

Janna Virtanen

ELINTARVIKKEIDEN KULJETUSVÄLINEET JA NIIDEN JÄÄHDYTYSTEKNIikka SUOMESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Syyskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Janna Virtanen: Elintarvikkeiden kuljetusvälineet ja niiden jäähdytystekniikka Suomessa
Refrigeration technology for the transport of food products in Finland
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Kandidaatintyö
Syyskuu 2021

Elintarvikkeiden kuljetusvälineille on Suomessa olemassa omat erityisvaatimuksensa, joilla varmistetaan elintarvikkeiden turvallisuus kuluttajille. Kuljetusvälineiden eristyskyvyn ja jäähdytystekniikan tulee toimia yhdessä siten, että olosuhteet elintarvikkeiden kuljetukselle säilyvät koko kuljetuksen ajan vaatimusten mukaisina. Tieliikenteessä kulkevien kuljetusvälineiden aiheuttamat ympäristövaikutukset ja niiden vähentäminen lisäävät jatkuvan kehityksen tarvetta elintarvikkeiden kuljetusalalla. Tämän työn tavoitteena on selvittää, millaisia elintarvikkeiden kuljetusvälineet ja niissä käytettävät jäähdytystekniikat ovat Suomessa nykypäivänä sekä tutkia niiden kehitysmahdollisuuksia tulevaisuudessa.

Työssä esitellään taustoitukseksi kirjallisuuslähteitä hyödyntäen elintarvikkeiden kuljetusalaa Suomessa sekä tuodaan esiin merkittävimpiä lainsäädännön vaatimuksia, jotka vaikuttavat kuljetusvälineiden suunnitteluun. Tarkemmin työssä perehdyttiin kirjallisuuden avulla kuljetusvälineiden jäähdyttämiseen vaikuttaviin teknisiin ominaisuuksiin, minkä pohjalta tehtiin myös yksinkertaista laskennallista tarkastelua.

Työssä painotetaan kahta elintarvikkeiden kuljetusvälineiden jäähdytykseen vaikuttavaa osa-aluetta. Ensimmäinen osa-alue käsittelee kuljetusvälineiden eristyskykyä. Eristyskykyä tarkasteltaessa keskitytään lämmön siirtymiseen vaikuttaviin ominaisuuksiin, kuten kuljetusvälineiden kuormatilojen pinta-aloihin ja rakennemateriaaleihin. Toinen osa-alue tarkastelee kuljetusvälineiden jäähdyttämiseen käytettävää koneellista jäähdytystekniikkaa. Kuljetusvälineen jäähdytystekniikan osalta esitellään jäähdytysprosessin toimintaa sekä prosessissa hyödynnettävää jäähdytyslaitteistoa. Tieteellisten kirjallisuuslähteiden lisäksi työssä hyödynnettiin myös kylmäkonevalmistajien laitteista saatavilla olevia tietoja. Työssä havaittiin, että elintarvikkeiden kuljetusvälineiden rakenteissa on huomattavia eroja, mikä asettaa haasteita kuljetusvälineen kuormatilan sisälämpötilan hallinnalle. Työssä pyrittiin vastaamaan haasteeseen selvittämällä, millainen tulisi pääpiirteittäin kuljetusvälineiden eristyskyvyn testaamiseen tarkoitetun testauslaboratorion olla.

Työssä tehdyn tutkimuksen perusteella kuljetusalan yhtenä merkittävänä kehityssuuntana on, että kuljetusvälineillä pyritään kuljettamaan aiempaa suurempia tavaramääriä, jotta saataisiin pienennettyä ajettavien kilometrien määrää. Tämä on johtanut kuormatilojen kokojen kasvattamiseen ja lisävarusteiden määrän lisäämiseen, joka asettaa haasteita riittävän eristyskyvyn takaamiselle. Lisäksi lainsäädännön muutokset koskien kuljetusvälineiden kokoja Suomessa on muuttanut erityisesti kylmäkoneilta vaadittavia jäähdytys- ja puhallustehoja. Tutkimuksessa todettiin laskennallisesti, että Suomessa käytettävien kylmälaitteiden jäähdytystehot pystyvät vastaamaan jäähdytettävien kuormatilojen kokojen muutokseen, mutta puhallusteho samoissa kylmäkoneissa jää vajaatehoiseksi halutuista arvoista. Elintarvikkeiden kuljetusvälineet ovat kuitenkin kokonaisuuksia, joissa tulee ottaa huomioon useita kuormatilan lämpötilan hallintaan vaikuttavia ominaisuuksia. Työssä todetaankin, että kuljetusvälineiden vaatimustenmukaisuuden varmistamiseksi tulee niiden testaamismahdollisuuksia kehittää, joko tietokonemallinnuksen tai kokeellisen testaamisen avulla.

Avainsanat: Elintarvike, kuljetusväline, eristyskyky, jäähdytystekniikka, kylmäkone

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ELINTARVIKKEIDEN KULJETTAMINEN SUOMESSA	3
2.1 Elintarvikekuljetukset tieliikenteessä	3
2.2 Elintarvikkeiden kuljetusvälineet	5
2.3 Elintarvikekuljetusten valvonta	9
3. KULJETUSVÄLINEIDEN RAKENNE JA LÄMMÖNSIIRTO ELINTARVIKEKULJETUKSISSA	12
3.1 Kylmäkuljetusvälineen rakenne	12
3.2 Kylmäkorien materiaalit ja niiden lämmönsiirto ominaisuudet	14
3.3 Kylmäkoneiden toiminta elintarvikkeiden kuljetusvälineissä	17
3.3.1 Kylmäkoneet	18
3.3.2 Jäähdytystekniikka kuljetusvälineissä	21
3.3.3 Ilman liike kuormatilassa	24
3.3.4 Kylmäaineet	24
3.4 Kylmäkoneiden jäähdytys- ja puhallustehojen muutokset kuormatilojen kasvun myötä	25
4. KULJETUSVÄLINEIDEN TESTAUSLABORATORIO	30
4.1 Kuljetusvälineen eristyskyvyn testaus ATP-sopimuksessa	30
4.2 Laboratorion rakenteen ja välineiden mitoitus	32
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	36
LÄHTEET	38

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ATP-sopimus	ransk. Accord relatif aux Transports internationaux de denrées Périssables et aux engins spéciaux a utiliser pour ces transports, Helposti pilaantuvien elintarvikkeiden kansainvälisiä kuljetuksia ja tällaisissa kuljetuksissa käytettävää erityiskalustoa koskeva sopimus
COP	engl. Coefficient Of Performance, tehokerroin
FNA-luokka	Luokan A normaalieristeinen koneellisesti jäähdytetty kuljetusväline
FRC-luokka	Luokan C raskaseristeinen koneellisesti jäähdytetty kuljetusväline
GWP-arvo	engl. Global Warming Potential, lämmityspotentiaali
HCT-yhdistelmä	engl. High Capacity Transport, ajoneuvoyhdistelmätyyppi
HFC-kylmäaine	Osittain halogenoitu hiilivety, hiiliatomien välillä yksöissidoksia
HFO-kylmäaine	Osittain halogenoitu hiilivety, hiiliatomien välillä kaksoissidoksia
KA	Kuorma-auto
Luke	Luonnonvarakeskus
PCM-materiaali	engl. Phase Change Material, faasinmuutosmateriaali
PPV	Puoliperävaunu
TPV	Täysperävaunu
A	Geometrinen keskipinta-ala
A_i	Sisäpinta-ala
A_o	Ulkopinta-ala
COP_R	Kylmäkoneen kylmäkerroin
k	Kokonaislämmönsiirtokerroin
λ	Lämmönjohtavuuskerroin
P	Lämmitys- tai jäähdytysteho
\dot{Q}	Lämpövirta
Q_H	Korkeamman lämpötilan lämpövarastoon siirtyvä lämpö
Q_L	Matalamman lämpötilan lämpövarastosta siirtyvä lämpö
$R_{joht.}$	Johtumisen aiheuttama lämmönvastus
R_{kok}	Kokonaislämmönvastus
$R_{konv.}$	Konvektion aiheuttama lämmönvastus
$R_{sät.}$	Säteilyn aiheuttama lämmönvastus
T	Lämpötila
T_i	Kuoromateriaalin sisälämpötila
T_o	Ympäristön lämpötila
W	Työ

1. JOHDANTO

Ympäriämme liikkuu jatkuvasti suuria tavaramääriä ja kulutusyhteiskuntamme tarve erilaisten hyödykkeiden käyttämiseen on kyltymätön. Tavarankuljetusvälineitä liikutellaan vuoden jokaisena päivänä ympäri vuorokauden, jotta kulutustarvikkeita olisi jatkuvasti ihmisten saatavilla. Tavaraliikenteessä kuljetettavista tonneista noin 90 % kulkee Suomessa maanteitse ja tavaraa kuljetettiin Suomessa vuonna 2020 kuorma-autoliikenteessä 259 miljoonaa tonnia [1][2]. Erilaisten kulutustarvikkeiden ostamisen tarpeellisuudesta voidaan olla montaa eri mieltä, mutta erään kulutustarvikkeen ostotarpeesta ei voida juurikaan kiistellä – ruuan.

Tässä työssä tutustutaan elintarvikkeiden kuljetusvälineisiin ja niissä käytettävään jäähdytystekniikkaan nykypäivänä sekä niiden mahdollisiin kehityssuuntiin tulevaisuudessa. Elintarvikkeiden kuljetukseen liittyy tiettyjä erityispiirteitä, kuten esimerkiksi helposti pilaantuvien elintarvikkeiden pitäminen niille sopivassa lämpötilassa koko kuljetuksen ajan. Työssä tehdään kirjallisuusselvitys elintarvikkeiden kuljetusvälineistä ja kuormatilan jäähdyttämisestä sekä tarkastellaan merkittävimpiä muutoskohteita sekä kirjallisuuslähteitä hyödyntäen että tehden niiden pohjalta yksinkertaista laskentaa. Työ on rajattu käsittelemään koneellisesti jäähdytettyjä sekä eristettyjä helposti pilaantuvien elintarvikkeiden kuljetukseen käytettäviä kuljetusvälineitä erityisesti Suomessa.

Työn eräänä tavoitteena on perehtyä kuljetusvälineiden eristettyjen kuormatilojen rakenteeseen ja materiaaleihin. Lisäksi tarkastellaan jäähdytysprosessissa käytettäviä kylmäkoneita sekä jäähdytysprosessin toimintaa kuormatilassa. Kuljetusvälineiden eristyskyky ja jäähdytyslaitteiston vaatimuksenmukaisuus on Suomessa tarkoin valvottua. Elintarvikkeiden kuljetusvälineiden tulee olla sellaisia, että ne soveltuvat elintarvikkeiden kuljetukseen ja täyttävät niille asetetut vaatimukset [3, s.41]. Tässä työssä tutustutaan lainsäädännön merkittävän vaikutuksen vuoksi myös elintarvikkeiden kuljetusvälineihin liittyvään lainsäädäntöön ja asetuksiin sekä niiden asettamia haasteita elintarvikkeiden kuljetusvälineiden valmistukselle.

Ilmastonmuutoksen asettamiin haasteisiin vastaaminen sekä turvallisuus ovat myös kuljetusvälineiden valmistuksessa merkitykseltään kasvavia kehitysalueita [4, s.1]. Esimerkiksi vuoden 2019 alussa voimaan astunut asetus sallii elintarvikkeiden kuljetusvälineille

aiempaa suuremmat pituudet, joka mahdollistaa suuremman tavaramäärän kuljettamisen pienemmillä määrillä ajokilometrejä [5]. Kuljetusvälineiden kokojen muutos aiheuttaa muutostarvetta kuormatiloille sekä jäähdytysjärjestelmille. Työssä tutustutaan muutosten aiheuttamiin vaikutuksiin kuljetusvälineissä ja niiden jäähdytyslaitteistoissa sekä tutkitaan millainen tulisi kuljetusvälineiden testauslaboratorion olla, jossa voitaisiin testata ja kehittää kuljetusvälineitä vaatimusten muuttuessa.

Työn alussa tutustutaan elintarvikekuljetusalaan ja siinä hyödynnettäviin kuljetusvälineisiin yleisesti sekä perehdytään pintapuolisesti lainsäädäntöön elintarvikekuljetusten osalta. Luvussa 3 tutkitaan tarkemmin kylmäkorien rakennetta ja niissä tapahtuvaa lämmönsiirtoa sekä jäähdytyslaitteiden ja -järjestelmien toimintaa. Lopuksi luvussa 4 perehdytään kuljetusvälineiden testauslaboratorion vaatimuksiin, jossa voitaisiin uusia kuljetusvälineitä testata ja parantaa.

2. ELINTARVIKKEIDEN KULJETTAMINEN SUOMESSA

Suomessa vaihtelevat sääolosuhteet sekä pitkät välimatkat asettavat haasteita elintarvikkeiden kuljetukselle. Vaihtelevissa olosuhteissa kuljetusvälineiltä vaaditaan kykyä sekä jäädyttämään että lämmittämään kuormatilaa, jossa elintarvikkeiden kuljetus tapahtuu, jotta kuljetuslämpötila säilyy elintarvikkeille sopivana [3, s.14]. Tässä työssä perehdytään tarkemmin vain kuormatilan jäädyttämiseen. Lisäksi Suomessa pitkistä välimatkoista huolimatta lähes 90 % väestöstä asuu kaupunkien vaikutusalueella, mikä vaatii kuljetuskalustolta monipuolisuutta ja muunneltavuutta erilaisiin kuljetustarpeisiin, jotta elintarvikkeita pystytään kuljettamaan pitkiä sekä lyhyitä matkoja [4, s. 1].

