

Jari Heinonen

Pakastustunneleiden optimointi

Opinnäytetyö

Kevät 2012

Tekniikan yksikkö

Bio- ja elintarviketekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Bio- ja elintarviketekniikka

Tekijä: Jari Heinonen

Työn nimi: Pakastustunneleiden optimointi

Ohjaaja: Pasi Junell

Vuosi: 2012 Sivumäärä: 43 Liitteiden lukumäärä:2

Työn tarkoituksena on selvittää paras mahdollinen täyttötapa pakastustunneleille ja sitä kautta lyhentää pakastuksen aikaa ja mahdollisesti parantaa pakastetun lihan laatua. Tutkimuksessa käytettiin lämpökameraa, jolla kuvattiin pakastuksesta tulevia lavoja. Lisäksi lämpötilaloggereita käytettiin eri lihalajitelmien pakastusaikojen mittauksiin.

Lämpökameralla kuvatuista lavoista poimittiin lämpötila-arvoja. Nämä arvot taulukoitiin ja niistä määritettiin lavapaikkakohtaiset keskiarvot. Näiden perusteella etsittiin poikkeavia lavapaikkoja tunnelista. Lämpötilaloggereiden tuloksia verrattiin Phamin-yhtälöstä (2001) saatuihin laskennallisiin pakastusaikoihin. Vertailutuloksien perusteella lihalajitelmat laitettiin pakastusnopeuteen perustuvaan järjestykseen.

Tutkimuksessa selvisi, kuinka suuria eroja on eri lihalajitelmien pakastusajoissa. Näiden pakastusaikojen ja lämpökamerakuvista saatujen tietojen perusteella pystyttiin kertomaan, kuinka pakastettavat tuotteet kannattaa jakaa tunneliin. Pakastukseen saapuvat lavat on syytä erotella rasvaisuuksien perusteella kahteen osaan. Koska vähemmän rasvaiset lajitelmat vaativat pitemmän pakastusajan, ne on syytä sijoittaa eturiviin. Tämän jälkeen kannattaa vielä jakaa rasvaiset ja vähemmän rasvaiset lihat lavakorkeuden perusteella kahteen osaan. Lämpökameran kuvista huomasi, että eturivin yläkerroksen ylimmät laatikot olivat selvästi lämpimämpiä kuin muut yläkerroksessa olleet laatikot. Yläkerroksen matalammilla lavoilla pystyy siksi minimoimaan yläkerroksen ja alakerroksen pakastusajan välisiä eroja.

Avainsanat: liha, pakastus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Food Processing and Biotechnology

Author: Jari Heinonen

Title of thesis: Optimizing freezing tunnels

Supervisor: Pasi Junell

Year: 2012 Number of pages: 43 Number of appendices: 2

The thesis subject is how to optimize a freezing tunnel. The studies began by using a thermal camera to take pictures of frozen transport pallets. Thermal data loggers were used to get information about the freezing times of different meat assortments. Frozen meats were beef and pork and all the eatable parts of them.

There was no exact literature on how long it will take to freeze meat. The data loggers and Pham's freezing time equation were used to find out the differences on the freezing times of the meats. The meat assortments were placed in the order of which freezes the fastest. The thermal camera was used to take thermal pictures of transport pallets. The thermal values from the photos were tabled and the average numbers showed if there were some warmer places in the tunnel.

Conclusions were that incoming transport pallets should be divided into lean meats and fatty meats. Lean meat should be put in the front row because it will freeze slower. More fatty meats should put in the back row. From lean and fatty meats pallets should be separated which have 4 or 5 layers and put them on upper racks. The more layers on pallets, the longer time it will take to freeze.

Keywords: meat, freezing

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
1 Johdanto.....	6
2 Pakastukseen liittyvää fysiikkaa.....	7
2.1 Lämpötila ja lämpömäärä.....	7
2.2 Lämmönsiirron mekanismit.....	8
2.2.1 Konvektio.....	8
2.2.2 Johtuminen.....	9
2.2.3 Säteily.....	9
2.2.4 Lämpökamera.....	10
2.2.5 Rajapinnat.....	10
2.3 Phamin-yhtälö ja pakastusajan laskeminen.....	11
3 Lihan pakastaminen.....	13
3.1 Yleistä.....	13
3.2 Lihan kemiallinen koostumus.....	13
3.3 Pakastukseen vaikuttavia tekijöitä.....	14
3.4 Solutasolla tapahtuvia muutoksia pakastettaessa.....	15
3.4.1 Jääkiteiden muodostus.....	15
3.4.2 Liuenneiden aineiden pitoisuus.....	16
4 Lihan pakastusmenetelmät.....	18
4.1 Yleistä.....	18
4.2 Mekaaninen pakastus.....	19
4.2.1 Ilmapakastus.....	19
4.2.2 Levypakastus.....	19
4.2.3 Uputuspakastus.....	20
4.3 Kryogeninen pakastus.....	20
5 Käytössä oleva toimintatapa.....	21
5.1 Tämänhetkinen täyttötapa.....	22
5.2 Optimaalisen täytön reunaehdot.....	23

5.2.1 Lihalajitelmat	23
5.2.2 Lavan sijainti	24
6 Ongelmien selvittäminen	25
7 Mittaustuloksia	26
7.1 Tuotteiden pakastusnopeus	26
7.2 Eri lajitelmiä pakastuksen kulminaatiopiste	28
7.3 Lämpökamerakuviin perustuvat arvot	31
8 Johtopäätös	38
9 LÄHTEET	40
LIITTEET	41

1 Johdanto

Tässä työssä pyrittiin selvittämään, kuinka pakastukseen saapuvat lihalajitelmat kannattaisi sijoittaa tunneliin. Lähtökohtana on ollut, että liha pitäisi saada 18 tunnissa alle -18 °C lämpötilan. Koska pakastettavien lihalajitelmien määrä on laaja, ne pitäisi saada laitettua tunneliin siten, että pakastustuloksesta tulisi mahdollisimman tasainen.

Lähtökohta oli, ettei pakastettavien tuotteiden pakastusajoista ollut juurikaan tarkkaa tietoa, jonka avulla olisi voinut lähteä suunnittelemaan oikeanlaista järjestystä. Tapa jolla pakastus oli katsottu olevan valmis, oli perustunut puhallus- ja paluuilman väliseen eroon. Kun ero oli ollut riittävän pieni, tuotteet oli otettu pois tunnelista. Pakastumisen varmistamiseksi lajitelmista oli mitattu lämpötilat kolmesta eri lavasta eri puolilta tunnelia. Mittaus oli suoritettu laatikon kyljestä.

Selvitystyö lähti liikkeelle selvittämällä eri lihalajitelmien pakastusaikoja, aluksi laskukaavaan perustuen sekä saatuihin loggerituloksiin. Alun optimismi pakastusaikojen lyhyteen vaihtui muutaman mittauskerran jälkeen huomattavasti pidempään pakastusaikaan ja matemaattiseen laskukaavaan uskomiseen. Mittausten edetessä kävi selväksi, kuinka suuri ero on eri lihalajitelmien pakastusaikojen välillä.

Koska olisi ollut liian hidasta mitata kaikki eri lihalajitelmat yksitellen eri lavapainoissa, päädyttiin vertailemaan lämpökameralla saatuja kuvia. Sen avulla vertailtiin kuvista saatuja lämpötila-arvoja eri pakastuskerroista. Samalla etsittiin kuvista yhtäläisyyksiä ja eroavaisuuksia. Tällä tavalla päästiin tavoitteeseen, jotta voitiin todeta, kuinka on optimaalisinta sijoittaa lavat tunneliin.

2 Pakastukseen liittyvää fysiikkaa

2.1 Lämpötila ja lämpömäärä

Useimmille on tuttu asia, että kaksi kappaletta on kiinni toisissaan, lopulta niillä on sama loppulämpötila, vaikka niiden alkulämpötilat ovat erilaiset. Silloin kun lämpöenergia pystyy siirtymään kappaleesta toiseen, nämä kappaleet ovat termisessä kontaktissa keskenään. Terminen tasapaino on taas tilanne, missä lämpöenergiaa ei enää siirry termisessä kontaktissa olevien kappaleiden kesken. Lämpötila voidaan ajatella ominaisuutena, joka määrää, onko kappale termisessä tasapainossa muiden kappaleiden kanssa. Lämpötilaa mitataan jollakin lämpömittarilla, joka perustuu tasapainolakiin. Lämpötilan SI-yksikkö on kelvin (K), mutta opinnäytetyössä käytetään celsiusastetta ($^{\circ}\text{C}$), joka on yksikön kelvin erityisnimi. (Inkinen & Tuohi, 2005, 353.)

Kun lämpömäärä virtaa kuumasta kappaleesta kylmään, siirtyy energiaa kuumasta kylmään kappaleeseen eli lämpömäärällä mitataan energian siirtymistä. Lämpömäärän yksikkö on joule (J). (Inkinen & Tuohi 2005, 379.)

Kun aineeseen tuodaan energiaa, aineen lämpötila nousee, mikäli samalla ei tehdä työtä. Oletetaan, että myöskään olomuodon muutosta ei tapahdu. Tietyn aineen määrän lämpötilan nostamiseksi jollakin määrällä vaaditaan aineesta riippuen eri energiamäärä. Esimerkkinä 1 kg vettä vaatii 1°C lämpötilan nousua varten 4,2 kJ, mutta jäälle riittää 2,1 kJ. Lämpökapasiteetti C määritellään energiamääräksi, joka tarvitaan nostamaan aineen lämpötila 1°C . (Inkinen & Tuohi, 2005, 380.)

Kun lämpökapasiteetti jaetaan aineen massalla, saadaan kullekin aineelle sille ominainen ominaislämpökapasiteetti (massalämpökapasiteetti) (c), jonka yksikkö on $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$. Mitä suurempi aineen ominaislämpökapasiteetti on, sitä enemmän energiaa pitää aineeseen massayksikköä kohti tuoda, jotta lämpötila saadaan muutettua. (Inkinen & Tuohi 2005, 381.)

Kun lihassa oleva vapaa vesi muuttuu jääksi, tapahtuu jähmettyminen. Tämä tapahtuu siten, että lihasta poistetaan energiaa lämpötilaa muuttamatta. Tätä lämpö määrää Q sanotaan latenttilämmöksi L . Koska vedellä on korkea latenttilämpö 334 kJ/kg, tämä vaihe pakastuksessa on eniten aikaa vievää ja energiaa kuluttavaa.

2.2 Lämmönsiirron mekanismit

Useat ruuanjalostamisen vaiheet sisältävät lämmönsiirtoa tai sen poistamista tuotteeseen ja se voi tapahtua kolmella eri tavalla: konvektiolla, johtumisella, säteilemällä tai näiden yhdistelmällä. Pakastaminen on näiden kolmen yhdistelmä, jossa konvektiolla ja johtumisella on tärkein merkitys. Säteilyn merkitys on lähinnä marginaalinen.

2.2.1 Konvektio

Nesteet ja kaasut eivät ole kovinkaan hyviä lämmön johteita, mutta ne voivat siirtää lämpöenergiaa varsin nopeasti kuljetuksen avulla. Konvektio eli kuljetus on prosessi, jossa siirretään lämpöenergiaa virtaamaan päässeeseen aineen mukana paikasta toiseen. Tässä tapauksessa lämpöenergiaa siirretään tuotteen pinnasta ilman mukana lämmönvaihtimelle. (Inkinen & Tuohi 2005, 382)

Konvektion sanotaan olevan vapaata eli luonnollista, jos ainevirtaus tapahtuu tiheyserojen seurauksena. Esimerkkinä vapaasta konvektiosta on järvivesien jäähtyminen. Jäähtynyt pintavesi vajoaa tiheämpänä alas. Kierro jatkuu aina +4 °C lämpötilaan asti, jolloin konvektio ei enää vaikuta. Konvektio muuttuu pakotetuksi, jos tapahtumaan lisätään jokin laite. Esimerkiksi pakastustunneleissa käytetään puhaltimia lisäämään tuulen nopeutta. (Inkinen & Tuohi 2005, 382)

2.2.2 Johtuminen

Kun hopealusikalla sekoittaa kuumaa kaakaota voi hetken kuluttua todeta myös kädessä olevan lusikan pään lämpenevän, vaikka se ei ole ollut suorassa kosketuksessa aineeseen. Lämpöenergian sanotaan johtuneen kuumasta päästä kylmään. Lämpöenergian johtuminen aineissa voidaan ajatella olevan seurausta molekyylien törmäyksistä. Kuumennettavassa kohdassa, molekyylit alkavat liikkua nopeammin ja värähdysliike kasvaa. Törmäyksissä hitaisiin molekyyleihin, siirtyy niihin energiaa ja niiden nopeus kasvaa. Näin energia siirtyy yhä kauemmaksi lopulta koko lusikkaan. (Inkinen & Tuohi 2005, 383)

Metallit ovat perinteisesti hyviä johtamaan lämpöä, kun taas eristeet johtavat huonosti. Vedellä on korkea lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti, kun vertaa muita lihassa esiintyviä ainesosia (katso taulukko 1 ja 2). Lihan jäätyminen kuitenkin nopeutuu huomattavasti, kun vapaan veden määrä pienenee tuotteessa, koska jään lämmönjohtokyky on lähes nelinkertainen veteen verrattuna. Tästä syystä laatikon keskellä oleva kohta alkaa jäätyä nopeasti kun sisälämpötila on ohittanut -5 °C lämpötilan (katso kuvio 15). (Inkinen & Tuohi 2005, 383)

Taulukko 1. Eri aineiden ominaislämpökapasiteetteja.

Ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg·°C)	
Vesi	4,18
Jää	2,05
Rasva	1,93
Proteiini	1,71
Hiilihydraatit	1,55
Sianliha	2,85
Naudanliha	3,42

Taulukko 2. Eri aineiden lämmönjohtavuuksia.

