehydit, pysyvät elementin lähes täysin ilmatiiviin pinnoitteen ansiosta elementin sisällä, eivätkä ne tämän vuoksi pääse siirtymään rakennuksen sisäilmaan. Elementtien alipaineistuksen aikana elementin sisäiset VOC-päästöt ohjataan tyhjiöpumpun kautta turvallisesti ulos rakennuksesta. Lisäksi VIS-elementtien ulkopinta, eli rakennuksen sisäpinta, on päällystetty VOC-päästöistä vapailla materiaaleilla mahdollistaen samalla rakennuksen terveen sisäilman saavuttamisen. VIS-elementeille on myös suoritettu alustavia LCA-laskelmia, joiden mukaan **elementtien on mahdollista saavuttaa jopa hiilinegatiivinen status** johtuen pääosin sekä puurunkoisesta elementtiratkaisusta että vähäpäästöisestä eristeratkaisusta (laajennettu perliitti). Alumiinipinnoite aiheuttaa toki paljon CO₂-päästöjä suhteessa käytettyyn materiaalmäärään, mutta elementin puurunkoon hiiltä saadaan varastoitua pitkäaikaisesti enemmän verrattuna alumiinituotannon aiheuttamiin CO₂-päästöihin, ja tulevaisuudessa elementtipinnoitetta voidaan kehittää yhä ympäristöystävällisempään suuntaan. Tarkemmat LCA-laskelmat valmistuvat jo lähitulevaisuudessa. Lisäksi VIS-elementin puurunko ei ole lainkaan altis vaurioitumaan lämpökuormituksesta aiheutuvan taipuman (eng. "thermal bending") johdosta, mikä aiheuttaa rakennusteknisiä rajoitteita mm. teräs-sandwich -paneeleita käytettäessä rakennuksen vaippaelementteinä. Etu saavutetaan puumateriaalien alhaisten lämpölaajenemiskertoimien ansiosta. Puolestaan betonielementteihin verrattuna VIS-elementeissä ei pääse ajan myötä tapahtumaan pakkasrappeumaa, mikä vähentää julkisivun huoltotarvetta.

VIS-koekasvuhuone

Projektin aikana valmistetuista seitsemästä VIS-elementistä pystytettiin rakennusfysiikkaan ja kasvitutkimukseen keskittyvä koehalli Luonnonvarakeskuksen tutkimusalueelle Piikkiöön. Koehallin vaippa, lattia ja kantavat tukirakenteet toteutettiin täysin modulaarisesti, eikä erillistä sääsuojasta pystytysvaiheessa tarvittu, mikä on puuelementtirakentamisessa varsin poikkeuksellista. VIS-elementtien erikoislaatuisten ominaisuuksien johdosta voidaan tutkimustilassa ylläpitää kasvihuoneolosuhteita vastaavaa ilmankosteutta vailla hallitsemattomien kosteusvaurioiden riskiä. Alla on esitettyinä valokuva valmistuneesta VIS-koekasvuhuoneesta.



Kuva 2. VIS-koekasvuhuone Luonnonvarakeskuksen alueella Piikkiössä.

Koehalli päädyttiin rakentamaan tasakattoisena, jotta koehalli voitiin toteuttaa vain yhden muotoisilla VIS-elementeillä, ja toteutus TUTL-projektin vaatimassa tiukassa aikataulussa oli ylipäättään

mahdollista. Tasakattoratkaisulla VIS-elementtien toimivuutta voitiin kuitenkin tutkia mahdollisimman haastavassa kosteusrasitustilanteessa, ja näistä tuloksista on kerrottu tarkemmin seuraavassa kappaleessa. Tulevaisuudessa tasakattoratkaisu mahdollistaa aurinkopaneelikentän asentamisen tehokkaasti teollisuuskokoluokan kasvatushallien katoille. TUTL-projektin aikana aurinkopaneeliratkaisua ei voitu toteuttaa koehallin katolle budjettisyyistä johtuen. VIS-elementtien heijastavan kattopinnan ansiosta on myös mahdollista tehokkaasti hyödyntää kaksipuoleisia aurinkopaneeleita, jolloin aurinkosähköä voidaan oletettavasti tuottaa kustannustehokkaammin tulevaisuudessa (kaksipuolisten aurinkopaneelien hintojen laskiessa). Lämpöteknisesti tarkastellen auringon säteilyä heijastava sekä voimakkaasti lämpöä emittoiva alumiininen (anodisoitu) kattopinta mahdollistaa viileämmän ulkokattopinnan verrattuna lähes kaikkiin markkinoilla oleviin kilpaileviin ratkaisuihin, mikä tulee merkittävästi vähentämään rakennuksen viilennyksen energiantarvetta erityisesti kuumien ilmastojen maissa. Koehallin sisäpuolella alumiininen elementtipinnoite puolestaan heijastaa LED-keinovalotusta tehokkaasti takaisin viljeltäville kasveille, ja näin käytetty sähköenergia lopulta muuttuu hieman tehokkaammin biomassaksi.



