



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ÄLYKÄS LÄMPÖSTABILOITU VARASTOINTIJÄRJESTELMÄ

Hiihtoputki ja ruoka-ainevarasto

TEKIJÄ: Jesse Sistonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jesse Sistonen	
Työn nimi Älykäs lämpöstabiloitu varastointijärjestelmä	
Päiväys 28.11.2013	Sivumäärä/Liitteet 44/1
Ohjaaja(t) yliopettaja Esa Hietikko, yliopettaja Eero Holmlund, suunnittelupäällikkö Heikki Suistomaa	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Oy U-Cont Ltd	
Tiivistelmä <p>Työn tavoitteena oli tarkistella patentoidun teknologian ja erityisesti tyhjiöeristyksen tarjoamia mahdollisuuksia kylmänvarastointijärjestelmissä. Työssä oli tarkoitus luoda energiatehokkaampi kylmäjärjestelmä pohjoisen olosuhteisiin. Kylmävarastojärjestelmän käyttötarkoituksiksi kaavailtiin ruoka-ainevarastoa ja hiihtoputkea. Työ toteutettiin Oy U-Cont Ltd:lle.</p> <p>Aluksi tutustuttiin patenttiaineistoon, jolla patentti oli haettu ja sen julkaisumuotoon. Seuraavaksi etsittiin tarvittavat määräykset elintarvikkeiden varastointiin sekä rakentamismääräykset hiihtoputkelle. Etsinnässä löydettiin vaatimukset, joita kummassakin tapauksessa laitteistolta edellytetään. Tämän jälkeen paneuduttiin syvällisemmin eri eristevaihtoehtoihin, kilpailijoiden ratkaisuihin ja asiakkaiden tarpeisiin. Näiden pohjalta lähdettiin luomaan vaatimuksia jotka tuotteen tulisi täyttää menestyäkseen markkinoilla. Lopulta paneuduttiin lämmön siirtymiseen tyhjiöeristeen läpi ja sitä verrattiin yleisimmin käytettyihin eristeratkaisuihin kilpailevissa tuotteissa.</p> <p>Lopputulokseksi saatiin, että tyhjiöeristys osoittautui liian kalliiksi ja hankalaksi toteuttaa kevyellä seinämärakenteella, sillä suuri alipaine aiheuttaa seinämävahvuuden kasvun, joka nostaisi hinnan yli tuotteelle asetetun budjetin. Tulevaisuuden ratkaisuissa tyhjiöeristys voi olla mahdollinen, mikäli vaipparakenne saadaan tehtyä riittävän kustannustehokkaasti ja kestävästi, mutta tällä hetkellä sellaista ratkaisua ei löytynyt. Lisäksi tyhjiöpumppu nostaa tuotteen hinnan yli budjetin, koska alkuolettamuksena oli pienempi tyhjiön tarve.</p>	
Avainsanat kylmälaite, tyhjiöeristys, ruokavarasto, hiihtoputki	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Jesse Sistonen			
Title of Thesis Intelligent Heat Stabilized Storage System			
Date	November 28, 2013	Pages/Appendices	44/1
Supervisor(s) Mr Esa Hietikko, Mr Eero Holmlund, Senior Designer Heikki Suistomaa			
Client Organisation /Partners Oy U-Cont Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this project was to investigate the possibilities offered by patented heat storing structure and calculate heat transfer of variable vacuum insulation in a structure. The final result was to be a more energy efficient cold storage system for food industry and free time use, suitable for Nordic climate conditions, for example in the form of a skiing pipe. The project was commissioned by Oy U-Cont Ltd.</p> <p>First, the patent files were studied and the basics of heat and mass transfer were studied. Secondly, the demands of both uses of the structure and related regulations were studied and adopted and customer needs were re-searched. The next stage was to design the structure of possible insulation solution for cold storage use, and to compare it to the solutions of competitors in this field of industry. Heat transfer calculations were made to find out the benefits and threats of variable vacuum insulation.</p> <p>As a result of this project the variable vacuum insulation was found to be too expensive to become the future product insulation for cold storing equipment. The use would still be possible in the future solutions if the shell of the container could be made strong enough to endure the stress of the vacuum. Today's technical solutions do not have the required strength and price efficiency. In addition, the price of the vacuum pump is high for creating really low pressure as required for the insulation.</p>			
Keywords cold storage, food industry,skiing pipe			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	PATENTOIDUN TUOTTEEN TOIMINTAPERIAATE	7
3	VAATIMUSLUETTELO	9
3.1	Lopputuotteen pakolliset vaatimukset.....	9
3.2	Lopputuotteen mahdolliset lisäominaisuudet.....	9
3.3	Käyttömukavuutta lisäävät ominaisuudet	10
4	KÄYTTÖKOHTEET JA NIIDEN OMINAISUUDET	11
4.1	Hiihtoputki.....	11
4.2	Ruoka-ainevarasto	11
5	MAHDOLLISET ASIAKASRYHMÄT JA NIIDEN TARPEET	13
5.1	Asiakastarpeiden määrittäminen	13
5.2	Hiihtoputki.....	13
5.2.1	Asiakasvaatimukset	13
5.2.2	Toteutusrajoitukset	14
5.2.3	Kilpailevat ratkaisut	14
5.3	Ruoka-ainevarasto	14
5.3.1	Asiakasvaatimukset	14
5.3.2	Toteutusrajoitukset	15
5.3.3	Kilpailevat ratkaisut	16
6	ERISTEVAIHTOEHDOT	17
6.1	Eristeen vaatimukset.....	17
6.2	Eri eristeiden ominaisuuksia.....	17
6.2.1	Tyhjiöeristys	17
6.2.2	Polyuretaanieristys	18
6.2.3	Lasi- tai kivivillaeristys	19
6.2.4	Lämpöä heijastavat kerrokset	19
7	LÄMMÖN SÄILYMINEN SYSTEEMISSÄ	21
7.1	Energian varastointi järjestelmään	21
7.2	Lämmön karkaaminen järjestelmästä	25
7.2.1	Konduktion aiheuttama lämpöhäviö.....	26

7.2.2	Konvektion aiheuttama lämpöhäviö	27
7.2.3	Säteilyn aiheuttama lämpöhäviö.....	30
7.2.4	Kesäkauden järjestelmän lämpeneminen	32
7.3	Energian kuljetus järjestelmään tai järjestelmästä ulos	33
7.3.1	Konvektiolla vaipparakenteen läpi kuljetettava energia	33
7.3.2	Lämmönsiirto aineen mukana	36
8	TEKNISET RATKAISUT	37
8.1	Vaipparakenne.....	37
8.2	Konttiratkaisu	41
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	42

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

LIITTEET

LIITE 1 RAYLEIGHIN-LUVUNLASKENTATAULUKKO

1 JOHDANTO

Työ sai ideansa pari vuotta aiemmin, kun suunniteltiin tulen- ja luodinkestäviä säiliöitä. Työn edetessä saatiin ajatus luoda energian varastointijärjestelmä, joka hyödyntäisi pohjoisissa oloissa olevaa kylmää ilmaa ja varastoi tämän energian kesään, jolloin tarvitaan jäähdytyslaitteistoja tuotteiden varastointiin ja moneen muuhun toimintaan.

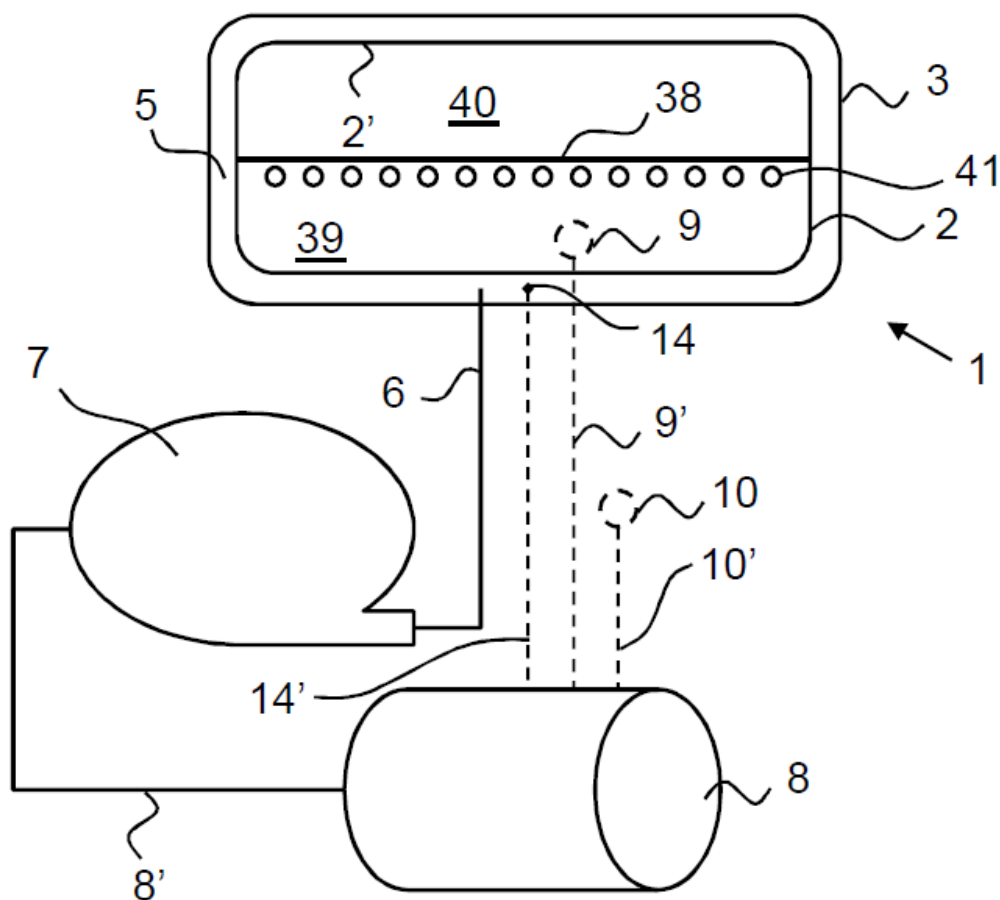
Projektissa syntyvä tuote pohjautuu patentteihin 30605FI & 30605WO, jotka myönnettiin kesällä 2011 Oy U-Cont Ltd:lle. Patentissa on käsitelty tuotteen ominaisuuksia, joiden pohjalta ajatusta lähdetään jatkojalostamaan valmiiksi tuotteeksi.

Tuotteessa on tarkoitus hyödyntää auringon energian vähäisyyttä napaseutujen lähetyvillä talviaikaan, jolloin vähäisestä auringon säteilystä johtuen ilman lämpötila on hyvin alhainen. Varkauden korkeudella talvipäivän seisauksen aikaan auringon säteilyenergia on korkeintaan 80 W/m². (SUN-TEKNO 2010.) Varastoimalla kylmää on tarkoitus saada kylmälaitteistojen hyötysuhteita paranemaan pohjoisella pallonpuoliskolla, koska mekaanisen työn osuus pienenee, kun kylmää ei tarvitse tuottaa perinteisellä käänteisellä lämpövoimakoneella. Nykyään jääkaappilämpötiloja tuotetaan huoneenlämpöisestä ilmasta, vaikka ulkoilmassa olisi -30 °C pakkasta. Aluksi tämä ilma lämmitetään huoneenlämpöiseksi ja tämän jälkeen moottori muuntaa tämän +20 °C ilman +5 °C ilmaksi jääkaappiin. Tässä tehdään kaksi häviöllistä lämmönmuuntoprosessia, vaikka ulkoa saisi suoraan sopivan viileää ilmaa tähän tarkoitukseen.

Työssä on tarkoitus tutkia mahdollisuutta jättää ulkopuolinen työ pois aiheuttamasta energiahäviöitä ja kääntää kylmälaitteen toimintaperiaate pääläelleen. Tarkoituksena on hyödyntää talven ulkoilma ja kylmät kelit, ja varastoida tämä energia kesää varten. Tämä jättäisi suurimmaksi osaksi vuodesta pois kuvassa kolme olevan ulkopuolisen työn ja lämpötila voisi siirtyä suoraan lämpimämmästä sisätilasta ulkoilmaan. Lämpimällä kelillä tämä kylmän tilan eristävyys nostettaisiin korkeammaksi niin, että ulkopuolen lämmin ilma ei pääsisi lämmittämään varastoa ja varaston sisällä olisi kokoajan koh- tuullisen vakaa jääkaappilämpötila. Tämä eristävyysmuutos on tarkoitus toteuttaa niin sanotulla älykkäällä eristyksellä, jonka eristävyttä pysyytään muuntamaan tilanteen mukaan.

Toinen vaihtoehto on käyttää lämmönvaihdinta ja pitää eristävyys kiinteänä. Tässä vaihtoehdossa ulkopuolista työtä tarvittaisiin vain lämmönsiirtoaineen liikuttelemiseen. Lämmönvaihtimen tarkastelun jätän tässä työssä vähemmälle ja tarkastelen pääasiassa älykkään eristyksen mahdollisuuksia ja hankaluuksia.

2 PATENTOIDUN TUOTTEEN TOIMINTAPERIAATE



Kuvio 1. Lämpövaraston rakenteen periaate

Kuviossa 1 on havainnollistettu lämpövaraston rakennetta karkeasti kuvattuna. Numero 3 kuviossa 1 kuvaa varaston ulkovaippaa, joka toimii varastoa suojaavana rakenteena. Numero kaksi kuvaa varaston sisäseinää, joka erottaa varastoitavan aineen ja lämpöä varastoivan aineen eristekerroksesta, joka on kuviossa 1 merkitty numerolla 5. Eristekerros on mahdollista toteuttaa eristyskykyä tarpeen mukaan vaihtavalla eristeellä. Numero 7 kuvaa älykkään eristysten mahdollista säätöyksikköä, eli tyhjiöpumppua jota ohjaa ohjauksyksikkö, systeemissä numerolla 8. Tieto kulkee ohjauksyksikön ja tyhjiöpumpun välillä 8' merkittävää kaapelia pitkin. Ohjauksyksikön toimintaa säätelevät lämpöanturit 9 ja 10, jotka tunnistavat varastointiaineen lämpötilaa ja ulkoilman lämpötilaa. Eristeeseen sijoitettulla paineanturilla numero 14 kerätään tieto ohjauksyksikölle eristeen sen hetkisestä lämmönjohtavuustilasta. Eristeen lämmönjohtavuutta voitaisiin kasvattaa lisäämällä painetta järjestelmään tai ilmankierron mahdollistamisella eristetilaan tai kierrättämällä eristetilassa nestettä. Eristävyyttä taas voitaisiin parantaa pienentämällä eristävän aineen painetta, mikä pienentää väliaineen lämmönjohtavuutta.

Numero 39 on lämmönvarastointiaine, jonka rajaa varastointitilasta (numero 40) välilattia tai väliseinä, joka on merkitty kuvaan 1 numerolla 38. Lämmönvarastointiainetta voidaan käyttää energiavarastona, johon varastoidaan ulkoilmasta kylmäenergia tai lämpöenergia. Varastoitua energiaa käytetään numerolla 40 merkityn osaston lämmön pitämiseen halutussa lukemassa pitkän aikaa. Väliroh-

jaa 38 voidaan käyttää pintana esimerkiksi lumelle, jota voidaan käyttää hiihtämiseen tai jäädyttää luistelua varten. Tilaa voisi käyttää myös elintarvikkeiden varastointiin vakioämpötilassa.

Energianvarastointiaineeseen johdetaan energia kylmänesteen avulla. Tällainen neste on esimerkiksi glykolivesisekoitus, joka on jäädytetty ulkoilman pakkassäässä. Nämä energiansiirtoputket on merkitty kuvaan 1 numerolla 41 ja niihin voi ottaa energiaa ulkoilmasta lämmönvaihtimella. (PCT 2011)

Systeemin energiansiirtoon vaipparakenteen läpi paneudutaan luvussa 7.

3 VAATIMUSLUETTELO

Vaatimusluetteloon listataan tarpeita, joista asiakas on valmis maksamaan. Lisäksi listataan asiakkaan tekniset toiveet ja välttämättömät asiat. Näin luetteloimalla ja lopullisessa tuotteessa priorisoidulla tavoitteilla saadaan helposti selville, mihin osa-alueeseen kannattaa sijoittaa suurin työpanos ja minkä voi jättää vähemmälle työlle ilman, että se vaikuttaa lopputulokseen merkittävästi.

3.1 Lopputuotteen pakolliset vaatimukset

Lopputuotteelle löytyi kartoituksessa kuusi pakollista vaatimusta. Nämä vaatimukset ovat seuraavat:

- Tuotteen pitää säästää energiaa verrattuna perinteisiin kylmälaiteratkaisuihin
- Tuotteen pitää kestää vuodenaikojen vaihtelut vahingoittumattomana
- Kylmän varastointilaitteiston pitää olla huollettavissa
- Tuotteen on oltava elintarvikekäyttöön hyväksytty (vain ruoka-aine varastossa)
- Tuotteen on oltava turvallinen loppukäyttäjälle
- Tuotteessa on oltava hyvä tuuletus, jotta se ei ala haista ummehtuneelle

3.2 Lopputuotteen mahdolliset lisäominaisuudet

Lisävarusteominaisuudet ovat ominaisuuksia, joita asiakas ei pidä yleensä toiminnan kannalta pakollisina, mutta hän saattaisi olla valmis ostamaan niitä, mikäli ne olisivat saatavilla lopputuotteeseen.