Lämmönjohtavuuksia (W/m·°C)	
Vesi (0 °C)	0,55
Jää	2,22
Rasva	0,177
Proteiini	0,199
Hiilihydraatit	0,204
Ilma (0 °C)	0,023

2.2.3 Säteily

Kaikki kappaleet lähettävät pinnaltaan eli emittoivat jatkuvasti energiaa sähkömagneettisena säteilynä. Tällainen säteily on tuttua vaikkapa leivänpaahtimesta tai

sähkölämmittimestä. Säteily eroaa muista energian etenemismuodoista siinä, ettei se tarvitse siirtymiseen mitään väliainetta. Tästä esimerkkinä on auringon maapal-
lolle tuottama lämpöenergia.

Samalla kun kappale emittoi ympäristöönsä lämpösäteilyä, se myös absorboi ympäristöstä sähkömagneettista säteilyä. Jos näin ei tapahtuisi, kappale säteilisi pois kaiken energiansa ja sen lämpötila laskisi absoluuttiseen nollapisteeseen. Osa kappaleeseen tulevasta säteilystä heijastuu. Jotkut aineet voivat läpäistä sähkömagneettista säteilyä, mutta vain imeytynyt osa voi lämmittää ainetta. Lämpösäteilyllä on tärkeä merkitys korkeissa lämpötiloissa. (Inkinen & Tuohi, 2005, 383.) Vaikka opinnäytetyö käsittelee pakastusta, lämpösäteilyllä on merkitystä selvitystyössä käytetyn lämpökameran takia.

2.2.4 Lämpökamera

Lämpökamera mittaa ja kuvaa kohteen lähettämää infrapunasäteilyä. Kamera pysyy laskemaan ja näyttämään kohteen lämpötilan, koska sen vastaanottaman säteilyn määrä riippuu kohteen pintalämpötilasta. Kameran mittaamaan säteilyn määrään ei yksin vaikuta kappaleen lämpötila, vaan myös sen säteilykyky eli emissiivisyys. Osa kohteen heijastamasta säteilystä on peräisin ympäristöstä. Itse kohteesta peräisin olevan ja siitä heijastuvan säteilyn määrään vaikuttaa myös ilman absorptio. (Flir system reference manual 2007, 201.)

Emissiivisyys on tärkein korjausparametri, eli se, miten paljon säteilyä kappale lähettää verrattuna saman lämpöiseen täydellisen mustan kappaleen lähettämään säteilyyn. Tavallisesti kohteen emissiivisyys vaihtelee 0,1 ja 0,95 välillä. Mitä kiiltävämpi pinta, sen alhaisempi on emissiivisyys. (Flir System reference manual 2007, 201) Lämpökameran kuvauksissa käytetty emissiivisyys oli 0,95.

2.2.5 Rajapinnat

On havaittu, että lämpöenergian siirtymisen nopeus ympäröivästä virtaavasta aineesta, nesteestä tai kaasusta varsinaiseen aineen pintaan riippuu pinnan laadus-

ta jopa asennosta, virtaavasta aineesta sekä virtausnopeudesta. Opinnäytetyössä käytössä olevalla laatikolla on kaiken kaikkiaan kolme rajapintaa jotka täytyy ylittää ennen kuin kylmyys pääsee itse tuotteeseen asti.

2.3 Phamin-yhtälö ja pakastusajan laskeminen

On tärkeää tietää pakastusaika tietylle elintarvikkeelle, jotta voidaan varmistaa pakastettavan tuotteen laatu. Pakastuksen aikana ruuan sisällä liikkuu kohta, joka erottaa jäätyneen kerroksen jäätymättömästä ruuasta. Lämpöä syntyy kun kylmä kerros kohtaa jäätymättömän kerroksen ruuan sisällä, jolloin latenttilämpö vapautuu. Tämä lämpö siirtyy johtamalla jäätyneen kerroksen läpi pintaan, jonka jälkeen kovektion avulla rajakerroksen läpi jäähdytysaineeseen. (Fellows 2009, 654)

$$t = \frac{d_c}{E_f h} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta \theta_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta \theta_2} \right) \left(1 + \frac{N_{Bi}}{2} \right) \quad (1)$$

jossa

d_c (m) = matka tuotteen keskelle,

E_f = muodon kerroin, joka on laatalla arvo 1,

h = pakastimen lämmönsiirtokyky.

$$\Delta H_1 = \rho_c C_u (\theta_i - \theta_{fm}) \quad (2)$$

jossa

ρ_c (kg m⁻³) = jäätymättömän aineen tiheys,

C_u (J kg⁻¹ °C⁻¹) = Jäätymättömän aineen ominaislämpökapasiteetti,

θ_i ja θ_{fm} = alkulämpötila ja keskimääräinen materiaalin jäätymislämpötila.

$$\Delta H_2 = \rho_f [\lambda_f + c_f (\theta_{fm} - \theta_c)] \quad (3)$$

jossa

ρ_f (kg m⁻³) = Jäätyneen aineen tiheys,

λ_f (kJ kg⁻¹) = ruuan yhdistelmän latenttilämpö, joka suoraan verrannollinen ruuan kosteuspitoisuuteen

θ_c = keskellä olevan ruuan loppulämpötila.

$$\Delta \theta_1 = [(\theta_i - \theta_{fm})/2] - \theta_a$$

$$\Delta \theta_2 = \theta_{fm} - \theta_a \quad (4)$$

$$\theta_{fm} = 1,8 + 0,263\theta_c + 0,105\theta_a$$

jossa

θ_{fm} (°C) = Keskimääräinen materiaalin jäätyislämpötila

θ_a (°C) = jäähdytysaineen lämpötila.

$$N_{bi} = \text{Biotin luku} = (hd_c)/k_u \quad (5)$$

jossa

k_u = jäätyneen tuotteen lämmönjohtokyky, lihalla se on noin 1,6 W/m · C.

Kun käyttää yhtälöä pakastusaikojen arviointiin, suurimmat muuttujat ovat lihan latenttilämpö, jäähdytysaineen lämpötila ja ilmapuhalluksen lämmönsiirtokyky. Jos muuttaa lihan kosteuspitoisuutta 5 % -yksikköä, pakastusaika lisääntyy tunnilla. Jos nostaa pakastuslämpötilaa yhdellä asteella, pakastusaika lisääntyy noin 30 minuuttia. Jos pakastuslaitteiston lämmönsiirtokyky laskee 30:stä 25:een (W/m °C), pakastusaika kasvaa noin 2 tuntia. Muilla muuttujilla, kuten tuotteen loppulämpötilalla, on vain marginaalinen merkitys pakastusaikaan, koska suurin osa ajasta kuluu, että tuotteen lämpötila saadaan laskettua alle -3 °C:een.

3 Lihan pakastaminen

3.1 Yleistä

Pakastus on tapa säilöä tuotteita pitkään kuitenkin aiheuttamatta suuria muutoksia tuotteen laatuun ja ravintoarvoihin. Pakastuksen idea on laskea lämpötila mahdollisimman nopeasti alle -18 °C lämpötilaan. Pakastusnopeutta pidetään riittävänä, jos jäätyminen etenee yhden senttimetrin tunnissa. (Leino 2007, 40.) Lihan jäätyessä sen vesi muuttuu kiinteiksi jääkiteiksi ja se laajenee. Jääkiteiden terävät reunat työntyvät ympäröivään kudokseen, rikkoen lihassolukkoa. Mitä nopeammin lihan lämpötilaa saadaan laskettua, sitä pienemmiksi jääkiteet muodostuvat. Tästä seurauksena lihaa sulatettaessa siitä irtoaa vähemmän nestettä, mikä pienentää sulamishävikkiä. (Potter & Hotchkiss 1995, 179.)

Säilyvyys saavutetaan matalan lämpötilan avulla, joka vähentää biokemiallisia muutoksia. Sekä entsyymien ja mikrobien aktiivisuutta sekä veden aktiivisuutta (aw). Pakastuksessa nämä aiheuttavat vain pieniä muutoksia ravintoarvoihin sekä laatuun, edellyttäen että pakastus, säilytys ja sulatus on tehty oikein, kun tuote otetaan uudelleen käyttöön. (Fellows 2009, 650.) Kuviossa 2 on pakastusaika jaettu kolmeen osioon.

3.2 Lihan kemiallinen koostumus

Lihan kemiallinen koostumus vaihtelee eläinlajin, eläimen iän, lihakkuuden sekä ruhonosan mukaan. Rasvattomassa lihassa on vettä noin 75 %. Lihan rasvapitoisuus vaihtelee eläinlajista ja ruhonosasta riippuen ja voi olla 1 - 30 %. Lihan vesi- ja rasvapitoisuus ovat toisistaan riippuvaisia. Vesi- ja rasvapitoisuuksien osuudet voi laskea seuraavasti: vesipitoisuus (%) + rasvapitoisuus (%) = 80 %. (Leino 2007, 27)

Lihasten valkuaisainepitoisuus on 18 – 24 % ja sidekudosvalkuaisen määrä 0,5 - 4 %. Eri eläinlajeilla ja eri ruhonosissa sidekudospitoisuus vaihtelee suuresti. Ruhon

arvo-osissa sidekudoksen osuus on pienin. Hiilihydraatin osuus lihaskudoksessa, joka on eläintärkkelystä eli kollageenia, on noin 1 %. Myös kivennäisainepitoisuus on noin 1 %. (Leino 2007, 27.)

3.3 Pakastukseen vaikuttavia tekijöitä

Vaikutukset pakastusnopeuteen voidaan jakaa yleisesti kahteen muuttujaan. Pakotevoima, joka jaetaan lämmönsiirtoa vastustavien asioiden summalla. Pakotevoima on tässä tapauksessa lämpötilaero tuotteen ja jäähdytysaineen välillä. (Potter & Hotchkiss 1995, 185) Lämmönsiirtoon vaikuttavat,

- tuotteen lämmönsiirtokyky
- pinta-ala, josta lämpö pystyy siirtymään
- matka, jonka lämmön täytyy siirtyä tuotteessa
- lämpötilaero tuotteen ja jäähdytysaineen välillä
- rajapinnan eristävä vaikutus, jonka paikallaan oleva ilma luo tuotteen ympärille
- mahdollinen pakkaus, joka on lämmönsiirtoa heikentävä este.

Lihan ainesosilla, kuten kaikilla muillakin materiaaleilla, on erilaiset lämmönjohtokyvyt, jotka muuttuvat kun lämpötila muuttuu. Mitä parempi johtokyky on, sitä nopeampi on jäähdytys- ja pakastusnopeus. Veden lämmönjohtokyky, joka on keskeinen lihan pakastamisessa, muuttuu vain vähän ennen vaihetta, kun vesi muuttaa olomuotoaan jääksi. Koska jään lämmönjohtokyky 2,22 (W/m·°C) on paljon suurempi kuin veden, pakastus nopeutuu huomattavasti, kun se läpäisee kriittisen alueen (katso kuvio 1). Tällä alueella suurin osa vedestä muuttuu vapaasta kiinteään olomuotoon, jolloin lämmönjohtokyky kasvaa ja tuote luovuttaa lämpöä nopeammin pois. (Fellows 2009, 656.)

Ilman nopeus on myös merkittävä tekijä ilmapakastuksessa. Suurempi puhallusnopeus pienentää tuotteen pintaan syntyvää eristävää ilmakalvoa. Näin konvektio

pystyy vaikuttamaan paremmin tuotteen pinnassa ja lämpö siirtyy nopeammin jäähdytysaineeseen. Levypakastuksessa jäähdytysaineen kiertonopeus levyjen välissä vaikuttaa pakastusnopeuteen. Myös tuotteen muoto vaikuttaa pakastukseen, siten kuinka suurelle alueelle puhallus osuu tai metallilevyjen pinta koskettaa. Ilmapakastuksessa puhallus tulee usein samasta suunnasta. Mitä suurempi alue on kohti puhallusta, sitä nopeammin tuote pakastuu. (Potter & Hotchkiss 1998, 185.)

Mitä vähärasvaisempi tuote on, sitä suurempi merkitys sillä on pakastusaikaan, kun vertaa laskukaavassa käytettäviä arvoja. Suurimmillaan yhden asteen ero tuotteen pakastuslämpötilassa voi merkitä jopa yhtä tuntia pidempää pakastusaikaa.

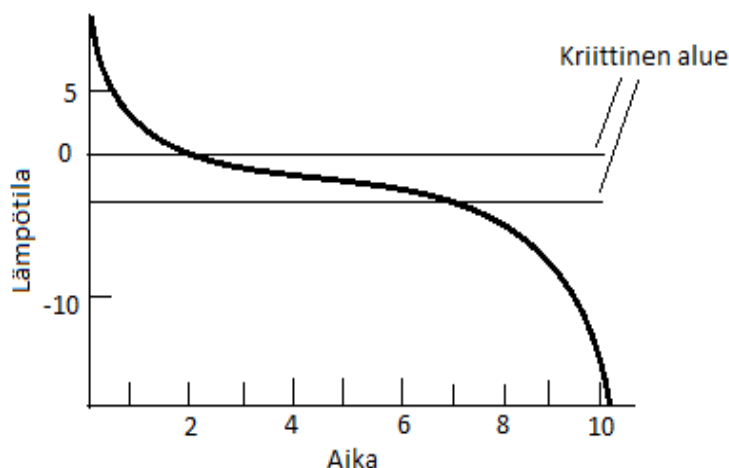
3.4 Solutasolla tapahtuvia muutoksia pakastettaessa

3.4.1 Jääkiteiden muodostus

Kun tuotteen pakastaminen alkaa, ensiksi tuotteesta poistuu ylimääräinen lämpö eli lämpö, joka on jäätymispisteen yläpuolella. Seuraavassa vaiheessa latenttilämpö poistetaan tuotteesta. Lopuksi pakastuksessa alkaa viimeinen vaihe eli kohmetuminen. Koska lihaskudoksessa on suhteellisen korkea vesipitoisuus, tarvitaan suhteellisen suuri määrä energiaa, jotta lämpösisältö ja latenttilämpö saadaan poistettua ja jääkiteitä alkaa muodostua. Myös muiden lihan ainesosien, kuten rasvan, latenttilämpö pitää poistaa. Usein niiden määrät ovat verrattain pieniä ja ne tarvitsevat suhteessa vähemmän energiaa lämmön poistamiseen. (Fellows 2009, 651.)