Kuljetusvälineiden ja niiden kuormatilojen moninaisuuden vuoksi sekä valmistajilta että valvovilta viranomaisilta tarvitaan tarkkaa yhteistyötä vaatimustenmukaisuuden varmistamiseksi, jotta elintarvikkeiden turvallisuus kuluttajalle voidaan taata. Tässä luvussa perehdytään elintarvikkeiden kuljetusalaan Suomessa ja esitellään pääpiirteittäin lainsäädäntöä, joka vaikuttaa kuljetusvälineiden suunnitteluun.

2.1 Elintarvikekuljetukset tieliikenteessä

Elintarvikkeita kuljetetaan yleisesti tieliikenteessä, sillä elintarvikkeiden kuljetuspaikat sijaitsevat usein erillään ja niiden käsittely vaatii elintarvikkeille erityisesti suunniteltuja olosuhteita. Tieliikenteessä tällaiset kuljetukset on mahdollista järjestää tieliikennekaluston joustavuuden avulla [1].

Lämpötilahallittavien elintarvikekuljetusten logistiikkaoppaassa [3, s.12] neuvotaan, että elintarvikkeiden kuljetuksessa kylmäketjun katkeamattomuus on tärkeää, jotta tuotteiden käyttökelpoisuus säilyy ja niiden käyttöikä ei muutu. Kylmäketjulla tarkoitetaan elintarvikkeen koko matkaa niiden tuottajalta esimerkiksi kauppaan, josta kuluttaja saa elintarvikkeen käyttöönsä [3, s.15]. Kuljetus on tärkeässä osassa elintarvikkeen kylmäketjun katkeamattomuuden toteutusta, sillä tuotetta saatetaan kuljettaa useain eri kohteeseen ennen loppukuluttajansa haltuun pääymistä. Kuljetusvälineistön suunnittelussa tulee siis ottaa huomioon myös elintarvikkeen siirtymät lastauspaikoilla kuljetusvälineeseen sekä muut kylmäketjun mahdolliset epäjatkuvuuskohdat. [3, s.12]

Elintarvikkeiden kuljetusmatkat poikkeavat siis toisistaan riippuen kylmäketjussa mukana olevien elintarvikkeiden varastointitilojen välimatkoista. Taulukossa 1 on esitetty

elintarvikkeiden kuljetusmääriä ja -matkoja kotimaisessa kuorma-autoliikenteessä vuonna 2020.

Taulukko 1. Kotimaan kuorma-autoliikenteen suoritteet tavaraliikenteessä vuonna 2020 [6].

	Tavaramäärä [1000 t]	Liikennesuorite [1000 km]	Keskimääräinen kuljetusmatka [km]
Liha, valmistettu kala, maito, voi ja muut helposti pilaantuvat elintarviketeollisuuden tuotteet	6848	101382	224
Jauhot, sokeri, kahvi, valmistetut hedelmät ja vihannekset, muut ei helposti pilaantuvat elintarviketeollisuuden tuotteet, ruokaöljy	3584	48331	218
Yhteensä	10432	149713	

Taulukossa 1 esitettyjen elintarvikkeiden osuus kotimaisen, ammattimaisen kuorma-autoliikenteen kuljettamista tavaroista massan mukaan oli 2020 noin 4,0 % ja vastaavasti kuljetusmatkan osuus 8,2 % [2][6]. Kuorma-autoliikenteen kokonaissuoritteet laskentaa varten on saatu Tilastokeskuksen julkaisun liitetaulukosta 1 [2]. Elintarvikkeiden kuljetusmatkat ovat pitkiä verrattuna esimerkiksi maa-aineksiin, jotka ovat tonnimäärällisesti yli kolmanneksen kotimaan tavarankuljetuksista, mutta niiden keskimääräinen kuljetusmatka on lyhyempi noin 20 km [4, s.16]. Elintarvikkeita kuljetetaan siis pitkiä matkoja, minkä vuoksi kuljetusvälineiden kokojen kasvattaminen ja siten suurempien elintarvikemäärien kuljettaminen on ollut viime aikoina Suomessa elintarvikukuljetusvälineiden kehityksen kohteena [5]. Kokonaispainoltaan yli 68 tonnia painavat ajoneuvoyhdistelmät kuljettivat vuonna 2020 noin 27 % koko kuljetetusta tavaramäärästä ja osuus on kasvanut tasaisesti vuodesta 2013 lähtien [2].

Kuljetettavista elintarvikkeista sekä kuljetusmatkoista riippuen voidaan tieliikenteessä käyttää erilaisia kuljetusvälineitä, jotka soveltuvat kulloiseenkin tarkoitukseen parhaiten [3, s.44]. Kuljetusvälineitä voidaan suunnitella ja tehdä erilaisiin kuljetuksiin joustavasti muokattavaksi kuitenkin tietyissä rajoissa, sillä elintarvikkeiden kuljetukseen käytettävät

kuljetusvälineet ovat muun muassa eristyskyvyltään ja jäähdytyslaitteiston tehokkuuden osalta tarkoin säänneltyjä [7].

2.2 Elintarvikkeiden kuljetusvälineet

Kuljetusmääristä ja -matkoista riippuen voidaan käyttää erilaisia kuljetusvälineitä, joiden tulee kuitenkin täyttää koostaan riippumatta samat vaatimukset lämpötilansäätelykyvyltään. Kuljetusvälineen kuormatilan tulee olla vaatimustenmukaisesti eristetty ja jäähdytysjärjestelmän tulee pystyä pitämään kuormatilan sisälämpötila elintarvikkeiden kuljetukselta vaadittujen raja-arvojen sisäpuolella [7, s.10].

Elintarvikkeita kuljetetaan kuljetusvälineillä, joissa voi olla kiinnitettynä yksi yhtenäinen kuormatila tai se voi koostua useasta erillisestä toisiinsa ulkoisesti kiinnitetystä kuormatilasta, jollaista kutsutaan yleisesti ajoneuvoyhdistelmäksi [5]. Tässä työssä tarkasteltavissa kuomatioissa on lämpöeristetyistä rakenne-elementeistä koottu kori sekä tämän tilan jäähdytykseen tarkoitettu koneellinen jäähdytysjärjestelmä [7, s. 9].

Niin sanotuilla jakeluautoilla kuljetetaan elintarvikkeita lyhyempiä matkoja, kun jaetaan elintarvikkeita useisiin toisistaan lyhyillä välimatkoilla sijaitseviin lastaus- ja purkupaikkoihin, jolloin kuljetettavien elintarvikkeiden määrä sekä kuljetusvälineen koko pienenevät [3, s. 45]. Kuvassa 1 oleva kuorma-auto (KA) soveltuu käyttötarkoitukseensa hyvin lyhyen matkan kuljetuksissa. Pidempien matkojen runkokuljetuksissa siirrettävät elintarvikemäärät ovat suurempia, joka vaatii myös suuremmat kuljetusvälineet, kuten varsinaisen perävaunun tai puoliperävaunun (PPV) (kuvat 2 ja 3). Varsinaista perävaunua kutsutaan myös täysperävaunuksi (TPV).



Kuva 1. Lyhyiden matkojen elintarvikekuljetukseen soveltuva kuorma-auto [8].



Kuva 2 ja 3. Vasemmanpuoleisessa kuvassa 2 on elintarvikekuljetuksiin käytettävä puoliperävaunu, joka kiinnitetään sitä vetävään autoon. Oikeanpuoleisessa kuvassa 3 on ajoneuvoyhdistelmä, jossa on kuorma-auto ja täysperävaunu [8].

Elintarvikkeiden jakelureitit eroavat toisistaan matkan pituuden lisäksi lastin purkupaikkojen osalta, joka vaikuttaa kuljetusvälineen jäähdytyslaitteiston valintaan. Jakelukuljetuksissa pysähdyspaikkoja on useita ja kuormatilan ovia auotaan usein, kun lastia puretaan. Lyhyen matkan jakeluautoissa käytetäänkin tämän vuoksi teholtaan suurempia kylmäkoneita korin sisälämpötilan pitämiseksi vaaditulla tasolla. [3, s.45] Runkokuljetuksissa kuljetusmatkat ovat usein pidempiä kuin jakelureiteillä ja pysähdyspaikat sijaitsevat yleensä lastaus- ja purkupaikoilla reitin alussa ja lopussa. Kylmäkorin sisälämpötila pysyy runkokuljetuksissa vakaampana, jolloin jäähdytystarve ei vaihtele yhtä paljon kuin jakeluautoissa. Tämän vuoksi jäähdytystehon ei tarvitse runkokuljetukseen tarkoitetussa kuljetusvälineessä olla niin suuri suhteessa jäähdytettävän kuormatilan tilavuuteen kuin jakeluautoissa. [3, s.45]

Vertaillaan esimerkkinä jäähdytystehojen suuruusluokista Suomessa eniten vuonna 2020 käytetyn kylmäkonevalmistajan Thermo Kingin kylmäkoneiden jäähdytystehoja taulukossa 2 [9]. Jäähdytystehot on ilmoitettu ympäristön lämpötilan ollessa 30 °C ja kuormatilan sisälämpötilatarpeen ollessa 0 °C tai -20 °C. Vertailuun on otettu ensin pienimmälle sekä sitten suurimmalle yksitilaiselle kuormatilalle tarkoitetut kylmäkoneet, jotka löytyvät Thermo Kingin tuotevalikoimasta. Taulukossa on ensin kuorma-autoon ja sitten perävaunun tarkoitettujen kylmäkoneiden jäähdytystehot tietyssä kuormatilan sisälämpötilassa. [10] Vertailun mahdollistamiseksi taulukkoon 2 on laskettu kylmäkoneen jäähdytysteho kuormatilan pituusmetriä kohti.

Taulukko 2. Taulukossa on esitetty tiedot jäähdytystehoista P [W] ensin kahdelle kuorma-autoon (KA) tarkoitetulle kylmäkoneelle, jonka jälkeen on vastaavien koneiden tiedot esitetty perävaunulle (PV) tarkoitetuille kylmäkoneille sisälämpötilassa T_i [°C] [10].

Kylmäkone	Jäähdytysteho [W] $T_i = 0\text{ °C}$	Jäähdytysteho [W] $T_i = -20\text{ °C}$	Kuormatilan pituus [m]	Jäähdytysteho P ($T_i = 0\text{ °C}$) / kuormatilan pituus [W/m]	Jäähdytysteho P ($T_i = -20\text{ °C}$) / kuormatilan pituus [W/m]
T-560R (KA)	6300	3500	4–5,5	1145– 1575	636–875
T-1000R (KA)	10 000	5400	7,5–8,5	1176–1333	635–720
SLXi-200 (PV)	13500	7500	15	900	500
SLXi-400 (PV)	18700	10 000	16	1169	625

Taulukosta 2 voidaan huomata, että kuorma-autojen kylmäkoneilla on suuremmat jäähdytystehot kuormatilan pituusmetriä kohden kuin perävaunuilla. Kuorma-autolle tarkoitettussa kylmäkoneessa jäähdytysteho pituusmetriä kohden on suurimmillaan 1575 W/m, kun taas jäähdytysteho suurimman perävaunun kylmäkoneelle on 1169 W/m. Lisäksi huomataan, että jäähdytysteho pituusmetriä kohden kasvaa perävaunuissa, mutta kuorma-auton tapauksessa vastaava jäähdytysteho on suurempi pienemmässä kuormatilassa, joka johtuu lyhyen matkan kuljetuksissa lämpöhäviöiden suuremmasta osuudesta [3, s.45]. Taulukosta voidaan myös käytännössä nähdä, että kuorma-autojen ja perävaunujen kokojen muutokset vaikuttavat merkittävästi kylmäkoneelta vaadittaviin jäähdytystehoihin.

Ajoneuvojen leveyttä rajoittaa Suomessa tieliikennelaki, jonka mukaan lämpöeristettyjen kuormakorien ja peräkärrien suurin sallittu leveys on 2,6 m [11]. Elintarvikkeiden, kuten minkä tahansa tuotteiden kuljetuksessa käytetään Suomessa standardikokoisia FIN- ja EUR-lavoja. FIN-lavat ovat mitoiltaan 1 m x 1,2 m ja EUR-lavat 0,8 m x 1,2 m [3, s. 31–32]. Näin ollen kuormatessa kaksi lavaa vierekkäin 2,6 m leveään kuormatilaan vievät kuormalavat vähintään 2,4 m tilan kuormatilan leveydestä, jolloin sivuseinien ja -ovien leveys rajoittuu välille 45–50 mm [12, s. 1468].