Toivottuja lisävarusteita ja lisäominaisuuksia ovat seuraavat:

- Helppo siirrettävyys, esimerkiksi siirtolava-alustalla tai peräkärryksi rakennettuna
- Riittävä energianvarastointikyky, jotta se riittää koko kesän lämpimän kauden ajaksi
- Tuotteen nopea asennus ja käyttöönotto
- Automaattinen lämpötilansäätö halutulla tavalla
- Tila on mahdollista laajentaa helposti uudella moduulilla
- Täysin ilman sähköä toimiva kokonaisuus
- Pienet ulkomitat suhteessa varastointitilavuuteen
- Vikatilanteiden varalle hälytysjärjestelmä
- Mahdollisuus osastojakoon (eri ruoka-aineet voisi jaotella eri osastoihin)
- Tavarahyllyköt ja hyllyköissä tuotetarrapaikat varastokirjanpitoa varten
- Lämpöenergian varastointi sähkökatkoksien varalle
- Mahdollisuus hyödyntää vuorkauden- ja vuodenaikojen lämpötilavaihtelut

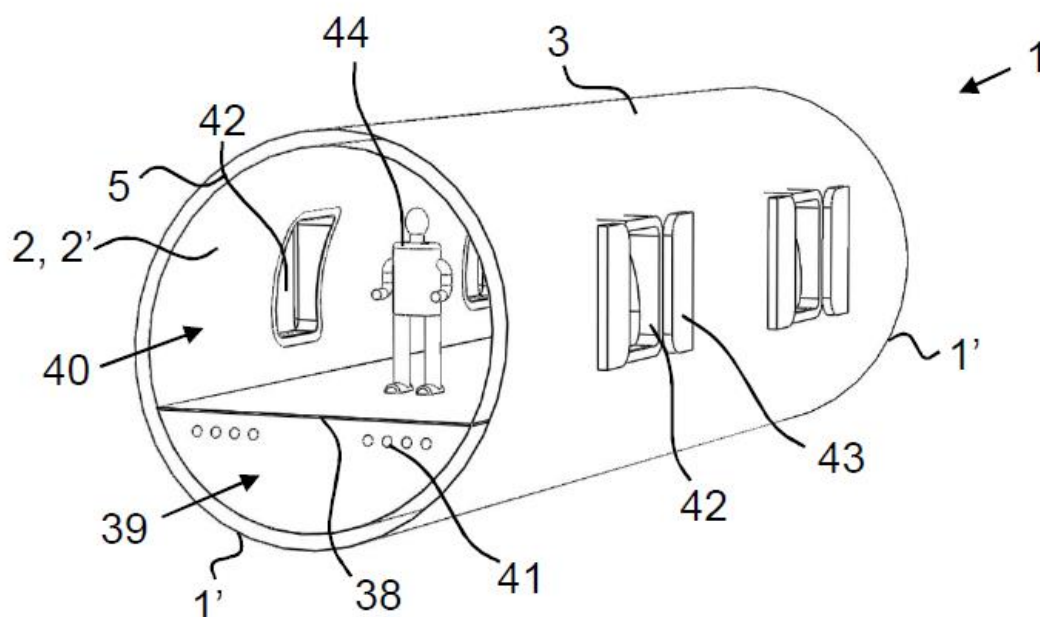
3.3 Käyttömukavuutta lisäävät ominaisuudet

Käyttömukavuutta lisäävät ominaisuudet ovat yleensä sellaisia, joista asiakas ei ole valmis maksamaan lisää, vaan hän saattaa päätyä kahdesta kilpailevasta tuotteesta tähän, jos joku näistä täyttyy ja hinta ei nouse merkittävästi. Näitä ominaisuuksia ovat:

- Miellyttävä ulkonäkö
- Ikkunat, jotta saadaan luonnonvaloa sisälle
- Puhelimeen lähetettävä informaatio kylmälaitteen toiminnasta
- Automaattinen valojen kirkkauden säätö ihmisten liikkumisen ja ympäristön valoisuuden mukaan
- Tuotehallinan tietokoneen sijoitusmahdollisuus kontin sisään tai tietokoneen hallintapääte ja lukulaite
- Ulkopinnan mainosmahdollisuus, mikäli tuotetta käytetään esimerkiksi festivaaliympäristön kylmälaitteena
- Sisätilojen miellyttävä valaistus

4 KÄYTTÖKOHTTEET JA NIIDEN OMINAISUUDET

4.1 Hiihtoputki

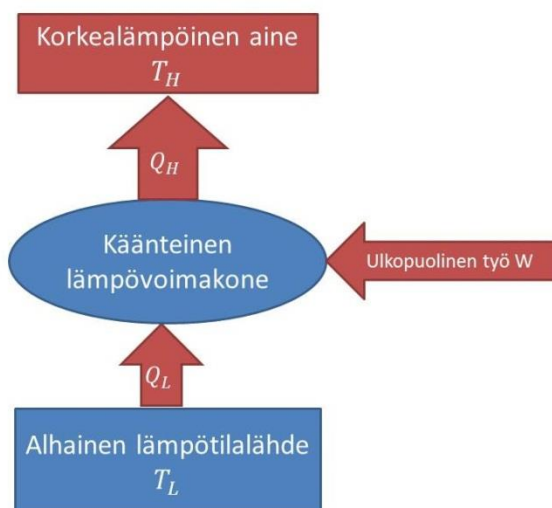


Kuvio 2. Perspektiivikuva hiihtoputkesta poikkileikkauksena

Hiihtoputkessa lämpötilan pitäisi pysyä vakaasti nollan alapuolella, jotta hiihtoputken lumi ei ala sulaa. Hiihtoputken lämpöä voisi säädellä putken kyljissä olevilla luukuilla, jotka näkyvät kuviossa 2 numerolla 42. Näitä voisi pitää auki pakkaskelillä, jolloin kylmä siirtyy hyvin putken sisälle. Lämpimämmillä keleillä luukut voitaisiin sulkea, mikä estää kylmän karkaamista ulkoilmaan, ja pitää energian systeemin sisässä tehokkaammin. Luukut toimisivat myös auki ollessaan luontaisen valon lähteenä päiväaikaan, mikä vähentää systeemin energiantarvetta entisestään kun lisävaloja ei tarvita niin paljoa. Varastointiaineeseen tuotaisiin energiaa myös putkistoa pitkin, mikä on merkitty kuvaan numerolla 41. Systeemin perustoimintaperiaate noudattaisi siis hyvin tarkasti luvussa kaksi kuvailtua laitteiston toimintaa.

4.2 Ruoka-ainevarasto

Kylmälaitteessa lämpötila pitää olla vuodenajasta riippumatta vakio, jotta halutut elintarvikkeet tai lääkkeet saataisiin pidettyä mahdollisimman lähellä oikeaa lämpötilaa ja niiden säilyvyyttä näin parannettua. Perinteisesti ruoka-ainevarasto on toteutettu käänteisellä lämpövoimakoneperiaatteella, jossa alhaisesta lämpötilasta pumpataan lämpöenergiaa jääkaapin ulkopuolelle mekaanisella energialla.



Kuvio 3. Lämpöpumpun periaate (Shepherd ja Shepherd 1998)

Kuviossa 3 on avattu perinteisen lämpövoimakoneen, tässä tapauksessa kylmälaitteen, toimintaperiaate. Ulkopuolelta tulevalla mekaanisella työllä W siirretään lämpöenergiaa kylmästä tilasta lämpimämpään tilaan. Mekaaninen työ perinteisessä jääkaapissa tarkoittaa kompressoria, joka puristaa kylmäainetta suureen paineeseen, mikä lämmittää höyrynä olevaa kylmäainetta. Lämmennyt kylmäainehöyry johdetaan seuraavaksi jäähdyttimeen, joka jäähdyttää kaasun lähelle jääkaapin ulkopuolisen ilman lämpötilaa. Jäähdyttyään korkeassa paineessa kaasu muuttuu takaisin nesteeksi ja se johdetaan pienen venttiilin kautta takaisin paineeseen, jossa se oli ennen kompressoria. Tällöin neste muuttuu kaasuksi ja se jäähtyy voimakkaasti. Jäähdytynyt kaasu viilentää kylmäkoneen sisätiloja. Normaalitilassa energia pyrkisi aina siirtymään lämpimämmästä kylmempään. Tämän takia tarvitaan ulkopuolista työtä, jolla saadaan luontainen energian kulkusuunta käännettyä. Lämpövoimakoneen siirtoprosessi on varsin huono hyötysuhteeltaan, koska jokaisessa vaiheessa tapahtuu energiahäviöitä. (Shepherd ja Shepherd 1998.) (Energyquest.ca.gov)

5 MAHDOLLISET ASIAKASRYHMÄT JA NIIDEN TARPEET

5.1 Asiakstarpeiden määrittäminen

Laitteiston asiakstarpeita pitää käsitellä käyttökohteittain, koska ne vaihtelevat sen mukaan hyvinkin paljon. Asiakasryhmä vaikuttaa myös siihen, mitä ominaisuuksia asiakas painottaa ja mistä hän on valmis maksamaan lisää. Pääasiallinen keskittyminen pitää saada ominaisuuksiin, joilla saadaan tuotteelle lisäarvoa ja lisäkatetta valmistavalle yritykselle. Keskeistä on tiedostaa asiakkaan arviointiperusteet, eli se millä perusteilla hän tekee tuotteen hankintaan johtavan valinnan.



Kuvio 4. Matkapuhelimen myynnin suppilomalli (Lahtinen ja Isoviita 2001.)

Kuviosta 4 nähdään miten asiakstarpeita pitäisi lähteä hahmottamaan varusteiden osalta. Kuviossa tullaan lopulta arviointikohdasta loppukäyttäjään ja siihen miten laitetta käytetään. Tämän pitää olla keskeisessä asemassa aina asiakstarvetta määrittäessä ja tuotekonseptia kehitettäessä. Eri asiakasryhmien tarpeita käsitellään tarkemmin kummankin tuotteen osalta erikseen.

(Lahtinen ja Isoviita 2001.)

5.2 Hiihtoputki

5.2.1 Asiakasvaatimukset

Hiihtoputkea käytetään hiihtokauden jatkamiseen, jolloin saadaan syksyllä kausi aloitettua aiemmin ja keväällä ja kesällä voidaan jatkaa hiihtokautta pidempään. Talvella hiihtoputken käyttö putoaa miltei olemattomiin, koska Suomen olosuhteissa on talvisin yleensä hyvät hiihtokelit. Vain erittäin kovien pakkasten aikaan ja suojakeleillä saatetaan hiihtoputkea käyttää talvellakin.

Hiihtoputken keskeisiä asiakasvaatimuksia on kiinteä nollan alapuolella oleva lattiataason lämpötila, jotta lumi ei ala sulamaan. Asiakkaan toiveisiin kuuluisi varmasti myös hyvä liikkumistila, jotta sisätiloissa mahtuisivat kulkemaan luisteluhiihdon ja perinteisen hiihdon ladut vierekkäin, mikä kasvattaisi harrastajakuntaa. Riittävä leveys on siis tärkeä, jotta kumpikin hiihtotekniikka saadaan mahdutettua samaan hiihtoputkeen. Sisätiloissa pitää olla miellyttävä valaistus ja sisätilat pitää muutenkin tehdä miellyttämään urheiluharrastajan silmää.

5.2.2 Toteutusrajoitukset

Toteutus pitää olla rakenteellisesti riittävän kestävä, jotta se voidaan luokitella julkiseksi tilaksi, eli rakenne pitää olla lujuusanalysoitu. Tuotteen pitää täyttää paloturvallisuusmääräykset asennuspai-
kallaan, eli sammutuslaitteisto pitää olla julkisiin tiloihin sopiva ja hätäpoistumisteitä pitää olla riittä-
vä määrä. Hätäpoistumisteiden määrä riippuu siitä henkilömäärästä, jolle tila halutaan luokitella.
Liukastumisriski pitää minimoida niillä kohdilla, joissa ei ole tarkoitus kulkea suksilla, esimerkiksi ovi-
en läheisyydessä. Vapaan kulkukorkeuden tulee olla minimissään 2100 mm, mutta ovien kohdalla
kulkukorkeus voi olla välttämättömien karmien ja kynnysten verran pienempi.

(Ympäristöministeriön asetus rakennuksen käyttöturvallisuudesta 2001.)

5.2.3 Kilpailevat ratkaisut

Pahin kilpailija hiihtoputkelle on perinteinen kallioon louhittu hiihtokeskus. Kallioon louhitun keskuk-
sen etuja ovat kestävyys, energian varastoituminen kallioon ja se, että siitä saa tehtyä niin suuren
kun haluaa. Suurimpana heikkoutena kallioon louhinnassa ovat erittäin suuret valmistuskustannuk-
set. Kallion louhiminen maksaa noin 24 € kuutiolta ja murskekuorman poisvienti maksaa 35 €/m³
yhteensä siis 59 €/m³. Louhittu kivi kasvattaa kuitenkin tilavuuttaan, kun se murretaan, eli kokonai-
sen hiihtoputken louhinta tulee maksamaan helposti satoja tuhansia euroja. Tämän lisäksi hintaa
nostavat kaikki kylmälaitteet, sekä sisätilojen tuuletuksen ja muiden rakenteiden tekeminen. Hinnas-
sa uuden mallinen modulaarinen hiihtoputki voisi varmasti kilpailla perinteisen louhittavan hiihtokes-
kuksen kanssa.

5.3 Ruoka-ainevarasto

5.3.1 Asiakasvaatimukset

Ruoka-ainevaraston keskeisin ominaisuus on tasainen alhainen sisälämpötila, joka on erittäin tärkeä
ruoan säilymisen takia. Tasaista lämpötilaa, joka on säädettävissä asteen tarkkuudella, voidaan pitää
tuotteen tärkeimpänä ominaisuutena ruoka-ainevarastokäytössä. Asiakkaan kannalta toinen keskei-
nen tekninen ominaisuus ovat pienet energiakustannukset käytön aikana. Laitteiston käyttäminen pi-
tää tulla nykyisiä ratkaisuja halvemmaksi, jotta investointi uuteen tekniikkaan kannattaa. Ruoka-
ainevaraston sisätilojen pitää olla hyvin organisoidut, jotta varastointikuutiot saadaan mahdollisim-
man tehokkaasti käytettyä ja hukkatila jää mahdollisimman pieneksi.

Ruoka-ainevaraston tulee täyttää Eviran asettamat vaatimukset elintarvikkeiden säilytystiloista.

1. Ruoka-aineet pitää pystyä lajittelemaan siten, että ensimmäiseksi tulleet voidaan ottaa en-
simmäiseksi ulos.
2. Samassa varastointitilassa ei saa säilyttää aineita tai tuotteita, jotka voivat vaikuttaa elintar-
vikkeiden hygieniaan kielteisesti tai vaikeuttaa tilan puhtaana pitoa.
3. Tuoreelle siipikarjalle, lihatuotteille ja kalatuotteille pitää olla erilliset kylmäsäilytystilat.

4. Suojaamattomat kypsennetyt ja kypsentämättömät helposti pilaantuvat lihat tulee varastoida eri tiloihin.
5. Helposti pilaantuville elintarvikkeille pitää olla erilliset puhtaat alustat, eikä näitä saa asettaa suoraan lattialle.
6. Kylmävarastointitilojen lämpötilaa pitää seurata kalibroidulla lämpömittarilla, joka on tilassa.
 - a. Seuranta pitää tapahtua säännöllisesti.
 - b. Helposti pilaantuvien elintarvikkeiden varastointilämpötiloja pitää noudattaa.

(Elintarviketurvallisuusvirasto Evira 2012.)

5.3.2 Toteutusrajoitukset

Keskeisimpänä rajoituksena on ruoka-aineväestön investointihinta, joka ei saa nousta niin paljon perinteisiä ratkaisuja korkeammaksi, että se ei käyttöikänsä aikana maksa säästettynä energiana omaa hintaeroaan takaisin.

Otetaan esimerkiksi perinteinen täysikorkea jääkaappi, jonka käyttöikä on noin kymmenen vuotta. Sen investointihinta on noin 690 € ja se kuluttaa valmistajan ilmoituksien mukaan 112 kW/h vuodessa energiaa, eli 1120 kW/h käyttöikänsä aikana. Sähkön hinta on tällä hetkellä 8,71 snt/kWh (30.9.2013 sahkohinta.fi) jolloin jääkaapin kuluttama energia vuodessa maksaa 97,55 €. Jääkaapin kokoinen järjestelmä saisi maksaa kokonaisuudessaan 787,55 € tällä laskentaperiaatteella, mutta käytännössä käyttökohdekaavailut on jääkaappia suurempia ruuan varastointijärjestelmiä.

Säilytyslämpötila tulee olla Eviran asettamien rajojen sisällä eri tuoteryhmille. Taulukossa yksi on säilytyslämpötilat eri ruoka-aineryhmille, jotka vaativat kylmävarastointia, pois lukien pakasteet. Jos tuotekehityksessä ei päästä näihin kaikkiin vaatimuksiin, pitää valita mitkä näistä lämpötilaluokituksista lopputuote täyttää.

Taulukko 1. Eviran asettamat lämpötilat eri ruoka-aineiden säilyttämiseksi (Elintarviketurvallisuusvirasto Evira 2013.)