Tuotteen jäätymispiste voidaan kuvata lämpötilan hetkenä, jolloin jääkiteet ovat tasapainossa ympäröivän veden kanssa. Ennen kuin jääkiteet voivat muodostua, vesimolekyylit pitää kuitenkin olla läsnä. Jääkiteiden muodostus alkaa, kun tuote saavuttaa jäätymispisteensä, joka on lihalla noin -1,70 ja -2,2 asteen välillä. (Fellows 2009, 651.)

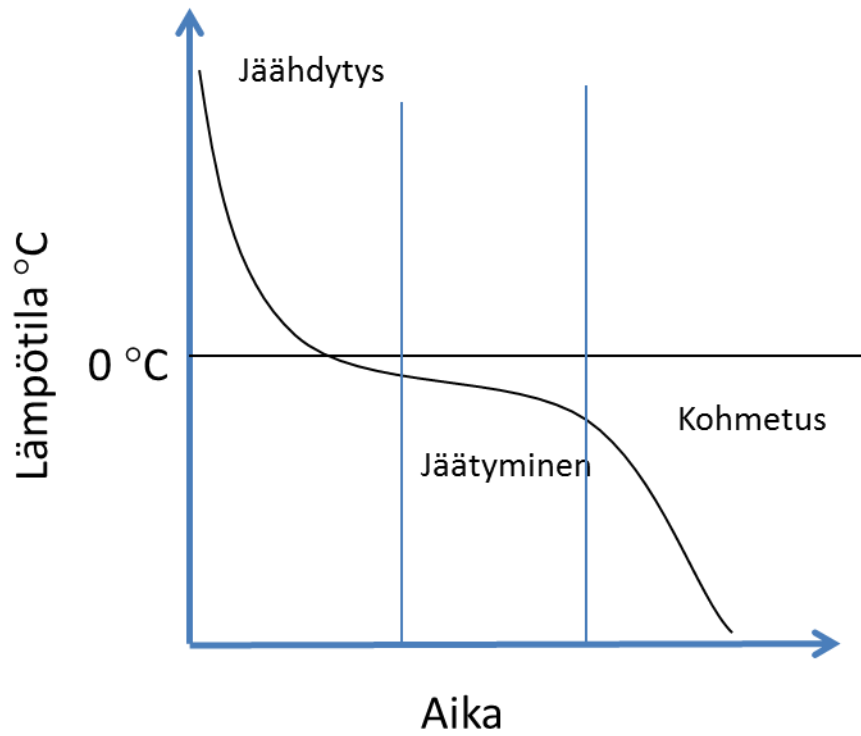
Kaikkien ravintoaineiden solut sisältävät muun muassa hiilihydraatteja ja suoloja, jotka vaikuttavat niiden jäätyiskäyttäytymiseen. Vettä löytyy niin solun sisältä kuin solun ulkopuolelta. Solun ulkopuolisella nesteellä on matalampi liuenneiden aineiden väkevyys ja tästä syystä jääkiteet muodostuvat siellä ensiksi. Se aika, joka ruuan lämpötilalla kuluu kriittisellä alueella (katso kuvio 1), kutsutaan jäätymisajaksi. Se määrää sekä jääkiteiden koon että lukumäärän. (Fellows 2009, 652.)



Kuvio 1. Lämpötilan kulku pakastuksen yhteydessä.

3.4.2 Liuenneiden aineiden pitoisuus

Jäätymisen edetessä liuenneiden aineiden pitoisuuksien kasvu aiheuttaa muutoksia vapaan nesteen pH:oon, viskositeettiin, pinnan jännityksiin ja hapetuspelkistymiseen. Kun lämpötila laskee, yksittäiset solut saavuttavat kyllästymispisteen ja kristallisoituvat. Lämpötila, jossa liuenneiden aineiden jääkiteet esiintyvät tasapainossa jäätyttömän aineen ja jään kanssa, sanotaan eutektiseksi lämpötilaksi. Esimerkiksi lihatuotteilla on vaikea määrittellä tarkkaa eutektista lämpötilaa, koska ne ovat monimutkaisten liuenneiden aineiden yhdistelmiä. Tällaisilla tuotteilla sitä kutsutaan lopulliseksi eutektiseksi lämpötilaksi. Lihalla tämä on noin -50 °C ja -60 °C lämpötilan välillä. Tällöin voidaan sanoa että tuote on lopullisesti jäätynyt, koska jääkiteitä ei enää muodostu. Kaupallisissa tuotteissa ei näin alhaisia lämpötiloja käytetä, minkä takia niistä löytyy aina vapaata vettä. (Fellows 2009, 654.)



Kuvio 2. Pakastus jaettuna kolmeen eri vaiheeseen. Jäätymisen aikana lämpötilan muutos on pienin, mutta vapautuva lämpöenergia suurin.

4 Lihan pakastusmenetelmät

4.1 Yleistä

Pakastamisella tarkoitetaan tuotteen nopeaa lämpötilan alentamista alle -18 °C :n. Kylmän avulla pystytään helposti pilaantuvia ruoka-aineita varastoimaan siten, että niiden laatu ja ravintoarvot eivät kärsi. Tästä syystä pakastaminen on yksi parhaisista säilöntämenetelmistä. (Leino ym. 2009, 39.)

Pakastusmenetelmät voidaan jakaa kahteen luokkaan, mekaaniseen ja kryogeeniseen pakastukseen. Mekaanisessa pakastuksessa jäähdytysaine höyrystyy ja tiivistyy jatkuvassa kierrossa, jossa aineina käytetään jäädetytettyä ilmaa, jäähdytettyä nestettä tai jäähdytettyjä pintoja. Vastaavasti kryogeenisessä pakastuksessa käytetään joko kiinteää tai nestemäistä hiilidioksidia tai nestemäistä typpeä, jotka ovat suorassa kosketuksessa tuotteen kanssa. (Fellows 2009, 661.) Pakastusmenetelmien jakona voidaan käyttää jossain tapauksissa myös suoraa- ja epäsuoraa pakastusta. Epäsuorassa pakastuksessa kylmäaine siirretään tuotteeseen väliaineen välityksellä. (Heldman & Lund 1992, 305.)

Yleisesti ottaen mekaanisten pakastimien käyttölämpötila on noin -40 °C ja sijoitettu pääoma on suurempi, mutta käyttökustannukset pienemmät, kun vertaa kryogeenisiin pakastimiin. Kryogeenisten pakastimien investointi on halvempaa, mutta käyttökustannukset suuremmat, koska jäähdytysainetta ei pystytä kierrättämään, vaan se haihtuu ilmaan. Kryogeeniset pakastimet toimivat yleensä $-70 - 196\text{ °C}$ lämpötilan välissä. (Fellows 2009, 661)

Pakastusmenetelmät voidaan vielä ryhmitellä jäätyminenopeuteen ja -etenemiseen tuotteessa. Hitaassa pakastuksessa jäätyminenopeus on $0,2\text{ cm}$ tunnissa. Nopeassa pakastuksessa jäätyminen etenee $0,5 - 3\text{ cm}$ tunnissa. Pikapakastuksessa nopeus on $5 - 10\text{ cm}$ tunnissa. Ultranopeassa pakastuksessa jäätyminen eteneminen on $10 - 100\text{ cm}$ tunnissa. (Fellows 2009, 661.)

4.2 Mekaaninen pakastus

4.2.1 Ilmapakastus

Perinteinen ilmapakastin on kaappipakastin, jossa paikallaan olevan tai luontaisesti kiertävän ilman lämpötila on - 20 ja - 30 °C välillä. Tällaisia pakastimia ei käytetä kaupalliseen tarkoitukseen pitkien pakastusaikojen vuoksi, koska se ei ole taloudellisesti järkevää ja se heikentää pakastettujen tuotteiden laatua. Täpäntyyppisiä pakastimia käytetään vain tuotteiden varastointiin, kun tuotteet ovat jäätyneet. Suurin ongelma pakkassäilytyksessä on jään keräytyminen lattialle, seiniin ja lämmönvaihtimiin. (Fellows 2009, 662)

Lihan pakastuksessa käytetään yleisemmin pakastustunneleita, joissa lämpö kuljetetaan ilmapvirran avulla pois tuotteesta. Pakastettavat tuotteet siirretään kuljetuskehikoissa, kuormalavoilla tai kuljetushihnalla pakastustunneliin. Voimakkaassa noin 1,5–6,0 m/s puhallusnopeudessa, ja 30–40 miinusasteen lämpötilassa saavutetaan riittävä pakastusnopeus. Suuri puhallusnopeus vähentää ruokien ympärillä olevaa ilmakalvoa ja parantaa tuotteen lämmönsiirtokykyä. (Fellows 2009, 662) Jos lihalajitelmia pakastetaan muovikalvolla vuoratuissa aaltopahvilaatikoissa, on kerrosten väliin on laitettava ritilät, jotta ilma kiertäisi niiden välissä ja pakastustulos olisi tasainen. (Leino 2007, 40.)

Puhalluspakastus on suhteellisen edullinen tapa pakastaa ja se sopii useiden erimuotoisten ja kokoisten tuotteiden pakastukseen. Laitteet ovat hyvin kompaktin kokoisia ja niiden pääomakustannukset ovat matalat, mutta kuitenkin mahdollistavat suuret pakastusmäärät. Ongelmana voidaan pitää pakkaamattomista tuotteista vapautuvaa kosteutta, joka kerääntyy jäänä jäähdytyspakoille. Lisäksi suuri ilman kierto voi aiheuttaa tuotteiden kuivumista. (Fellows 2009, 662.)

4.2.2 Levypakastus

Levypakastimet sisältävät vaakaa tai pystyasossa olevia levyjä, joita voi olla jopa 24 kappaletta. Levyt ovat 2,5–5 cm paksuja ja onttoja, ja ne valmistetaan ruostu-

mattomasta teräksestä tai alumiinista. Nestemäinen kylmäaine kiertää levyjen sisällä höyrystyen ja sitoen itseensä lämpöä.

Tämän tyyppisessä pakastuksessa käytetään tietyinkokoisia pakkauksia, jotka asetetaan kahden metallilevyn väliin. Levyt puristetaan kiinni siten, että niiden pinnat osuvat pakkauksen ylä- ja alapintaan, jolloin saadaan hyvä kontakti pakkauksen ja levyjen välille. Metallilevyissä kiertää kylmäaine, joka siirtää lämmön tuotteesta. Tämän etu ilmapuhallukseen on, että saadaan minimoitua kosteuden häviäminen pakastuksen yhteydessä. (Ramaswamy & Marcotte 2006, 210.) Ongelmana voidaan pitää, että pakastus sopii vain tasapintaisille tuotteille. (Heldman & Lund 1992, 307.) Levypakastusta voidaan pitää epäsuorana pakastuksena.

4.2.3 Upotuspakastus

Upotuspakastuksessa tuote, joka voi olla pakattu tai pakkaamaton, upotetaan jäähdytysaineeseen. Tämä pakastusmenetelmä kohtalaisen nopea, koska lämmönsiirto on nopeampaa nestemäisen pakastusaineella avulla kuin ilman välityksellä. Useimmin upotuspakastuksessa käytetyt nestemäiset aineet ovat propyleeniglykoli, glyseriini, natriumkloridi ja kalsiumkloridi. (Ramaswamy & Marcotte 2006, 210.) Upotuspakastus on yksi suorista pakastusmenetelmistä. Siinä kylmäaine on suorassa kosketuksessa tuotteeseen.