Kuva 3. VIS-koekasvuhuoneen sisätila salaatinkasvatuskokeiden aikana keväällä 2021.

VIS-teknologia sopii erityisen hyvin kosteiden olosuhteiden rakenneratkaisuksi, sillä se käytännössä ratkaisee rakennuksen vaipan kastepisteongelman. Ilmatiiviin pinnoituksen johdosta ilmankosteus ei pääse siirtymään elementin sisään ja näin vaikuttamaan elementin sisäisen puumateriaalin kosteuspitoisuuteen, tai ilmankosteuden siirtyminen puuhun on äärimmäisen hidasta. Projektin aikana valmistuneista VIS-elementeistä ensimmäisiä on säilytetty ulkona jo noin 22 kuukautta lokakuuhun 2021 mennessä, ja eräissä elementeissä kosteuspitoisuudet ovat säilyneet tänä aikana muuttumattomina. Tämä tarkoittaa puuelementtien olevan käytännössä immuuneja ilmankosteuden vaikutukselle. Toisissa koehallin elementeissä on mitattu puurungon kosteuspitoisuuden kohoamista mm. elementtien päällä maanneista sadevesistä johtuen, mutta näissä tapauksissa puurunkoihin kerääntynyt ylimääräinen kosteus on saatu jälleen poistettua tyhjiökuivauksen avulla. Kesän 2021 aikana suoritettujen tyhjiökuivausten jälkeen elementtien kosteustilanne on se, että kaikkien elementtien puurungot ovat kuivia ja elementit voivat erittäin hyvin.

Koehallin lämpötekniinen tarkastelu

Piikkiön koehallissa toteutettiin lämmöneristävyyden mittaus keväällä 2021 ennen Luken aloittamia salaatin kasvatuskokeita. Hallin tutkimustila eristettiin eteistilasta ja tutkimustilan

ilmanvaihto sammutettiin. Eteistilassa ei ollut tällöin erillistä lämmitystä ja tutkimustilan alkulämpötila oli 10 astetta. Tutkimustilaan jätettiin päälle 1000 watin sähkölämmitin, joka lämmitti tilaa jatkuvasti neljän vuorokauden mittausjakson ajan. Tutkimustilan lämpötilan tasaannuttua tutkimustilan sisälämpötila oli 15 astetta korkeampi kuin kyseisen yön keskimääräinen ulkolämpötila Piikkiössä. Saavutettu tasapaino vastaa hyvin tarkasti (virhe < 5 %) koehallin vaipan laskennallista lämmöneristävyyttä. Suoritettu lämpötekniinen tarkastelu osoitti sen, että jo **Piikkiön koehallissa toteutettu lämmöneristykseen taso mahdollistaa vertikaaliviljelylaitoksen ympärivuotisen lämmittämisen missä tahansa päin Suomea pelkästään kasvien kasvatukseen tarvittavien LED-kasvatusvalojen, viljeltävien kasvien sekä muiden vaadittujen kasvatuslaitteiden tuottamalla lämmöllä**. Ratkaisua skaalaamalla suuremmaksi tullaan lopulta pääsemään tilanteeseen, jossa kasvatuslaitteisiin käytetystä sähköenergiasta jopa 90 % voidaan uusiokäyttää lämpöenergiana esimerkiksi kaukolämpöverkossa (mitä suurempi toteutus sitä tehokkaampi). Kaupallisessa mielessä kyseinen tilanne on erityisen mielenkiintoinen, sillä myymällä tuotantolaitoksen hukkalämpö paikalliseen kaukolämpöverkkoon on mahdollista kattaa viljelytoiminnan vaatiman jäähdytyksen kustannukset. TUTL-projektin aikana käymiemme useiden asiantuntijakeskusteluiden perusteella tuotantolaitoksen jäähdytyskustannus on yksi suurin kustannuserä vertikaaliviljelyn tuotantokustannuksista maailmalla. Lopulta tämä tarkoittaa sitä, että pohjoinen kaupunki, jossa yritysten hukkalämmön myyminen kaukolämpöverkkoon on mahdollista, tulee olemaan kustannustehokkain lokaatio suuren mittakaavan vertikaaliviljelytuotannolle, mikäli kaikki muut osatuotantokustannukset oletetaan vakioiksi.