Lämpötila °C	Elintarvikelaji
sulavan jään lämpötila (korkeintaan + 2)	Tuoreet kalastustuotteet, keitetyt äyriäiset ja nilviäiset sekä sulatetut jalostamattomat kalastustuotteet mukaanlukien mäti (suolaamattomana)
0 - + 3	Kylmäsavustetut ja tuoresuolatut kalastustuotteet, tyhjiö- ja suojakaasupakatut jalostetut kalastustuotteet sekä suolattu mäti ja pakasteesta sulatettu, suolattu mäti
alle +4	Jauheliha ja jauhettu maksa
enintään +6	Muut helposti pilaantuvat elintarvikkeet, mukaanlukien maito, kerma, idut, paloittelut kasvikset, kalapuolisäilykkeet, elävät simpukat, sushi sekä kaikki muut helposti pilaantuvat elintarvikkeet, joille ei ole annettu +6 celsius -asteesta poikkeavaa säilytyslämpötilaa
enintään +8	Helposti pilaantuvat maitopohjaiset tuotteet, joiden valmistukseen sisältyy vähintään pastörinti tai sitä vastaava käsittely

5.3.3 Kilpailevat ratkaisut

Ruoka-ainevarastona keskeisin osaamisalueemme kuuluisi varmaan kokoluokkaan 20 tai 40 jalan merikontti, joka on hyvin kilpailtu osa-alue perinteisissä kuljetetuissa kylmälaitteissa. Tällaisen 20' kylmälaittekontin hinta ilman rahteja on noin 22850 €. Sen energian kulutusta ei suoraan löydy yhdenkään valmistajan sivuilta, mutta kuljetuskaluston jäähdytyslaitteiden tehon tarpeet löytyvät verrattain helposti. Voidaan päätellä, että maksimissaan 20 jalan kokoisen tavaratilan jäähdyttämiseen tarvittava laitteisto vie maksimissaan 5090 wattia tehoa. Oletetaan, että laitteisto pyörii täydellä teholla 15 % vuodesta. Lopun ajan laitteisto on pelkästään puhaltimien varassa, jotka kuluttavat noin 500 W pyöriessään kylmätilassa. Tällöin päästäisiin energian kulutuksessa 11068 kW/h lukemaan, joka olisi nykyisellä sähkön hinnalla 964 €/vuodessa. Tämän lisäksi hintaan tulee valaisinten aiheuttamat sähkökustannukset, mutta niihin ei päästä vaikuttamaan niin paljon, että niitä kannattaisi ottaa tähän vertailuun.

Tämän laskennan perusteella suurin käytettävissämme oleva myyntihinta olisi 32490 €, mikäli järjestelmä ei tarvitsisi ollenkaan ulkopuolista energiaa kylmälaitteiston toimintaan ja mikäli asiakas haluaisi, että sijoitus maksaa itsensä takaisin kymmenen vuoden sisällä. Jos tuotemme tulee maksamaan enemmän, niin kilpailevat tuotteet on voitettava jollain ominaisuudella tai mahdollisuudella, jota muilla ei ole tarjota ja joka saa asiakkaan maksamaan lisähintaa tuotteesta. Tällainen ominaisuus voisi olla sähkökatkojen kestoturvallisuus tuotteiden vaurioitumatta. Sähkökatkojen aikaan kauppoille tulee yleensä suuret tuotevahingot, koska tuotteiden kylmäketju katkeaa eikä niitä saa enää Suomen lain mukaan sen jälkeen myydä asiakkaalle.

Eristetty kontti on yksi kilpailevista ratkaisuista, mutta se on vain lyhyisiin kuljetuksiin, jossa lämpötila ei ole yhtä tarkka kuin kylmälaitteistolla varustetulla kontilla. Eristetyn 20 jalan kontin hinta on noin 6600 €, joka sisältää lukituksen ja sisävalot. Vertailukontin mitat ovat 6 m x 2,4 m. Tässä luokassa meidän on hyvin hankala kilpailla omilla ratkaisuillamme hinnassa, koska emme ole tehokkaita neliskulmaisten rakenteiden tekijöitä, mutta kontin jatkojalostaminen voisi tulla kysymykseen. Eristettyjen konttien markkinat Suomessa ovat 100 - 1000 kappaletta vuodessa. Euroopassa markkinat ovat kymmeniätuhansia kontteja vuodessa.

6 ERISTEVAIHTOEHDOT

6.1 Eristeen vaatimukset

Systeemin eristäminen on haastavaa, koska haluamme että eriste muuttuisi tarpeen mukaan. Eristeen muuttumisella tarkoitetaan lämmön johtavuuden säätymistä vallitsevien ulkoilmaolosuhteiden mukaiseksi. Kaikissa kohdissa järjestelmää älykäs eristys on tuskin mahdollinen, koska sisäseinämärakenteen pitää tukeutua johonkin, ja tämän tulisi olla mahdollisimman hyvin eristävää, ettei lämpösilloja pääse muodostumaan. Samalla sisäelementin painon vastaanottava rakenne pitäisi olla hyvin painoa kestävä, ettei se menettäisi eristävyysominaisuuksiaan, vaikka systeemi täytettäisiinkin vedellä tai jollain muulla painavalla aineella. Sisällä oleva säiliö tai tila pitäisi olla myös hyvin paikoiltaan, ettei se pääse liikkumaan kuljetuksen aikana.

Massan aiheuttaman paineen vaikutusalueen ulopuolella älykäs eristys on vartenotettava vaihtoehto. Helpoiten muuntuva eristävyys saataisiin aikaan säädettävällä tyhjiöllä. Siinä alipainepumpulla tyhjennettäisiin ja täytettäisiin tila ilmasta. Täytettäessä välitila ilmalla parannetaan lämmön johtuvuutta ja tyhjentäessä tilaa pienennetään lämmön johtuvuutta. Tyhjiössä tulee ongelmaksi sen oikea-aikainen hallitseminen, eli logiikka joka ohjaa tyhjiön lämmönjohtuvuutta. Tähän logiikkaan pitää tehdä avuksi taulukko, joka antaa raja-arvot sille, milloin mikäkin asetus astuu voimaan. Apuna taulukon luomiseen käytetään Tynjälän (2010) tutkimusraporttia *Säiliön seinämärakenteen lämmönläpäisykertoimen määrittäminen*, jossa asiaan on jo paneuduttu aiemmin. Taulukon arvot ja laskennat löytyvät luvusta *Lämmön karkaaminen järjestelmästä*.

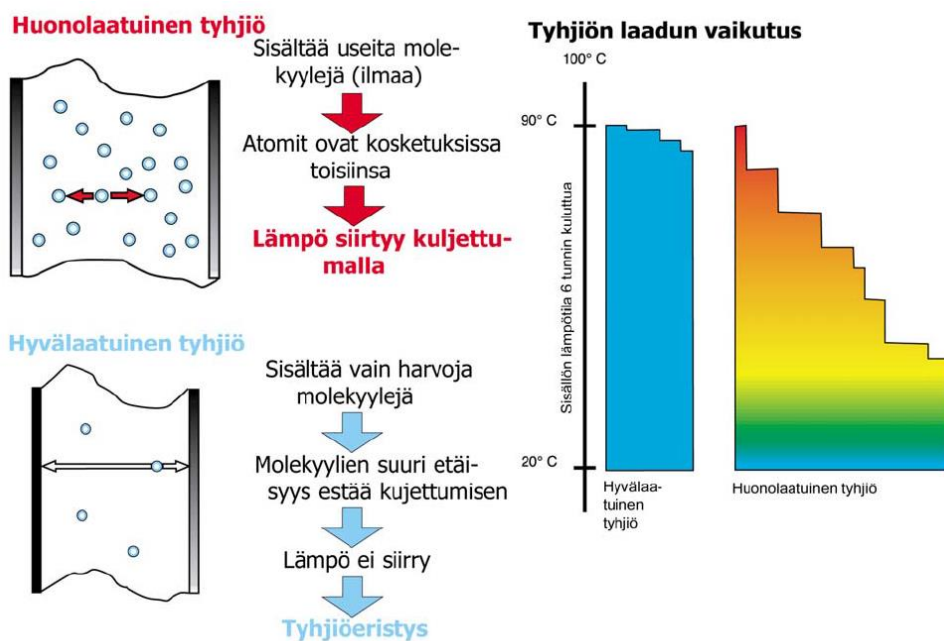
Ruoka-ainevarastossa voisi olla järkevää käyttää kokonaan kiinteään eristävyys omaavaa eristettä. Tällöin ruoka varastoitaisiin erillisiin kylmälaitteisiin ja kylmäenergia olisi erillisessä säiliössä toisessa paikassa. Kylmäenergia pumpattaisiin tämä energia tarpeen vaatiessa kylmälaitteisiin. Siirtonesteen virtauksella säädellään, paljonko energiaa kuljetetaan osastosta toiseen. Tällöin olisi tärkeää, että kylmäenergia saataisiin talven aikana mahdollisimman alhaiseen lämpötilaan.

6.2 Eri eristeiden ominaisuuksia

Tässä luvussa käsitellään eri eristeiden ominaisuuksia ja kartoitetaan sopivin vaihtoehto aikaisemmin mainittuihin käyttökohteisiin.

6.2.1 Tyhjiöeristys

Tyhjiöeristykseen tunnetuimpia käyttökohteita ovat termospullot, jossa hyvä lämmön eristävyys on tehty mahdollisimman täydellisellä tyhjiöllä ja lämpösäteilyä heijastavilla pinnoilla. Tyhjiössä pyritään estämään lämmön kulkeutuminen konduktion ja konvektion seurauksena pois järjestelmästä. Perinteisesti termospulloissa on myös lämmön säteilyä estävä kirkas alumiini, kupari tai hopeakerros, joka heijastaa lämpösäteilyä tehokkaasti. (Thermos)

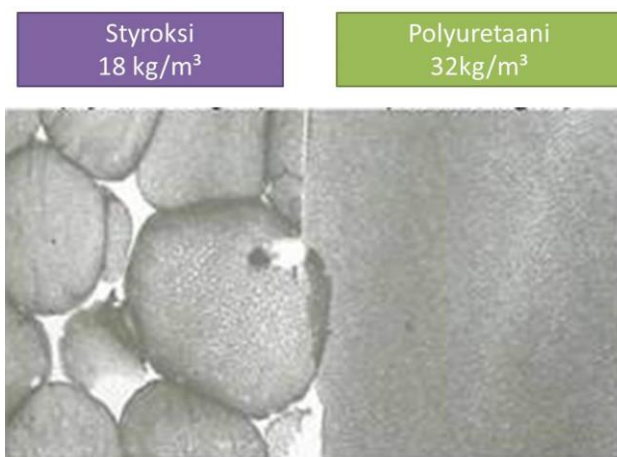


Kuvio 5. Tyhjiöeristyksen periaate (Thermos)

Kuviossa 5 on havainnollistettu tyhjiön laadun vaikutusta lämmön johtavuuteen. "Kaasun lämmönjohtavuus ei riipu paineesta niin pitkään kun kaasun voidaan ajatella olevan jatkuva faasi," Tynjälä (2010) toteaa. Toisin sanoen kaasumolekyylien välimatka pitää saada riittävän suureksi, jotta lämpö ei siirry atomien törmäilyn seurauksena atomista toiseen. Atomien välimatkaa saadaan pidennettyä pienentämällä painetta järjestelmässä. Molekyylien välinen etäisyys pitää saada suuremmaksi kuin karakteristinen mitta s (m) tällöin ilma ei täytä enää jatkuvan faasin ominaispiirteitä. Täten voidaan tehdä olettaus, että mitä täydellisempi tyhjiö on, sen parempi on myös sen eristävyys. Arvion eristävyden parantumisesta lasken kappaleessa lämmön karkaaminen järjestelmästä. Tyhjiöeristys vaatii hyvätasoisien tyhjiöpumpun toimiakseen säädettävällä eristysperiaatteella. Mikäli ilman luonnollista lämmönjohtumista halutaan pienentää oleellisesti, pitää paineen laskea alle 4000 Pa. Siinäkin tapauksessa suurin merkitys on lämmön säteilyllä. (Tynjälä, 2010.)

6.2.2 Polyuretaanieristys

Polyuretaanieriste on valmistettu polystyreenistä, joka on kestonuovi ja tarvittaessa uudelleen käytettävissä oikein kierrätettynä.



Kuva 1. Styroksin ja polyuretaanieristeen rakenne-ero (Finnfoam.)

Kuva 1 kuvaa hyvin millainen tiheysero on perinteisellä styroksieristeellä ja polyuretaanieristeellä. Polyuretaanieristeistä esimerkiksi Finnfoam lupaa lämmönjohtavuudeksi $0,026 \text{ W}/(\text{mK})$, verrattuna perinteiseen styrokseen, jonka lämmönjohtavuus on $0,036 \text{ W}/(\text{mK})$. Pitkäaikainen puristuskestävyys on polyuretaanilla erinomainen $15000 \text{ kg}/\text{m}^2$ eli pascaleina 150 kPa ja perinteisellä styroksilla paineenkesto on vain 100 kPa . Suurin ero on eristeiden hinnassa, sillä Finnfoam polyuretaanieriste on neliöhinnaltaan 50% kalliimpaa, kuin perinteinen styroksieristys. Eristävyydessä polyuretaanieriste on 28% parempaa kuin styrokseksi ja paineenkesto on 33% parempi. Saman eristävyys saavuttamiseksi tarvitaan 28% vähemmän polyuretaanieristettä. Polyuretaanilla on parempi kantavuus, joten perinteisen eristyksen pinta-alaa voitaisiin pienentää 33% eristävyyskärsimättä. (Finnfoam.) (Taloon.com.)

Polyuretaanin rakenteen toimivuudesta tyhjiössä ei ole tieteellistä tutkimusta olemassa, joten sen toimivuutta pitää havainnoida ensimmäisessä pienen mittakaavan prototyypin testauksessa.

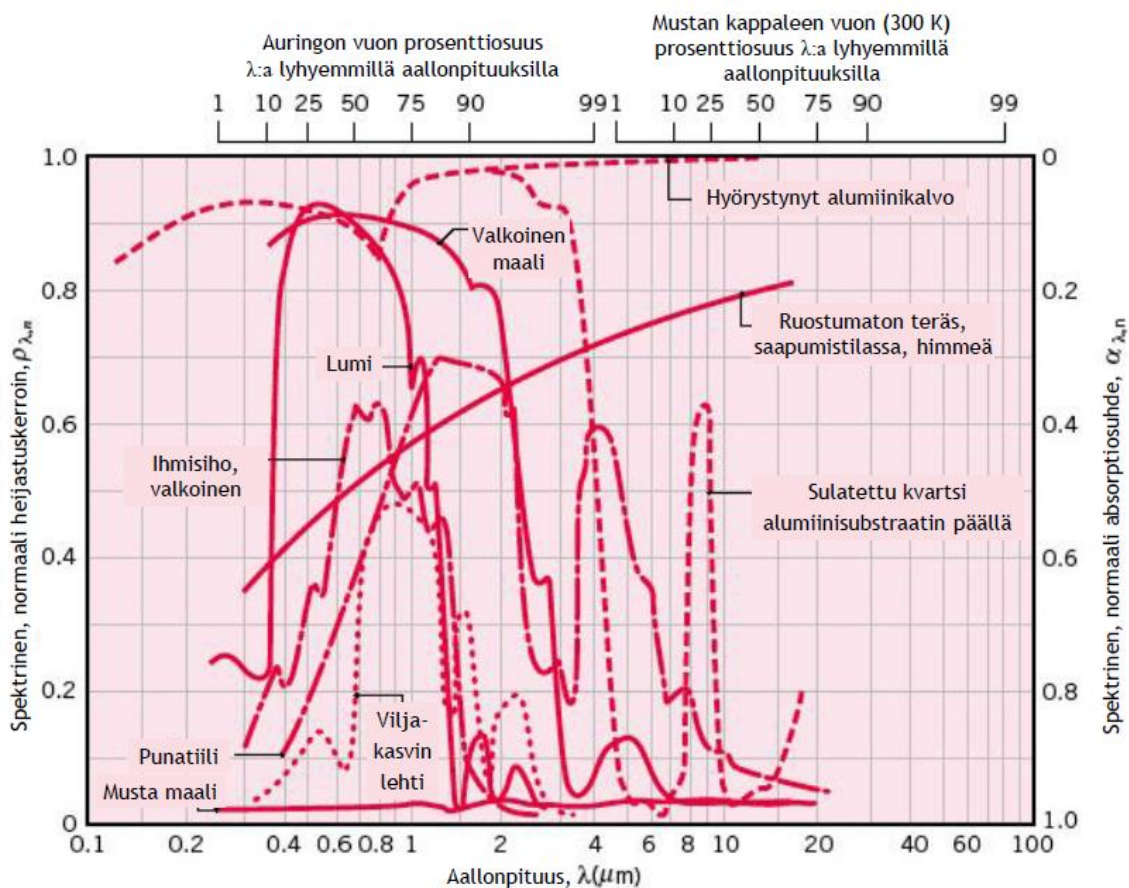
6.2.3 Lasi- tai kivivillaeristys

Lasi ja kivivillaeristys ovat helppoja asentaa pyöreälle pinnalle hyvän joustavuutensa ansiosta. Eristeenä lasivillan ja kivivillan eristyskyky perustuu säikeiden väliin varastoituneen ilman eristävyteen. Säikeiden väliin varastoitunut ilma imeytyisi pois tyhjiötä luodessa, ja samalla laittilan eristävyys heikkenisi. Tämä olisi ristiriidassa tyhjiöeristävyys säädön kanssa, sillä haluamme, että tyhjiötilassa eristys olisi parhaimmillaan ja ilmalla täytettynä välitila johtaisi mahdollisimman paljon lämpöä. Näiden seikkojen takia lasi- ja kivivilla jätetään pois lopullisen rakenteen eristevaihtoehdoista.