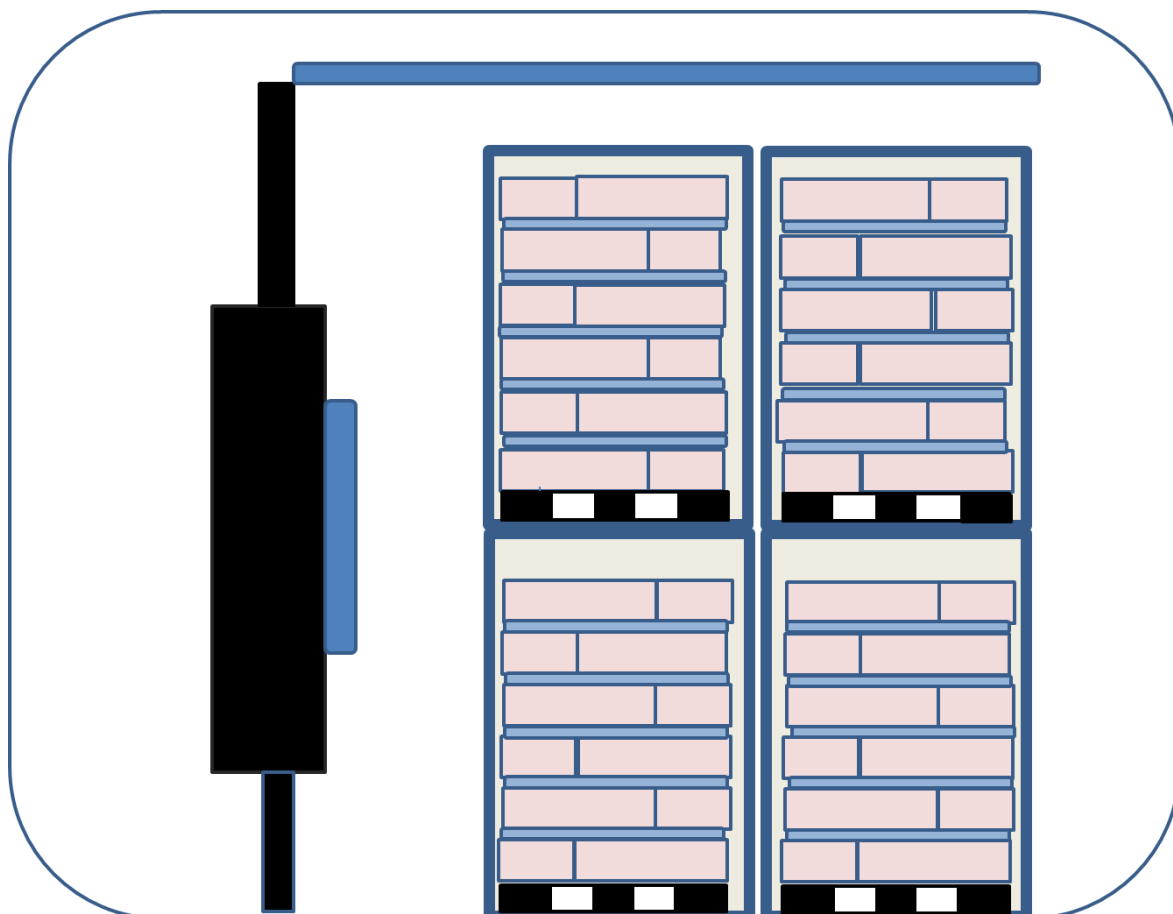
4.3 Kryogeninen pakastus

Kryogeninen pakastus tarjoaa todella nopean pakastuksen siinä käytettävän kylmäaineen takia. Yleisesti käytettävät aineet ovat nestemäinen typpi ja kiinteä tai nestemäinen hiilidioksidi. Nestemäinen typpi kiehuu -196 °C :n lämpötilassa, kun taas kiinteä hiilidioksidi sublimoituu -79 °C . Sublimoituminen, jossa hiilidioksidi muuttuu suoraan kiinteästä kaasuksi, pystyy absorboimaan kolme kertaa niin paljon latenttilämpöä kuin nestemäinen typpi. (Ramaswamy & Marcotte 2006, 211.)

5 Käytössä oleva toimintatapa

Yritys käyttää ilmapakastusmenetelmää, jossa kylmä ilma puhalletaan suoraan edestäpäin lavoihin. Lämmennyt ilma kiertää yläkautta takaisin lämmönvaihtimelle. Käytössä on kolme toiminnaltaan samanlaista, mutta kapasiteetiltaan erilaista tunnelia. Lavapaikkoina laskettuna tunnelit ovat kooltaan 12-, 16- ja 32-paikkaisia. Yhdelle lavalle mahtuu keskimäärin 750 kg. Eli kiloina laskettuna tunnelit ovat kooltaan 9000 kg, 12000 kg ja 24000 kg. Kuviossa 3 on esitetty sivuprofiili pakastustunnelista.

Pakastettavat tuotteet, jotka ovat sian ja naudan eri lajitelmiä, pakataan tehtaalla pahvilaatikoihin. Nämä pinotaan omille lavoilleen siten, että jokaiseen kerrokseen tulee viisi laatikkoa. Yhteen lavaan voidaan laittaa enintään kuusi kerrosta, ja joka kerroksen väliin tulee muovinen ritilä, jotta ilma saadaan kiertämään mahdollisimman hyvin. Lavana käytetään FIN-lavaa, joka on kooltaan millimetreinä 1200 x 1000. Pahvilaatikon mitat ovat 600 x 400 x 200. Tästä syystä laatikot voidaan laittaa lavalle vain yhdellä tavalla (katso kuvio 4b)), eli kolme laatikkoa poikittain ja kaksi pitkittäin. Jotta lava pysyy tasapainossa, joka toinen kerros laitetaan edellisen peilikuvana.



Kuvio 3. Pakastustunnelin sivuprofiili.

5.1 Tämänhetkinen täyttötapa

Tällä hetkellä ohjeistuksena on että arvokkain, eli naudanliha, täytyy saada nopeimmin oikeaan lämpötilaan ja siksi se sijoitetaan eturiviin. Olettamuksena on ollut, että naudanliha jäätyy sianlihaa nopeammin. Asia on usein päinvastainen, koska nauta sisältää useammin vähemmän rasvaa, riippuen tietenkin lihalajittelusta. Kuten alussa mainittiin, lihan ja kaikkien muidenkin elintarvikkeiden pakastuksen tärkein vaihe on veden jäätyminen. Koska veden ominaislämpökapasiteetti on suhteessa korkeampi kuin muilla ainesosilla, se on silloin vaikeinta saada jäätymään.

Vaikuttaa kuitenkin siltä, että kuormien saapuessa ei mitään suurempaa lajittelua lavojen välillä tehdä, vaan lavat nostellaan kehikoihin sitä mukaan kun kuormaa puretaan. Ainoa lajittelu lavapaikkojen välillä tapahtuu, kun lavat laitetaan tunne-

liin. Mutta siinä vaiheessa lajittelulla on enää hyvin vähäinen merkitys, koska samassa lavapaikassa saattaa olla hitaimmin ja nopeimmin jäätyvät lavat.

5.2 Optimaalisen täytön reunaehdot

Opinnäytetyö on rajattu pelkästään lavoilla tehtävään pakastustunnelin optimointiin, vaikka ilmapakastuksessa myös puhallusnopeudella ja jäähdytysaineen lämpötilalla on suuri merkitys. Kuitenkin edellä mainitut parametrit ovat sellaisia joihin ei pysty vaikuttamaan.

Jotta pystyy optimoimaan tunnelin lavoilla, on selvittävä kolme asiaa. Ensiksi millainen pakastusnopeus on eri lihalajitelmilla. Toinen selvittävä asia on, kuinka suuri vaikutus on lavan sijainnilla pakastusnopeuteen. Kolmas asia on, mitä kannattaa tehdä, jos tunneli ei ole täynnä.

Tavoitteena olisi saada aikaan tunneliin tasainen ilmavirtaus, jolloin teoriassa pakastusnopeus olisi myös tasainen. Tällaiseen tilanteeseen ei voi tietenkään päästä, koska jokainen lava ja laatikko aiheuttavat turbulenssia ilmavirtaan. Lisäksi ensimmäiseen rivin laatikoihin osuva ilmavirta on aina kylmempää kuin viimeisiin laatikoihin osuva ilmavirta, koska ilma on ehtinyt matkalla sitoa lämpöä itseensä.

5.2.1 Lihalajitelmat

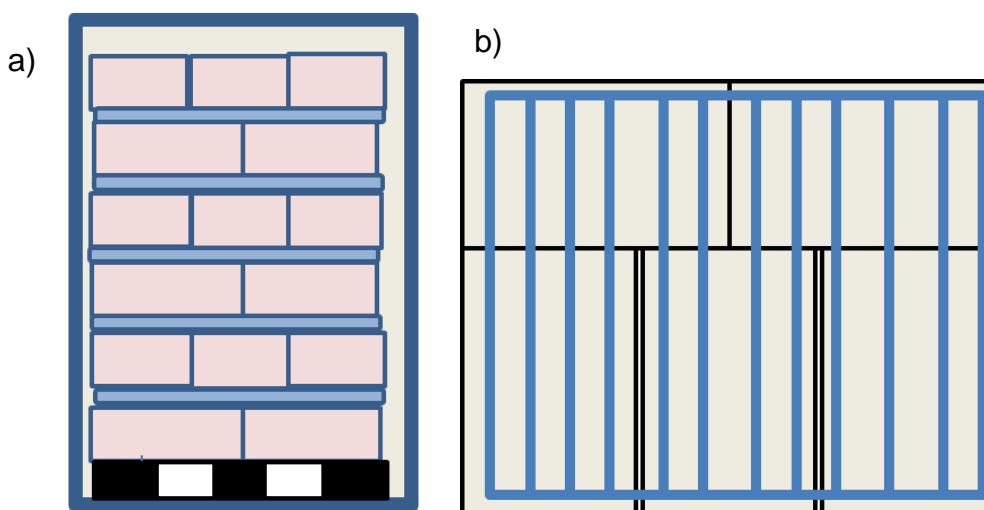
Kuten teoriaosuudessa on mainittu, lihan koostumuksella on merkitystä pakastusaikaan. Suurin yksittäinen merkitys on lihan vesipitoisuudella. Vähärasvaisen lihan vesipitoisuus on noin 75 %, kun taas rasvaisella lihalla se on noin 60 %. Eli mitä rasvaisempaa liha on, sitä vähemmän siinä on vapaata vettä. Phamin muunneltua yhtälöä apuna käyttäen on saatu laskettua suuntaa antavia pakastusaikoja ihan-teellisissa olosuhteissa.

Samankokoiset, lihaa sisältävät laatikot, joiden korkeus on 200 mm, pakastetaan samanlaisissa olosuhteissa. Toinen nautalaatu sisältää vettä 75 % ja toinen 60 %.

Suuremman vesimäärän sisältämän laatikon pakastusaika oli yli 18 tuntia ja laatikon, jonka lihan vesipitoisuus on 60 %, pakastusaika on noin 14,5 tuntia.

5.2.2 Lavan sijainti

Vaikka puhaltimet sijaitsevat samalla korkeudella tunnelissa, noin puolessa välissä, siten että niiden puhallus osuu suurin piirtein kaikkiin eturivin lavoihin tasaisesti. Ongelmana on, ettei puhallus ole takariviin yhtä voimakas, koska eturivi estää ilman vapaan virtauksen. Osasyyn tähän on lavoissa, jotka pinotaan liian tiiviisti, siten ilma ei pääse kiertämään tarpeeksi. Kuviossa 4 a) on sivuprofiili lavasta, sekä kuviossa 4 b) yksi kerros on kuvattu yläpuolelta. Siitä näkee, kuinka tiiviisti laatikot joudutaan laittamaan lavalle. Jos laatikoiden väliin jäisi riittävästi, tai edes jonkin verran tilaa, ilmavirta osuisi laatikon kaikkiin pintoihin, mikä nopeuttaisi pakastumista tai ainakin tasoittaisi sitä. Kuviossa 4 b) näkee, että joka kerroksessa keskellä olevan laatikon pinnoista vain puolet on suorassa kosketuksissa ilmavirran kanssa. Muissa laatikoissa yhden kolmasosan pinnat eivät ole suorassa kosketuksessa ilmavirran kanssa. Lisäksi normaalissa tapauksessa laatikon kannen ja lihan väliin jää eristävä ilmakerros, koska laatikkoa ei voida pakata ihan täyteen asti. Tämäkin hidastaa jäätymisprosessia.



Kuvio 1. Kuviossa 4 a) lava kuvattuna sivulta. Kuviossa 4 b) kerros kuvattuna yläpuolelta.

6 Ongelmien selvittäminen

Tunneleiden vajaatäyttö vaikutti heti alkuun ongelmallisimmalta ratkaista, koska pakastukseen saapuvien kuormien lavamäärät vaihtelevat paljon. Tämä vaikeuttaa selvitystyötä, koska yhdenkään pakastuksen lavamäärä ei ole sama, joten suoria vertailukohtia eri pakastusten välillä on mahdotonta saada. Tunneleiden vajaatäytössä vaikutti kaksi tapaaärkevimmiltä vaihtoehdoilta tutkia:

1. takarivi täyteen, eturivi vajaaksi
2. eturivi täyteen, takarivi vajaaksi.

Koska lihalajitelmien pakastusajoissa pitäisi olla merkittäviä eroja, niin selvitys lähti liikkeelle niiden pakastumisaikoja mittaamalla. Lämpötilaloggereiden avulla selvitettiin jäätyminenopeutta eri lihalajeille tietyssä lavapaikassa. Näiden avulla sekä vertaamalla Phamin-yhtälöstä saatuja teoreettisia arvoja, on mahdollista saada suuntaa antava pakastumisaika useimmille lajitelmille. Sen jälkeen tuotteet voidaan lajitella pakastusnopeuteen perustuvaan järjestykseen.

Lämpökameran avulla lähdettiin selvittämään ilman kiertoa. Millaisia eroja on lämpötiloissa eri lavapaikoilla, kun lavat otetaan pois pakastuksesta. Näiden arvojen pohjalta tehdään taulukko, josta selviää kuvien perusteella kylmimmät lavapaikat. Lisäksi laatikoiden ulkopuolelle sijoitettiin lämpötilaloggereita mittaamaan lämpötiloja eri puolilla tunnelia. Tämä auttaa selvittämään, millaisia lämpötilaeroja on etu ja takarivien välillä.