Ympärivuotisessa lasikasvihuoneviljelyssä lämmitysenergian tarve on Luken vuonna 2019 julkaiseman [tutkimuksen](#) mukaan 48 % käytetystä kokonaisenergiasta (lukuarvo ruukkusalaatin viljelyn tapauksessa), ja tulevaisuudessa lasikasvihuoneviljelijöiden yhä enenevissä määrin siirtyessä LED-keinovalojen käyttöön tulee tämä prosenttiosuus entisestään kasvamaan, sillä nykyisin yhä laajalti käytössä olevat HPS-valaisimet toimivat kasvatustoiminnassa käytännössä tuplaroolissa sekä valon että lämpöenergian tuottajina. Vuonna 2014 Suomen kasvihuonealan energiankulutus oli noin [1600 GWh](#) , josta noin kaksi kolmasosaa oli lämmitysenergiaa. Vertailuarvona Suomen kasvihuoneiden lämmittämiseen vuosittain käytetty lämpöenergia vastaa hyvin lähelle Lahden kokoisen kaupungin vuotuista [kaukolämmöntarvetta](#).

Ylipaineinen sisätila ja avoin lattiarakenne

Kasvien sisäviljelyn filosofiassa pyritään tuotantotila pitämään mahdollisimman puhtaana kasvitautilien aiheuttajista sekä erilaisista tuholaisista, minkä johdosta Piikkiön koekasvihuoneessa tutkittiin myös ylipaineistettua sisätilaa. Ylipaineistuksessa perimmäinen idea on ilmapirran kulkeminen kasvatustilasta ulospäin kasvatustilan oven avautuessa. Samalla puhaltuu pois tilaan pyrkivät tuholaiset ja itiöt. Vertailupohjana normaaliin rakennustapaan sekä ylipaineisten kosteiden tilojen kosteusvaurioriski on tässä suora lainaus Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisusta RIL 235-2009: *"(uima-)allashuoneen yläpohjaan ja ulkoseinien yläosiin kohdistuu lämpötilaeroista aiheutuvan ylipaineen vuoksi varsinkin korkeissa tiloissa merkittävä kosteuskonvektioriski"*. Riskin seurauksista puolestaan todetaan: *"Kosteuskonvektio on ollut yksi keskeisistä syistä nykyisten uimahallien ulkovaippojen korjaustarpeeseen"*. VIS-teknologian käyttämisen ansiosta kostean sisätilan ylipaineistaminen ei kuitenkaan johda hallitsemattomiin kosteusongelmiin hallin vaipparakenteissa.

Piikkiön koehalli ylipaineistettiin kanavapuhaltimen avulla, jota ohjattiin erillisen automatiikkaohjauslaitteiston avulla. Automatiikka mittaa jatkuvasti ilmanpainetta sekä hallin ulko- että sisäpuolelta ja pyrkii ylläpitämään hallissa ennalta määritettyä ylipainetta. **Ratkaisuna ylipaineistettu sisätila mahdollisti koehalliin maata vasten avoimen lattiapinnan, eikä koehallin rakenteissa tarvinnut käyttää lainkaan betonia, vaan maanvastaisena lattiamateriaalina käytettiin**

noin 45 cm paksua kerrosta vaahtolasimurskaa. Koehallin lattiakerros ei siis ole ilmatiivis maaperään nähden. Vaahtolasimurska on kierrätyslasista valmistettua kotimaista uusiomateriaalia, joka toimii myös hyvänä lämmöneristeenä sekä maaperän kosteuden kapilaarikatona. Vaahtolasimurskakerroksen alle asennettiin viisi kappaletta radonpoistoputkia, joista osa on nähtävillä myös kuvassa kaksi. Tällä ratkaisulla koehallin ylipaineistettu sisäilma kulkee hitaasti hallin sisältä huokoisen vaahtolasimurskakerroksen lävitse ja lopulta ulos hallista radonpoistoputkien kautta. **Ilmavirtauksen kulkiessa vaahtolasimurskakerroksen lävitse kohti poistoputkia, ei maaperän radonkaasu päässyt nousemaan koehallin sisäilmaan.** Sisäilman radonpitoisuutta mitattiin Airthings Wave -radonmittarilla, ja alla olevassa kuvassa on esitetty koehallin sisäilman radonpitoisuus heinäkuun 2021 aikana.



Kuva 4. Koehallin radonpitoisuus heinäkuussa 2021.

Keskiarvo sisäilman radonpitoisuudelle tällä ajalla oli 21 Bq/m³ huippuarvon ollessa 46 Bq/m³, kun STUK:in määrittämä [viitearvo](#) radonpitoisuudelle oleskelutiloissa puolestaan on 300 Bq/m³. Radonpitoisuuteen liittyen tulee kuitenkin huomioida koehallin sijaitsevan Piikkiössä, jonka maaperä kuuluu alhaisten radonpäästöjen alueeseen. Tästä johtuen lattiaratkaisun toimivuutta tulee mitata aktiivisesti pilotoitaessa ratkaisua korkeampien radonpäästöjen alueilla, ja erityisesti talviaikaan, jolloin rakennusta ympäröivä maaperä on jäässä, ja radon pyrkii nousemaan ilmakehään sulan lattiapinnan alueelta.