Ajoneuvojen pituutta rajoittanut lainsäädäntö on muuttunut hiljattain ja mahdollistaa nyt pidempien ajoneuvojen sekä ajoneuvoyhdistelmien valmistamisen. Tammikuussa 2019 tuli voimaan lainsäädäntömuutos 31/2019, joka kasvatti kuorma-autojen ja perävaunujen suurinta sallittua pituutta. Alkuperäisessä valtioneuvoston asetuksessa 407/2013,

kuorma-auton suurin sallittu pituus oli 12 m [13]. Uuden asetuksen myötä kuorma-auton pituus saa olla 13 m. Perävaunujen suurin sallittu pituus on määritelty siten, että niiden pituus puoliperävaunussa vetotapin pystyakselista tai täysperävaunussa etuakseliston kääntöpuolesta perävaunun etuosaan, vaakatasossa olevaan pisteeseen nähden, saa olla 2,04 m. Perävaunun etukulman kääntösäde ei siis saa ylittää suurimpia sallittuja pituusrajoja. Kyseisestä pisteestä pituus taas perävaunun takaosaan saa täysperävaunulla olla uuden asetuksen myötä 16 m ja puoliperävaunulla 18 m, kun vastaava pituusrajoitus oli aikaisemmin molemmille perävaunutyypeille 12 m. [13][14]

Ajoneuvoluokka ja sen pituuden muutos lakimuutoksen voimaan astuessa on esitetty taulukossa 3. Taulukossa 3 esitettyihin puoliperävaunun sekä täysperävaunun suurimpiin sallittuihin pituuksiin on laskettu kokonaispituus. Suurin muutos on tapahtunut puoliperävaunun pituudessa. Käytännössä suurimmat sallitut kuljetusvälineen mitat ovat hieman pienempiä kuin seuraavaksi esitellyt, koska asetuksessa 31/2019 on puututtu myös ajoneuvon kääntyvyyteen liittyviin seikkoihin [14]. Tässä työssä ei kuitenkaan perehdytä näihin vaatimuksiin tarkemmin.

Taulukko 3. Ajoneuvojen suurimpien sallittujen pituuksien muutos.

Ajoneuvon tyyppi	Suurin sallittu pituus 407/2013 [m]	Suurin sallittu pituus 31/2019 [m]	Pituuden muutos [m]
Kuorma-auto	12	13	1
Puoliperävaunu	13,57	19,57	6,00
Täysperävaunu	13,57	17,57	4,00

Asetusmuutoksen myötä myös ajoneuvoyhdistelmien pituutta kasvatettiin 16,5 m:stä 22,5 m:iin sekä täysperävaunujen pituutta 25,3 m:stä pisimmillään 34,5 m:iin [5]. Uudet pidemmät ajoneuvoyhdistelmät ovat High Capacity Transport -yhdistelmiä (HCT-yhdistelmä) [5]. Tällaisessa HCT-yhdistelmässä tulee olla takaosassa tekstin "PITKÄ" sisältävä kyltti, jollainen voidaan nähdä aiemmin esitetyssä kuvassa 3. Lainsäädännön muutos mahdollistaa nyt suurempien tavaramäärien kuljettamisen kerralla, ja vähentää näin tarvittavien ajoneuvojen ja ajokilometrien määrää.

Kuljetuskorien rakenne ja niiden jäähdyttämiseen käytettävien kylmäkoneiden jäähdytysominaisuudet pyritään saamaan optimoituja käyttötarpeeseensa mahdollisimman hyvin. Vaikka kuljetusvälineiden koko sekä ulkomuoto saattavat suuresti poiketa toisistaan,

niiden rakennuselementit ovat perusominaisuuksiltaan samanlaiset. Kokovaatimusten lisäksi elintarvikkeiden kuljetusvälineiden tulee täyttää erityisvaatimuksia liittyen niiden eristys- ja jäähdytystehoon [7].

2.3 Elintarvikekuljetusten valvonta

Turvallisten elintarvikkeiden tarjoaminen kuluttajille on niiden kuljettamisen osalta pyritty varmistamaan elintarvikekuljetuksia koskevalla lainsäädännöllä. Elintarvikkeita koskevia säädöksiä on niin kansallisella kuin maakohtaisella tasolla, mutta tässä luvussa perehdytään paremmin erääseen merkittävään kansalliseen sopimukseen – ATP-sopimukseen. Lyhenne ATP tulee sopimuksen alkuperäisestä ranskankielisestä nimestä ”Accord relatif aux Transports internationaux de denrées Périssables et aux engins spéciaux a utiliser pour ces transports”.

ATP-sopimuksella tarkoitetaan sopimusta, joka koskee helposti pilaantuvien elintarvikkeiden kansainvälisiä kuljetuksia ja tällaisissa kuljetuksissa käytettävää erityiskalustoa ja se on solmittu 1970. Suomessa sopimus astui voimaan toukokuussa 1981 [3, s. 77]. Sopimuksen päivittämisestä vastaa tällä hetkellä Euroopan talouskomission sisämaanliikennekomitea, mutta sopimus on valtioiden välinen ja siihen on sitoutunut tällä hetkellä 51 valtiota. Sopimusosapuolet valvovat ATP-sopimuksen vaatimusten toteutumista kukin oman lainsäädäntönsä mukaan, eikä itse ATP-sopimuksessa ole mainittu rangaistuksia vaatimusten noudattamatta jättämisestä. [7, s. V] Sopimus kattaa lähes kaikki pakastetut sekä jäähdytettynä kuljetetut elintarvikkeet [3, s. 78].

ATP-sopimuksen piiriin kuuluvien kuljetuksien ajoneuvot tulee olla ATP-sertifioituja sekä täyttää ATP-sopimuksessa määritellyt vaatimukset. Sopimuksen vaatimukset keskittyvät kuljetuskorien eristyskykyyn, lämpötilansäätölaitteen toimintaan sekä kuormatilän lämmönvalvontalaitteistoon. ATP-todistus myönnetään jokaiselle kuormatilalle erikseen eli ajoneuvoyhdistelmän eri yksiköt tarvitsevat omat ATP-todistuksensa. [3, s. 80] Kuljetukseen käytettävät kuormatilat jaetaan ATP-sopimuksessa erilaisiin luokkiin, joille on erilaiset vaatimukset [7, s.85]. Eristetyt kuljetusvälineet jaetaan eristyskykyä kuvaavan kokonaislämmönsiirtokerroimen (k -arvo) mukaan normaali- (IN) ja raskaseristeisiin (IR) kuljetusvälineisiin. Normaali-eristeisten kuljetusvälineiden kokonaislämmönsiirtokerroin ei saa ylittää arvoa $0,70 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, eikä raskaseristeisten kuljetusvälineiden kokonaislämmönsiirtokerroin arvoa $0,40 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. [7, s. 9]

Tässä työssä käsitellään elintarvikkeiden kuljetusvälineitä, jotka on luokiteltu Suomessa eniten käytettyihin ATP-luokkiin, joita ovat luokan A normaalieristeinen koneellisesti

jäähdytetty kuljetusväline (FNA-luokka) ja luokan C raskaseristeinen koneellisesti jäähdytetty kuljetusväline (FRC-luokka) [7, s.85]. Suomeen haetuista ATP-luokista FRC-luokiteltujen kuljetusvälineiden osuus on noin 75 % ja FNA-luokiteltujen osuus noin 23 %. [15] Luokiteltujen kuljetusvälineiden tulee pystyä ylläpitämään tiettyä sisälämpötilaa ympäristön lämpötilan ollessa +30 °C. FNA-luokan kuormatilan sisälämpötila tulee voida pitää välillä 0 °C - +12 °C ja FRC-luokan välillä -20 °C - + 12 °C. [7, s. 10 ja s.85]

Jokaista jäähdytettyä kuljetusvälinettä ei tarvitse erikseen testata valtuutetussa laboratoriossa ATP-lupaa varten, kunhan kuljetusväline täyttää tietyt ehdot. Sarjavalmisteiselle kuljetusvälineelle voidaan myöntää luokitus, jos kyseistä tyyppiä edustavista kuljetusvälineistä testataan yksi ja muut tyyppin edustajan mukaiset kuljetusvälineet ovat tyyppin vaatimusten mukaisia. Tällaisessa tilanteessa testatun tyyppin edustajasta laadittu raportti toimii muiden tyyppihyväksyntätodistuksena, jonka perusteella luokitus voidaan myöntää. [7, s. 14]

Tyyppihyväksyntäraporttia varten testatun edustavan kuljetusvälineen sekä kuljetusvälineen, jolle ATP-luokitusta haetaan tyyppihyväksyntätodistuksella, tulee olla tietyiltä osin samanlainen. Kuljetusvälineen rakenteen tulee olla lähes samanlainen ja siihen tehtyjen upotusten täytyy olla samanlaiset tai yksinkertaisemmat. Ovien ja aukkojen lukumäärä ei myöskään saa olla tyyppin edustajaa suuremmat. Lisäksi kuormatilan pinta-ala saa olla maksimissaan 20 % pienempi tai 20 % suurempi kuin tyyppitestatun rakenteen. ATP-lupaa haetaan Suomessa Luonnonvarakeskukselta (Luke). [7, s. 15]

Eristetyn kuljetusvälineen koneelliseen jäähdytykseen käytettävän kylmäkoneen tulee myös olla tietyn jäähdytystehovaatimuksen mukainen. ATP-luokitellussa kylmäkorissa tulee olla vastaavan viranomaisen testaama ja hyväksymä kylmäkone. Jos kylmäkonevalmistaja on testannut ja hyväksyttänyt kylmäkoneen erikseen, voidaan ATP-luokitus myöntää kuljetusvälineelle testaamatta konetta yhdessä kuljetusvälineen kanssa. Tällöin kylmäkoneen alin sallittu jäähdytysteho tulee olla 1,75-kertainen korissa esiintyviin lämpövuotoihin verrattuna. [7, s. 27] Vaadittu laskennallinen jäähdytysteho voidaan laskea kaavalla

$$P = k \cdot A \cdot \Delta T \cdot 1,75, \quad (1)$$

jossa k on korin keskimääräinen kokonaislämmönsiirtokerroin, A on korin geometrinen keskipinta-ala, ΔT kuormatilan ulko- ja sisälämpötilojen erotus [3, s. 80] [7, s. 19]. Kaavassa 1 esitelty korin geometrinen keskipinta-ala A määritellään kaavalla

$$A = \sqrt{A_i \cdot A_o}, \quad (2)$$

jossa A_i korin sisäpinta-ala ja A_o korin ulkopinta-ala [7, s.19].

Kaavassa 1 esiintyvä lämpötilaero määrittyy haettavan ATP-luokan mukaan [7, s.10]. Esimerkiksi FRC- ja FNA-luokissa vastaavat lämpötilaerot ovat 50 °C ja 30 °C, kuormatilassa vaadittavan matalimman sisälämpötilan ja ympäristön lämpötilan välillä.

3. KULJETUSVÄLINEIDEN RAKENNE JA LÄM- MÖNSIIRTO ELINTARVIKEKULJETUKSISSA

Elintarvikkeiden kuljetusvälineissä on lämpötilasäädely kuormatila, jossa elintarvikkeita kuljetetaan. Tarkasteltaessa kuljetusvälineen vaatimustenmukaisuutta elintarvikkeiden kuljetukseen tulee esille kolme merkittävää osatekijää, jotka vaikuttavat erityisesti kuljetusvälineen lämmönsäätelykykyyn. Nämä kuljetusvälineen lämmönsäätelykykyyn vaikuttavat kolme osatekijää ovat korin rakenne ja eristemateriaalit, kuormatilan jäähdytystekniikka ja -laitteisto sekä kuormatilan sisälämpötilan mittausta ja rekisteröintilaitteisto. [7] Seuraavassa luvussa käsitellään kuljetusvälineen rakennetta ja materiaaleja sekä siinä hyödynnettävää jäähdytystekniikka ja -laitteisto.

3.1 Kylmäkuljetusvälineen rakenne

Kuljetusvälineen rakenne riippuu sen käyttötarkoituksesta ja kuormatiloja voidaan tehdä muuntumiskykyisiksi erilaisiin kuljetuksiin lisävarusteiden avulla. Nykypäivänä kuormatilojen muunneltavuus on tärkeässä osassa suunnittelun prioriteetteja, sillä kuljetettavia elintarvikkeita on hyvin erityyppisiä ja kuormatila halutaan optimoida erilaisiin käyttötarkoituksiin sopiviksi.

Alaluvussa 2.2 käsiteltiin lyhyesti yleisimpiä elintarvikkeiden kuljetuksissa käytettäviä kuljetusvälinetyyppejä, joita olivat kuorma-autot, puoli- ja täysperävaunut sekä niiden erilaiset ajoneuvoyhdistelmät. Ulkoisesti nähtävien rakenne-erojen lisäksi kuljetusvälineen kuormatilan muunneltavuutta erilaisiin kuljetustarpeisiin voidaan tuoda korin sisäosaan asennettavilla lisävarusteilla.

Elintarvikkeiden kuljetusvälineellä kuljetetaan yleensä ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia tuotteita. Ongelmaksi saattaa muodostua elintarvikkeiden pakkaus niin, etteivät ne vaurioidu kuljetuksessa. Myöskin kuormatilan ilmanvaihto sekä ilman kierrättämisen lämmön tasaaminen tulee ottaa huomioon kuormatila suunniteltaessa ja pakattaessa elintarvikkeita kuljetukseen [3, s. 49].

Kuormatilan seinäelementteihin upotetaan kuorman sidontaa varten sidontakiskoja, jotka mahdollistavat kuorman asianmukaisen kiinnityksen, mutta upotukset pienentävät samalla elementtien eristevahvuutta. Eristevahvuuden väheneminen paikoittain lisää sen tarvetta muualla tarvittavan kokonaisristustuksen varmistamiseksi, jolloin korielementtien paksuutta joudutaan usein kasvattamaan upotusten vuoksi. [3, s. 42] Lisäksi

välttämättömiä upotuksia rakenne-elementeissä ovat linjat, joita tehdään esim. sähkö- tai nesteputkien vuoksi.