7 Mittaustuloksia

7.1 Tuotteiden pakastusnopeus

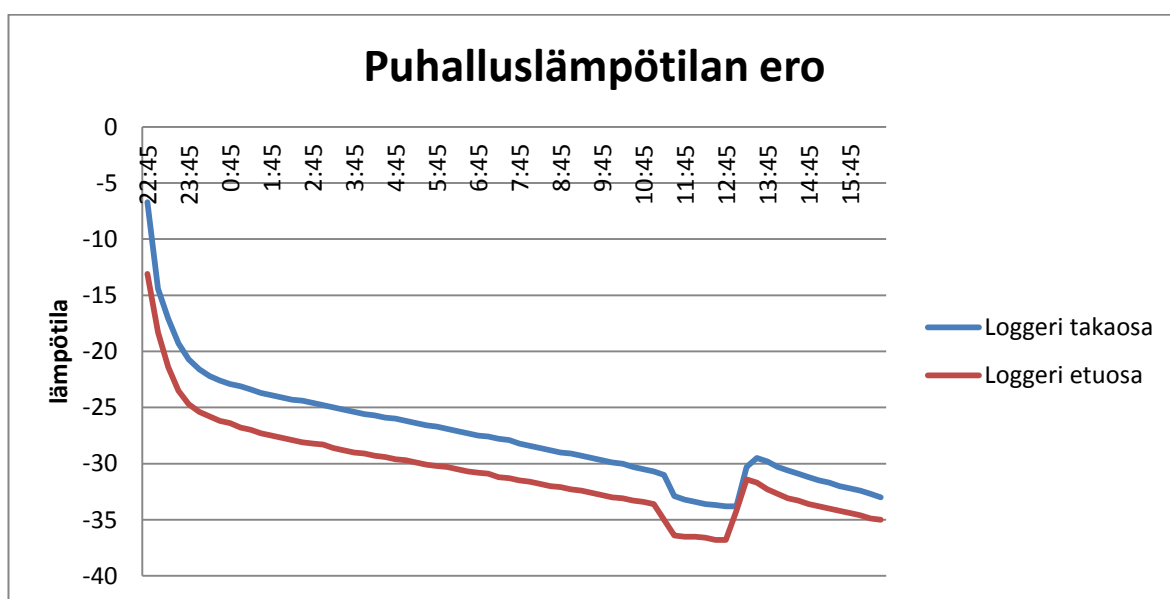
Kuvioissa 7,8 ja 10 näkyy pakastuskäyrät kolmelle eri tuotteelle, jotka ovat olleet yhtä aikaa samassa tunnelissa. N1- ja S2-lavat sijaitsivat takarivissä vasemmassa kulmassa. N1-lava oli alaosassa ja S2-lava yläosassa. NE-lava sijaitsi keskellä eturivissä kehikon alaosassa. Kun vertailee näiden kolmen tuotteen eroja, huomaa, että S2:lla oli huomattavasti nopeampi jäätyminen kuin naudan lajitelmilla. Jos tuotteet olisivat kaikki samoja, eturivi olisi pitänyt jäätyä oletettavasti nopeimmin, sitten takarivin ylin lava ja hitaimmin alin lava.

Lavat oli otettu pois karkaisusta noin kello 14:00. Tuotteiden sisälämpötilat olivat S2 48 %:lla -22,5 °C, N1:llä -11,5 °C NE:llä -14,0 °C. Eli ainoastaan S2 48 % oli rajan -18 °C alapuolella. Muut tuotteet olisivat tarvinneet lisää pakastusaikaa ehkä noin tunnin, perustuen siihen, että jäätyminen etenee kohmetusvaiheessa noin - 4 °C tunnissa. Kuvioita lukemalla loput tuotteet olisivat olleet valmiit noin klo 20:00. Loppupakastus tapahtui kuitenkin seisovassa ilmassa ja -26 °C lämpötilassa, mikä selittää lopun hidasta pakastumista.

Syitä näihin erilaisiin käyriin voidaan hakea lihan laaduista. S2-lajitelma on hyvin rasvaista, noin 48 % ja se on pieninä paloina laatikossa tai massana. NE-lajitelman rasvapitoisuus on noin 6 % ja N1:n noin 15 %. Näiden rasvapitoisuus on huomattavasti alempi, mutta vesipitoisuus on vastaavasti korkeampi, mikä hidastaa jäätymistä. Lisäksi nautalajitelmat olivat isoina paloina laatikossa, jolloin niiden pinta-ala, josta lämpö voi haihtua, on pienempi kuin S2:lla. Lisäksi isojen palojen väliin saattaa jäädä kohtia, joihin ilma jää eristyksiin, jolloin pakastuminen hidastuu. Oletettavasti tämä on suurin syy näin suureen jäätymiseroon.

Kuitenkin N1:llä ja NE:llä ei ollut suurtakaan eroa jäätymisajoissa, vaikka N1 sijaitsi takarivissä, missä periaatteessa pitäisi olla huonoin paikka jäätyksen kannalta. Kun vertaa puhalluslämpötilan eroa (katso kuvio 6), on etuloggerilla lämpötilan keskiarvo -29,7 °C, kun vastaavasti takaloggerilla se on -26,9 °C. Teoriassa samalla tuotteella on lämpötilaerosta johtuen 2 tuntia pidempi pakastus takarivissä.

Eri pakastuskerroilla takarivin vasemmasta reunasta saatiin yllättävän alhaisia lämpötiloja muihin takarivin lavapaikkoihin verrattuna. Näiden arvojen perusteella vasen takakulma saattaa olla eturivin jälkeen nopeimmin jäätyvä paikka. Se voi selittää niin pientä eroa pakastusajoissa. Tietysti aina voi olla eroja siinä, kuinka loggerit on laitettu lihan sisään, jolloin voi syntyä suuriakin eroja. Liitteestä 1 löytyy lisää lajitelmiä pakastuskäyriä.



Kuvio 5. Puhalluksen lämpötilaero etu- ja takarivissä sijaitsevan loggerin välillä.

Taulukossa 3 on eri tuotteiden pakastuksen kestoja. Taulukkoon on merkitty tuotteen alkulämpötila, loppulämpötila, pakastuksen kesto, pakastuksen etenemisnopeus, Phamin-yhtälöön perustuva laskentataulukon arvo ja keskiarviollinen loggeista saatu pakastuslämpötila. Alimpana taulukossa on todellisen ja laskennallisen ajan prosentuaalinen ero. Huomioitavaa on, että NE_1:n, N1_1:n ja S2 48 %:n laskennallisessa tuloksessa on käytetty keskimääräistä arvoa (-35 °C), koska puhalluslämpötilaa ei ollut saatavilla. Tuotteessa SE laskennallinen aika on laskettu kyseiseen loppulämpötilaan eli -13,2 °C:een. Lisäksi kyseinen laatikko oli yksinään suoraan puhaltimen edessä, koska lämpötila on oletettavasti siinä kohdassa alhaisin.

Taulukko 3. Mitattujen ja laskennallisten pakastusnopeuksien eroja.

Taulukon 3 perusteella laskennallisen ja todellisen pakastusajan välinen ero on karkeasti noin 12,5 %. Laskennallisen ja todellisen pakastusajan eroa osin selittää laatikko, johon liha pakataan. Laatikko on rakenteeltaan eristävä, koska kahden kartongin välissä on aaltopahvi, lisäksi laatikon sisäpinnassa on muovikalvo. Pakastusta hidastaa myös tapa, jolla laatikot pinotaan lavoille. Kyseinen tapa pienentää kosketuksessa olevaa pinta-alaa jäähdytysaineeseen nähden.

Taulukossa 4 tuotteet on laitettu pakastusnopeuteen perustuvaan järjestykseen. Tuotteet ovat sellaisia mistä löytyy dataa ja joita tulee yleisemmin pakastettavaksi. Tuotteista Sika 2 (48 %) on selvästi nopeimmin pakastuva tuote, mutta myös N2 (20 %) ja N1 (15 %) eroaa kuitenkin muista tuotteista. Muut tuotteet ovat noin tunnin sisällä toistensa pakastusajoista.

Taulukko 4. Eri tuotteet pakastusnopeuteen perustuvassa järjestyksessä. Suluissa on tuotteiden rasvapitoisuudet.

Tuote	Järjestys
Sika 2 (48 %)	1
Nautalajitelma 2 (20 %)	2
Nautalajitelma 1 (15 %)	3
Nauta 0 krossattu (10 %)	4
Nautalajitelma 0 (10 %)	5
Sikalajitelma 0 (10 %)	6
Sikalajitelma E (6 %)	7
SE/4 Trimm	8
Nautalajitelma E (6 %)	9

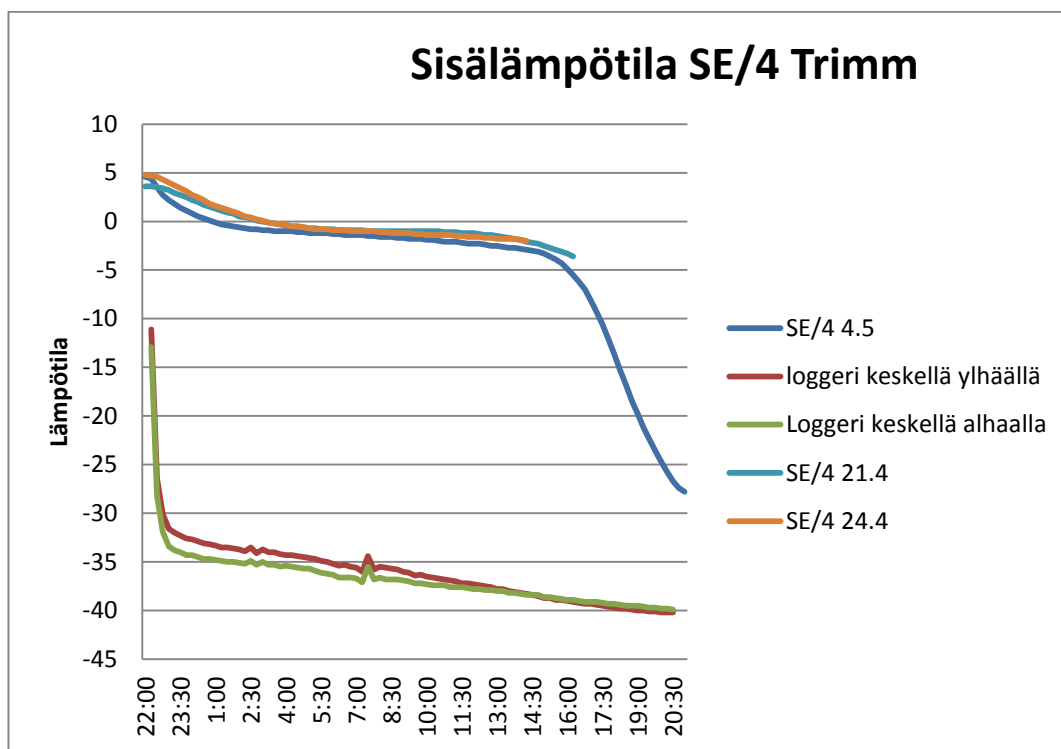
7.2 Eri lajitelmiä pakastuksen kulminaatiopiste

Taulukko 5. Eri lajitelmiä mittauksista saatuja jäätyäsaikoja

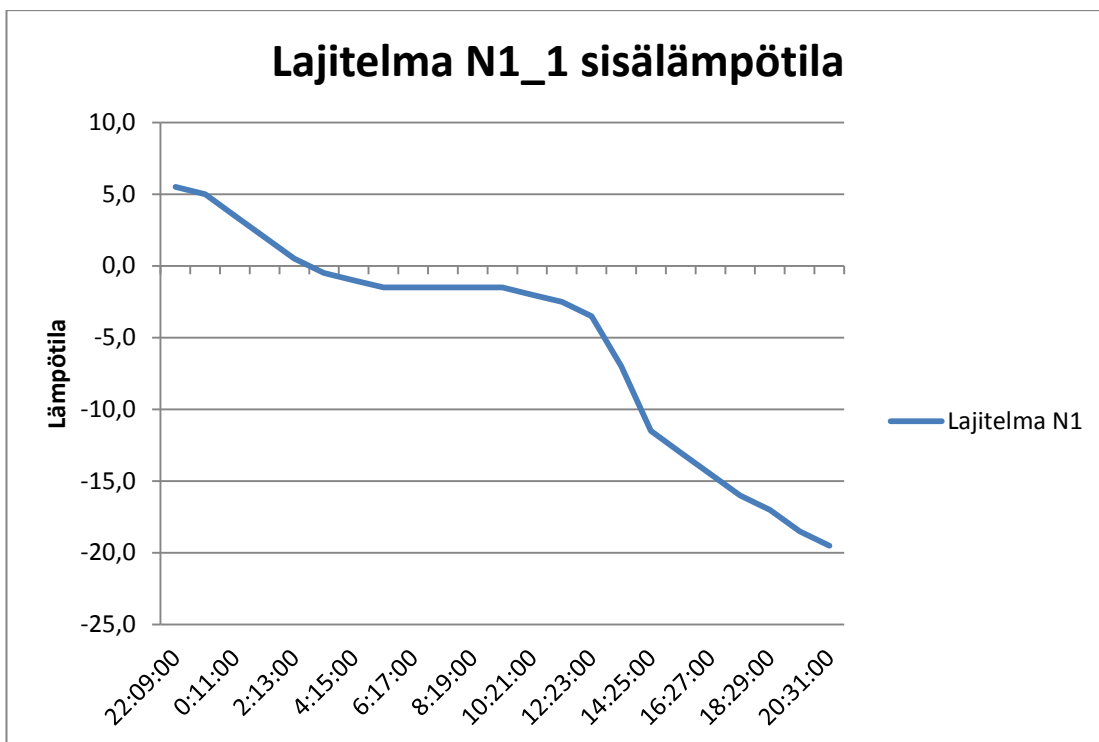
SE	NO	S2	NE	N1	SE/4	S0	Tuote
							Kohmettuminen alkaa (°C)
							Käytetty aika (h)
							Tavoitelämpötila (°C)
							Kokonaisaika (h)
							Kohmettumis aika (h)

Taulukossa 5 on eritelty eri mittauksista saatuja jäätymisaikoja eli aikoja jolloin vapaan veden määrä on vähentynyt huomattavasti ja kohmettumisvaihe pakastuksesta on alkanut. Taulukosta näkee eri lajitelmiä kohmetusajat. Lajitelma S2:lla ei ole ollenkaan kohmettumisaikaa, koska pakastumisnopeus pysyi lähes koko ajan samana. Lajitelmiä kohmettumisaika oli keskimäärin 2,25 tuntia. Eli jossain tapauksissa vain 1/10 koko pakastusajasta.