Ruukkusalaatin kasvatuskoe

Tämän alaotsikon teksti on suoraan kopioitu Luonnonvarakeskuksen tuottamasta loppuraportista nimeltä *Ruukkusalaatin sato ja laatu VIS-kasvuhuoneessa*.

Luonnonvarakeskuksen Kaarinan toimipisteessä järjestettiin huhti- ja toukokuussa 2021 ruukkusalaatin kasvatuskoe Aalto-yliopiston paikalle rakentamassa elementtirakenteisessa VIS- (Vacuum Insulation System) kasvuhuoneessa. Kokeessa testattiin kahta erilaista LED-valotusjärjestelyä ”Katusa”-lehtisalaatilla (*Lactuca sativa* L). Koejäsenet olivat: 1. Pieni valotusteho (155 µmol m⁻² s⁻¹) ja pitkä tekovalojakso, 2. Suuri valotusteho (310 µmol m⁻² s⁻¹) ja lyhyt tekovalojakso. LED-valotus toteutettiin Philips Green Power LED production module 3.0 L120 DRWL

LED-valaisimilla siten, että vuorokauden fotosynteesistä aktiivisen säteilyn kertymä DLI (Daily Light Integral) oli molemmilla koejäsenillä yhtä suuri. Koejäsenillä oli oma kastelujärjestelmänsä, samanlainen lannoitus ja yhtä suuri kastelu vuorokaudessa. Ruukkusalaattia viljeltiin yhdessä kerroksessa. LED-valaistuksen tuottama lämpö riitti kasvuhuoneen lämmitykseen. VIS-kasvuhuone tarjosi ruukkusalaatille vakaat valo-, lämpö- ja kosteusolot. Salaatin lehdenreunapoltetta oli hyvin vähän. Pieni valotusteho ja pitkä tekovalojakso saavutti kaupakelpoisen ruukkusalaatin minimipainon nopeammin kuin suuri valotusteho ja lyhyt tekovalojakso. Valotusjärjestelyllä ei ollut vaikutusta ruukkusalaatin koko satoon tai kaupakelpoiseen satoon, mutta ruukkusalaatista kaupakunnostuksen yhteydessä poistettu lehtimassa oli kolmanneksen pienempi suurella valotusteholla ja lyhyellä tekovalojaksolla. Suurella valotusteholla ja lyhyellä valotusjaksolla kasvin korkeus ja varren pituus olivat lyhyemmät ja ravinneliuosta kului neljänneksenvähemmän. Valotusjärjestelyllä ei ollut vaikutusta ruukkusalaatin nitraattipitoisuuteen. Kasvuhuoneessa kasvatettu ruukkusalaatti säilyi kylmävarastossa 11 vrk eikä valotusjärjestely vaikuttanut ruukkusalaatin säilyvyyteen. Pienellä valotusteholla ja pitkällä tekovalojaksolla voidaan pienentää kasvuhuoneen jäähdytystarvetta. Kasvuhuoneen jäähdytysratkaisu osoittautui vielä puutteelliseksi, koska se ei poistanut riittävästi lämpöä kasvuhuoneesta.



Kuva 5. Ruukkusalaatin kasvatuskokeet Piikkiön VIS-koekasvuhuoneessa.

Teknologian kaupallistamisen loppuraportti

Markkinatutkimus

Projektin aikana vertikaaliviljelymarkkinat sekä yleinen kiinnostus alaa kohtaan ovat kasvaneet nopeasti. Kasvun ajureina ovat toimineet varsinkin vertikaaliviljelyteknologian kehitys, kuluttajien kasvanut kiinnostus vastuullista lähiruokaa kohtaan, sekä globaali huoli ilmaston lämpenemisen vaikutuksista ulkoviljelyn satotasoihin pitkällä aikavälillä. Projektin aikana vertikaaliviljelyalalla on näkynyt paljon uusia sijoituksia alan yrityksiin sekä myös ensimmäinen yli miljardin pörssilistautuminen (Aerofarms/USA). Tämän lisäksi markkinoilla on näkemys, että alan ensimmäinen Eurooppalainen Unicorn-listautuminen on lähellä (InFarm). Ruuan vähittäismyyjät ovat alkaneet kiinnostumaan projektin aikana vertikaaliviljelystä ja alalla on nähty paljon yhteistyötä vertikaaliviljelyratkaisuiden ja ruokakauppakettujen välillä (esim. Plenty & Wholefoods sekä InFarm & Amazon Fresh). Tyypillisesti vertikaaliviljelyoperaattoreiden ja ruokakauppojen yhteistyö toimii siten, että vertikaalifarmit tuottavat ruokakaupoille räätälöidysti tuoreita ja hyvin paikallisia tuotteita. VIS-teknologian näkökulmasta projektin aikana on tutkittu markkinoita sekä vertikaaliviljelyoperaattoreiden (mitä viljelijät haluavat teknisten ratkaisuiden tarjoajilta) että kuluttajien (mitä ominaisuuksia kuluttajat haluavat vertikaaliviljelyoperaattoreiden kasvattamilta tuotteilta) näkökulmasta. Tätä markkinatietämystä on pyritty hyödyntämään VIS-teknologian kehityksessä sekä liiketoimintamallien kartoittamisessa.