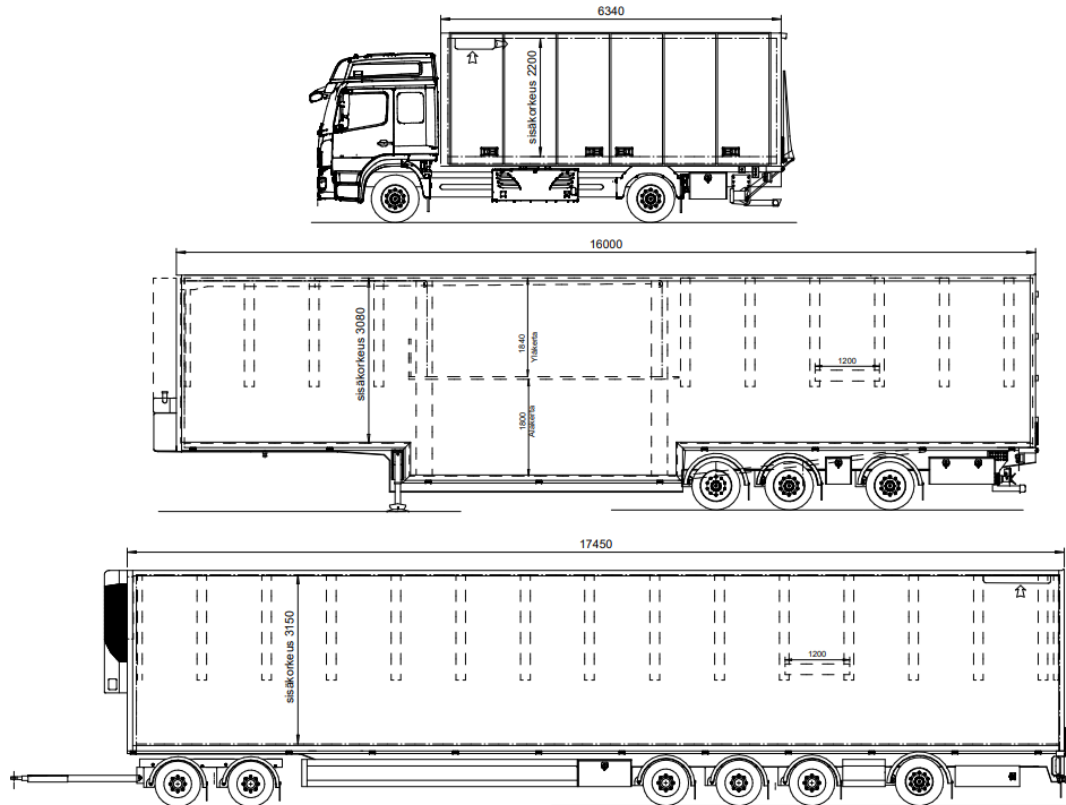
Samalla kuljetusvälineellä voidaan haluta kuljettaa elintarvikkeita, jotka vaativat erilaisia kuljetuslämpötiloja. Yksiosaisen kuljetustilan lisäksi voidaan kuormatila eritellä useaan osiin väliseinien avulla. Kuormatilan osastoiksi jakavat väliseinät voivat olla kiinteitä tai siirreltäviä. [3, s. 45] Väliseinä voi rakenteeltaan olla rakenne-elementin kaltainen jäykkä lisärakenne tai pressukankaalla verhottu eristelevy, jota kutsutaan myös kevytväliseinäksi [3, s.45–46]. Lämpövuotoja voidaan lisäksi vähentää asettamalla oviaukkojen eteen muovisia verhoja, jotka vähentävät lämmön siirtymistä koritilan ja ympäristön välillä. Väliseinien ja muoviverhojen kiinnitykseen on kuitenkin elementteihin tehtävä urituksia, jotka puolestaan ohentavan elementin eristepaksuutta. [3 s. 41] Eristepaksuuden väheneminen on huomioitava kuormatilaa suunniteltaessa.

Kuormatilaa jaetaan lämpötilavaatimusten erojen lisäksi tehokkaan ja tuotteita vahingoittamattoman kuljetuksen vuoksi. Elintarvikkeiden pakkausten kestävyys ja paino voivat estää niiden pakkaamisen päällekkäin ja lisäksi ilman tulee päästä kiertämään kuormatilassa tarpeeksi hyvin tasaisen lämmön jakautumisen varmistamiseksi. Tällaisiin tarkoituksiin käytetään erilaisia välitasoratkaisuja.

Standardikokoisia kuormalavoja voidaan pakata useampaan tasoon välitasopuomien avulla [3, s. 45]. Tällaista ratkaisua varten korin sivuseiniin on upotettava puomien kiinnitykseen käytettäviä pystykiskoja kuormalavoille määritellyin välein. Kiskoihin voidaan sitten kiinnittää päistään välitasopuomeja, joiden päälle kuormalavat voidaan asettaa useampaan tasoon kuormatilan pohjalle lastauksen lisäksi. Välitasopuomeille tehdyt upotukset on esitetty kuvan 4 puoli- ja täysperävaunussa kuormatilan seinissä olevilla pystysuuntaisilla katkoviivoilla.

Välitasot voidaan toteuttaa myös levymäisillä tasoilla, joita voidaan liikuttaa kuormatilassa pystysuunnassa esimerkiksi hydraulisesti toimivilla vaijerinostimilla [3, s. 45]. Tällaisissa välitasokoreissa välitasoja liikuttavat komponentit tarvitsevat myös seinään tehtäviä upotuksia, jotka vähentävät eristepaksuutta. Korin pinta-alaa voidaan lisätä, jos halutaan esimerkiksi lastata metallisia, häkkimäisiä rullakoita kahteen tasoon. Perävaunussa korkeutta voidaan lisätä laskemalla kuormatilan pohja pituussuunnassa akselien väliin, jolloin korin tilavuus kasvaa ja samoilla ajokilometreillä voidaan kuljettaa suurempia määriä elintarvikkeita. Välitason avulla kahden tason kuormaukseen käytettävä puoliperävaunu on esitetty kuvassa 4 keskimmäisenä. Kuvan puoliperävaunussa on välitasopuomeille tehtävät välitasoupotukset kuten täysperävaunussa, mutta lisäksi siinä on

ylös ja alas liikuteltava välitaso. Kuvasta 4 voi myös nähdä, kuinka erilakokoisia kuljetusvälineitä elintarvikkeiden kuljetuksissa voidaan hyödyntää.



Kuva 4. Kuvassa ylimpänä on jakokuljetuksiin tarkoitettu pieni kuorma-auto, keskimmäisenä kahden rullakkotason lastaukseen tarkoitettu puoliperävaunu ja alimmaisena täysperävaunu. Mitat kuvassa ovat millimetrejä. [16].

Kasvavana trendinä kuormatiloissa on, että niiden tilakapasiteettia pyritään lisäämään erilaisilla välitasoratkaisuilla sekä kuljetusvälineiden pituutta kasvattamalla, kuten esimerkiksi pitkien HCT-yhdistelmien sallimisella lainsäädännössä. Kuormatilojen kasvattaminen asettaa kuitenkin haasteeksi tarvittavan lämpötilasäätökyvyn varmistamisen elintarvikkeiden kuljetusta varten, kun kuljetusratkaisuiden monimuotoisuus lisääntyy.

3.2 Kylmäkorien materiaalit ja niiden lämmönsiirto-ominaisuudet

Elintarvikkeiden kuljetukseen käytettävien kuormakorien rakennemateriaalien tulee olla elintarvikkeiden käsittelyyn sopivia ja niiden tulee täyttää vaaditut materiaaliominaisuudet. Esimerkkinä tällaisista ominaisuuksista ovat muun muassa sileä pinta, joka mahdollistaa pintojen tarpeellisen puhdistamisen. Lisäksi pinnoista ei saa irrota elintarvikkeisiin aineita, jotka voisivat olla haitaksi terveydelle tai muuten vaikuttaisivat elintarvikkeen laa-

tuun. [3, s.42] Pinnanlaatuominaisuuksien lisäksi tärkeä asia on myös materiaalien riittävän hyvä eristyskyky sekä elementtien saumojen sekä ovien välien tiiveys, joka mahdollistaa korin lämpötilasäätelyn luotettavasti.

Kuormakorien pää rakenneosia eli sivuseiniä, lattiaa, kattoa, takaovia sekä etuseiniä kutsutaan yleisesti elementeiksi. Elementti koostuu useammasta materiaalista, jotka kootaan yhtenäiseksi kappaleeksi esimerkiksi liimaamalla. Korirakenteissa elementit voidaan rakentaa monella eri tavalla, mutta usein ne koostuvat yksinkertaistetusti paksummasta eristemateriaalista, jonka molemmin puolin kiinnitetään ohuempaa pintamateriaalia. [3, s. 42]

Sivuseinien elementtien pintarakenteet voivat olla lasikuitulaminaattia, lasikuitulaminaatin ja vanerin yhdistelmää tai metallipintaisia, kuten terästä tai alumiinia, riippuen valmistajasta. Vahvistettua lasikuitulaminaattia käytettäessä laminaatin paksuus on yleensä 2,5 mm. Jos pintamateriaalina käytetään lasikuitulaminaattia sekä vaneria yhdessä, on vanerin paksuus noin 4 mm ja lasikuitulaminaatin 1,2–1,5 mm. [3, s.42] Eristeenä käytetään usein polyuretaania (PU) tai vaahtomaista polystyreeniä (PS). Eristepaksuus sivuseinissä vaihtelee välillä 35–60 mm [3, s. 42]. Seinäelementteihin tehdään usein upotuksia sidontaa varten, jolloin eristepaksuus upotuksen kohdalla heikkenee. Upotuksia lisätessä tulee usein myös eristepaksuutta lisätä, jotta elementin lämmöneristyskyky pysyy vaadittavalla tasolla. [3, s. 43] Sivuseinien kokonaispaksuudet ovat välillä 40–65 mm.

Sivuovien rakenne vastaa usein sivuseinien rakennetta. Takaovet taas voivat olla hie-man sivuseiniä paksummat ja koostua kahdesta tai kolmesta osasta. Tämän työn laskennassa käytetään takaovien kokonaisainevahvuuksia väliltä 60–80 mm. Kolmeosaisia takaovia käytetään esimerkiksi jakeluautoissa, jolloin lastin purkamisen yhteydessä ei aina tarvitse avata koko takaosaa, vaan ovesta voidaan avata saranoidun elementin avulla vain osa. [3, s.43]

Kylmäkone kiinnitetään useimmiten kuljetusvälineen etuseinään. Etuseinä on muita seinäelementtejä paksumpi, jotta se kykenee kannattelemaan kylmäkoneen painon, mutta muuten sen eristys- ja pintamateriaalit ovat samat kuin sivuseinissä. Etuseinä tulee muotoilla niin, että ilma pääsee kiertämään kuormatilan etuosassa. [3, s.43] Tämän työn laskennassa käytetään etuseinän ainevahvuuksia väliltä 80–100 mm.

Lattiarakenne on usein muita elementtejä paksumpi ja siinä on myös poikkirakenteita riittävän kantavuuden varmistamiseksi. Lattiassa voidaan käyttää elementin vahvistamiseksi vanerilevyä sekä poikkirakenteena esimerkiksi kertopuupalkkia, vaneria tai alumiiniprofiilia. [3, s.44] Lattiaelementin yläpinnassa on jalan liukumista estävä kulutus-

pinta, joka voi olla esimerkiksi alumiinia. Kulutuspuolella on vaneria, jonka ainevahvuus on välillä 14–24 mm. Painoa kannattavana poikkirakenteena voi olla esimerkiksi 18 mm leveitä vaneri- tai puupalkkeja, joiden jakoväli on 200–300 mm. Alapinnassa voi vaihtoehtoisesti olla 4 mm paksu vanerilevy sekä 1 mm paksu lasikuitulaminaattilevy tai vahvistettu 2,5 mm paksu lasikuitulaminaatti. [3, s.43] Lattia on kokonaispaksuudeltaan noin välillä 80–150 mm. Kattoelementti on taas rakenteeltaan lähempänä sivuseinien rakennetta ja siinä ei tarvitse olla poikkikannakkeita, ellei kattoon kiinnitetä merkittävää määrää lisävarusteita tai urituksia [3, s.44]. Tämän työn laskennassa käytetään katolle kokonaisainevahvuuksia väliltä 60–100 mm.

Lämmönjohtavuuskerrointa voidaan käyttää laskettaessa korin kokonaislämmönsiirto-kerrointa k , jota käytetään korin ATP-sertifioinnissa [3, s.79]. Korin eristyskyky kuitenkin testataan todellisuudessa kokeellisesti [7, s.22]. Kokeellista menettelyä tarkastellaan tarkemmin luvussa 4. Seuraavassa taulukossa 4 on esitetty elementeissä useimmin käytettävien materiaalien lämmönjohtavuuskertoimia.

Taulukko 4. Elementtimateriaalien lämmönjohtavuuskertoimia λ [W/(m K)]
[17, s.72–77] [18].