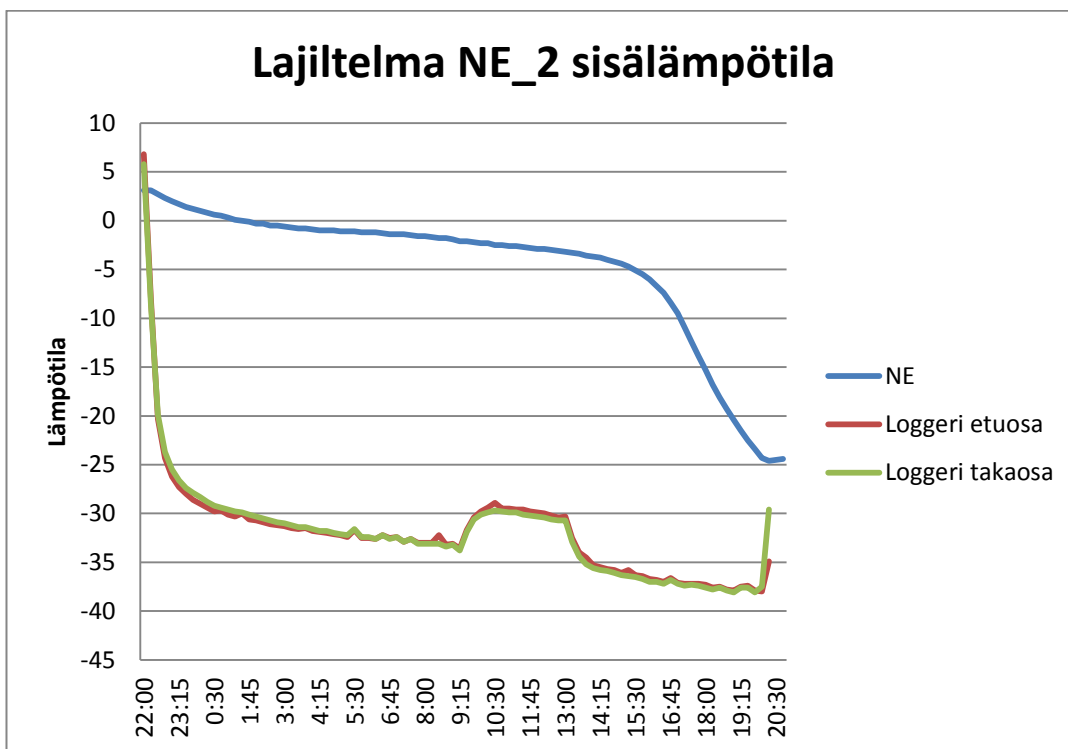
Ensimmäisillä pakastuserroilla ei ollut varmuutta, kuinka kauan tuotteita piti pakastaa, koska Phamin-yhtälöstä saadut pakastusajat tuntuivat arveluttavan pitkiltä. Kuviosta 5 huomaa hyvin, kuinka tasaisia tuotteiden käyrät olivat ennen kuin loggeri poistettiin ja mitattiin sisälämpötila. Vasta siinä vaiheessa huomattiin, että pakastus oli vielä kesken, jolloin sitä jatkettiin.



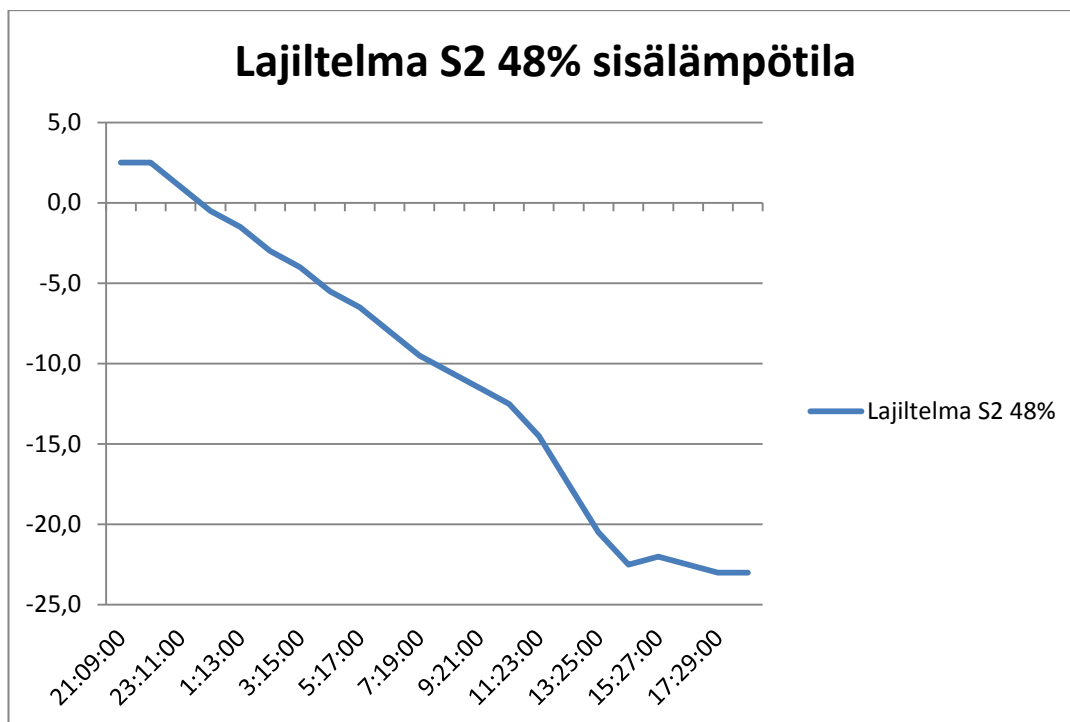
Kuvio 6. Sisälämpötiloja eri pakastuserroilla samasta tuotteesta. Laatikon ulkopuolisilla loggereilla oli aluksi noin -1,5 °C:n lämpötilaero mutta 10 tunnin jälkeen se tasoittui.



Kuvio 7. Lajitelman N1 sisälämpötilan pakastuskäyrä. Käyrästä pystyy näkemään selvästi pakastuksen eri vaiheet: jäähtyminen, jäätyminen ja kohmettuminen.



Kuvio 8. Lajitelma NE sisälämpötila. Jäähtyminen on kestänyt 6 tuntia, jäätyminen 11 tuntia ja kohmettuminen 3,5 tuntia.



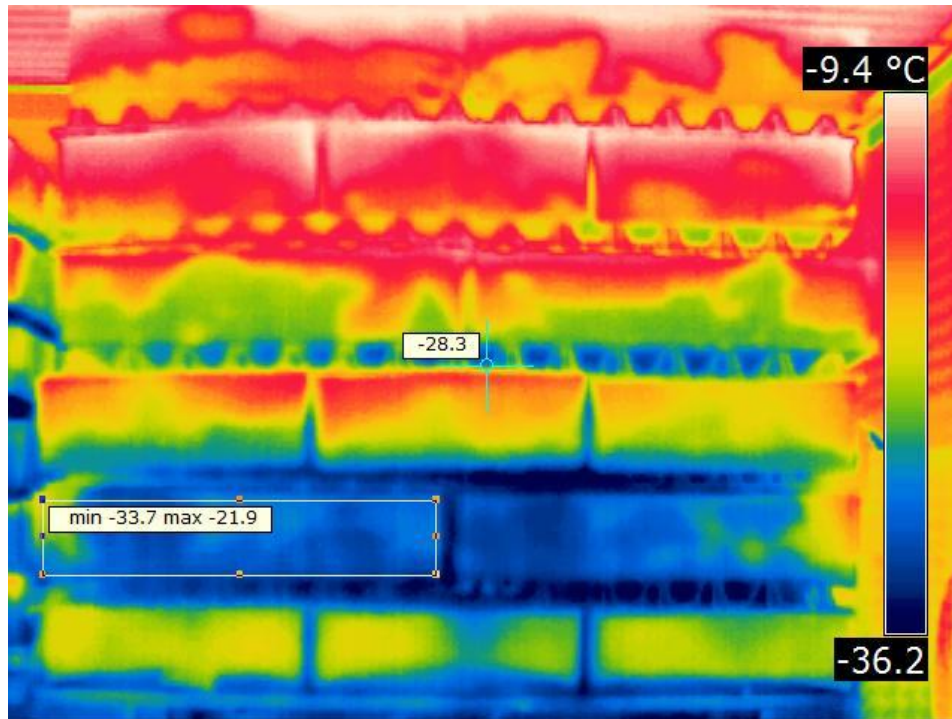
Kuvio 9. S2 48 % pakastuskäyrä. Tämän käyrä eroaa selvästi kaikista muista lajitelmissä. Käyrästä ei löydy selvää jäätyksen vaihetta, vaan pakastus etenee tasaisesti melkein koko ajan.

7.3 Lämpökamerakuviin perustuvat arvot

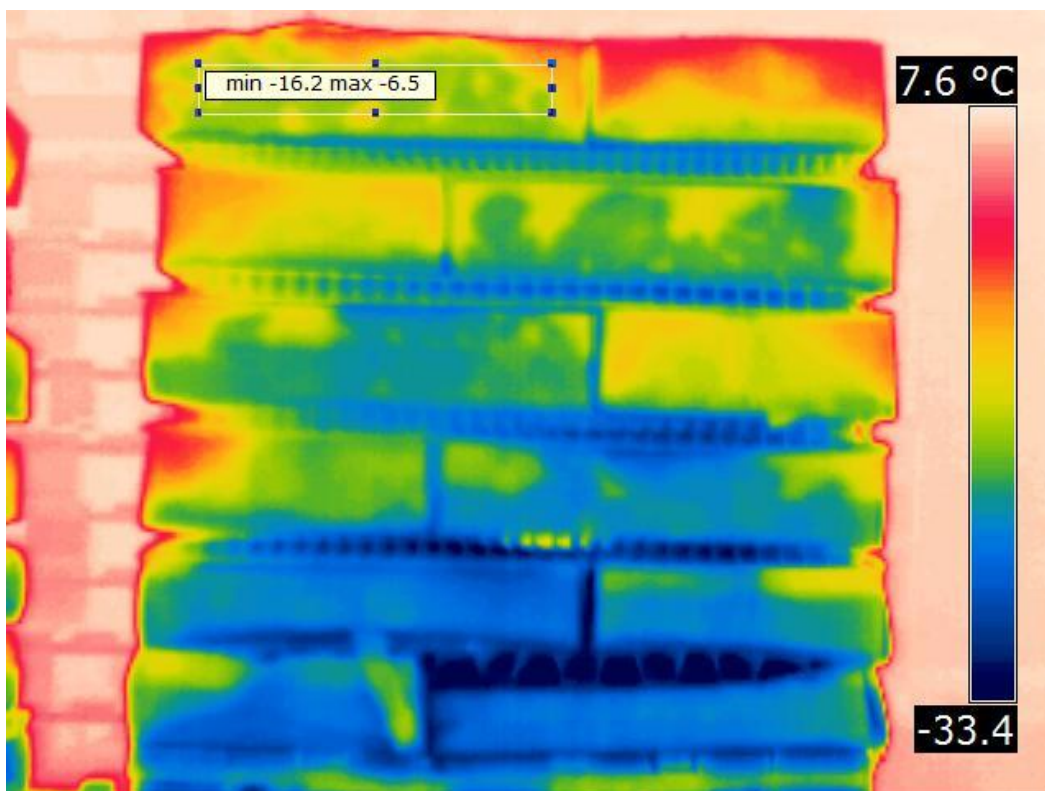
Taulukossa 6 on yhden pakastuskerran lämpökameralla otettujen kuvien lämpötilojen minimi, maksimi ja keskiarvo. Kuvista poimitut minimi- ja maksimilämpötilat on otettu poikittaisista laatikoista (katso kuvio 10). Maksimilämpötila otettiin kaikkein lämpimimmistä laatikosta. Minimiarvo vastaavasti poimittiin kaikkein kylmimmistä laatikosta. Lukemia ei voinut ottaa laatikon päädyistä, koska laatikon rakenne on sieltä avoin. Lämmin ilma pääsi sitä kautta sen rakenteisiin. Siksi laatikon päädyistä saadut arvot olivat lämpimämpiä. Kuviosta 11 huomaa selvästi kahden vierekkäisen laatikon lämpötilaeron. Taulukon keskiarvot voitiin ottaa koko lavasta, koska kaikilla lavoilla oli sama ongelma eikä sillä silloin ole merkitystä kokonaisuuteen.

Taulukossa 6 lihan lämpötilat mitattiin Teston ruuvipäisellä lämpömittarilla keskeltä laatikkoa. Valittu laatikko oli aina lavan ylimmästä kerroksesta ja keskimäinen laatikko (katso kuvio 4b)). Kyseinen laatikko valittiin siksi, että sen pitäisi jäätyä

hitaimmin, koska sillä on pienin ilman kanssa kosketuksissa oleva pinta-ala. Laati-
kon keskikohta on sen lämpimin paikka, koska jäätyminen etenee reunoilta kohti
keskustaa. Kuvissa käytetyn lämpökameran virhemarginaali on 2 °C.



Kuvio 10. Lämpökameralla otettu kuva lavan kyljestä



Kuvio 11. Lämpökameralla otettu kuva lavan päädyssä. Huomaa vierekkäisten laatikoiden lämpötilaero, kun ilma pääsee avonaisesta päädyssä sen rakenteisiin.

Taulukko 6. Lämpökamerasta saatujen lämpötilojen arvoja.