6.2.4 Lämpöä heijastavat kerrokset

Lämpöä heijastavalla kerroksella on tarkoitus heijastaa kesän aikana tulevaa auringon säteilyenergiaa takaisin systeemin ulkopuolelle, jottei sisällä oleva tila pääsisi lämpenemään. Lämpöä heijastavana kerroksena käytetään retkeilyvarusteissa usein avaruushuopaa, eli alumiinikelmua, joka heijastaa lämpösäteilyä takaisin. Heijastumiseen ei tarvita kuin hyvin ohut kerros alumiinia. Alumiinin pinnalle muodostuu alumiinioksidia, jos alumiinia ei kiilloteta ja päällystetä jollain alumiinioksidin muodostamista estävällä aineella tai tilaa täytetä inerttikaasulla, joka estää alumiinioksidin muodostumisen.

Alumiinioksidi ei kuitenkaan vaikuta heijastavuuteen niin paljon, että alumiinia kannattaisi alkaa pinnoittamaan tai tilaa täyttää suoja-kaasulla. Ohut alumiinikalvo toimii hyvänä heijastuspintana koko lämpösäteilyn taajuusalueella. Alumiinikalvon lisäksi laitteisto maalataan valkoisella maalilla, jolloin saadaan aikaan vielä parempi heijastava pinta näkyvän valon alueella. Valkoinen maali on hyvä torjumaan lämpösäteilyä aallonpituusalueella 0,4 – 2 μm . Tällä aallonpituusalueella valkoisen maalin heijastavuus $\rho_{\lambda,n}$ on yli 0,8.



Kuvio 6. Heijastuskertoimen ja aallonpituuden vertailua eri aineille (Incopera, De Witt, Bergman ja Lavine 2006, 758)

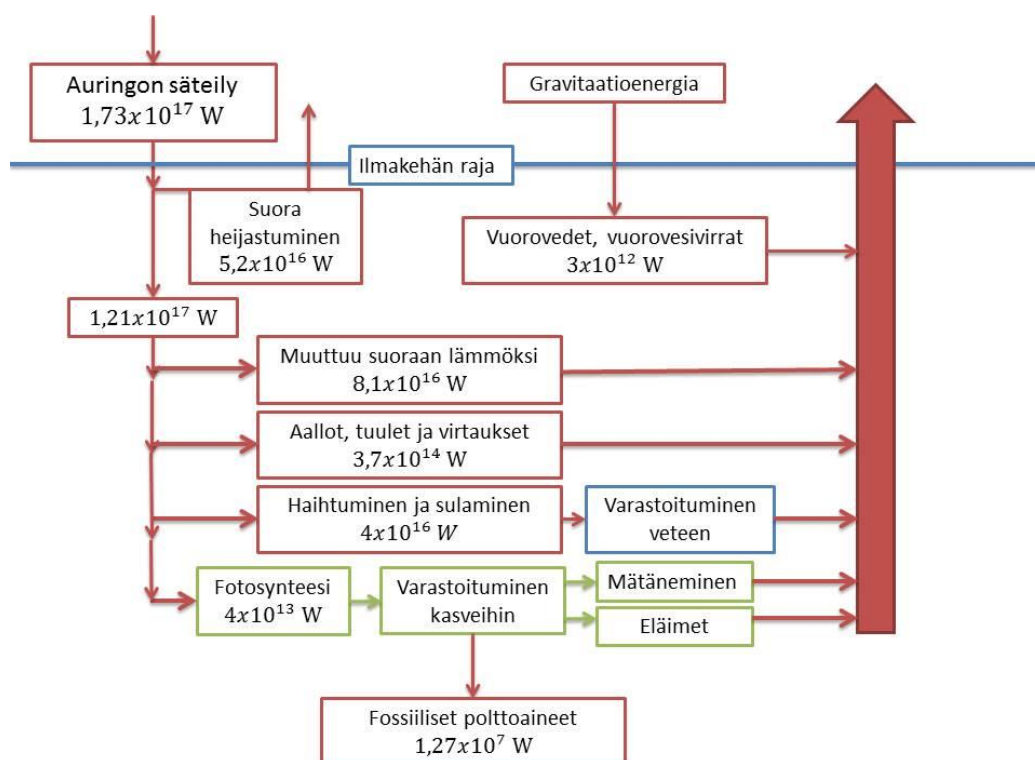
Kuviossa 6 nähdään eri materiaalien Spektrisiä heijastuskertoimia eri aallonpituuksilla. Kuvaajasta nähdään, että valkoinen maali soveltuu hyvin valonsäteiden heijastamiseen. Teknisenä ratkaisuna käytän valkoiseksi maalattua teräsulkokuorta, jonka sisällä on alumiinifolio toisena heijastavana kerroksena. Alumiinifolion absorptiokerroin on 0,15 eli 85 % saapuvasta säteilystä heijastuu takaisin. Taulukon mittaustulokset on tehty 300 K lämpötilassa, kun taas alumiinikelmun lämpötila on noin 5 °C, joten tulokset eivät varmasti pidä aivan paikkaansa kelvineinä 278 K lämpötilassa, mutta hyvin lähellä varmasti ollaan oikeata näin pienellä lämpötilaerolla.

(Lappeenranta University of Technology 2013.) (Incopera ym. 2006.)

7 LÄMMÖN SÄILYMINEN SYSTEEMISSÄ

7.1 Energian varastointi järjestelmään

Lämmön varastointiaineena voisi toimia vesi, koska sen ominaislämpökapasiteetti on nesteenä $4,182 \text{ kJ}/(\text{Kkg})$ ja jäätyneenä $2,1 \text{ kJ}/(\text{Kkg})$. Suolan määrää lisäämällä veden jäätymispisteeksi saataisiin noin $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin tilan lämpötila olisi mahdollista saada alle $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Veden sulamislämpö s on 333 kJ/kg ($0 \text{ }^\circ\text{C}$). Jään sulamisen vaativa energia on siis verrattain suuri, mikä voi tehdä siitä hyvin tehokkaan kylmänvarastointiaineen.



Kuvio 7. Energian kulku maapallolla (Shepherd ja Shepherd 1998.)

Kuviossa 7 näkyy havainnollistettuna maapallon energian kierto ja kunkin energian varastointialueen energian kierron osuudet. Kuvasta käy ilmi, että suuri osa maapallolle tulevasta energiasta varastoituu veteen. Tämä energian varastointi veteen toimii myös käänteisesti. Veden lämmittäminen vaatii yhtä paljon energiaa, kuin siitä vapautuu jäähtyessään. Veden lämmittäminen ja sulattaminen jäädästä vaatii siis paljon energiaa, jolloin auringon tuoma energia ei sulata tai lämmitä vettä nopeasti. Mikäli järjestelmä halutaan pitää kylmänä, pitää auringon energia saada mahdollisimman hyvin heijastettua pois pinnalta.

Esimerkkinä oletetaan että veden energian varastoimispotentiaalista järjestelmässä olisi 1 m^3 vettä, joka on jäädytetty $-5 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilaan. Tämän massan saamiseksi $+5 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilaan vaadittaisiin energiaa seuraavasti:

$$Q = m\Delta T_J c_J + ms + m\Delta T_V c_V = 1000 \text{ kg} \left\{ 5 \text{ K} * 2,1 \frac{\text{kJ}}{\text{K*kg}} + 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 5 \text{ K} * 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{K*kg}} \right\} = 364410 \text{ kJ} \approx 364 \text{ MJ}, \quad (1)$$

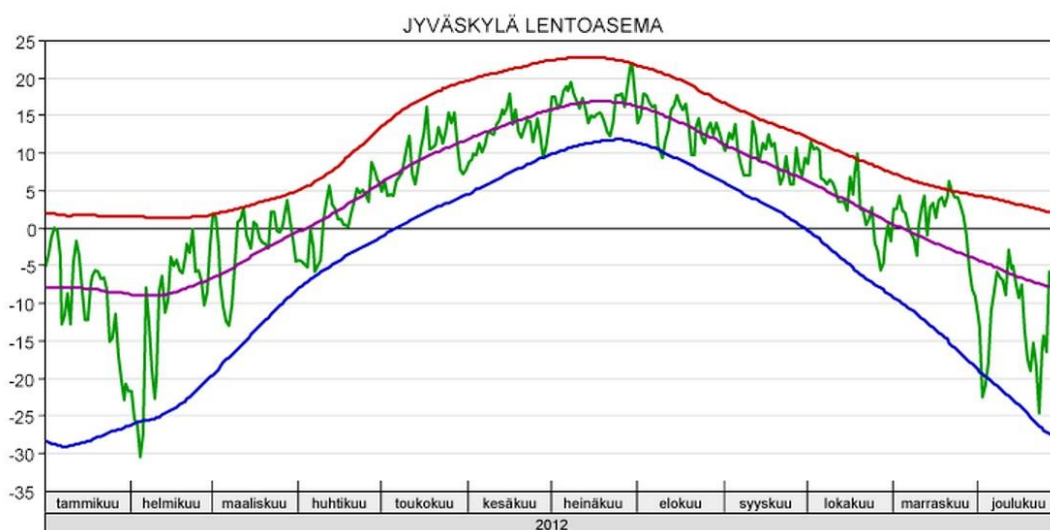
Se on hyvin paljon energiaa, suhteutettuna jääkaapin energian kulutukseen. Kaavassa 1 Q on systeemin luovuttama energia kilojouleina (kJ), m on lämpöä muuttavan veden massa (kg), ΔT_J on lämpötilanmuutos veden ollessa jäätyneenä kelvineinä (K), ΔT_V on lämpötilan muutos veden ollessa sulaneena kelvineinä (K), c_J on jään ominaislämpökapasiteetti ($\frac{\text{kJ}}{\text{K*kg}}$) ja c_V on veden ominaislämpökapasiteetti ($\frac{\text{kJ}}{\text{K*kg}}$). Verrataan tätä energiaa A+ energialuokan jääkaappiin, joka on tilavuudeltaan 355 l. Esimerkki jääkaappina toimi Bosch KSR38V11, jonka energian kulutus on valmistajan mukaan 152 kWh/vuosi. Tällä energian kulutuksella 1 m³ vettä sisältämä energia lämpötilavälillä -5 °C - +5 °C riittäisi pitämään oikean lämpötilan seuraavasti:

$$P = \frac{152 \text{ kWh}}{365 \text{ d} * 24 \text{ h}} \approx 0,017 \text{ kW} \rightarrow T = \frac{364410 \text{ kJ}}{0,017 \text{ kW} * 60 * 60 * 24 \text{ s/d}} = 243 \text{ d}$$

Tämä on useammaksi päiväksi kuin Suomen korkeudella on yli +5 °C lämpötiloja. Laskelmassa ei ole otettu huomioon ollenkaan energiahäviöitä, joita tapahtuu aina kun ulkopuolinen lämpötila on korkeampi kuin systeemin sisäinen lämpötila. Energiahäviöihin paneudutaan syvemmin lämmön siirtymistä käsittelevässä luvussa 7.

Varastoitu energia pitäisi saada säilymään järjestelmässä mahdollisimman tehokkaasti ja tarvittaessa lämpö pitää saada poistumaan järjestelmästä. Veden jäätymispistettä voisi säätää myös muilla lisäaineilla kuin suolalla, kuten esimerkiksi alkoholilla, jolla jäätymisen saisi säädettyä juuri oikeaan kohtaan. Olomuodon muutoksella voisi säädellä tilan ominaislämpöä, jossa lämpötila pysyy mahdollisimman pitkään ja vakaana. (Mäkelä, Soininen, Tuomola ja Öistämö 2005.)

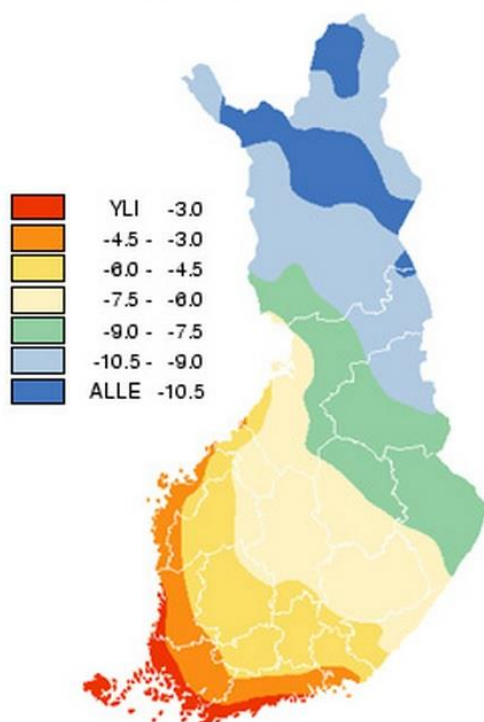
Kuviosta 8 nähdään violetilta viivalta Jyväskylän vuorokauden keskilämpötilat vuonna 2012.



Kuvio 8. Jyväskylän lentoaseman lämpötilajakauma vuonna 2012 (Ilmatieteenlaitos)

Talvikaudet eli jouluihelmikuun välin järjestelmän tulee varastoida energiaa. Kuviosta 9 nähdään talven 2011 - 2012 keskilämpötilat Jyväskylän korkeudella. Näinä kuukausina on ollut vertailuajan kohtana -7,5 - -6,0 °C lämmintä.

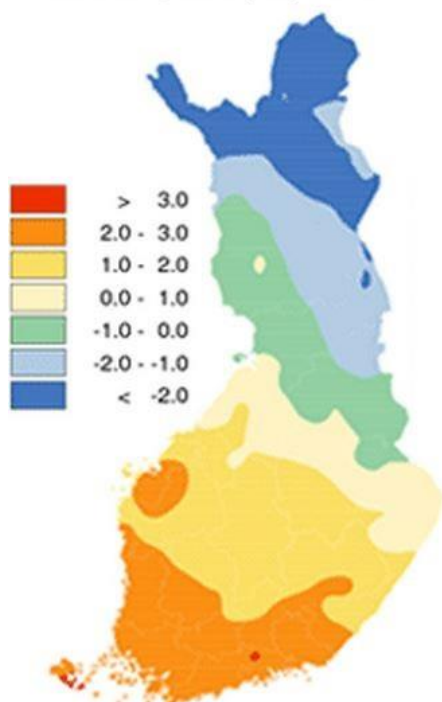
Keskilämpötila (°C) talvi 2011-2012



Kuvio 9. Suomen keskilämpötilakartta talvelta 2011 - 2012 (Ilmatieteenlaitos)

Kevätkautena järjestelmä pitäisi olla noin nollakulutuksella ja varastoinnilla. Kevätkauden (maaliskuuhu) keskimääräiset lämpötilat vuonna 2013 on esitetty kuviossa 10.

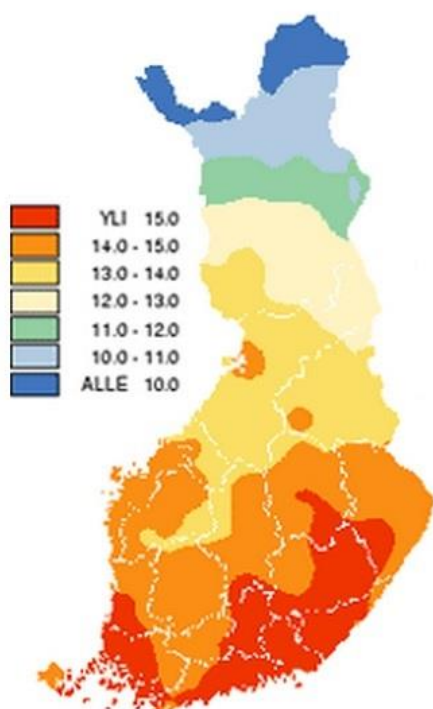
Keskilämpötila (°C) 2013



Kuvio 10. Kevään keskilämpötilat vuonna 2013 (Ilmatieteenlaitos)

Kesäkaudella varastoitua energiaa tulee kulumaan järjestelmästä. Kesäkauden energiankulutus on järjestelmän toiminnan kannalta kaikkein kriittisin. Kesäkausi kattaa kesä-elokuun välisen ajan. Kesän 2012 keskilämpötilakartta nähdään kuviosta 11.

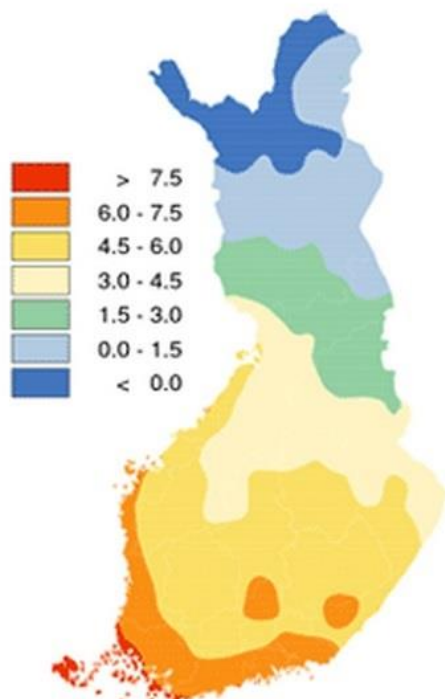
Keskilämpötila (°C) 2012



Kuvio 11. Kesän keskilämpötilat vuonna 2012 (Ilmatieteenlaitos)

Syyskauden syys-marraskuun välisen ajan keskilämpötilakartta on kuviossa 12.

Keskilämpötila (°C) 2012

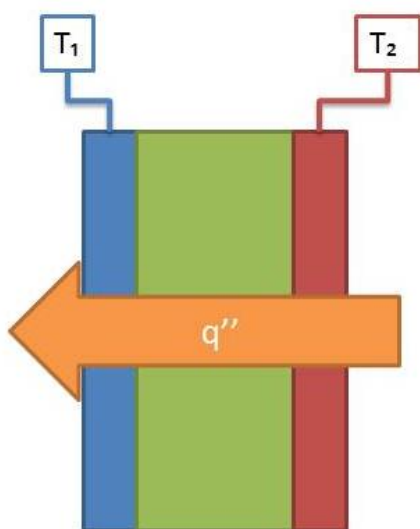


Kuvio 12. Syysän keskilämpötilat vuonna 2012 (Ilmatieteenlaitos)

Kuvioiden 8-12 keskilämpötiloja tullaan käyttämään hyödyksi alustavissa laskelmissa lämmön säilymisestä ja siirtymisestä.