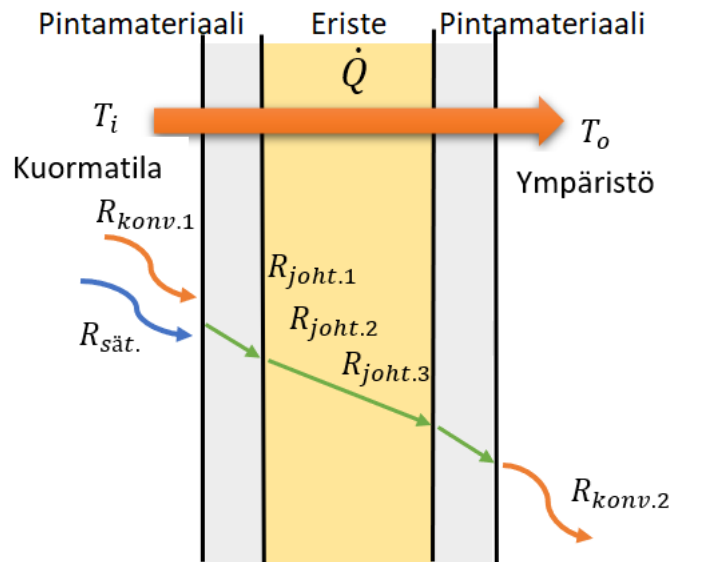
Materiaali	Lämmönjohtavuuskerroin λ [W/(m K)]
Vaneri	0,12–0,04
Lasikuitu	0,04
Alumiini	237
Teräs	45
Polyuretaani	0,02
Polystyreeni (vaahto)	0,033

Pintamateriaalien paksuudet pysyvät usein likimain samoina, mutta elementtien eristepaksuudet muuttuvat vaadittavan eristyskyvyn mukaan ja ATP-todistusta hakiessa haettavan luokan mukaan. Ainevahvuudet ja -materiaalit mitoitetaan siten, että elementin yli johtuva lämpö pysyy vaatimusten rajoissa.

Lämpö siirtyy kuljetusvälineen kuormatilan sisäosan ja ympäristön välillä kolmella eri tavalla: johtamalla, konvektiolla sekä säteilemällä. Siirtynyt lämpövirta \dot{Q} voidaan laskea sisälämpötilan T_i ja ulkolämpötilan T_o sekä lämmönvastaukset R_{kok} avulla, jotka ovat materiaaleista sekä olosuhteista riippuvaiset. [19, s.125] Lämpövirta voidaan laskea kaavalla

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_o}{R_{kok}} . \quad (3)$$

Kuvassa 5 on esitetty lämmön johtuminen kuormatilan sisältä seinäelementin läpi ympäristöön. Johtumista tapahtuu seinäelementin materiaalin sisällä sekä konvektiota ja säteilyä elementtien pinnan sekä ympäristön välissä [19, s. 125].



Kuva 5. Kuvassa on esitetty lämmön siirtyminen seinäelementin yli kuormatilan sisältä ympäristöön.

Kokonaislämmönvastus R_{kok} koostuu seinäelementin yli johtuvan lämmön tapauksessa useasta eri osasta kuvan 5 mukaisten lämmönvastusten vuoksi. Kaava asettuu muotoon

$$R_{kok} = R_{konv.1} + R_{sät.1} + R_{joht.1} + R_{joht.2} + R_{joht.3} + R_{konv.2} , \quad (4)$$

jossa $R_{konv.}$ tarkoittaa konvektiosta, $R_{sät.}$ säteilystä ja $R_{joht.}$ johtumisesta aiheutuvaa lämmönvastusta. [19, s. 126]

3.3 Kylmäkoneiden toiminta elintarvikkeiden kuljetusvälineissä

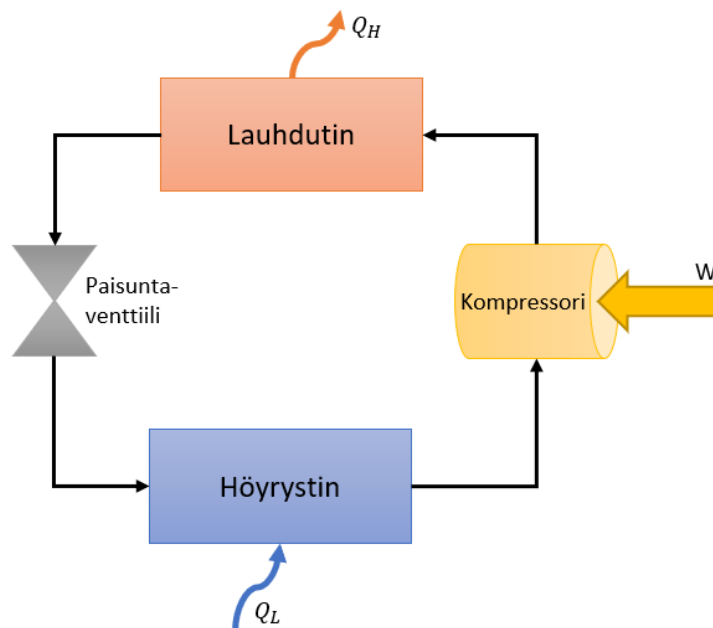
Kylmäkoneilta vaadittavat ominaisuudet riippuvat kulloisenkin kuljetusvälineen käyttötarkoituksesta. Kylmäkoneelta vaadittava jäähdytysteho riippuu esimerkiksi jäähdytettävän kuormatilan tilavuudesta sekä lämpötilasta, joka kuormatilassa halutaan pysyvän. Kylmäkoneita voidaan myös käyttää erilaisten käyttövoimien avulla, kuten kylmäkoneen omalla moottorilla tai vetoauton moottorista hihnavälityksellä siirtämällä [3, s. 49]. Kylmäkone sijoitetaan yleensä joko kuormatilan etuseinään tai kuormatilan alle, riippuen siitä mahtuuko kylmäkone kuormatilan ja auton hytin väliin vai ei. Kylmäkoneita on yksi-

ja monilämpötilakoneita, jolloin kone on suunniteltu jäähdyttämään joko yksi yhtenäinen kuormatila tiettyyn lämpötilaan tai useita erillisiä tiloja eri lämpötiloihin. Tämä taas voidaan toteuttaa väliseinillä sekä useammalla höyrystimellä, kuten aiemmin todettiin.

3.3.1 Kylmäkoneet

Koneellisesti jäähdytettävissä elintarvikkeiden kuljetusvälineissä käytettävät kylmäkoneet ovat rakenteeltaan tavallisia lämpövoimakoneita, joissa koneen tekemällä työllä siirretään lämpöä lämpövarastosta toiseen. Kylmäkoneen peruseriaate on, että lämpöä saadaan siirrettyä matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan jäähdytysprosessissa kiertävän kylmäaineen olomuodonmuutosten avulla. Elintarvikkeiden kuljetusvälineissä käytettävä jäähdytysprosessi on useimmissa tapauksissa höyryn puristusprosessi [12, s.1468]. Yksinkertaistetussa jäähdytysprosessissa on neljä pääkomponenttia: kompressori, lauhdutin, paisuntaventtiili sekä höyrystin. Suurin osa kylmäkoneen tekemästä työstä kuluu kompressorin käyttöön, joka nostaa kylmäaineen painetta [20].

Yksinkertainen kylmäkone on peruseriaatteeltaan samanlainen kuin kuljetusvälineissä käytettävät kylmäkoneet. Jäähdytysprosessissa kiertää kylmäaine, joka kulkee suljetussa kiertoprosessissa neljän pääkomponentin läpi (kuva 6) [21, s.916]. Suljettu kierto-prosessi tarkoittaa, ettei kiertoainetta juurikaan kulu jäähdytysprosessissa. Kuvassa 6 työtä kuvataan merkinnällä W . Matalan lämpötilan lämpövarastosta siirtyvää lämpöä kuvataan merkinnällä Q_L ja korkeamman lämpötilan lämpövarastoon siirtyvää lämpöä merkinnällä Q_H .

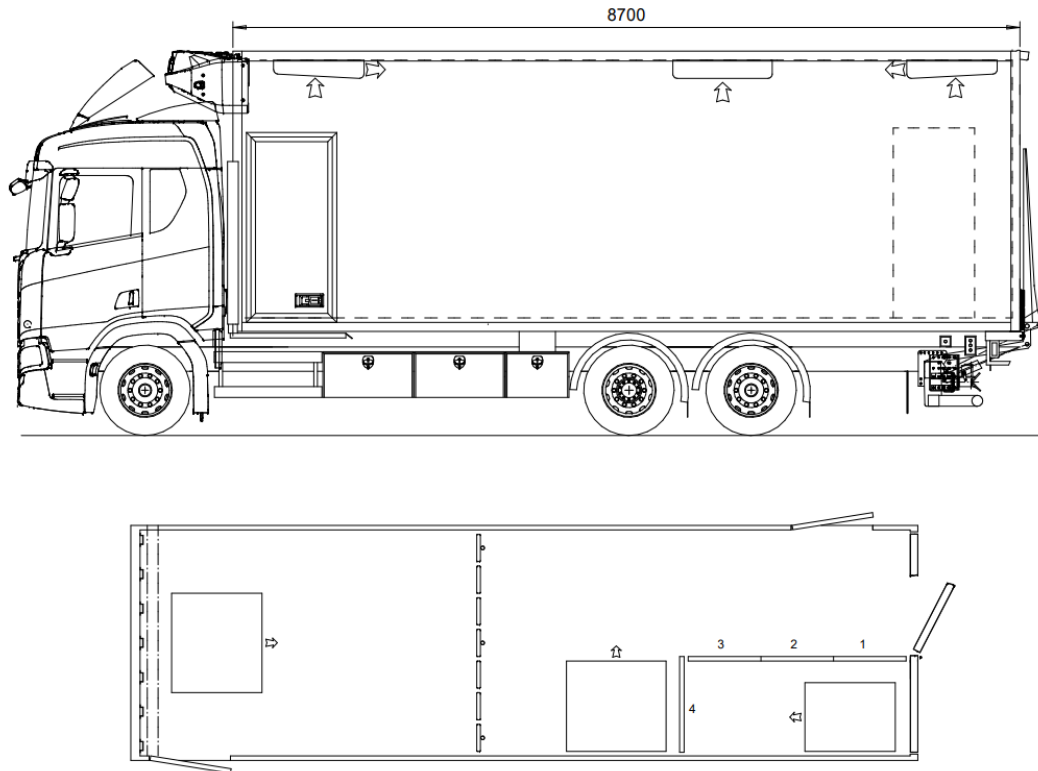


Kuva 6. Periaatekuva yksinkertaisesta jäähdytysprosessista.

Jäähdytysprosessissa työtä tekevä komponentti, kompressorin nostaa höyrystimeltä tulevan höyrystyneen kylmäaineen painetta, jolloin siitä tulee tulistettua höyryä. Kompressorilta höyry menee lauhduttimeen, joka on kuormatilan ulkopuolella sijaitseva komponentti, jossa kylmäaine luovuttaa lämpöä ympäristöön ja lauhtuu nesteeksi. Lauhduttimelta nestemäinen kylmäaine kulkee sen painetta laskevan paisuntaventtiilin läpi höyrystimelle. Höyrystimessä kylmäaine sitoo jäähdytettävästä tilasta lämpöä itseensä ja höyrystyy. Höyry jatkaa höyrystimestä taas kompressorille ja kierto alkaa alusta. [20]

Elintarvikkeiden kuljetusvälineissä lauhdutin sijaitsee kuormatilan ulkopuolella ja siirtää kuumaa ilmaa ympäristöön, kun taas höyrystin sijaitsee korin sisäpuolella ja sitoo korin sisäosasta lämpöä itseensä [19, s.125]. Elintarvikkeiden kuljetusvälineissä on myös puhaltimet, jotka tehostavat lämmön siirtymistä [21, s.916]. Pitkissä kuormatiloissa voidaan käyttää kattoon kiinnitettävää puhallustunnelia, esimerkiksi pressua, siirtämään kylmää ilmaa takaosaan asti.

Höyrystinkomponentteja voi olla myös useita eri osissa kylmäkoria, kun halutaan jakaa kuormatila useampiin osastoihin [12, s.1469]. Kuvassa 7 on esimerkiksi kolmeen eri lämpötilassa olevaan osastoon jaettu kuormatila. Höyrystimien vierellä on nuolet, jotka osoittavat ilman kiertosuunnat. Moniosaisen kuormatilan osastoihin saadaan aikaiseksi erilaiset lämpötilat erillisten höyrystimien avulla, jotka ovat kiinni saman kylmäkoneen lauhdutyksikössä. Tällaisella järjestelyllä voidaan myös välttää myös turhia lämpövuotoja, kun avataan vain liikuteltavan kuorman osaston ovia. [12, s.1469] Erillisissä höyrystinkomponenteissa on huomioitava, että niihin siirrettävä kylmäaine joutuu kulkemaan pidemmän matkan putkistossa, joka lisää painehäviöitä.



Kuva 7. Kuvassa on kuorma-auto, jossa voidaan ylläpitää useaa eri lämpötilaa kuljetuksen aikana. Ylempänä ajoneuvo on kuvattuna sivulta ja alempana se on kuvattuna ylhäältä päin. Mitat kuvassa ovat millimetrejä. [16].