Korona-pandemian vaikutukset alaan eivät ole vielä täysin selvillä, mutta tällä hetkellä näyttää siltä, että vertikaaliviljely oli yksi aloista, joka hyötyi pandemiasta. Tämä johtuu siitä, että COVID19 toi esiin keskitetyn ruuantuotannon ja nykyisten toimitusketjujen heikkoudet, ja ruokaturvariskit nousivat julkisen keskustelun valokeilaan, jolloin vertikaaliviljely nousi esiin eräänä potentiaalisena ratkaisuna kyseisten riskien pienentämiseen, erityisesti desentraloidun ruuantuotannon kautta. Vertikaaliviljelymarkkinoiden kasvua hidastavana tekijöinä ovat nousseet esiin muun muassa korkeat investointikustannukset, verrattain korkeat muuttuvat kustannukset (korkeat sähkökustannukset), sekä mm. ilmastonhallinta- ja ohjausjärjestelmien suhteellisen matala TRL-taso (kaikki tekniset ratkaisut ovat vielä melko uusia).

Yhteenvetona tämän hetken markkinakentästä voidaan todeta, että vertikaaliviljelyn liiketoimintamalli perustuu hyvin pitkälle sille, että vertikaaliviljelijät tuottavat kuluttajille puhtaita, vastuullisia ja mahdollisimman lähellä tuotettuja salaatteja ja yrttejä ja myyvät niitä ruokakaupoissa sekä ravintoloissa selkeällä preemiolla verrattuna perinteisillä tavoilla tuotettuun ruokaan. Esimerkkinä voidaan mainita helsinkiläisen vertikaaliviljely-yrityksen hinnoittelustrategia, kun tuotteita myytiin suurissa ruokakaupoissa: noin 50 % - 100 % bulkkisalaattia ja -basilikaa korkeampi hinnoittelu. Lopputuotteiden korkeampi myyntihinta on tällä hetkellä välttämätöntä vertikaaliviljelijöille, sillä *early adapter* -vaiheessa teknologiariskit ja tuotanto- sekä investointikustannukset ovat vielä verrattain korkeita.

Kilpailevien ratkaisuiden kartoitus

Projektin aikana olemme jakaneet kilpailevat vertikaaliviljelyn rakennusratkaisut kahteen kategoriaan: konttiratkaisut (rahtikontit ja kylmäkontit) sekä suurta kosteusrasitusta kohtuullisesti kestävä rakennerratkaisut suuremmassa mittakaavassa (betonirakentaminen ja teräs-sandwich -paneeliratkaisut). Konttiratkaisujen etu on niiden toimittamisen helppous: Asiakas tilaa valmiiksi varustellun kontin, joka voidaan tuoda asiakkaan tontille ja kytkeä alueen infraan ilman suurempia rakennustöitä. Huonona puolena on ratkaisun heikko skaalautuvuus, joka johtaa korkeaan hintatasoon per viljelyneliö. Lisäksi ahtaassa konttiratkaisussa sisätilan ilmastonhallinta on

merkittävästi haastavampaa verrattuna suuremman kokoluokan ratkaisuihin. Ilmastonhallinnan toimivuudella on puolestaan suora vaikutus tuotannon satotasoihin per tehokas viljelyneliö.

Betonirakentamisen tapauksessa etuna on yhä nykyisen markkinatilanteen suhteellisen matalat investointikustannukset, mutta suurena heikkoutena näemme ratkaisun erityisen suuren hiilijalanjäljen, sillä betonirakenteinen vertikaaliviljelyhalli vaatii etenkin kylmässä ja kuumassa olosuhteissa lisäksi paksun kerroksen muovipohjaisia lämpöeristeitä, jotka lisäävät CO₂-päästöjä entisestään. Lisäksi betoninen julkisivu kärsii esim. Suomen talviolosuhteissa pakkasrappeumasta, mikä johtaa kasvavaan kunnossapitotarpeeseen rakennuksen vanhetessa. Teräs-sandwich paneelien tapauksessa puolestaan hintataso on samoin hyvin edullinen, mutta rakenneratkaisun heikkouksina voidaan mainita varsin lyhyt elinkaari etenkin vertikaaliviljelyn erittäin kosteissa sisäolosuhteissa, rakenteen CO₂-päästöt sekä lämpölaajenemisen aiheuttamat mitoitusrajoitukset etenkin erityisen kuumissa sekä kylmissä maissa. Arkkitehtuurisessa mielessä sekä betonirakenteiden että teräs-sandwich -paneelien käyttö vertikaaliviljelyhallin julkisivussa voi rajata toiminnan pelkästään kaupunkien laitamille. Lisäksi uusien rakennusten jatkuvasti kiristyvät CO₂-päästömääräykset voivat tulevaisuudessa rajoittaa epäekologisten rakennusten rakentamista monissa maissa. Projektin aikana näitä kyseisiä ratkaisuja on verrattu teknisten ominaisuuksien, hinnan, laadun ja skaalautuvuuden puolesta VIS-teknologiaan ja käytetty tätä tietoa liiketoimintamallien kartoittamisessa sekä hinnoittelustrategian suunnittelussa.