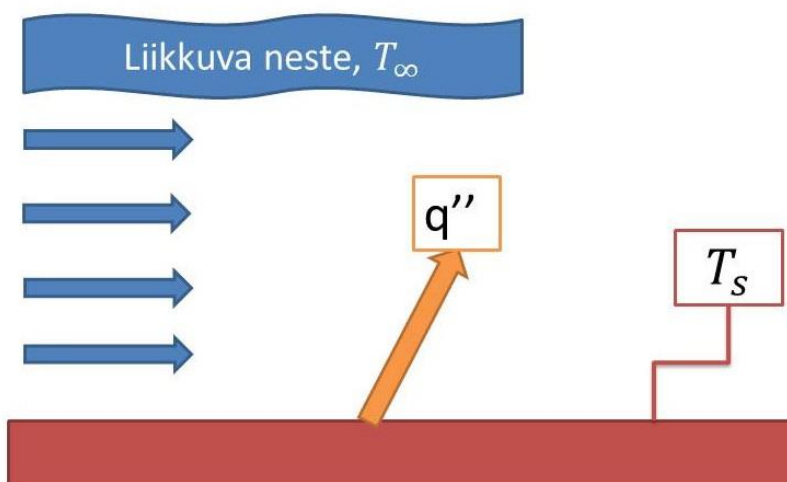
7.2 Lämmön karkaaminen järjestelmästä

Lämpöenergia siirtyy aina lämpimämmästä kylmempään, koska energiaerot pyrkivät aina tasaantumaan. Lämmön poistuminen systeemistä tapahtuu kolmella peruseriaatteella. Konduktiolla eli lämmön johtumisella kiinteän aineen tai paikoillaan olevan nesteen läpi. Kuviossa 13 on havainnollistettu lämmön siirtymistä kiinteän aineen läpi, jota kuvastaa keskellä oleva vihreä alue, jonka läpi kulkee lämpöenergia q'' suuremmasta lämpötilasta T_2 viileämpään T_1 .



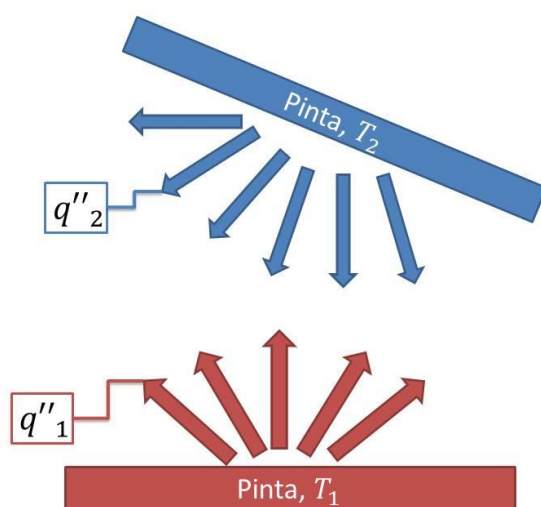
Kuvio 1 Konduktion peruseriaate

Toinen peruseriaatteista on konvektio eli lämmön virtaus aineesta liikkuvaan nesteeseen tai kaasuun. Kuviossa 14 on lämmön siirtyminen kiinteän aineen pinnalta liikkuvaan nesteeseen. T_s on kiinteän pinnan lämpötila, jota vasten liikkuu neste lämpötilaltaan T_∞ , nesteeseen siirtyy pinnalta lämpöenergia q'' .



Kuvio 14. Konvektion peruseriaate.

Kolmas ja viimeinen peruseriaatteista on lämmön säteily, jossa lämpöenergiaa sisältävä pinta säteilee energiaansa toiseen pintaan ilman välissä olevaa väliainetta. Tämä säteily tapahtuu lämmön tuottamana elektromagneettisena säteilyinä. Kuviossa 15 on havainnollistettu lämmön siirtymistä säteilemällä. Sinisen ja punaisen pinnan välissä on tyhjiö tai sitten harva kaasu. Lämpötila säteilee kummastakin pinnasta pois päin elektromagneettisena säteilyinä, ja pinnalle osuessaan osa siitä siirtyy pintaan, johon se osuu. Kaikki kappaleet, jotka ovat lämpötilaltaan absoluuttisen nolapisteeseen yläpuolella säteilevät lämpösäteilyä, mutta lämpötilan laskiessa tämä säteily heikkenee. Lämpötila pyrkii tässäkin tilanteessa siirtymään lämpimämmästä kylmempään. Lähtevät nuolet kuvastavat kuviossa 15 energiaa, joka poistuu pinnalta.



Kuvio 15. Lämpösäteilyn peruseriaate.

(Incopera ym. 2006.)

7.2.1 Konduktion aiheuttama lämpöhäviö

Konduktiota tapahtuu niissä kohdissa, joissa eriste on vasten systeemin sisä- ja ulkovaippaa ja koskettaa molempia pintoja. Tämä lämpöhäviö lasketaan yksinkertaisimmillaan kaavalla

$$q''_x = k \frac{\Delta T}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2),$$

jossa q'' on (W/m^2) energian johtuminen neliötä kohti, k on materiaalin lämmönjohtavuuskerroin ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$), L on eristeen paksuus metreissä, T_1 on suurempi lämpötila (K) kelvineissä ja T_2 on alhaisempi lämpötila kelvineissä. Kaava 2 ei ota huomioon ollenkaan lämmön siirtymisen muita vaihtoehtoja, mutta yksinkertaistetuissa eristävyden laskelmissa tämä on käyttökelpoinen. Halutessa tarkastella isompaa systeemiä, eikä pelkästään eristettä, on otettava huomioon myös muut lämpöhäviötä aiheuttavat tekijät.

Eristeen pinta-alan A (m^2) ollessa tiedossa voidaan käyttää kaavaa

$$q_x = Ak \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (3),$$

jolla saadaan kokonaisenergian poistumisteho (W), eli joulea per sekunti.
(Incopera ym. 2006.)

7.2.2 Konvektion aiheuttama lämpöhäviö

Painetta laskemalla molekyylien välinen välimatka kasvaa, jolloin lämmön johtuminen vaikeutuu. Molekyylien välinen välimatka ilmalle huoneen lämpötilassa voidaan laskea kaavasta,

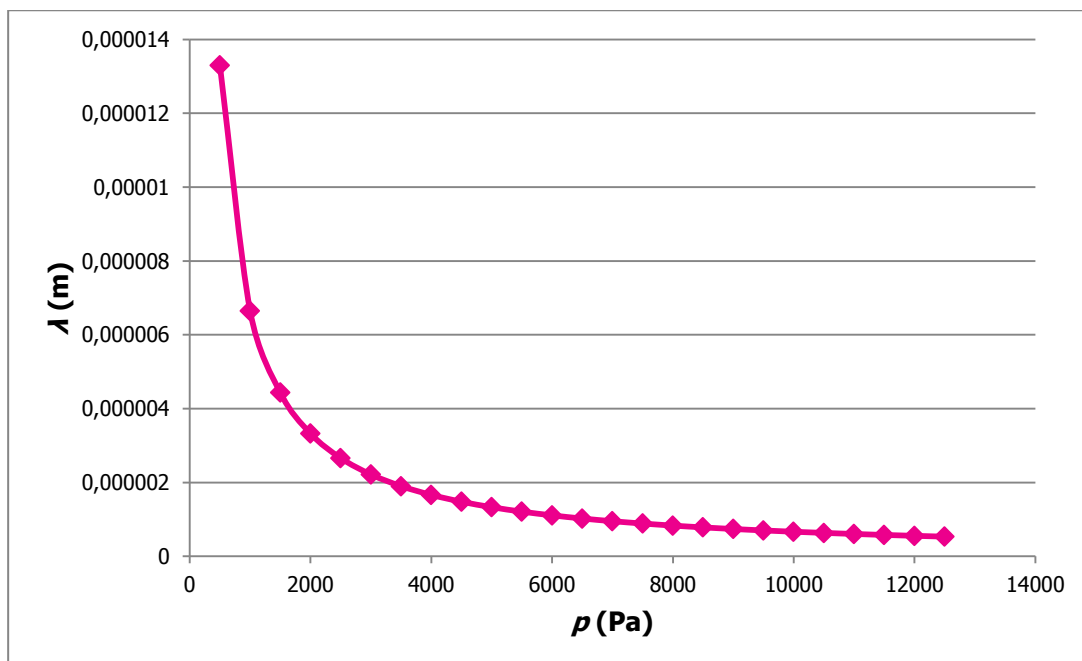
$$\lambda = \frac{6,65 \times 10^{-3} \text{ N/m}}{p}. \quad (4)$$

Kaavassa 4 λ on molekyylien välinen matka metreissä ja p on kaasun paine pascalleissa. Kaavasta 4 havaitaan, että molekyylien välinen vapaa matka kasvaa taulukossa 2 esitetyllä tavalla, jossa alim-pana on normaali ilmanpaine, josta lähdetään laskemaan painetta.

Taulukko 2. Ilman molekyylien välinen matka paineen muuttuessa

p (kPa)	λ (μm)
0,5	13,30
1,0	6,65
1,5	4,43
2,0	3,33
2,5	2,66
3,0	2,22
3,5	1,90
4,0	1,66
4,5	1,48
5,0	1,33
5,5	1,21
6,0	1,11
6,5	1,02
7,0	0,95
7,5	0,89
8,0	0,83
8,5	0,78
9,0	0,74
9,5	0,70
10,0	0,67
10,5	0,63
11,0	0,60
11,5	0,58
12,0	0,55
12,5	0,53
101,3	0,07

Kun taulukon arvot sijoitetaan diagrammiin, nähdään selkeämmin paineen aiheuttama välimatkan muutos.



Kuvio 2. Ilman molekyylien välinen matka paineen muuttuessa

Kuviosta 16 nähdään hyvin, että mentäessä alle 2000 Pa paineen tapahtuu voimakas molekyylien välisen välimatkan kasvu, eli voidaan olettaa, että näillä paikkeilla liikuttaessa tapahtuu merkittävä eristäytyyden parantuminen.

Luonnollisesta konvektiosta aiheutuva lämmön siirtyminen pienenee merkittävästi kun paine alenee. Luonnollista konvektiota arvioidaan Rayleigin luvun (Ra) avulla, joka kertoo konvektion voimakkuuden. Rayleihin luku voidaan laskea yhtälöstä

$$Ra_L = Gr * Pr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} = \frac{\rho^2 g\beta\Delta TL^3 c_p}{\mu k}, \quad (5)$$

jossa g on gravitaatiokiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$, β on lämpölaajenemiskerroin $1/\text{K}$, ΔT on lämpötilan muutos, L on karakteristinen mitta metreissä, ν on kinemaattinen viskositeetti m^2/s , α lämmönjohtavuus m^2/s . α eli lämpötilan johtavuus saadaan kaavasta 6 1000 pascalin paineessa 283K lämpötilassa

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{k}{\left(\frac{p}{R_{ilma} T}\right) c_p} = \frac{0,0263 \text{ W/mK}}{\left(\frac{1000 \text{ Pa}}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} * 283 \text{ K}}\right) * 1005 \text{ J/(kg*K)}} = 2,125 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}, \quad (6)$$

jossa k on lämmönjohtavuus W/mK , ρ on tiheys (kg/m^3) joka ja c_p on aineen ominaislämpökapasiteetti, joka on ilmalle $1,005 \text{ kJ/(kg*K)}$.

Tiheys lasketaan kaavalla

$$\rho = \frac{p}{R_{ilma} T}, \quad (7)$$

jossa R on yleinen kaasuvakio, p paine pascaleina, ja T lämpötila.

Kinemaattinen viskositeetti saadaan kaavasta

$$v = \frac{\eta}{\rho}, \quad (8)$$

jossa η on dynaaminen viskositeetti ($\frac{N*s}{m^2}$). Dynaaminen viskositeetti muuttuu lämpötilan vaihtuessa, 200K lämpötilassa ilman dynaaminen viskositeetti on $132,5*10^{-7}(\frac{N*s}{m^2})$, 250 k lämpötilassa $159,6*10^{-7}(\frac{N*s}{m^2})$, ja 300K lämpötilassa $184,6*10^{-7}(\frac{N*s}{m^2})$.

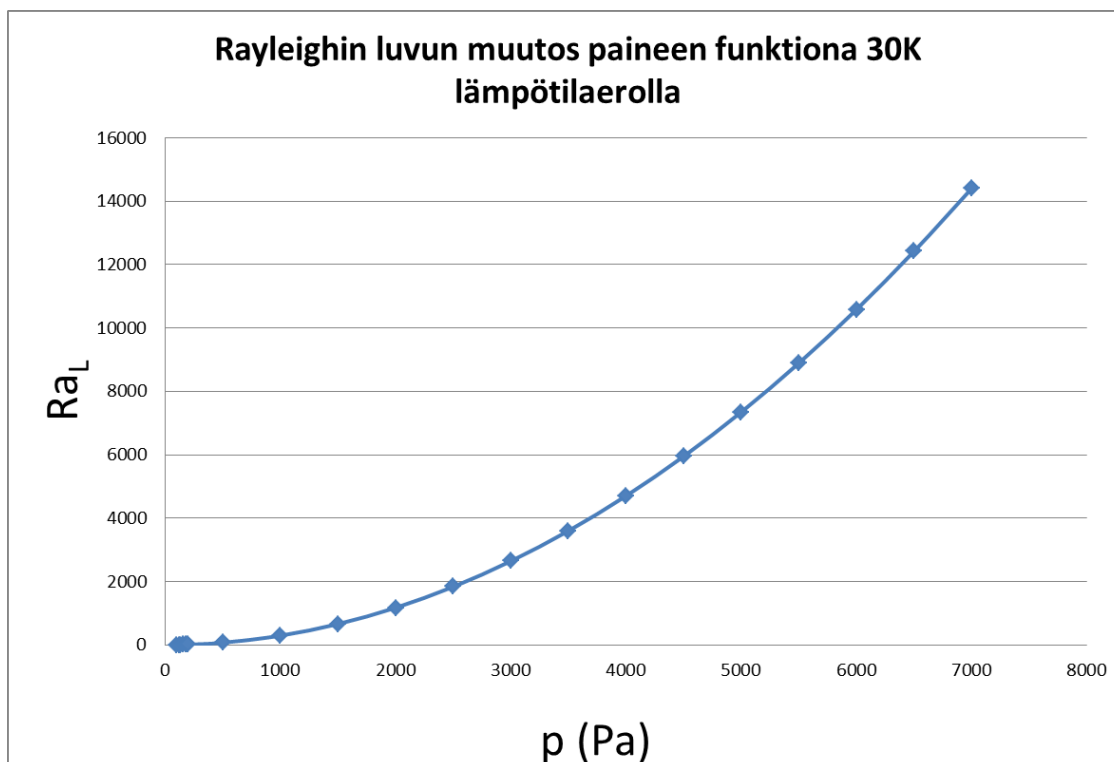
Luonnollinen konvektio käynnistyy 1708 Rayleighin luvun arvolla, jonka alle mentäessä viskositeetti on riittävän suuri estääkseen luonnolliset nostevoimat, jotka aiheuttavat aineen kiertämisen lämpötilaeron vaikutuksesta.

Lämpövarastoinnin suurin lämpötilaero varastosäiliön ja ulkoilman välillä on, kun ulkoilman lämpötila on noin 30 °C ja varaston sisälämpötila 0 °C. Pakkasella ulkoilma taas voi olla -30 °C varaston sisälämpötilan pysyessä samassa 0 °C:ssa. Kylmällä kelillä välitila voitaisiin täyttää ilmalla, jolloin lämpö pääsisi vaihtumaan luonnollisella konvektiolla.