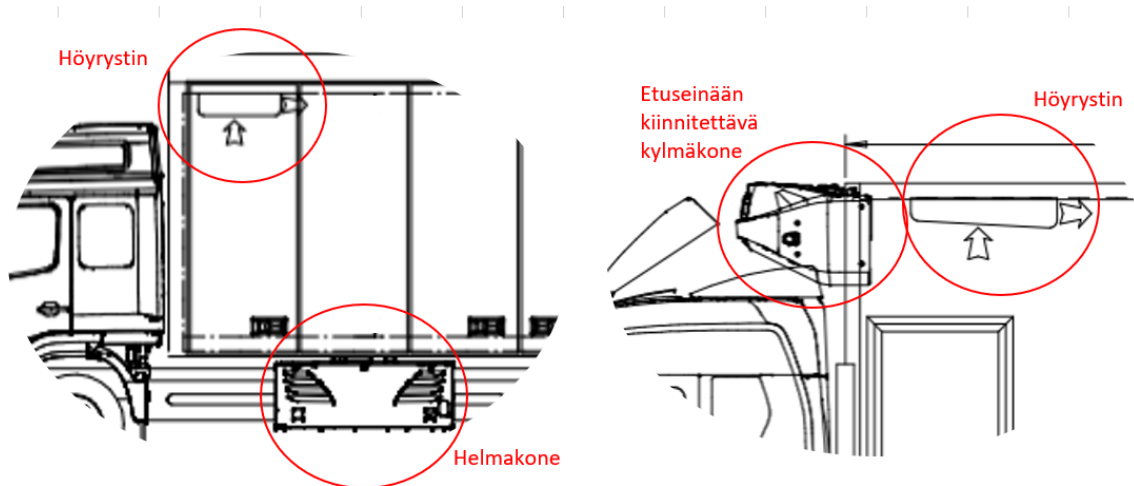
Kylmäkorien tapauksessa lämpövarastoina toimivat korin jäädytettävä sisätila sekä korin ulkopuolinen ympäristö. Koneen tekemään työhön vaikuttaa lämpövarastojen lämpötilaero, joka voi vaihdella suuresti varsinkin Suomessa, jossa ulkolämpötila voi vaihdella vuodenaikojen mukaan välillä noin 30 °C plussan sekä miinuksien puolella. Olosuhteiden muutokset aiheuttavat haasteita korien suunnittelulle sekä kylmäkoneille.

Kylmälaitteen kylmäkerroin kuvaa suhdetta siirretyn lämpömäärän ja sen siirtoon vaadittavan työn välillä. Kylmäkertoimen lyhenne COP tulee englannin kielen sanoista ”coefficient of performance” ja alaindeksi R sanansta ”refrigerator” [20] ja se voidaan laskea kaavasta

$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} \quad (5)$$

jossa Q_L tarkoittaa siirrettyä lämpömäärää ja $W_{net,in}$ lämmön siirtoon vaadittavaa tehdyn työn määrää [20]. Jäähdytetyissä kuljetusvälineissä kylmäkoneen kylmäkerroin vaihtelee voimakkaasti sen mukaan, kuinka paljon lämpövuotoja tulee esimerkiksi lastin purkutilanteissa vai kuljetetaanko lastia pidempiä matkoja, jolloin kylmäkorin tila pysyy suhteellisen vakaana. Kylmäkerroin vaihtelee normaalisti välillä 0,5–1,5 [12, s. 1468].

Kylmäkone voidaan kiinnittää kuormatilan etuseinään, kuten aikaisemmin mainittiin, jolloin kylmäkoneen lauhdutinosa sijaitsee etuseinän yläosassa, kuormatilan ulkopuolella ja höyrystinosa sisäpuolella. Niin sanottu helmakone taas sijaitsee korin ulkopuolella, jolloin lauhdutinosa on kiinnitettynä runkoon kuormatilan alapuolelle. Höyrystin on tällöin kauempana kylmäkoneesta, sillä se sijoitetaan etuseinän yläosaan. Kuvassa 8 on etuseinään kiinnitetty kylmäkone sekä ajoneuvon runkoon kiinnitetty kylmäkone.



Kuva 8. Vasemmalla on helmakone ja oikealla etuseinään kiinnitetty kylmäkone sekä niiden höyrystinosat. [16].

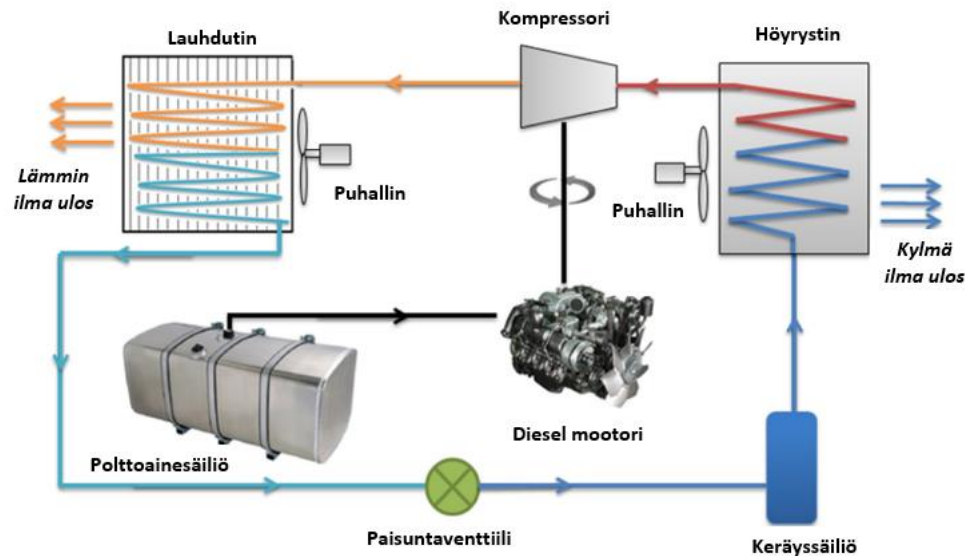
Helmakonetta voidaan käyttää, jos esimerkiksi auton ja kuormatilan väliin ei jää kylmäkoneelle riittävää tilaa. Kuormakorin etuseinään voidaan myös tehdä upotus kylmäkoneen varten, jolloin hytin takaseinän ja upotuksen väliin jää kylmäkoneelle paikka.

3.3.2 Jäähdytystekniikka kuljetusvälineissä

Koneellista jäähdytystä hyödynnettäessä saadaan kylmäkoneen käyttövoima auton moottorista tai kylmäkoneen omalta moottorilta. Raskaan kaluston kuljetusvälineissä kylmäkoneella on yleensä oma moottori, jotta jäähdytyslaitteisto toimii, vaikka auton moottori ei käy. [3, s. 49] Jäähdytysprosessissa työtä tehdään kompressorin ja puhaltimien käyttämiseksi ja siinä voidaan hyödyntää erilaisia voimansiirtotapoja käyttötarpeesta riippuen.

Kylmäkoneen käyttövoimana jäähdytysprosessissa voidaan käyttää vaihtovirtageneraattorin tuottamaa sähköä, kylmäkoneen yhteyteen rakennettua polttomoottoria, yleensä dieselmoottoria, tai hihnakäyttöä, jolloin hihnan avulla pyörimisvoima siirretään kompressorille suoraan auton moottorista. Sähkökäyttöä hyödynnetään yleensä pienemmissä

kuormakoreissa ja polttomoottorikäyttöä taas käytetään enemmän suuremmissa ajoneuvoissa. [12, s.1468] Kuvassa 9 on esitetty yksinkertaistettu kuva kylmäkoneen polttomoottorista käyttövoimansa saavan jäähdytysprosessin prosessikaaviosta.



Kuva 9. Jäähdytysprosessin prosessikaavio [21, s.916].

Tieliikenteen päästöt ovat jo pitkään puhututtaneet ja siten kuljetusvälineiden energiatehokkuudesta ja ympäristöystävällisyydestä on tullut kehityskohde myös elintarvikekuljetusten jäähdytystekniikalle. Jäähdytysprosessin käyttövoimana voidaan hyödyntää paljon erilaisia variaatioita energialähteinä, kuten eräänä esimerkkinä hybridikäyttöä, joka saa energiansa auton moottorin pyörintäenergiasta. Eron normaalikäyttöiseen jäähdytysprosessiin on auton moottorin ja muun jäähdytysprosessin välillä on vaihtovirtageneraattori, joka muuttaa esimerkiksi hihnavälityksen avulla auton moottorista välittyvän liike-energian sähkövirraksi. Tämä sähkövirta johdetaan kompressoria ja puhaltimia pyörittäviin sähkömoottoreihin. Tällaisen jäähdytystekniikan hyödyntäminen on energiatehokkaampaa kuin käyttövoiman ottaminen suoraan moottorista. [22]

Mahdollisena vaihtoehtoisena käyttövoimana voitaisiin käyttää myös lämpöä. Lämpöä käyttövoimanaan hyödyntävässä jäähdytystekniikassa käytettäisiin mekaanisesti toimivan kompressorin tilalla niin kutsuttua ”termistä kompressoria” sekä sorbenttia. Sorbentti on aine, joka absorboi ja/tai adsorboi kylmäainetta jäähdytysjärjestelmässä. Absorboinnissa aineet sitoutuvat toisiinsa, mutta adsorboinnissa toinen aine kiinnittyy sorbentin pintaan. Tässä tekniikassa käytettäisiin kuljetusvälineen moottorista kerättyjä kuumia savukaasuja lämmittämään sorbenttia, joka toimisi termisenä kompressorina jäähdytysprosessissa ja nostaisi kylmäaineen paineen lauhduttimen paineeseen desorptiomalla eli vapauttamalla kylmäaineen. Kylmäaine kiertäisi lauhduttimen ja paisuntaventtiilin läpi höyrystimelle, kuten normaalissakin jäähdytysprosessissa. Höyrystimessä sorbentti

jäähtyisi ja absorboisi itseensä höyrystynyttä kylmäainetta sen jälkeen, kun kylmäaine on sitonut lämpöä kuormatilasta. Lämmön sitomisen jälkeen sorbentti ja kylmäaine jatkaisivat ulos höyrystimestä ja kierto alkaisi alusta. [12, s.1472] Käytännössä tällaisen systeemin toimintaa on tutkittu, mutta esimerkiksi Koehler et al. esittävät absorptiojärjestelmää tutkivassa tutkimuksessa [23], että dieselmoottorin pakokaasujen kierrättäminen jäähdytysprosessin käyttöön ei riitä täyttämään kuormatilan jäähdytysvaatimuksia ilman lisänä käytettäviä apulaitteita [12, s.1473].

Zheng et al. ovat tutkineet jäähdytysprosessin käyttövoimana aurinkoenergian hyödyntämistä tutkimuksessaan [24]. Aurinkoenergian hyödyntämisessä on kuitenkin, joitakin merkittäviä huonoja puolia, kuten aurinkoenergian säästä riippuva saatavuuden epäjatkuvuus [24, s. 1]. Aurinkoenergian hyödyntäminen yhdessä jonkin muun jäähdytysratkaisun kanssa voisi kuitenkin saavuttaa tarpeeksi suuren ja jatkuvan jäähdystehon varmuuden.

Eräänä kehityskohteena kuormatilan jäähdyttämisessä ovat olleet faasinmuutosmateriaalit (PCM-materiaalit), joka tulee englannin kielen sanoista "Phase Change Material" [12, s. 1469]. PCM-materiaalien käyttöä on tutkittu esimerkiksi kiinalaisen yliopiston tutkimuksessa [24]. Tämä jäähdytystekniikka ei ole koneellinen, toisin kuin aiemmin tässä luvussa käsitellyt jäähdytystekniikat, mutta sitä voisi hyödyntää esimerkiksi yhdessä koneellisen jäähdytyksen kanssa. PCM-materiaaleja voisi hyödyntää lisäämällä materiaalia erilaisiin onttoihin säiliöihin, kuten esimerkiksi putkiin ja levyihin. Materiaalien hyödyntäminen perustuu siihen, että näitä PCM-säiliöitä ladattaisiin eli käytännössä jäädytettäisiin ennen käyttöä, jonka jälkeen ne sijoitettaisiin kuormatilaan jäähdytettävien elintarvikkeiden läheisyyteen. Kuormatilassa niiden faasinmuutosenergia, joka vapautuisi materiaalin sulaessa, jäähdyttäisi elintarvikkeita. [12, s. 1469]

Faasinmuutosmateriaalien käyttö soveltuisi lyhyisiin kuljetusmatkoihin, sillä faasinmuutosmateriaalien latauksen purkautuminen, eli tässä tapauksessa sulaminen, aiheuttaa sen, ettei niiden vaikutusaika ole kovin pitkäkestoinen. Materiaaleja voitaisiin käyttää pienemmissä jakeluautoissa, joissa ovien avaaminen aiheuttaa lämpövuotoja. Materiaaleja hyödyntämällä yhdessä koneellisen jäähdyttämisen kanssa voitaisiin myös kylmäkoneiden tehoja pienentää, jolloin energiankulutus laskisi. [12, s.1469] Huomioitavaa on kuitenkin se, että vaikka itse jäähdytystilanteessa faasinmuutosmateriaalit eivät kuluta ulkoista energiaa, niiden lataamiseen tarvitaan kuitenkin energiaa.