Asiakaskartoitus

Asiakaskartoituksen osalta olemme jakaneet vertikaaliviljelyteknologian ostajat kahteen pääkategoriaan: ammattiviljelijät ja elämysviljelijät. Kummankin edellä mainitun kategorian toimijat voivat olla sekä yksityisiä että julkisia tahoja (esimerkiksi Persianlahdella valtiolliset tekijät ovat vahvasti mukana vertikaaliviljelyratkaisuiden ostamisessa).

Ammattiviljelijät tuottavat tyypillisesti ruokaa esimerkiksi suurien ruokakauppaketjujen lähialueen kaupoille tai ravintoloille (esim. Plenty ja Whole Foods). Ammattiviljelijät keskittyvät suuriin tuotantoyksiköihin ja heille on tärkeää korkea automaatiotaso sekä yksikkökustannusten minimointi. Ammattiviljelijöiden vertikaaliviljelytilat sijaitsevat tyypillisesti suurten asutuskeskusten liepeillä, mutta kuitenkin harvemmin keskusta-alueilla. Tuotantoyksikköjen koko on usein suurempi kuin 1000 m² ja koko operaation vaatimat investointikustannukset ovat useita miljoonia euroja.

Elämysviljelijöillä tarkoitetaan viljelijöitä, joita kiinnostaa ennen kaikkea tuottaa korkean arvon ruokaa erittäin lähellä asiakkaita (jopa samassa rakennuksessa). Esimerkkejä tällaisista viljelijöistä ovat ostoskeskusten, toimistotalojen tai ravintoloiden yhteydessä toimivat vertikaaliviljelijät, jotka myyvät tuotteensa pääasiassa samassa rakennuksessa sijaitsevien jälleenmyyntipisteiden kautta. Elämysviljelijät haluavat mahdollisimman helppokäyttöisiä avaimet käteen -ratkaisuja, sillä heillä ei välttämättä ole merkittävää aiempaa kokemusta ruuantuotannosta. Tärkeää heille on myös se, että teknologianmyyjä auttaa heitä laajasti vertikaaliviljelyoperaation suunnittelussa ja aloittamisessa. Vaikka kustannustaso on myös elämysviljelijöille tärkeä, korostuvat tälle asiakassegmentille entistä enemmän vastuullisuus, ratkaisun helppokäyttöisyys, lisäpalvelut (esim. datapalvelut, kasvatusohjeet, yhteisöllisyys) sekä toiminnan joustavuus, eli ei haluta välttämättä tuottaa vain 1-2 kasvilajia per tuotantolaitos, vaan halutaan usein tarjota laajempaa kasvivalikoimaa kuluttajille. Pienet, hyvin paikalliset vertikaalifarmit ovat pinta-alaltaan usein 100 m² - 500 m² ja investointikustannukset sadasta tuhannesta miljoonaan euroon.

Asiakasarvon määrittely ja ratkaisun hinnoittelu

Uuden innovaation näkökulmasta vertikaaliviljelytekniikan hinnoittelua vaikeuttaa se, että ala on vielä hyvin aikaisessa kehitysvaiheessa, markkinat ovat vielä melko hajanaiset, eikä pitkän aikavälin dataa ole vielä olemassa. Projektin aikana selväksi on käynyt se, että jo nykyisellä vertikaaliviljelyteknologialla voidaan toiminta saada kannattavaksi. Tämä on johtanut siihen, että uusia, suuria vertikaalifarmeja on avattu kaikilla mantereilla ja olemme pyrkineet keräämään näistä tietoja. Tavoitteenamme on ollut kartoittaa nykyisten vertikaalifarmien kannattavuuksia ja takaisinmaksuaikoja ja hyödyntää tätä tietoa tulevaisuuden liiketoimintamallien kartoittamisessa. Olemme myös identifioineet vertikaaliviljelyoperaattoreiden kohtaamia ongelmia, joita voimme tulevaisuudessa ratkaista lisäämällä liiketoimintamalliimme myös älykkäitä data- ja energiaratkaisuja (mm. hukkalämmön hyödyntäminen sekä tehokas datankeruu ja -hyödyntäminen) yhdessä partnereidemme kanssa.