Taulukko 3. Rayleighin luvun muuttuminen paineen vaihtuessa

p (Pa)	β (1/K)	$T_{keskimääräinen}$ (°C)	v (m ² /s)	Ra_L	ΔT (K)	α (m ² /s)	k (W/mK)	c_p (J/(kgK))	ρ (kg/m ³)	T (K)	η (N*s/m ²)
0,01	0,00330033	15	1,5890E-01	0,00	30	216,4164194	0,0263	1005	1,2092E-07	200	0,00001325
0,1	0,00330033	15	1,5266E+01	0,00	30	21,64164194			1,2092E-06	250	0,00001596
1	0,00330033	15	1,5266E+00	0,00	30	2,164164194			1,2092E-05	300	0,00001846
10	0,00330033	15	1,5266E-01	0,03	30	0,216416419			0,00012092		
100	0,00330033	15	1,5266E-02	2,94	30	0,021641642			0,001209204		
120	0,00330033	15	1,2722E-02	4,23	30	0,018034702			0,001451044		
130	0,00330033	15	1,1743E-02	4,97	30	0,016647417			0,001571965		
160	0,00330033	15	9,5414E-03	7,53	30	0,013526026			0,001934726		
180	0,00330033	15	8,4812E-03	9,53	30	0,012023134			0,002176567		
200	0,00330033	15	7,6331E-03	11,76	30	0,010820821			0,002418407		
500	0,00330033	15	3,0532E-03	73,50	30	0,004328328			0,006046019		
1000	0,00330033	15	1,5266E-03	293,99	30	0,002164164			0,012092037		
1500	0,00330033	15	1,0177E-03	661,47	30	0,001442776			0,018138056		
2000	0,00330033	15	7,6331E-04	1175,94	30	0,001082082			0,024184075		
2500	0,00330033	15	6,1065E-04	1837,41	30	0,000865666			0,030230093		
3000	0,00330033	15	5,0887E-04	2645,87	30	0,000721388			0,036276112		
3500	0,00330033	15	4,3618E-04	3601,32	30	0,000618333			0,042322131		
4000	0,00330033	15	3,8166E-04	4703,76	30	0,000541041			0,048368149		
4500	0,00330033	15	3,3925E-04	5953,20	30	0,000480925			0,054414168		
5000	0,00330033	15	3,0532E-04	7349,63	30	0,000432833			0,060460187		
5500	0,00330033	15	2,7757E-04	8893,05	30	0,000393484			0,066506205		
6000	0,00330033	15	2,5444E-04	10583,46	30	0,000360694			0,072552224		
6500	0,00330033	15	2,3487E-04	12420,87	30	0,000332948			0,078598243		
7000	0,00330033	15	2,1809E-04	14405,27	30	0,000309166			0,084644261		
101300	0,00330033	15	1,5070E-05	3016783,19	30	2,13639E-05			1,224923382		

Taulukosta 3 näkyy hyvin, kuinka Rayleighin luku ylittää 1708 arvon 2000 ja 2500 pascalin välillä, eli tyhjiöpumpun pitäisi päästä alle tämän paineen, jotta se toimisi halutulla tavalla ja estäisi luontaisen konvektion aiheuttaman lämpöhäviön 100 mm tyhjiöeristyksellä.



Kuvio 17. Rayleighin luvun muutos paineen funktiona 30K lämpötilaerolla (ks. Liite 1)

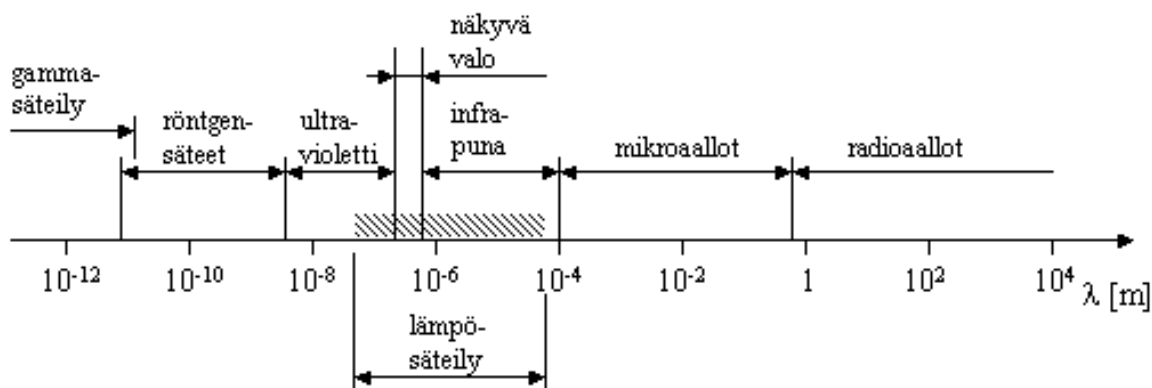
Kuviosta 17 huomaa hyvin että Rayleighin luku muuttuu tasaisesti paineen kasvaessa.

Alipaineena 2000 pascalia on suuri ja tämä aiheuttaa haasteita erityisesti kustannustehokkaasti tehtävän ulkovaipan kestävyteen. Asiakasta ajatellessa tulee ensimmäisenä mieleen, että tämä vaikuttaa hintaan kasvattavasti. Alkuoletuksena oli että, 4000 pascalia olisi kriittinen paine, jolla järjestelmästä saataisiin luontainen konvektio poistettua, mutta laskenta osoitti tämän hypoteesin vääräksi. Asia, joka pitää tutkia rakennetta miettiessä, on painelaitteasetuksen raja-arvot. Ne määrittävät, milloin alipaineistettu järjestelmä luokitellaan painelaitteasetuksen alaisuuteen. Mikäli laitteisto menee painelaitteasetuksen alaisuuteen, voidaan suunnitellut kauppakohteet unohtaa suuren hinnan korotuksen seurauksena.

(Incopera ym. 2006.) (Tynjälä 2010.)

7.2.3 Säteilyn aiheuttama lämpöhäviö

Säteilylämpö on kappaleen pinnan aiheuttamaa sähkömagneettista säteilyä, jonka aallon pituus määräytyy lämpötilan mukaan. Mitä suurempi on lämpötila, sitä lyhyempi aalto ja suurempi energia. Kuviossa 18 näkyy taajuusalue, jolla lämpösäteilyä esiintyy.



Kuvio 18. Sähkömagneettisen säteilyn spektri ja eri säteilyalueet (Lampinen ja Kotiaho 2012.)

Lämmön siirtyessä johtumalla tai konvektiolla siirtyvällä lämmöllä pitää olla väliaine, mutta säteily ei väliainetta tarvitse, vaan väliaine hankaloittaa lämpösäteilyä. Lämpösäteilyn perusperiaatetta on selitetty aiemmin kuviossa 15. (Lampinen ja Kotiaho 2012.)

Säteilylämpövirran tiheys lasketaan yhtälöstä

$$q_r = \frac{\sigma(T_{in}^4 - T_{out}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{in}} + \frac{1}{\varepsilon_{out}} - 1} = h_r(T_{in} - T_{out}), \quad (9)$$

jossa σ on Stefan-Boltzmannin vakio $5,667 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, ε on pinnan emissiiviteetti, T_{in} on sisälämpötila ja T_{out} on ulkolämpötila kelvineinä ja h_r on lämmönsiirtokerroin säteilylämmölle.

Taulukko 4. Eri materiaalien emissiivisyyksiä (The Engineering Toolbox)

Pintamateriaali	Pinnan emissiiviteetti
	- ε -
Alumiini normaalina levynä	0.09
Alumiinifolio	0.04
Alumiini paljon hapettunut	0.2 - 0.31
Alumiini kiilloitettu	0.039 - 0.057
Anodisoitu alumiini	0.77
Raaka-alumiini	0.07
Alumiinimaali	0.27 - 0.67
Black Body Matt (täydellinen musta)	1.00
Musta silikoonimaali	0.93
Musta epoksimaali	0.89
Musta emalimaali	0.80
Sileä jää	0.966
Raakajää	0.985
Kiilloitettu rauta	0.14 - 0.38
Ruostunut rauta	0.61
Rauta, tumman harmaa pinta	0.31
Raakarauta	0.87 - 0.95
Teräs	0.20 - 0.32
Kiilloitettu nikkeli	0.072
Hapettunut nikkeli	0.59 - 0.86
Maali	0.96
Paperi	0.93
Hapettunut teräs	0.79
Kiilloitettu teräs	0.07
Ruostumaton teräs hapettunut	0.85
Ruostumaton teräs kiilloitettu	0.075

Taulukossa 4 on annettu muutamia aineiden pintojen emissiivisyyksiä, joita tarvitaan laskelmissa, kun halutaan määrittää välitilassa tapahtuvaa säteilylämmönsiirtoa. Tämän työn tapauksessa sopiva heijastuspinta on varmaankin teräs kumpanakin pintana. Tätä vaatimusta muutetaan, mikäli laskenta osoittaa sen tarpeelliseksi.

7.2.4 Kesäkauden järjestelmän lämpeneminen

Kesäkauden lämpötilahäviö lasketaan noin 50 m³ sylinterisäiliön läpi. Nestetilavuutena käytetään 10 m³ vettä, joka on nollassa asteessa (0 °C) jäätyneenä. Sitten arvioidaan, kuinka pitkään tällä vesimäärällä menisi sulaa vuoden 2012 kesän keskilämpötilalla Jyväskylässä. Kuvion 11 mukaan vuorokauden keskilämpötila olisi kesäkuukausina 15 °C. Välitilan ilmanpaine pudotettaisiin alipainepumpulla 2000 Pascaliin, jolloin luontaista konvektiota ei pitäisi aiempien laskelmien mukaan enää tapahtua. Eristystila olisi edelleen sama 100 mm, muuttujien vähentämiseksi tarkastelussa. Aluksi lasketaan alkuarvoina Pradtlin luku

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{184,6 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}\right) \cdot 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})}{0,0263 \text{ W/mK}} \approx 0,705.$$

Seuraavaksi lasketaan Rayleighin luku, jotta saadaan selville onko kyseessä lämmön johtuminen vai konvektio.

$$Ra_L = \frac{g\beta\Delta T L^3}{\nu\alpha} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,0035 \frac{1}{\text{K}} \cdot 15 \text{ K} \cdot (0,1 \text{ m})^3}{7,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot 0,0014 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \approx 652,10 < 1708,$$

joten tilanteessa ei tapahdu luontaista konvektiota, vaan lämpö siirtyy johtumalla. Lasketaan siis molekyylien välinen välimatka kaavalla 10,

$$\lambda = \frac{6,65 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}}{p} = \frac{6,65 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}}{2000 \text{ Pa}} = 3,325 \cdot 10^{-6} \text{ m}.$$

Kerrointa β tarvitaan ilman lämmönjohtavuuden määrittämisessä. Kerroin β lasketaan kaavalla (huomio, eri kuin Rayleighin luvun β , joka esittää Rayleighin luvussa lämpölaajenemiskerrointa),

$$\beta = \left(\frac{9\gamma-5}{2\gamma+1}\right) \left(\frac{2-\alpha}{\alpha}\right) \lambda = \left(\frac{9 \cdot 1,4-5}{2 \cdot 1,4+1}\right) \left(\frac{2-0,8}{0,8}\right) 3,325 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 3,366 \cdot 10^{-5} \text{ m}, \quad (10)$$

jossa γ on ilman lämpökapasiteettisuhe joka on suunnilleen 1,4, α on ilman accommodation coefficient, joka on suunnilleen 0,8. Ilman lämmönjohtavuus lasketaan yhtälöstä

$$k_g = \frac{k_{ilma}}{s+2\beta} * L = \frac{k_{ilma}}{L+2\beta} L = \frac{0,0263 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{0,1 \text{ m} + 2 \cdot 3,366 \cdot 10^{-5} \text{ m}} * 0,1 \text{ m} \approx 0,263 \text{ W/mK}, \quad (11)$$

eli lämmön johtavuus ei poikkea merkittävästi ilman normaalista lämmön johtavuudesta vaikka niin aluksi oletettiin. Lämpövirran tiheys rakenteen läpi voidaan laskea Fourierin yhtälöstä,

$$q_c = k_g \frac{\Delta T}{L} = 0,263 \frac{\text{W}}{\text{mK}} * \frac{15 \text{ K}}{0,1 \text{ m}} = 3,94 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (12).$$

Vaipparakenne on noin 89 m², mikäli se on tehty vakiovaippalevyistä leikkaamatta.

Voidaan siis laskea, että teho, jolla ulkoilma lämmittää järjestelmää, on

$$P = q''_{conf} A = 3,94 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 89 \text{ m}^2 = 338,84 \text{ W}.$$

Seuraavaksi voidaan laskea aika, jossa jää sulaa:

$$T = \frac{sm}{P} = \frac{333000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * 10000 \text{ kg}}{338,84 \text{ W}} \approx 9,8 * 10^6 \text{ s} = 113,7 \text{ d}$$

Se on noin 3,8 kuukautta, optimiolosuhteissa ja yksinkertaistetulla laskennalla, kun säteilylämmön-
siirtoa ei ole otettu huomioon.

Rakenteen säteilylämpövirta lasketaan kaavasta 6

$$q_r = \frac{\sigma(T_{in}^4 - T_{out}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{in}} + \frac{1}{\varepsilon_{out}} - 1} = \frac{5,667 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot ((273 K)_{in}^4 - (288 K)_{out}^4)}{\frac{1}{0,32} + \frac{1}{0,32} - 1} \approx -14,30 \frac{W}{m^2}.$$

Lämpövirran suunta on kummassakin tapauksessa sama, vaikka säteilyenergiasta tuleekin negatiivinen vastaus. Kokonaislämpövirraksi tulee siis

$$q_{tot} = q_r + q_c = 14,30 \frac{W}{m^2} + 3,94 \frac{W}{m^2} = 18,24 \frac{W}{m^2}.$$

Sama jäämäärä kuin aiemmassakin esimerkissä sulaa tällä teholla

$$T = \frac{sm}{P} = \frac{333000 \frac{J}{kg} \cdot 10000 kg}{18,24 \frac{W}{m^2} \cdot 89 m^2} \approx 2 \cdot 10^6 s \approx 24 d,$$

eli tällä jäämassalla menee alle kuukausi sulaessa 2000 Pascalin tyhjiöeristyksellä. Kysymys kuuluu-
kin tässä vaiheessa, kuinka alas paineessa tulisi päästä, jotta jää pysyisi jäätyneenä vähintään 3
kuukauden ajan. Toinen esille nouseva asia on se, onko tämä edes fysikaallisesti mahdollista. Tästä
2000 pascalin paineesta alaspäin meneminen vaatii tyhjiöpumpulta paljon. Vaipparakenteen kesto
tulee vastaan, sillä ohut seinämä lommahtaa helposti ja lisäpaksuus taas nostaa nopeasti hintaa.
100 mm polyuretaanieristeellä vastaava sulamisaika olisi lämmönjohtavuudella 0,026 W/(mK),

$$q = \frac{k}{L} = \frac{0,026 \frac{W}{mK}}{0,1 m} \cdot 15 K = 3,9 \frac{W}{m^2} \rightarrow P = qA = 3,9 \frac{W}{m^2} \cdot 89 m^2 = 347,1 W \rightarrow T = \frac{sm}{P} =$$

$$\frac{333000 \frac{J}{kg} \cdot 10000 kg}{347,1 W} \approx 111 d = 3,7 kk,$$

eli uretaanieriste on tässä tapauksessa lopulta huomattavasti järkevämpi eristemateriaali kuin tyh-
jiöeriste ja se toimii myös vaipparakennetta tukevana ratkaisuna. Sen voisi toteuttaa sandwichinä,
mutta siihen joutuisi tuomaan energian jollain muulla tavalla, kuin seinän läpi, esimerkiksi lämmön-
vaihtimella järjestelmään kuljettamalla. (Tynjälä 2010.)

Laskelmasta voidaan tehdä johtopäätös, että tyhjiöeristys ei tule niin kannattavaksi, kuin aluksi ole-
tettiin. Perinteinen polyuretaanieristetty merikontti on edelleen eristävydessä loistava ja halpa rat-
kaisu.

7.3 Energian kuljetus järjestelmään tai järjestelmästä ulos

Energiaa voidaan kuljettaa järjestelmästä tai järjestelmään kolmella eri peruseriaatteella.

Ensimmäinen on mekaaninen työ, jolla tehdään lämpöenergiaa tai kuljetetaan sitä pois. Toinen on
lämmön siirtyminen kuljettamalla aineen läpi. Kolmas on aineen siirtyminen, jossa energiaa sisältä-
viä hiukkasia siirretään paikasta A paikkaan B halutulla tavalla.

7.3.1 Konvektiolla vaipparakenteen läpi kuljetettava energia

Järjestelmästä halutaan kuljettaa energiaa pois tarpeen vaatiessa, eli kun järjestelmää jäähdytetään, Rayleighin luku pitää saada korkeammaksi, jotta mahdollistetaan luontaisen konvektion aiheuttama lämpöenergian siirtyminen järjestelmän sisältä ulkoilmaan. Tällöin olisi luontevinta laskea välitila normaaliin ilmanpaineeseen, jolloin 10 °C ($T_{\text{in}}=273\text{ K}$, $T_{\text{out}}=263\text{ K}$) lämpötilaerolla tapahtuu jo luontaista konvektiota,

$$Ra_L = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} = \frac{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,0038 \frac{1}{\text{K}} * 10 \text{ K} * (0,1 \text{ m})^3}{0,126 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} * 0,26 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \approx 1,4 * 10^6$$

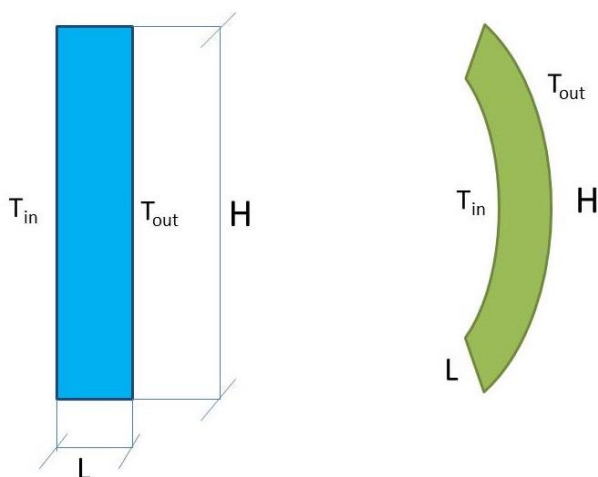
Kuten laskelmasta voidaan havaita, Rayleighin luku ylittää luontaisen konvektion raja-arvon 1708, jolloin luontainen konvektio alkaa tapahtua.

Seuraavaksi pitää laskea Nusseltin luku, eli kerroin puhtaalle konvektiolle. Nusseltin luku on dimensioton suure, joka määritellään kaavan

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = 0,42 Ra_L^{1/4} Pr^{0,012} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0,3}, \quad (13)$$

mukaan. Nusseltin luku on voimassa kun korkeuden H ja tilan paksuuden L suhde on välillä $10 < H/L < 40$ ja Pradtin luku on $1 < Pr < 2 * 10^4$ ja Rayleighin luku on välillä $10^4 < Ra_L < 10^7$.