Pakastusaika 20h

Tunneli 1			Eturivi yläkerros					
8	7	6	5	4	3	2	1	Paikkanro
N1	SE/4	NE	SE	NE	N2	N2		Tuote
								Min (°C)
								max (°C)
								Ka (°C)
								Lihan lämpötila (°C)

Eturivi alakerros								
8	7	6	5	4	3	2	1	Paikkanro
N2	S2	N0	SE	NE	N2	N0		Tuote
								Min (°C)
								max (°C)
								Ka (°C)
								Lihan lämpötila (°C)

Takarivi yläkerros

8	7	6	5	4	3	2	1	Paikkanro
NO	S2	SE/4	S Rowls	S2	S0	NE		Tuote
								Min (°C)
								Max (°C)
								Ka (°C)
								Lihan lämpötila (°C)

Takarivi alakerros

8	7	6	5	4	3	2	1	Paikkanro
NO	S0	S2	SE/4	NE suol.	S lapa	SE	SE/4	Tuote
								Min (°C)
								Max (°C)
								Ka (°C)
								Lihan lämpötila (°C)

Taulukoissa 6 ja 7 on joka kerroksien ylimmillä riveillä merkattu tunnelin paikkainumero. Jos kaksi paikkainumeroa on samassa laatikossa, se tarkoittaa, että lava on ollut silloin poikittain tunnelissa. Taulukon 6 lihan lämpötiloja vertaamalla lämpökameralla laatikoista saatuihin keskiarvoihin huomaa, että lihan lämpötila on selvästi korkeampi. Esimerkiksi taulukon 6 eturivin yläkerroksen paikan 5 SE-lajitelma lämpötilan keskiarvo on -22,5 °C ja lihan lämpötila on -5,1 °C. Kuvasta kuitenkin pystyy lukemaan, että yläkerroksen laatikot ovat huomattavasti lämpimämpiä kuin alakerroksen laatikot. Yksinkertainen selitys on, että yläkerros ei ole vielä riittävän jäässä. Mahdollinen syy tähän on, että eturivin yläkerroksen ilman kierto on ollut heikko. Lämpökameran kuvia analysoimalla huomaa, että kaksi ylintä kerrosta on tavallisesti muita lämpimämpiä. Liitteessä 2 on kuvattu edellä mainittu lava kahdesta suunnasta. Kuvista huomaa hyvin lämpötilaerot eri kerrosten välillä.

Taulukossa 6 on tunneli 1 täytetty siten, että vain takarivissä lavat on sijoitettu kahden kerrokseen. Etummaisessa rivissä oli muutama lava, mutta niissä oli enimmillään 3 kerrosta, joten niiden vaikutus ilmavirtauksiin pitäisi olla vain marginaalinen. Taulukosta näkee hyvin, että alarivi oli selvästi kylmempi. Mutta niin kuin monessa muussakin mittauksessa, aina löytyy poikkeamia, joille ei löydy selvää syytä. Taulukossa 6 suurimpana poikkeavuutena voidaan pitää paikkainumerolla 5 olevat lihan lämpötilat. Niin ylä- kuin alakerroksen lihojen lämpötilat olivat noin -14 °C. Se

ehkä kertoo sen, että kyseinen paikka voi olla ilmavirtauksen kannalta huono. Riskiiriitaa kuitenkin aiheuttaa se, että kameran kuvien perusteella lavat olivat parhaiten jäätyneitä.

Taulukon 7 lämpökameran arvot ovat huomattavasti pienempiä, kun vertaa taulukossa 6 olevia arvoja. Taulukon 7 kuvat olivat kuvattu pakastustunnelin ulkopuolella, jolloin lämmin + 5 -asteinen ilma pääsee vaikuttamaan laatikon pinnan lämpötilaan.

Taulukko 7. Tunneli 1 lämpökameralla saatuja arvoja, kun vain takarivi oli täynnä.

Tunneli 1 **Pakastusaika 19,5h**

Takarivi yläkerros

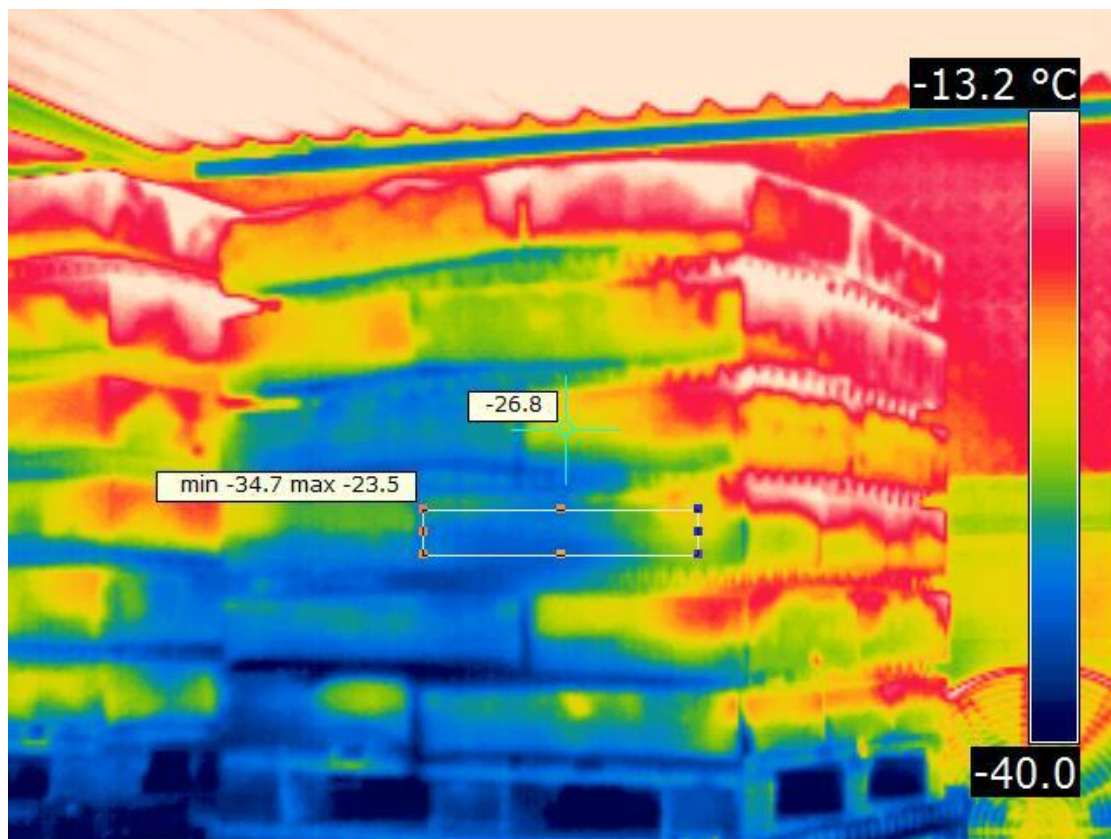
8	7	6	5	4	3	2	1	Paikkanro
	N-maksa	N0	N1	N1	Karjala	NE	Karjala	Tuote
								Min (°C)
								Max (°C)
								Ka (°C)
								Lihan lämpötila (°C)

Takarivi alakerros

8	7	6	5	4	3	2	1	Paikkanro
N1	N0	N1	N1	NE	S2 48 %	SE	Elinliha	Tuote
								Min (°C)
								Max (°C)
								Ka (°C)
								Lihan lämpötila (°C)

Pääsääntöisesti voidaan ajatella, että eturivissä alakerroksen paikat ovat parhaiten jäätyviä, koska ilmavirta osuu ensimmäisenä niihin lavoihin. Eturivin ylimmät kerrokset ovat useimmin huonoimmin jäätyviä paikkoja. Yksi syy voi olla, että lavat ovat niin lähellä tuulettimia. Silloin ilmavirta ei osu niin korkealle eivätkä laatikot pääse jäähtymään yhtä tehokkaasti. Kuten kuviosta 12 huomataan, kahden vierekkäisen lavan yläkerrokset ovat selvästi lämpimiä alimmaisiiin nähden. Tämä ongelma korostuu varsinkin, jos sattuu tulemaan sellaisia lavoja joihin on laitettu jopa seitsemän kerrosta. Silloin tämä ylimääräinen kerros, joka joudutaan laitta-

maan kehikon ylätasolle, voi olla useita asteita lämpimämpi kuin alempi kerros. Paras vaihtoehto tällaiselle lavalle on sijoittaa se yksinään eturiviin lattialle, mutta ei missään nimessä eturivin ylätasolle.



Kuvio 12. Lämpökamerakuva eturivin yläkerroksesta.

Taulukko 7. Lämpökamerakuvista saadut keskiarvot.

8	7	6	5	4	3	2	1	Paikkanumero
								Eturivi Yläkerros
								Eturivi Alakerros
								Takarivi Yläkerros
								Takarivi Alakerros

Taulukossa 7 on laskettu yhteen kuvista saadut keskiarvot. Kuvauskertoja oli 4, joista yhdessä tunneli oli saatu melkein täyteen. Ongelmana on, etteivät eturivin arvot ole täysin vertailukelpoisia, koska niihin on saatu liian vähän tuloksia. Pääosa tuloksista, joita eturivin osiossa käytettiin, oli kuvattu pakastustunnelin sisällä, jossa lämpötila pysyi aluksi selvästi pakkasen puolella. Tällaiseen ratkaisuun jouduttiin, koska pakastukseen saapuvien tuotteiden määrät vaihtelivat suuresti ja hyvin harvoin saatiin koko tunnelia täytettyä. Jotta ilmavirta olisi mahdollisimman tasainen, lavat oli parempi sijoittaa takariviin. Mutta vertailemalla takarivin eroja huomaa selkeästi, että yläkerroksen lavapaikkojen 6, 3 ja 1 arvot poikkeavat muista eli näissä pakastuminen olisi muita hitaampaa. Takarivin alakerroksen lavapaikoissa 6 ja 3 arvot ovat pienempiä kuin joissakin yläkerroksen kohdissa. Eli näitäkin voidaan pitää huonona vaihtoehtona arvokkaimmille lajitelmiille.

8 Johtopäätös

On mahdotonta kertoa, mikä on täysin optimaalinen täyttötapa, koska lajitelmat vaihtelevat suuresti. Lajitelmien pakastusajoista löytyy suuria eroja, joten ei voi mitenkään täyttää tunnelia siten, että kaikki tuotteet saavuttaisivat yhtä nopeasti tarvittavan lämpötilan. Mutta pakastusaikojen eroja voi minimoida laittamalla tuotteet oikealla tavalla tunneliin. Pakastukseen käytettävä minimiaika vaihtelee luultavimmin 18 ja 20 tunnin välissä

Kun tunneleihin saapuu pakastettavaksi tuotteita, kannattaa tehdä karkea jako niiden välille. Rasvaisimmat lajitelmat eli N2, S2, S6 ja S7 laitetaan takariviin. Näiden tuotteiden pakastusaika on useamman tunnin lyhyempi kuin esimerkiksi NE:llä tai SE:llä. Eturiviin kannattaa sijoittaa NE, SE, S0, N0, N1. Tällä tavalla rasvaisten ja vähemmän rasvaisten tuotteiden välinen pakastusaika lyhenee, mutta kuinka paljon todellisuudessa, sitä ei pystytä tarkasti määrittämään. Toisena jakona kannattaa käyttää lavakokoa. Lavan korkeudessa voi olla melkein puoli metriä eroa, riippuen siitä onko lavassa 4 kerrosta vai 6 kerrosta. Matalat lavat, yleensä sian ja naudan eri maksat, hännät ja kielet sekä krossattu N0, tulevat yleensä 4 kerroksen lavoissa. Tällaisia tuotteita kannattaa sijoittaa eturivin ylätasolle, jos eturivin yläosa joudutaan täyttämään.

Mittausten perusteella optimoinnin lopputulos on, että 1 tunnelissa, kun saapuva lavamäärä on 18 - 24, kannattaa täyttää takarivi ensimmäisenä ja eturiviin lattialle ylimääräiset lavat. Eturiviin lattialle hitaimmin pakastuvat lavat eli lajitelmat: NE, SE, S0 ja N0. Tässä tapauksessa ilmavirta osuu paremmin myös takarivin yläosassa oleviin lavoihin, koska edessä ei ole lavoja estämässä ilmavirran kulkua. Ylätasolle kannattaa sijoittaa sellaiset lavat, jotka ovat samankorkuisia, jotta laskettava katto tulisi mahdollisimman tasaisesti niiden päälle ja ilma ohjautuisi sitä kautta parhaiten yläkerroksiin. Pakastustunneli 1:n laskettava katto on kaksiosainen, joten takariviin tulevien samankorkuisten lavojen määrä kannattaa olla 4 tai 8. Syy siihen on, että molemmille puolille mahtuu 4 riviä lavoja. Kerrosten määrä näissä ylätasoin lavoissa kannattaisi olla 4 tai 5.

Jos saapuva lavamäärä noin 20, kannattaa yrittää sijoittaa lavat poikittain, jolloin pinta-ala johon puhallus osuu, on silloin suurempi. Tunnelissa on lavapaikkoja 10,

jos lavat asetetaan poikittain, eturiviin 5 ja takariviin 5 lavaa. Lisäksi yläkerroksiin tulee saman verran lavoja, jolloin yhteismäärä on 20 lavaa. Tietenkin tässäkin tilanteessa kannattaa ottaa saapuvien lavojen korkeus. Jos lavat ovat niin korkeita, etteivät ne mahdu kehikon alaosaan, ne kannattaa sijoittaa silloin lattialle.

Tunneli 2:n maksimi lavamäärä on 16, mutta aina voi harkita myös noin 14 lavamäärän sijoittamista tunneli 1:een lattiatasolle. Tietenkään ei voi olla varma sen energiatehokkuudesta, vaikka teoriassa pakastusaika pitäisi olla lyhyempi vaapaamman ilmavirtauksen takia.