Elintarvikkeiden kuljetusvälineiden jäähdytystekniikan kehittämiseksi on tutkittu ja ehdotettu useita erilaisia toteutustapoja. Kylmäkoneiden käyttövoimaksi polttomoottoritekniik-

kan tilalla voitaisiin tulevaisuudessa käyttää esimerkiksi uusien koneellisten jäähdytyslaitteistojen ja jäähdytyksessä hyödynnettävien materiaalien yhdistelmää, jotka mahdollistaisivat tarpeeksi tehokkaan, mutta ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon polttomoottoritekniikalle.

3.3.3 Ilman liike kuormatilassa

Kuormatilassa tehokas ilman kierto on tärkeää, jotta haluttu sisälämpötila pysyy tasaisena ja kylmäkone saa jäähdytettyä elintarvikkeita koko kuormatilan tilavuudelta. Tehokkaan ilmanvaihdon varmistavat kylmäkoneen puhaltimet, jotka saavat ilman kiertämään koritilassa [12, s. 1469]. Lämmin ilma nousee ylöspäin kuormatilassa, jonka vuoksi höyrystinkomponentit on sijoitettu kuormatilan yläosaan. Jos käytetään vain yhtä höyrystintä, se sijaitsee yleensä korin etuseinän yläosassa. Puhaltimet ja höyrystimen jäähdyttämä ilmassa saavat ilman kiertämään korin ympäri etuosasta taaksepäin sekä ylhäältä alaspäin. Korin rakenne-elementtien yli johtunut sekä elementtien väleistä ja ovien saranoista vuotanut ympäristön lämmin ilma palautuu kuormatilan alaosan kautta takaisin jäähdytysyksikköön. [12, s.1469]

Ilman kierron varmistamisen tärkeys on korostunut, kun kuormatilat pitenevät ja ilman tulisi edelleen kiertää tehokkaasti koko korin matkalta. Kylmän ilmassa johtamiseksi kuormatilan takaosaan asti voidaan käyttää aiemmin mainittua kattoon kiinnitettävää pressua, joka ohjaa ilman taakse. Kuorman pakkaaminen on myös tärkeässä roolissa ilman kierron varmistamiseksi, jotta kylmä ilma levittyy koko kuormatilaan ja lämmin ilma palautuu jäähdytettäväksi kylmäkoneelle [12, s.1469].

Haasteena on, että kun elintarvikkeita halutaan kuljettaa koko ajan suurempia määriä yhdellä ajoneuvolla, myös kylmäkoneelta vaaditaan suurempia tehotasaitteita ja il-mankierrätysjärjestelmän suunnitteluun tulee kiinnittää aiempaa tarkempaa huomiota. Ilman kiertoa voidaan pyrkiä mallintamaan erilaisilla laskennallisilla virtausmekaniikan tekniikoilla, kuten esimerkiksi Hoang et al. tutkimuksessa [25]. Nykypäivänä ilman kierron mallintamiseen kylmäkorissa käytetäänkin erilaisia tietokoneella toteutettavia mallinnus-tekniikoita, kuten laskennallista virtausmekaniikkaa [12, s. 1469].

3.3.4 Kylmäaineet

Tyypillisimpiä elintarvikkeiden kuljetusvälineissä käytettäviä kylmäaineita Suomessa ovat käytöstä poistumassa oleva R404a sekä uudempi R452a [9]. Kylmäaineisiin liittyvä

lainsäädäntö on muuttumassa nopeasti tiukemmaksi ja ympäristöystävällisempien kylmäaineiden käyttöönotto asettaa muutospainetta alalle. Kylmäaineiden ilmaston lämmityspotentiaalia voidaan vertailla GWP-arvon avulla. GWP on lyhenne englannin kielen sanoista "Global Warming Potential" ja sen vertailukohtana on hiilidioksidi, jonka GWP-arvo on yksi. Euroopan parlamentin ja neuvoston laatiman F-kaasuasetuksen EU 517/2014 mukaan vuoden 2019 jälkeen on kiellettyä tuoda markkinoille GWP-arvoltaan 2500 ylittäviä kylmäaineita käyttäviä kylmäkoneita [9]. Aiemmin paljon käytetyn R404a – kylmäaineen GWP-arvo on 3922, minkä vuoksi sitä ei ole voinut vuoden 2019 jälkeen käyttää uusissa markkinoille tuotavissa kylmäkoneissa [26]. R404a kylmäainetta on tullut korvaamaan R452a, jonka GWP-arvo on 2141 [26].

F-kaasuasetus käsittelee muun muassa HFC- ja HFO-kylmäaineita, joita kutsutaan myös F-kaasuiksi. HFC- ja HFO-kylmäaineet ovat osittain halogenoituja hiilivetyjä, mutta ero on niiden hiiliatomeiden välisissä sidoksissa, jotka ovat HFC-aineilla yksöissidoksia ja HFO-aineilla kaksoissidoksia. [27] Edellä käsitellyistä kylmäaineista R404a on HFC-kylmäaine ja R452a on HFC- ja HFO-aineiden seos [26] [28, s. 102].

Kylmäaine R452a on kaasusekoitus, jota voidaan käyttää väliaikaisena ratkaisuna F-kaasuasetuksen vaatimukseen. Aineen GWP-arvo alittaa kuitenkin toistaiseksi sallitun maksimiarvon, mutta sen käyttö ei ole enää mahdollista uusissa kylmäkoneissa 1.1.2022 alkaen. [26] Kiellon astuessa voimaan siirtymäajan kylmäaineet on uusissa kylmäkoneissa korvattava aineilla, joiden GWP-arvo on alle 150 [26].

Kylmäaineiden muutostarve sekä jäähdytyslaitteiden tekniikan sopeuttaminen uusille aineille ovat ajankohtaisia kehittämiskohteita Euroopassa ja korvaavien kylmäaineiden löytämiseksi tehdään aktiivista tutkimustyötä [28]. F-kaasuasetuksen mukaan EU:n omia HFC-päästöjä on tarkoitus vähentää neljällä viidesosalla vuoden 2015 päästötasosta vuoteen 2030 mennessä [26]. Tavoitteeseen pääsemiseksi kylmäaineiden päästörajoja kiristetään jatkuvasti. HFC-kylmäaineiden korvaajiksi on esitetty erilaisia luonnollisia kylmäaineita, kuten hiilidioksidia, ammoniakkia sekä puhtaita hiilivetyjä [28, s. 101]. On arvioitu, että vuoteen 2030 mennessä kuljetusvälineiden jäähdytyksessä käytetyistä kylmäaineista 60 % olisi luonnollisia kylmäaineita ja 40 % HFO-kylmäaineita [28, s. 109].

3.4 Kylmäkoneiden jäähdytys- ja puhallustehojen muutokset kuormatilojen kasvun myötä

Haluttaessa kuljettaa suurempia määriä elintarvikkeita kuljetusvälineen tilavuutta kasvatamalla kasvaa suhteessa myös kylmäkorin elementtien yli siirtyvä lämpömäärä Q . Suuremman lämpömäärän siirtymiseen korin lämmönsiirtopinta-alan lävitse tulee vastata

suuremmalla jäähdytysteholla. Suuret kuormatilan asettavat haasteita myös kuormatilan ilmankierrolle ja siten kylmäkoneen puhallusteholle.

ATP-luokiteltava kuljetusväline ja kylmäkone voidaan testata eristetyssä mittaustilassa yhdessä, jolloin kylmäkoneen tulee pystyä pitämään kuormatilan sisälämpötila ATP-luokituksen vaatimassa matalimmassa lämpötilassa kahdentoista tunnin mittausjakson ajan, kun korin ulkopuolisen ympäristön lämpötila on +30 °C. FNA-luokitellun kuljetusvälineen jäähdytyslaitteiston on testauksilanteessa siis kyettävä ylläpitämään 30 °C asteen lämpötilaeroa korin sisä- ja ulkopuolisen ilman välillä. [7, s. 26–27] FRC-luokitellulle kuljetusvälineelle ylläpidettävä lämpötilaero on 50 °C [7, s.27]. Mittaus suoritetaan ATP-sopimuksessa määritellyn testausmenettelyn tavoin koneellisesti jäähdytetylle kuljetusvälineelle. [7, s.25–29]

Elintarvikkeiden kuljetusvälineelle voidaan myös antaa hyväksytty ATP-luokitus testaamalla sen eristyskyky eli kokonaislämmönsiirtokerroin k sekä jäähdytyslaitteisto erillisinä yksiköinä. Tällöin jäähdytyslaitteisto kaikkine apulaitteineen on valtuutetun viranomaisen toimesta testattava ja edellä kuvaillun testausmenetelmän mukaisesti hyväksyttävä ATP-luokan vaatimuksia vastaavaksi, ja jäähdytyslaitteiston tehokkuuden on vastattava 1,75-kertaisesti kuormatilan seinien yli tapahtuvia lämpöhäviöitä. [7, s. 27] Tarvittava jäähdytysteho tulee laskea kullekin kuljetusvälineelle, jolle ATP-luokitusta haetaan, aiemmin esitellyn lämpötehon kaavan (1) avulla.

Tarkastellaan kuljetusvälineiden suurimman sallitun pituuden muutoksen vaikutusta kylmäkoneilta vaadittaviin jäähdytystehoihin. Uuden asetuksen 31/2019 mukaan suurin sallitun pituuden muutos tapahtui puoliperävaunulle, jossa tapahtunut muutos pituudessa on taulukon 3 mukaan suurimmillaan 6 m. Perävaunutyypin jäähdytyslaitteistolta vaaditun jäähdytystehon nousu on siis kaikista suurin, sillä kaavan (1) mukaan jäähdytysteho kasvaa geometrisen pinta-alan (2) kasvaessa.

Tarkastellaan tapahtuvaa vaadittavan jäähdytystehon muutosta neljässä erilaisessa puoliperävaunussa, joiden mitat sijoittuvat sallittujen pituuksien maksimipituuksiin. Lasketaan tarvittava jäähdytysteho kahdelle FNA-luokitellulle puoliperävaunulle, joista toinen on ulkopituudeltaan asetuksen 407/2013 mukainen ja toinen nykyisin voimassa olevan asetuksen 31/2019 ulkopituuden mukainen. Suoritetaan laskenta vastaavasti kahdelle FRC-luokitellulle puoliperävaunulle.

Suomessa ajoneuvon suurin sallittu korkeus on 4,4 m asetuksen 407/2013 pykälän 25 mukaan. Käytetään laskennassa korin sisäkorkeutena 3 m ja ulkoleveytenä mitta 2,6 m. Lisäksi valitaan korin rakenne-elementtien paksuudet luvussa 3.2 ”Kylmäkorien ma-

terialit ja niiden lämmönsiirto ominaisuudet” esitetyistä ainevahvuuksista. Lisäksi huomioidaan, että FNA-luokitellulta kuljetusvälineeltä vaadittu kokonaislämmönsiirtokerroin k on matalampi kuin FRC-luokitellulta kuljetusvälineeltä vaadittu k -arvo. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että FNA-kylmäkorissa ei todellisuudessa ole yhtä suuria eristevahvuuksia, kuin FRC-korissa. Eristevahvuuksien pienentyessä saadaan kuormatilaan enemmän tilaa elintarvikkeille, joka hyödynnetään FNA-koreissa, joissa päästään vähennyksestä huolimatta vaadittuun kokonaislämmönsiirtokerroimen raja-arvoon. Laskennassa on FNA-luokitellulle korille käytetty alaluvussa 3.2 esiteltyjä pienimpiä kokonaisainevahvuuksia ja FRC-luokitellulle vastaavasti suurimpia. Jäähdytystehon laskennassa, jonka tulokset on esitetty taulukossa 5, on käytetty kaavoja (1) ja (2).

Taulukko 5. Vaadittavat kylmäkoneen jäähdytystehot neljälle erilaiselle puoliperävaunulle. Taulukossa on esitetty kaavalla (2) laskettu geometrinen pinta-ala A [m²] ja kaavalla (1) laskettu jäähdytysteho P [W].

	Luokitus	Ulkopituus [m]	Geometrinen pinta-ala A [m ²]	Jäähdytysteho P [W]
PPV 1	FNA	13,57	167,72	6163,59
PPV 2	FNA	19,57	235,26	8645,98
PPV 3	FRC	13,57	168,36	5892,56
PPV 4	FRC	19,57	236,24	8268,49

Taulukon 5 tuloksista nähdään, että puoliperävaunujen suurimman pituuden muutos vaikuttaa kylmäkoneelta vaadittavaan jäähdytystehoon. Vaadittavan jäähdytystehon muutos on otettava huomioon, sillä kylmäkoneiden on kyettävä ylläpitämään edelleen vaadittavia lämpötiloja elintarvikkeille myös kuormatilojen kokojen kasvaessa. Edellä tarkasteltu laskenta on suoritettu uusille kuljetusvälineille, mutta on huomattava, että kuljetusvälineen ikääntyessä sen eristysominaisuudet heikkenevät. Tassou et al. [12, s.1468] mukaan on tutkittu, että kuormatilan kokonaislämmönsiirtokerroin k voi menettää vuosittain jopa 5 % eristystehostaan.

Tarkastellaan seuraavaksi aiheuttaako eristystehon heikkeneminen ongelman, kun kuljetusvälineen vaatimuksenmukaisuus tulee todentaa uudestaan kuuden vuoden kuluttua ATP-luokituksen myöntämisestä. Tällöin kylmäkoneen tulee edelleen kyetä pitämään luokituksen vaatimia lämpötilaeroja yllä kuormatilan ja ympäristön välillä. Taulukossa 6 on esitetty taulukon 5 laskennassa käytettyjen perävaunujen mukaisille kylmäkoneille uudet jäähdytystehojen arvot kuuden vuoden kuluttua perävaunujen valmistumisesta, kun oletetaan, että kokonaislämmönsiirtokerroimen arvot nousevat 5 % vuosittain. Laskennassa ei ole enää otettu varmuuskerrointa 1,75 huomioon, sillä kausitarkastus on kokeellinen mittausta [7].