Korkeuden ja paksuuden suhde käsittää yleensä pelkästään suoran pinnan, jossa luontainen konvektio tapahtuu.



Kuvio 3. Pintojen muodot

Kuviossa 19. on esitetty pintojen muodot. Pyöreässä kappaleessa ulkopinnan pinta-ala muodostuu suuremmaksi kuin sisäpinnan, mutta laskenta käsittää pintojen suhteen olevan sama. Pienellä virheellä voidaan olettaa, että varastointitilan kaarevuussäde on riittävän suuri, jotta voidaan olettaa, että pinnat ovat yhtä suuret laskennan yksinkertaistamiseksi. Olettamuksen yhtä suurista sisä- ja ulkopinnoista perustan siihen, että suurella kaarevuussäteellä tämä ero on pieni. Oletetaan että sisäsilöön halkaisija on 2,5 m, ja sisäsilöön segmentin $H_{\text{sisä}}$ pituus on 1 m, tällöin α on,

$$\alpha = 180^\circ * \frac{H_{\text{sisä}}}{\pi r} = 180^\circ * \frac{1 \text{ m}}{\pi * 1,25 \text{ m}} \approx 45,8^\circ.$$

H_{ulko} on

$$H_{\text{ulko}} = \frac{\alpha}{180^\circ} \pi r = \frac{45,8^\circ}{180^\circ} * \pi * 1,26 \text{ m} = 1,008 \text{ m},$$

eli mitassa tehdään alle yhden prosentin virhe, mikäli käytetään yhtä suuria sisä- ja ulkoseinän mittoja. Tämä virhe on hyväksyttävä, koska lämmönsiirrossa laskennallinen ja todellinen lämmönsiirtyminen voi helposti heittää paljonkin, koska kaikkia muuttujia ei pystytä laskennassa ottamaan huomioon arvioinnin helpottamiseksi ja laskemisen mahdollistamiseksi.

Valitaan Nusseltin luvun laskentaan H :ksi 1 m ja L on 10 cm, jolloin H/L on 10, eli ollaan raja-arvossa, jossa voidaan olettaa Nusseltin luvun antavan totuuden mukaisen arvon. Pradlin luku tarvitaan Nusseltin luvun määrittämiseen. Prandlin luku kuvaa diffuusion ja aineen liikemäärän suhdetta. Prandlin lukuun vaikuttaa paljon lämpötila. Sen takia tässä laskelmassa käytetään ilman dynaamista viskositeettia $\mu \left(\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)$ 250 K lämpötilassa. Ominaislämpökapasiteetti ei riipu lämpötilasta, joten c_p voidaan olettaa olevan vakio 1005 J/(kg*K).

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{159,6 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right) \cdot 1005 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})}{0,0223 \text{ W}/\text{mK}} \approx 0,72 \quad (14)$$

Nusseltin luvuksi voidaan siis laskea

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = 0,42 Ra_L^{1/4} Pr^{0,012} \left(\frac{H}{L}\right)^{-0,3} = 0,42 (1,4 \cdot 10^6)^{1/4} \cdot 0,72^{0,012} (10)^{-0,3} \approx 7,21 .$$

Ongelma tässä on se, että Prandlin luvun arvo ei täytä ehtoja, jolloin Nusseltin luku on luotettava. Lasketaan siis Nusseltin luku käyttäen kaavaa 15, joka on voimassa kun $2 < H/L < 10$, $Pr < 10^5$ $10^3 < Ra_L < 10^7$. Nusseltin luku esimerkkitalanteessa on

$$Nu_L = 0,22 \left(\frac{Pr}{0,2+Pr} Ra_L\right)^{0,28} * \left(\frac{H}{L}\right)^{-\frac{1}{4}} = 0,22 \left(\frac{0,72}{0,2+0,72} 1,4 \cdot 10^6\right)^{0,28} * \left(\frac{1}{0,1}\right)^{-\frac{1}{4}} \approx 6,07 \quad (15).$$

Tätäkin kaavaa käyttäessä syntyy ongelma, jossa H/L suhde on 10, mutta oletetaan kuitenkin, että kaava on tällä raja-arvolla vielä luotettava.

Nusseltin luvun kaavasta saadaan johdettua lämmönsiirtokerroin h (W/m²K)

$$Nu_L = \frac{hL}{k} \rightarrow h = \frac{Nu_L k}{L} = \frac{6,07 \cdot 0,0223 \text{ W}/\text{mK}}{0,1 \text{ m}} \approx 1,60 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}.$$

Seuraavaksi lasketaan lämpövirran tiheys pintojen välillä. Se on lämpötilaeron ja lämmönsiirtokerroimen tulo

$$q''_{conf} = h\Delta T = 1,34 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * 10 \text{ K} = 16,0 \text{ W}/\text{m}^2 . \quad (16)$$

(Incopera ym 2003.) (Tynjälä 2010) (Lampinen ja Kotiaho 2012.)

Meillä on nyt laskettuna 10 °C lämpötilaerolla oleva lämpövirran tiheys vaipparakenteen läpi. Lasketaan seuraavaksi paljonko pelkästään tällä tunnetulla suurella vaadittaisiin aikaa, jotta noin 50 m³ sylinterimallisen säiliön sisällä saataisiin jäädytettyä 10 m³ 0 °C lämpöistä vettä. Veden sulamislämpö s on 333 kJ/kg (0 °C), jolloin vettä jäädytettäessä vaaditaan yhtä paljon energiaa. Sylinterin seinän pinta-ala on noin 79 m² ja päädyn pinta-ala on 4,9 m², joten kokonaispinta-ala on noin 89 m², mikäli vaipparakenne on tehty vakiovaippalevyistä leikkaamatta.

Voidaan siis laskea, että teho, jolla ulkoilma jäädyttää järjestelmää, on

$$P = q''_{conf} A = 16,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 89 \text{ m}^2 = 1424 \text{ W}.$$

Seuraavaksi voidaan laskea aika, jossa vesi jäätyy:

$$T = \frac{sm}{P} = \frac{333000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * 10000 \text{kg}}{1424 \text{ W}} \approx 2338483 \text{ s} = 27 \text{ d},$$

eli 10 °C lämpötilaerolla menee noin kuukausi, että vesi jäätyisi järjestelmässä, kun ei oteta muita lämmönsiirtymisperiaatteita huomioon ja yksinkertaistetaan laskentaa äärimmilleen.

7.3.2 Lämmönsiirto aineen mukana

Luvussa 7.2.4 todettiin, että älykäs eristys säädettävällä tyhjiöllä toteutettuna ei ole laskennallisesti järkevä ratkaisu. Tällöin ainoaksi vaihtoehdoksi jää kuljettaa energiaa sisältäviä hiukkasia järjestelmästä pois lämmönvaihtimeen, josta tämä energia pumpataan ulkoilmaan.

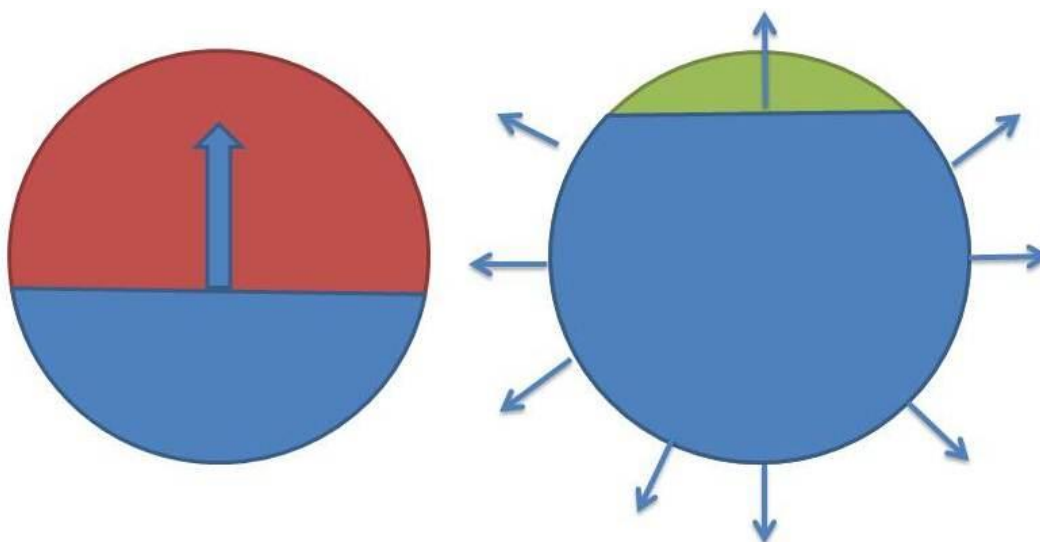
Lämmönvaihtimet ja niiden sopivuuden arviointi tähän käyttöön vaatisi syvällisempää paneutumista ja tarkkaa laskentaa. Täten päätettiin, että tämän vaihtoehdon tarkastelu jätetään myöhemmäksi, mahdollisesti seuraavan projektin aiheeksi. Nykyisellä energian hinnalla tällä periaatteella toteutettavasta järjestelmästä olisi hankala saada toimivaa taloudellisesti, sillä sähkö on verrattain halpaa ja kylmäkontteja valmistetaan suuria määriä, jolloin myös niiden maailmanmarkkinahinta on alhainen.

8 TEKNISET RATKAISUT

Järjestelmän tulisi olla teknisesti hyvin yksinkertainen ja varmatoiminen. Kuitenkin järjestelmä vaatii herkkiä antureita ja logiikkaa toimiakseen. Nämä monimutkaistavat helposti rakennetta ja tekevät toiminnasta epävarmempaa. Yhden moduulin valmistuskustannusten tulisi jäädä riittävän alhaiseksi, jotta tuotteella on markkinoilla menestymismahdollisuuksia ja myyntikatetaso saadaan pidettyä kannattavana. Tuotteen tulee myös olla käyttökustannuksiltaan järkevä, eli energiankulutus on saatava alhaiseksi, jotta sitä voidaan markkinoida energiaa säästävänä ratkaisuna. Energian säästön kautta tulee ympäristöystävällisyys, joka vaikuttaa monen kuluttajan ostopäätökseen.

8.1 Vaipparakenne

Vaipparakenne on ongelmallinen toteuttaa mikäli haluamme, että vesi on lämmön varastointiaineena ja se jäädytetään. Jäätyessään vesi laajenee ja laajeneminen aiheuttaa suuren paineen vaippaan.



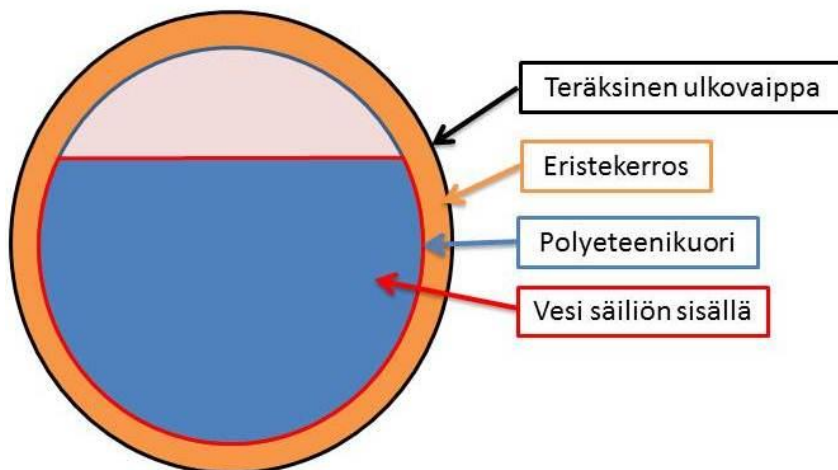
Kuvio 20. Veden aiheuttama voima säiliön vaippaan jäätyessään.

Kuvio 20 selittää hyvin miten voima jakautuu säiliössä, kun vesi jäätyy. Vasemmanpuoleisessa säiliössä nestepinta on alle puolen välin. Tällöin jää pääsee nousemaan ylöspäin vapaasti ja vaippaan ei kohdistu suuria jännityksiä. Oikean puoleisessa säiliössä nestepinta on nostettu yli puolen välin. Tällöin laajeneminen joutuu tapahtumaan joka suuntaan, koska jää ei pääse nousemaan säiliössä ylöspäin vaan se turvottaa vaippaa oman laajenemisensa verran. Veden tiheys muuttuu olomuodon muutoksessa nesteestä kiinteäksi, arvosta $1,000 \text{ g/cm}^3$ arvoon $0,917 \text{ g/cm}^3$. Veden tilavuus siis kasvaa jäätymisessä 9,1 %, joten Ø2500 mm säiliön ympärysmittan pitää kasvaa 7853 mm:stä 8565 millimetriin, eli 712 millimetriä. Tämä laajeneminen rikkoo monen materiaalin, joten materiaalin valinnassa tulee olla hyvin tarkka, jos haluamme säiliön täytettävän yli puolen välin.

Sisävaippamateriaalin tulisi siis olla hyvin joustavaa ja kestää pitkään. Teräs ei siis ole vaihtoehto, sillä se hajoaa tällaisessa laajenemis-supistumis-rasituksessa muutamassa vuodessa. Muoveista po-

lyeteeni voisi tulla vaihtoehdoksi, sillä sen myötövenymä ylittää jopa 15 % asti. Se riittäisi hyvin veden laajenemisprosentin ollessa 9,1 %.

Ruoka-ainevaraston kylmän varastointitila



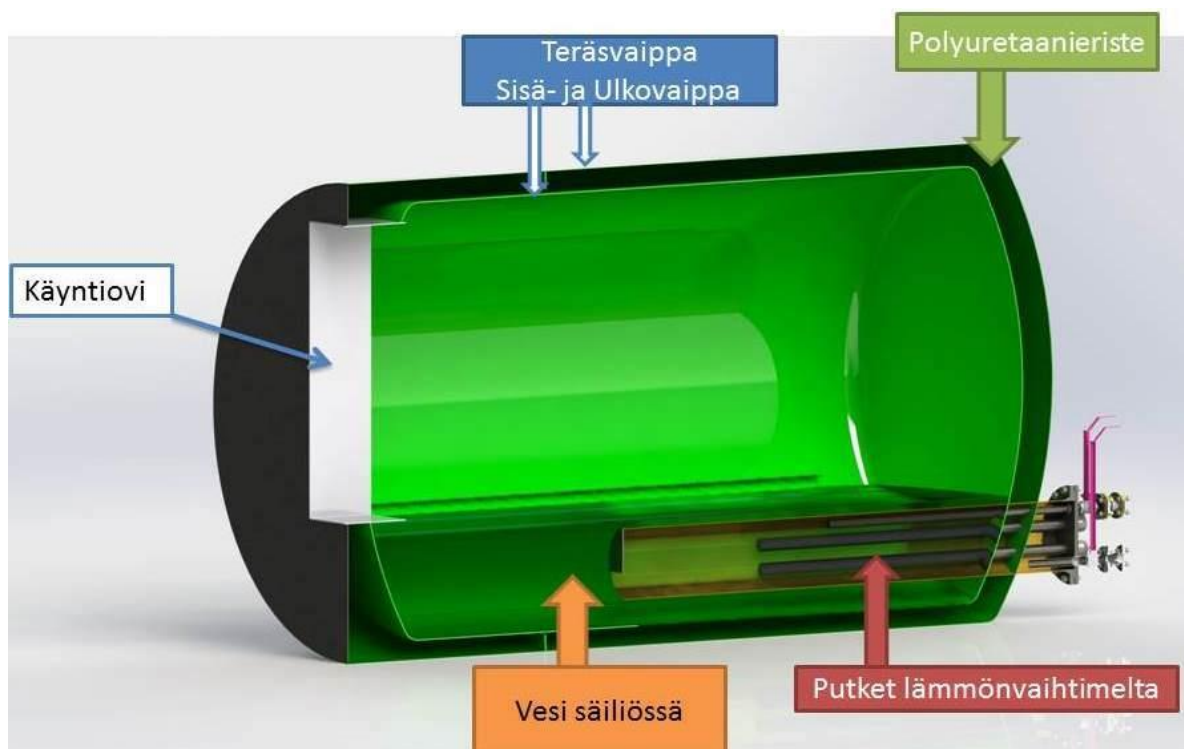
Kuvio 21. Ruoka-ainevaraston vaipan rakennekerrokset

Ulommaiseksi kuoreksi voisi tulla kuvion 21 mukaisella tavalla teräksinen ulkovaippa, joka suojaa rakennetta, mikäli se haudataan maan sisään kokonaan tai osittain. Ulkovaipan ja sisävaipan väliin sijoitetaan eristävä kerros, joka ehkäisee ulkopuolelta lämmön tulemisen sisälle. Eriste ja neste on erotettu toisistaan muovisella polyeteenikerroksella, joka ottaa vastaan veden jääytymisestä aiheutuvat laajenemiset ja supistumiset. Kerroksien liikkumavarojen tulee olla riittävän suuret, jotta teräskuori ja muovipinta eivät pääse hankautumaan rikki vuosien saatossa.

Taulukko 5. Polyeteenien ominaisuuksia (Kolev.)