Projektin aikana on saatu avattua kontakteja potentiaalsiin tulevaisuuden hyödyntäjiin. Olemme pyrkineet näiden kontaktien kautta ymmärtämään paremmin asiakkaiden preferenssejä, ja sitä miten tulevaisuuden asiakasneuvotteluprosessit tulevat etenemään. Raportointijakson aikana on vahvistunut se käsitys, että suurten farmien lisäksi myös pienemmille yksiköille on kysyntää useista eri lähteistä (tutkimusorganisaatiot, talonyhtiöt, ravintolat yms.). Asiakaskartoitusta on suoritettu yhdessä yhteistyöverkostomme kanssa. Olemme määritelleet myös ratkaisumme kiinnostavuutta potentiaalisten hyödyntäjien näkökulmasta myös muun muassa seuraamalla sitä, minkä takia potentiaaliset hyödyntäjät ovat ottaneet meihin yhteyttä R2B-projektin aikana: Esille nousee muun muassa seuraavia tekijöitä: 1) VIS-rakennusratkaisu koettiin ilmastoystävälliseksi ratkaisuksi ja kontaktin tavoitteena oli käynnistää mahdollisimman ekologinen vertikaaliviljelyoperaatio, 2) Kontakti koki, että rakennusteknologiamme sopi laatunsa ja ominaisuuksiensa puolesta (kosteudenkestävyys/energiatehokkuus/pitkä elinkaari) vertikaaliviljelyn rakennusratkaisuihin, 3) Kontakti oli kiinnostunut vertikaaliviljelystä ja koki, että meillä oli paljon tietoa aiheesta sekä mahdollinen ratkaisu asiakkaan tarpeeseen (esim. miten viljellä kasvia X paikassa Y).

Kun verrataan puhtaita investointikustannuksia per viljelyneliö, ratkaisumme ovat edullisempia kuin konttiratkaisut, mutta kalliimpia kuin suuremman kokoluokan betoni- tai teräs-sandwich -ratkaisut. Uskomme kuitenkin pystyvämme tarjoamaan kokonaisuudessaan parhaan ratkaisun myös suuren kokoluokan vertikaalifarmeihin, kun otetaan huomioon ratkaisumme elinkaari, huollon helppous, tekniset ominaisuudet, laatu ja minimoitu hiilijalanjälki. Projektin aikana olemme kirkastaneet arvolupaustamme ja sitä, mitkä ovat tärkeimmät kilpailuedut (hinnan lisäksi). Olemme myös päässeet keskustelemaan potentiaalisten hyödyntäjien kanssa ratkaisumme hinnoittelustrategiasta.

Liiketoimintamallien kartoitus

Vertikaaliviljelymarkkina on ruuantuotannon mittakaavassa vielä hyvin uusi markkina ja siksi asiakassegmentit eivät ole vielä niin selkeitä kuin pidemmälle kehittyneillä markkinoilla. Tämä johtaa väistämättä siihen, että asiakkailla ei ole välttämättä pitkää kokemusta vertikaaliviljelystä, ja tämän lisäksi ratkaisuiden tarjoajilla ei ole näyttää pitkän aikavälin dataa ratkaisuidensa toimivuudesta. Vertikaaliviljelyoperaation pyörittäminen vaatii samanaikaisesti valtavan määrän erilaisia teknisiä- ja datapohjaisia ratkaisuja ja jokaisen osapaketin ostaminen eri tarjoajalta johtaa hyvin pitkään suunnittelu- ja neuvotteluprosessiin. Tämän vuoksi olemme alusta asti panostaneet siihen, että olemme verkostoituneet tarvittavien osaratkaisuiden toimittajien kanssa, jotta pystymme tulevaisuudessa tarjoamaan yhdeltä luukulta avaimet käteen -ratkaisuja. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, että liiketoimintamallimme perustuisi pelkästään avaimet käteen -ratkaisuiden tarjoamiseen. Meillä on erinomainen mahdollisuus tehdä yhteistyötä myös hyvin kokeneiden vertikaaliviljelijöiden ja vertikaaliviljelyteknologiaa tarjoavien yritysten kanssa siten, että toimitamme heille pelkästään

ekologisen vertikaaliviljelyn tuotantohallin. Markkinoilla on paljon tällaisia potentiaalisia yhteistyökumppaneita, sillä suurin osa vertikaaliviljelyyn ratkaisuja tarjoavista yrityksistä keskittyy pääasiassa automaatiikkaan, LED-valoihin tai dataratkaisuihin, ja tällaisille yrityksille pystymme tarjoamaan lisäarvoa ekologisella ja pitkäikäisellä vertikaaliviljelyn rakenneratkaisulla (ns. co-selling).