Tarkempien pakastusaikojen saavuttamiseksi voi olla järkevää miettiä reaaliaikaisista tuotteen lämpötilamittausta, esimerkiksi tunnelin ulkopuolelle sijoitettavaa lämpötilamittausyksikköä, josta menisi langallinen anturi hitaimmin pakastuvaan tuotteeseen. Tällä tavalla voisi varmistua siitä, että pakastus on valmis. Eikä pakastusta tarvitsisi keskeyttää turhaan mittauksen ajaksi.

Ehkä pakastustunneleiden täyttö hidastuu, kun joutuu miettimään miten lavat kannattaa laittaa tunneliin. Sitä voi nopeuttaa parantamalla kommunikaatiota teurastamon ja pakastamon välillä. Tällä hetkellä pakastettavat tuotteet tiedetään vasta, kun kuljettaja ojentaa listan tunnelia täyttävälle työntekijälle. Ennakkoilmoitus sähköpostilla saapuvista pakastettavista tuotteista antaa aikaa miettiä tunnelin täyttöä.

9 LÄHTEET

Fellows, P.J., 2009. Food Processing Technology: Principles and practice. Cambridge: Woodhead Publishing.

Leino, P. Kohtala, J. Kymäläinen, S. Tarvainen, J. Hendriksson, J. 2007. Liha-alan ammattioppi. Helsinki: Edita Prima Oy.

Inkinen, P. & Tuohi, J. 2005. Momentti 1: Insinööri Fysiikka. Helsinki: Kustannus-yhtiö Otava.

Heldman, D. & Lund, D. 1992. Handbook of Food Engineering. New York: Marcel Dekker, Inc.

Potter, N. & Hochtiss, J. 1998. Food Science: Fifth Edition. Gaithersburg: Aspen Publishers, Inc.

Ramaswamy, H. & Marcotte, M. 2006. Food Processing: Principles and Applications. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC.

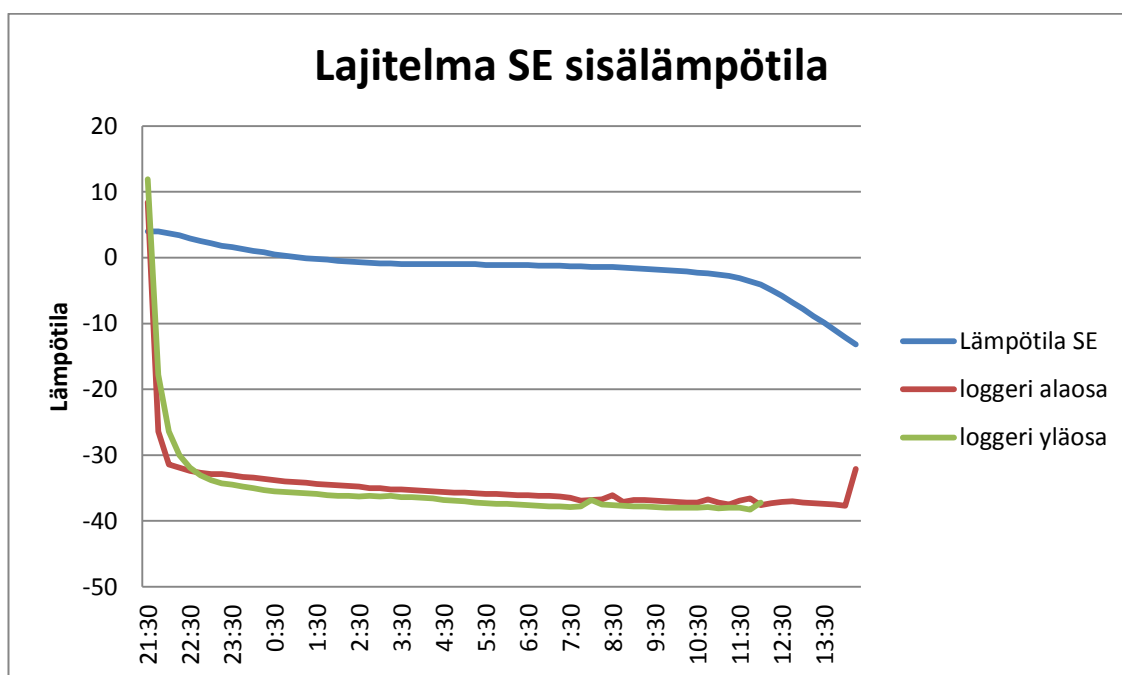
Flir System reference manual. 2007.

LIITTEET

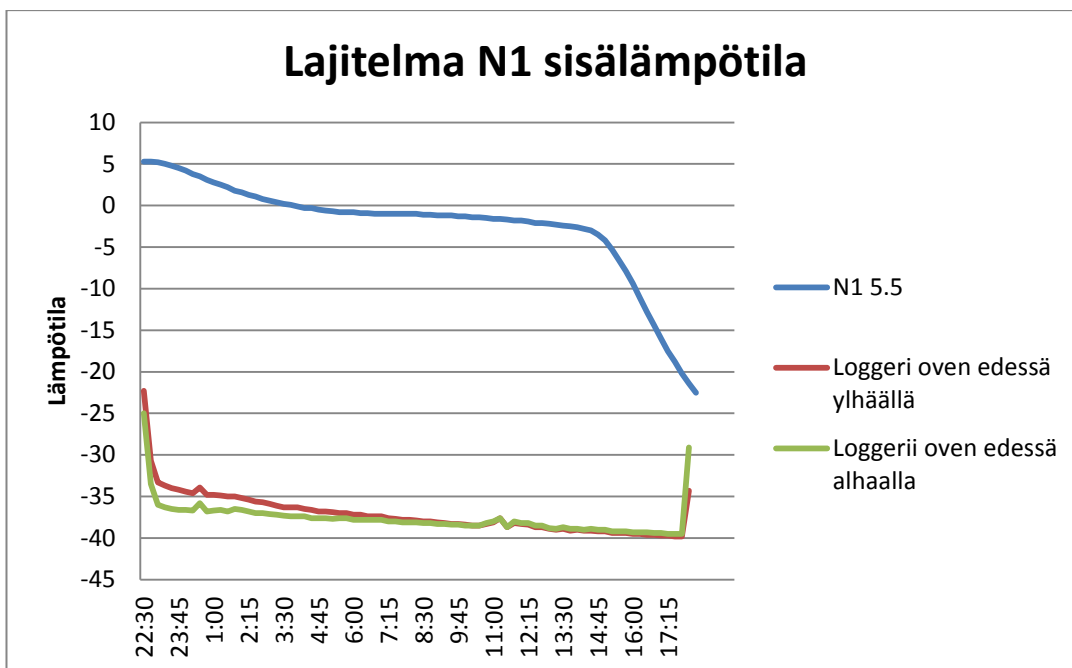
Liite 1



Lajitelman NE sisälämpötilan pakastuskäyrä. NE_1:llä oli yllättävän lyhyt jäätymisaika, mutta kohmettuminen oli jostain syystä hitaampaa.

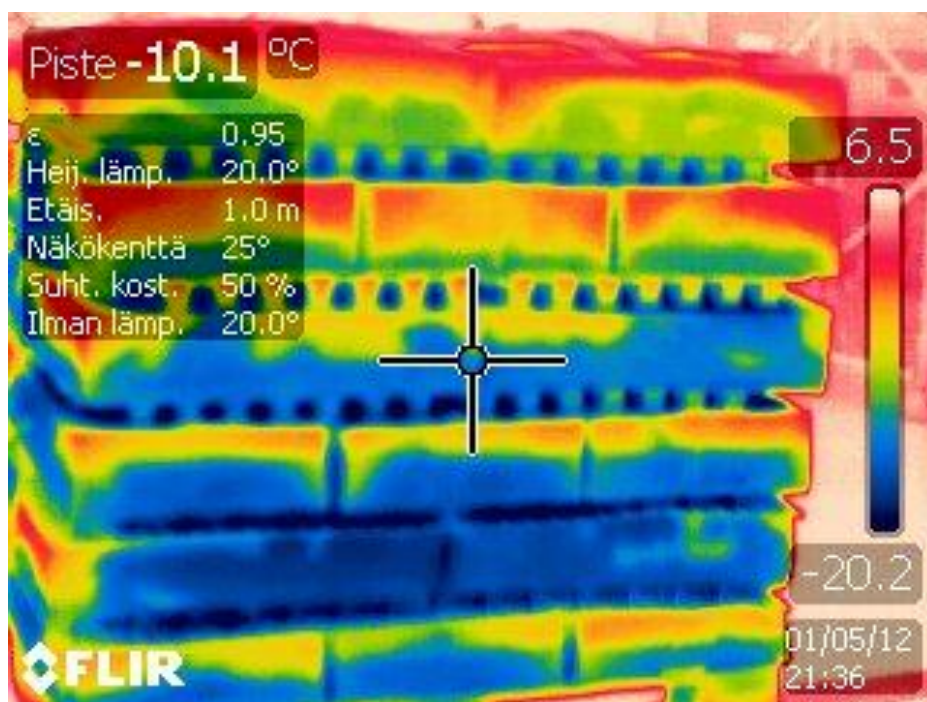


Lajitelman SE sisälämpötilan käyrä.



Lajitelman N1 sisälämpötilan käyrä. Kohmettumisvaihe oli hyvin nopea.

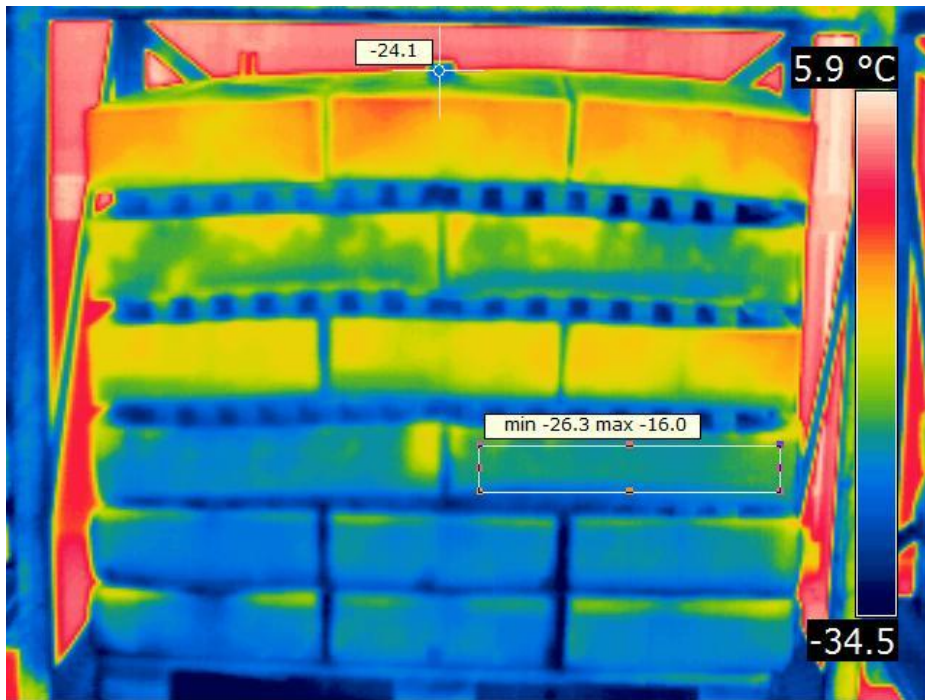
Liite 2



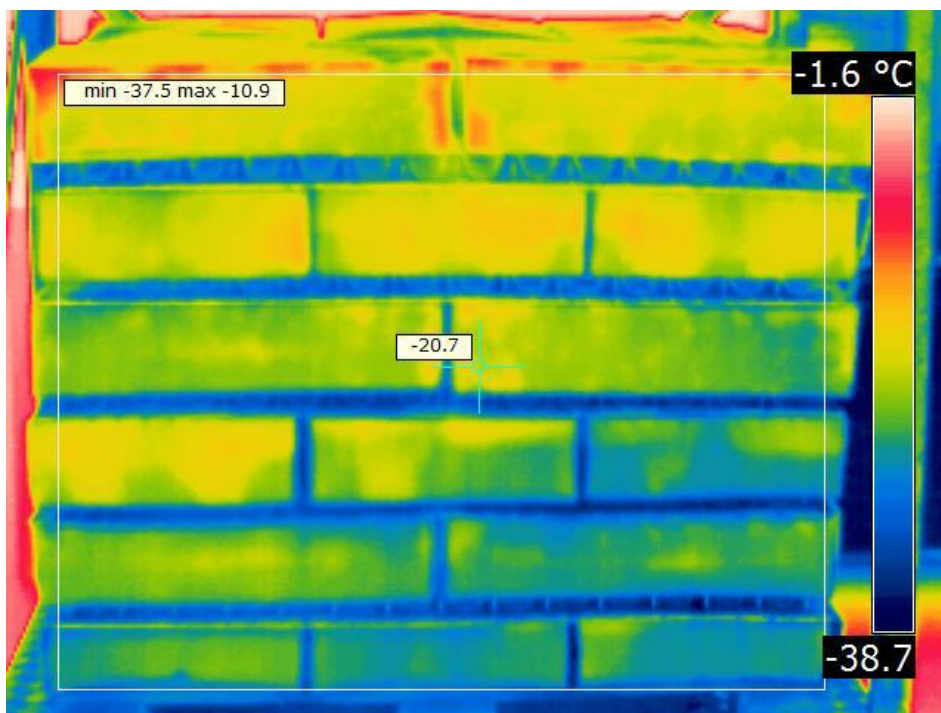
Lava SE kuvattu kyljestä



Lava SE kuvattu edestä



Lämpökameran kuva otettuna lavan sivusta.



Lämpökameralla kuvattu lava joka on jäätynyt tasaisesti.