Ominaisuus	PE
Kovuus, Rockwell R	60 - 65
Kovuus, Shore D	55 -69
Vetomurtolujuus (MPa)	10 - 50
Vetolujuus (MPa)	2,4 – 31, 7
Murtovenymä (%)	10 - 1500
Myötövenymä (%)	6,9 - 15
Vetokerroin (GPa)	0,18 – 1,6
Taivutuskerroin (GPa)	0,179 – 1,7
Taivutuslujuus (MPa)	14 - 25
Puristuslujuus (MPa)	4 - 25
Iskulujuus; Izod, lovettu (J/cm)	0,21 – 8,01
Iskulujuus; Charpy,lovettu (J/cm)	0,38 - 11
Virumiskerroin (1h) (MPa)	400 - 570
Virumiskerroin (1000h) (MPa)	270 - 400

Polyeteeni ei toimi tyhjiöeristyksen kanssa, koska se venyy täyttäen tyhjiön tilan, minkä vuoksi menetetään eristävyys ja välitilaan jäävä paisuntatila jäätyvälle vedelle. Muoveja käytettäessä on käytettävä kiinteää eristystä älykkään eristyksen sjaan. Toinen ongelma on myötövenymän aleneminen lämpötilan laskiessa. Kyselyn mukaan eri muovien toimittajista kukaan ei voinut taata polyeteenille taulukossa esitettyä myötövenymää alle 0 °C lämpötiloissa. Älykäs eristys jäisi mahdollisuudeksi vain, mikäli nestepintaa ei nosteta yli puolen välin säiliössä. Hiihtoputki olisi vielä mahdollista tehdä älykkäällä eristyksellä kuvion 22 mukaisella teknisellä ratkaisulla, jossa lämpöä varastoiva neste on sijoitettu lattian alapuolelle. Hiihtoputkessa polyeteenivaipan tilalla on teräsvaippa, joka kestää paremmin rasitusta kuin polyeteenivaippa. (Kolev.) (Mäkelä ym. 2005.)



Kuvio 22. Terässäiliörakenne

Pyöreän rakenteen ongelma kylmävarastointitilana on huono tilavuuden ja ulkomittojen hyötysuhde verrattuna perinteiseen merikonttirakenteeseen (ks. kuvio 22), varsinkin mikäli halutaan varastoida tavaraa trukkilavoilla. Eurolava on kooltaan 120 cm kertaa 80 cm.

Taulukossa 6 on merikonttien keskeisimmät mitat. Eristetyt ja kylmälaitteilla varustetut merikontit ovat pahimmat kilpailijat kuljetettavissa kylmävarastoissa tässä projektissa.

Taulukko 6. Merikonttien keskeisimmät mitat ja hyötykuormat (Rahtihuolinta Suomi Oy 2013.)

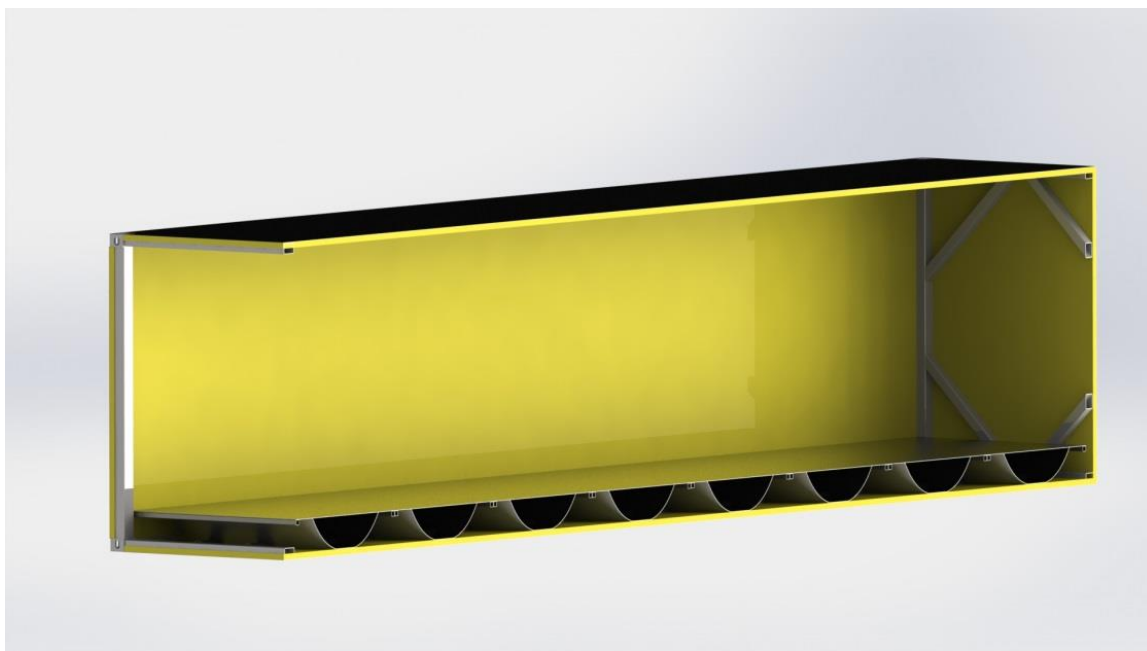
Tieto	20' merikontti	40' merikontti	40' HC merikontti
Pituus (mm)	6058	12192	12192
Leveys (mm)	2438	2438	2438
Korkeus (mm)	2591	2591	2895
Sisäpituus (mm)	5890	12010	12010
Sisäleveys (mm)	2330	2330	2330
Sisäkorkeus (mm)	2370	2370	2690
Pinta-ala (m ²)	13,7	28,1	28,1
Tilavuus (m ³)	31,8	66,4	76,0
Kantavuus (kg)	20000	26000	26000
Oma paino (kg)	2250	4000	4200
Eurolavat (koko 120 x 80 cm) (kpl)	11	23	23
Ovien aukeamisleveys (mm)	2320	2320	2320
Ovien aukeamiskorkeus (mm)	2280	2280	2580

Kaiken kaikkiaan voidaan tiivistää, että merikontti on kustannustehokas tilankäytöltään ja eristyksestään, sillä siinä on polyuretaanieristys, jonka tehokkuus on osoitettu luvussa 7.2.4. Rakenteena pyöreä lämmönvarastointijärjestelmä, joka toteutettaisiin polyuretaanieristeellä, ei pystyisi kilpailemaan perinteisen eristetyn merikontin kanssa ominaisuuksissa ja hinnassa, koska merikonttien valmistusvolyymit ovat suuria ja tarvittava teräsmäärä ja työ on laskettu aivan minimiin. Jatkossa voisi miet-

tiä, miten olemassa olevia konttirakenteita voisi hyödyntää, jotta niistä saisi tehtyä jatkojalostetun tuotteen, josta asiakas on valmis maksamaan lisää.

8.2 Konttiratkaisu

Pyöreä ratkaisu on siis perinteiseen konttiratkaisuun verrattaen tiloiltaan huono. Ajatusta ilman kylmälaitetta toimivasta kontista voisi jatkojalostaa.



Kuvio 23. Kylmäpatruunat kontin sisälle lastattuna

Kuvassa 23 kylmäpatruunat ovat kontin pohjalla. Niissä voisi olla jäätynyttä vettä kylmän ylläpitämiseksi. Mallissa olevalla geometrialla valmistetuilla kylmäpatruunoilla vettä saisi järjestelmään noin neljä kuutiota. Patruunoita voisi säilyttää missä tahansa, missä on riittävän kylmää, jotta vesi pysyy jäätyneenä ja patruunat voidaan lastata kyytiin tarpeen vaatiessa. Patruunoiden päälle voisi lastata tarvittavat tavarat ja näin tuotteiden kylmäsäilytys olisi varmistettu matkan ajaksi. Lämmön tasaisuuden kannalta olisi parasta, että patruunat sijoitettaisiin kattoon, koska kylmä ilma valuu alas. Lattian rajasta ilman kiertäminen pitäisi hoitaa koneellisesti, mutta katosta kylmä ilma laskeutuu luontaisesti alas lämmintä ilmaa raskaampana.

Tämän idean jalostaminen jatketaan loppuun myöhemmin, sillä tämä menee työssä annetun tehtävänannon ulkopuolelle.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia tyhjiöeristyksen tarjoamia mahdollisuuksia kylmänvarastointilaitteistoissa pohjoisissa oloissa, sekä miten voidaan mahdollisimman hyvin kerätä talven kylmä kesän jäähdytystarpeisiin hyödyntäen patentoidun tuotteen toimintaperiaatetta.

Työssä kävi ilmi, että älykäs eristys tyhjiöeristeellä toteutettuna ei ole järkevä konttikokoisen säiliön mittakaavassa. Eristys vaatisi toimiakseen niin suuren alipaineen, että teräksen määrä kasvaa yli tuotteelle asetetun budjetin, sillä perinteinen säiliönvaipparakenne ei tätä jännitystä kestä lommahattamalla. Vaipparakenteeseen pitäisi keksiä uusi tekninen ratkaisu, jonka saisi toteutettua pienemmillä kustannuksilla kuin perinteinen teräsvaippa. Jos alipainetta voitaisiin viedä alle kymmenen pascalin, tyhjiöeristys olisi järkevää ja kannattavaa. Silti kustannustehokkuus olisi kilpaileviin eristeisiin verrattuna varsin heikko. Korkeaan alipaineeseen mentäessä tyhjiöpumppujen hinta nousee moninkertaiseksi ja laite siirtyy mitä todennäköisimmin painelaitedirektiivin alaisuuteen, mikä nostaa hintaa vielä entisestään. Patentoidun tuotteen toimintaperiaatetta voisi varmasti hyödyntää perinteisellä eristeellä ja lämmönsiirron toteuttaa lämmönvaihtimella ja näin käyttää hyödyksi napaseutujen kylmät olosuhteet.

Älykkään eristyksen säätämiseen ei työssä alkutiedoista poiketen tarvinnut syventyä, koska tyhjiöllä toteutettava älykäs eristys todettiin toimimattomaksi ratkaisuksi työn edetessä.

Lämmönsiirtoa tutkiessa havaittiin myös veden valtava potentiaali kylmän varastointiin, kunhan jäätyksen aiheuttama laajeneminen saadaan hyvin kohdistettua johonkin suuntaan eikä koko rakenne joudu ottamaan tätä valtavaa voimaa vastaan. Astian hyvin suunnitellulla muodolla laajenemisen aiheuttama voima saadaan helpoiten suunnattua ylöspäin ja jää liikkumaan laajenemisensa verran, kuten kuviosta 20 havaitaan. Jatkossa olisi selvitettävä aineita, joilla veden olomuodonmuutosta saisi hallittua, ettei vesi laajenisi niin paljon jäätyessään. Vaihtoehtoisesti pitäisi löytää joku toinen kylmän varastointiaine, jolla olisi käyttöön tarvittavat ominaisuudet. Tarkemmin varastointiaineen määrittäminen tai veden seostaminen tähän käyttöön paremmin sopivaksi vaatisi hyvin pitkälle menevää kemian asiantuntemusta ja mahdollisesti jatkoprojektin asian selvittämiseksi.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- ELINTARVIKETURVALLISUUSVIRASTO EVIRA. Elintarvikkeiden säilytystilat. 2012. [Viitattu 2013-09-30] Saatavissa:
<http://www.evira.fi/portal/fi/elintarvikkeet/hygieniaosaaminen/tietopaketti/elintarvikkeiden+hygieeni+nen+kasittely/elintarvikkeiden+sailytystilat>
- ELINTARVIKETURVALLISUUSVIRASTO EVIRA. Elintarvikkeiden säilyttäminen. 2013 [Viitattu 2013-09-30] Saatavissa:
<http://www.evira.fi/portal/fi/elintarvikkeet/hygieniaosaaminen/tietopaketti/elintarvikkeiden+hygieeni+nen+kasittely/elintarvikkeiden+sailyttaminen/>
- ENERGYQUEST.CA.GOV 2002, How Does A Refrigerator Work? [Viitattu 2013-04-19] Saatavissa:
http://www.energyquest.ca.gov/how_it_works/refrigerator.html
- FINNFOAM, Koostumus ja rakenne [Viitattu 2013-03-08] Saatavissa:
<http://www.finnfoam.fi/index.php?page=6fc73976fd1df1c24f240d72ac9ae52>
- ILMATIETEENLAITOS [Viitattu: 2013-10-30] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi>
- INCOPERA, Frank, DE WITT, David, BERGMAN, Theodore, LAVINE, Adrienne 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, USA: WILEY.
- KOLEV, Milena. Polyeteeni (PE). (Suom. Sanna Nykänen.) Tampereen teknillinen yliopisto. [Viitattu 2013-05-17] Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PE_FI.pdf
- LAHTINEN, Jukka, ISOVIITA Antti 2001 Asiakaspalvelun ja markkinoinnin perusteet, Gummerus Kirjapaino Oy.
- LAMPINEN M, KOTIAHO V, 2012. Termodynamiikka ja lämmönsiirto, johdatusta lämmönsiirto-oppiin, Espoo: Aalto yliopisto.
- LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2013. Lämmönsiirto kurssimateriaali, kurssi BH20A0450.
- MÄKELÄ, Mikko, SOININEN, Lauri, TUOMOLA, Seppo, ÖISTÄMÖ, Juhani, 2005. Tekniikan Kaavasto, Hämeenlinna: Tammertekniikka.
- PCT 2011, Huhtikuu, WO 2011/048266 patentti. European Patent office
- RAHTIHUOLINTA SUOMI OY, 2013. Merikonttien mitat [Viitattu:2013-09-30] Saatavissa:
<http://www.rahtihuolinta.fi/fi/hyodyllista-tietoa/merikonttien-mitat.php>
- Shepherd, W. Shepherd, D., 1998. Energy Studies, Imperial College Press.
- SUNTEKNO 2010, Tietopankki Aurinkoenergia [Viitattu 2013-02-15] Saatavissa:
<http://www.suntekno.fi/resources/public/tietopankki//aurinkoenergia.pdf>
- TALOON.COM, Styrox EPS 100 Lattia 100mm 6m2/pak [Viitattu 2013-04-05] Saatavissa:
<http://www.taloon.com/styrox-eps-100-lattia-100mm-6m2-pak/EPS-100-L-100MM/dp?openGroup=267>
- THE ENGINEERING TOOLBOX, Emissivity Coefficients of some common materials, [Viitattu: 2013-10-30] Saatavissa: http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html.
- THERMOS, Thermos midnight blue L&C tekniikkaa [Viitattu 2013-03-07] Saatavissa:
<http://www.mastermarkbrands.fi/index.php?action=file&file-action=download&file-id=2411>
- TYNJÄLÄ, Tero, 2010. Säiliön seinämärakenteen lämmönläpäisykertoimen määrittäminen, Lappeenranta, Lappeenranta teknillinen yliopisto.
- YMPÄRISTÖMINISTERIÖN ASETUS RAKENNUKSEN KÄYTTÖTURVALLISUUDESTA, 2001. [Viitattu: 2013-09-30] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/6376-F2.pdf>

LIITE 1

Rayleighin-luvunlaskentataulukko

p (Pa)	β (1/K)	$T_{keskimaa}$ (°C)	ν (m ² /s)	Ra_i	ΔT (K)	α (m ² /s)	k (W/mK)	C_p (J/(kgK))	ρ (kg/m ³)	T (K)	η (N*s/m ²)
0,01	0,00330033	15	1,5890E-01	0,00	30	216,4164194	0,0263	1005	1,2092E-07	200	0,00001325
0,1	0,00330033	15	1,5266E+01	0,00	30	21,64164194			1,2092E-06	250	0,00001596
1	0,00330033	15	1,5266E+00	0,00	30	2,164164194			1,2092E-05	300	0,00001846
10	0,00330033	15	1,5266E-01	0,03	30	0,216416419			0,00012092		
100	0,00330033	15	1,5266E-02	2,94	30	0,021641642			0,001209204		
120	0,00330033	15	1,2722E-02	4,23	30	0,018034702			0,001451044		
130	0,00330033	15	1,1743E-02	4,97	30	0,016647417			0,001571965		
160	0,00330033	15	9,5414E-03	7,53	30	0,013526026			0,001934726		
180	0,00330033	15	8,4812E-03	9,53	30	0,012023134			0,002176567		
200	0,00330033	15	7,6331E-03	11,76	30	0,010820821			0,002418407		
500	0,00330033	15	3,0532E-03	73,50	30	0,004328328			0,006046019		
1000	0,00330033	15	1,5266E-03	293,99	30	0,002164164			0,012092037		
1500	0,00330033	15	1,0177E-03	661,47	30	0,001442776			0,018138056		
2000	0,00330033	15	7,6331E-04	1175,94	30	0,001082082			0,024184075		
2500	0,00330033	15	6,1065E-04	1837,41	30	0,000865666			0,030230093		
3000	0,00330033	15	5,0887E-04	2645,87	30	0,000721388			0,036276112		
3500	0,00330033	15	4,3618E-04	3601,32	30	0,000618333			0,042322131		
4000	0,00330033	15	3,8166E-04	4703,76	30	0,000541041			0,048368149		
4500	0,00330033	15	3,3925E-04	5953,20	30	0,000480925			0,054414168		
5000	0,00330033	15	3,0532E-04	7349,63	30	0,000432833			0,060460187		
5500	0,00330033	15	2,7757E-04	8893,05	30	0,000393484			0,066506205		
6000	0,00330033	15	2,5444E-04	10583,46	30	0,000360694			0,072552224		
6500	0,00330033	15	2,3487E-04	12420,87	30	0,000332948			0,078598243		
7000	0,00330033	15	2,1809E-04	14405,27	30	0,000309166			0,084644261		
101300	0,00330033	15	1,5070E-05	3016783,19	30	2,13639E-05			1,224923382		
101300	0,00380228	5	1,2577E-05	1438095,26	10	2,06225E-05			1,268961612		
202600	0,00380228	5	6,2886E-06	5752381,03	10	1,03112E-05			2,537923225		
303900	0,00380228	5	4,1924E-06	12942857,31	10	6,87416E-06			3,806884837		