Aineettomien oikeuksien suojaus

VIS-teknologian patentointiin liittyen aktivoi Aalto-korkeakoulusäätiö kansainvälisen PLC-patenttihakemuksen VIS-teknologiasta seuraaviin maihin/alueisiin: EPO, USA, CAN, CHN, JPN, BRA ja AUS.

Yhteenveto

Tämän projektin aikana tehdyn tiedonkeruun ja markkinaselvitysten pohjalta uskomme, että vertikaaliviljelymarkkina tulee kasvamaan nopeasti seuraavien vuosien sekä vuosikymmenten aikana. Vertikaaliviljelyllä ja urbaanilla ruuantuotannolla pystytään vastaamaan useampaan kuluttajatasoon megatrendiin (lähiruoka, vastuullisuus ja puhdas ruoka), mikä tuo alalle yksityisiä sijoituksia. Tämän lisäksi vertikaaliviljely on julkisen puolen näkökulmasta potentiaalinen ratkaisu ruokaturvan ylläpitämiseen ilmaston lämmetessä, mikä puolestaan tuo alalle myös merkittävästi julkisen puolen investointitukia. Vertikaaliviljelyn vahvuus on siis se, että sen voidaan ajatella sekä hidastavan ilmastomuutosta että auttavan meitä sopeutumaan ilmastomuutokseen, ja globaalisti tarvitaankin juuri tällaisia positiivisia ratkaisuja vaikeisiin ongelmiin.

Megatrendien tuomasta myötätuulesta huolimatta vertikaaliviljelyalan teknologioiden täytyy kuitenkin vielä kehittyä toimintavarmemmiksi, vastuullisimmiksi ja edullisemmiksi, jotta ala voi siirtyä kohti nopean kasvun ja skaalautumisen vaihetta. Tämän lisäksi vertikaalifarmeja pitää tulevaisuudessa integroida entistä tehokkaammin älykkäisiin kaupunkeihin, jotta voidaan saavuttaa uusia kiertotaloushyötyjä ja tuottaa ympäröivälle yhteiskunnalle enemmän lisäarvoa (hukkalämmön hyötykäyttö, sähkön kysyntäjouston tarjoaminen sekä muiden sivuvirtojen hyödyntäminen). Tämän lisäksi, mikäli tavoitteena on merkittävästi parantaa globaalia ruokavarmuutta, vertikaaliviljelyalan täytyy myös pystyä monipuolistamaan kasvattamiensa tuotteiden valikoimaa: Tällä hetkellä vertikaaliviljelyala on erittäin vahvasti painottunut mataliin, nopean kierron kasveihin, kuten salaattiin ja yrtteihin, ja käytännön kokemusta ravintopitoisempien kasvien vertikaaliviljelystä on tällä hetkellä hyvin vähän.

Projektin aikana käytyjen hyödyntäjäkartoitusten perusteella markkinoilla on kysyntää VIS-teknologialle. Arvolupauksemme hyödyntäjille on vahva ja ekologinen puurakentaminen kasvattaa jatkuvasti arvoaan tulevaisuudessa. Samaan aikaan jatkuvasti kiristynyt rakentamisen lainsäädäntö nostaa kilpailevien, epäekologisten rakennusmateriaalien kustannustasoa. Vertikaaliviljelymarkkinoiden kulmakivenä on tuottaa ruokaa mahdollisimman ekologisesti ja uskomme, että ekologisten materiaalien käytön maksimointi tekee vertikaaliviljelystä kiinnostavampaa, kannattavampaa ja hyväksytympää niin kuluttajille kuin julkiselle sektorille (julkinen sektori usein mukana ruuantuotannossa, vähintäänkin kaavoituksen kautta). Kriittiseksi innovaatiomme liiketoimintapotentiaalin realisoitumisen kannalta tulee nousemaan se, miten edullisesti ja miten skaalautuvasti saamme järjestettyä VIS-elementtien kokoonpanon tulevaisuudessa. TUTL-projektin aikana olemme tunnistanee lupaavia elementtien kokoonpanoa tarjoavia yrityksiä ja tulemme neuvottelemaan heidän kanssaan startup-vaiheen aikana. Projektin aikana olemme myös verkostoituneet useiden potentiaalisten yhteistyökumppaneiden kanssa ja uskomme, että pystymme tämän yhteistyön avulla kehittämään entistä pidemmälle vietyjä ja tehokkaampia ratkaisuja, jotka tarjoavat merkittävästi lisäarvoa vertikaaliviljelyratkaisujen hyödyntäjille. Projektin päätyttyä perustettiin Vacuum Insulation Solutions Oy.