Taulukko 6. Uusintalaskennassa saadut jäähdytystehojen arvot, kun perävau-
nun valmistumisesta on kulunut 6 vuotta. Taulukossa on kokonaislämmönsiirtokerroin
 k [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$] ja jäähdytysteho P [W]

	Luokitus	Kokonaislämmönsiirtokerroin k [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$]	Jäähdytysteho P [W]
PPV 1	FNA	0,94	4719,88
PPV 2	FNA	0,94	6620,82
PPV 3	FRC	0,54	4512,34
PPV 4	FRC	0,54	6331,75

Tarkastellaan kahden Suomessa eniten käytetyn kylmäkonevalmistajan kylmäkoneita, joita on Suomen viranomaisen toimesta ATP-luokitelluissa kuljetusvälineissä. Tarkastellaan niiden tehokapasiteetteja sekä verrataan niitä laskettuihin teho vaatimuksiin, jotka esitettiin taulukossa 6. Suomessa vuonna 2020 ATP-luokitelluissa kuljetusvälineissä toimivista kylmäkoneista 58 % oli Thermo Kingin valmistamia ja 20 % Carrierin valmistamia [9]. Vertaillaan Thermo Kingin ja Carrierin suurimmille kuormatiloille tarkoitettujen kylmäkoneiden jäähdytystehoja, jotka on ilmoitettu ATP-sopimuksen mukaisessa $+30\text{ °C}$ ympäristön lämpötiloissa. Kuormatilan sisälämpötilan ollessa -20 °C Carrierin kylmäkoneen Vector 1950 jäähdytysteho on 10100 W [29]. Vastaavassa lämpötilassa Thermo Kingin kylmäkoneen A-500 jäähdytysteho on 10400 W [10]. Taulukossa 6 sisälämpötilan ollessa -20 °C vaadittavat jäähdytystehot jäävät huomattavasti pienemmiksi, kuten myös taulukossa 5. Voidaan siis todeta, jos kylmäkoneiden jäähdytystehojen voidaan olettaa pysyvän likimain samoina kuusi vuotta, että tämänhetkisten kylmälaitteiden tehot riittävät uusiin, tilavuudeltaan suurempiin kuormatiloihin.

Eräs ratkaisu kasvaviin teho vaatimuksiin voisi olla aiemmin mainitut faasinmuutosmateriaalit, joita voitaisiin hyödyntää yhdessä kylmäkoneen kanssa ja tehostaa näin kuormatilan jäähdyttämistä. Tilakapasiteetin ja teho vaatimusten kasvaminen koskee kuitenkin eniten suurempia yksiköitä, kuten puoli- ja täysperävaunuja sekä pidempiä kuljetusmatkoja, jolloin faasinmuutosmateriaalien hyöty ei välttämättä jää enää merkittäväksi tätä kehityskohdetta ajatellen.

Jäähdytystehojen riittävyyden lisäksi huomionarvoista on myös kylmäkoneen riittävä puhallusteho riittävän tehokkaan ilman kierron ja lämmön siirtymisen takaamiseksi kuormatilassa. Tarpeeksi tasaisen kuormatilan lämpötilan ylläpitämisen kanssa on ollut haasteita jo aiemmin 13 m pitkien kuljetusvälineiden kanssa, ja haaste tulee vain kasvamaan suurempien kuormatilojen yleistyessä. Ongelmaksi saattaa nousta markkinoilla olevien kylmäkoneiden puhallustehon riittämättömyys. [9]

Tehdään yksinkertainen laskennallinen tarkastelu kylmäkoneiden puhallustehon riittävydestä suurimmissa Suomessa valmistettavissa kuormatiloissa. Otetaan tarkasteluun aiemmin laskennassa käytettyjen puoliperävaunujen 2 ja 4 tilavuudet. Puoliperävaunu 2 on FNA-luokiteltu kuljetusväline, jossa siis kuljetetaan jääkaappilämpötilaa vaativia elintarvikkeita. Puoliperävaunu 4 taas on FRC-luokiteltu kuljetusväline, jossa kuljetaan pakastelämpötilassa kuljetettavia elintarvikkeita. Ilman kiertoon vaikuttavat useat kuormatilan sekä olosuhteiden ominaisuudet, kuten ilmanpaine ja elintarvikkeiden kuormaus-tapa, mutta suurpiirteisenä ohjeena ilmankierron vaatimustasolle on, että kuormatilan tilavuuden ilman tulisi tuoreita kasviksia kuljetettaessa kiertää noin 60–80 kertaa tunnissa ja pakasteita kuljetettaessa noin 30–40 kertaa tunnissa [3, s. 49].

Lasketaan ilmankierron tarve puoliperävaunulle 2, jos siinä halutaan kuljettaa tuoreita kasviksia sekä puoliperävaunulle 4, jos siinä kuljetetaan pakasteita. Tarvittava tilavuusvirta puoliperävaunulle 2, kun halutaan sen kuormatilan ilman vaihtuvan 60–80 kertaa tunnin aikana, on noin 8800–11800 m³/h. Puoliperävaunulle 4, jossa ilman halutaan vaihtuvan 30–40 kertaa tunnissa, tilavuusvirran tarve olisi 4300–5700 m³/h. Käytetään vertailuun samoja kylmäkoneita kuin käytettiin jäähdytystehoja tarkasteltaessa. Carrierin Vector 1950 kylmäkoneen tuottama maksimitilavuusvirta on 5700 m³/h ja Thermo Kingin A-500 kylmäkoneen tilavuusvirran tuotto 6000 m³/h. Vertailtaessa kylmäkoneiden ominaisuuksia ohjearvoihin voidaan nähdä, että puhallustehot riittävät pakasteita kuljettaessa haluttuun ilmankierron tasoon, mutta tilavuusvirta ei ole riittävä tuoreita kasviksia kuljetettaessa.

Elintarvikkeiden kuljetusvälineiden riittävät jäähdytys- ja puhallustehot tulevat varmasti olemaan kuljetusalan kehityksen kohteita tulevaisuudessa. Kuormatiloja kasvatettaessa ja lisävarusteiden määrää nostaessa vaatii kuljetusvälineiden eristyskyky ja jäähdytys-teknikka jatkuvaa valvontaa sekä testaamista. Testaamista varten on kuitenkin tehtävä investointeja ja kokeellisen testaustilan tulee soveltua hyvinkin erilaisten kuljetusvälineiden testaamiseen, joka taas puolestaan asettaa omat haasteensa. Tuotekehitystä tehtäessä voidaan mahdollisesti hyödyntää myös aiemmin ilman kierron yhteydessä esiin nostettua laskennallista virtausmekaniikkaa ja mallinnusta.

4. KULJETUSVÄLINEIDEN TESTAUSLABORATORIO

Nykypäivän odotukset elintarvikkeiden kuljetusvälineiden muunneltavuudesta, monikäyttöisyydestä sekä kuormatilojen kokojen kasvattamisesta luovat tarpeen kuljetusvälineiden laadun ja vaatimustenmukaisuuden varmistamiselle. Tarpeeseen vastaamaan tulisi uusia kuljetusvälinetyyppejä voida testata laadun takaamiseksi ja kuljetusvälineiden kehittämiseksi.

Vuonna 2020, kun elettiin uuden kuljetusvälineiden sallittuja pituuksia kasvattaneen asetuksen voimassaolon toista vuotta, uusia HCT-mittaisia puoli- ja täysperävaunuja ATP-sertifioitiin Suomessa noin 80 kappaletta. Suomessa pystytään kuitenkin tällä hetkellä testaamaan vain kuljetusvälineitä, joiden kuormatilan pituus on korkeintaan 15 m ja tätä suuremmat kuormatilat joudutaan viemään Ruotsiin testattavaksi. Luonnonvarakeskuksen sivuilla todetaankin: ”Suomalaisen kuljetusvälineiteollisuuden kannalta olisikin ensiarvoisen tärkeää, että kotimaisia testausmahdollisuuksia kehitettäisiin”. [9] Seuraavaksi tarkastellaankin yksinkertaistetusti millainen nykypäivän testauslaboratorion tulisi olla.

4.1 Kuljetusvälineen eristyskyvyn testaus ATP-sopimuksessa

Kuljetusvälineen eristyskyky määritellään ATP-sopimuksessa kuljetusvälineen kokonaislämmönsiirtokertoimen k avulla, joka on sopimuksessa määritelty laskettavaksi kaavalla

$$k = \frac{P}{A \cdot \Delta T}, \quad (6)$$

jossa P on lämmitys- tai jäähdytysteho, joka vaaditaan ylläpitämään vaadittu lämpötilaero ΔT ja A on korin keskipinta-ala, joka on määritelty aiemmin kaavassa (2). [7, s. 19] Huomattavaa on, että eristyskykyä testattaessa kuormatilassa ylläpidettävä lämpötilaero ΔT on $25^\circ\text{C} \pm 2 \text{ K}$. Lämpötilaero lasketaan keskimääräisen sisälämpötilan T_i ja ulkolämpötilan T_o erotuksena. [7, s. 19]

ATP-sopimukseen on kuljetusvälineen eristyskyvyn testaamiseen määritelty testausmenettely, jonka mukaisesti sen k -arvo voidaan mitata haluttua ATP-luokitusta varten. Vaaditut k -arvot olivat luvussa 2 esitetyt eli FNA-luokassa enintään $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ja FRC-luokassa $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Testausmenettely voidaan toteuttaa, joko sisätilan jäähdytys- tai

lämmitysmenetelmällä, joista tässä luvussa käydään tarkemmin läpi sisätilan lämmitysmenetelmää [7, s.22].

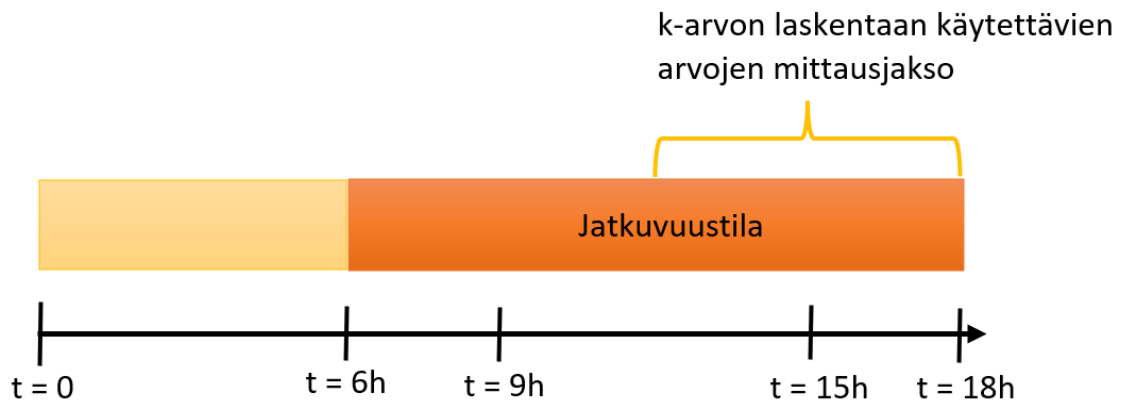
Sisätilan lämmitysmenetelmässä kuormatilaa lämmitetään sähköisellä lämmityslaitteistolla, joka tarkoittaa esimerkiksi vastuksia [7, s. 22]. Lasketusta kokonaislämmöntuotosta voidaan vähentää sähkökaapelien häviöt lämmöntuoton mittauslaitteen ja kuormatilan välillä [7, s.23]. Kokonaislämmönsiirtokerrointa k määritettäessä sijoitetaan laskettu lämmitysteho P kaavaan (6).

Lämmityslaitteiston tulee täyttää tiettyjä vaatimuksia. Lämmityslaitteiston tulee olla varusteltu puhaltimilla, jotka kierrättävät ilmaa kuormatilassa. Näiden puhaltimien puhallusilman tuoton tulee olla tunnissa 40–70-kertainen verrattuna testattavan kuormatilan tilavuuteen. Lisäksi puhaltimien tuottama lämpövirran tiheys saa olla enintään 1 W/cm^2 . Ilman tulee kiertää kuormatilassa niin, että lämpötilan mittauspisteissä ilman nopeus on 1–2 m/s. [7, s.22]

Kuljetusvälineen eristyskyvyn testaamista varten tulee olla eristetty mittaustila, jossa voidaan ylläpitää mittauksen edellyttämää tasaista ympäristön lämpötilaa T_o [7, s.22]. Mittoittaessa mittaustilaa tulee huomioida kuljetusvälineiden koon lisäksi testaukseen tarvittavien mittalaitteiden vaatima tila.

Kuormatilan ulkopuolelta sekä sisäpuolelta tulee mitata lämpötila pisteistä, jotka sijaitsevat 10 cm:n etäisyydellä kuljetusvälineen seinistä. Kuljetusvälineen keskimääräinen ulkolämpötila T_o mitataan edellä mainitulla etäisyydellä korin kahdeksasta ulkokulmasta ja pinta-alaltaan neljän suurimman ulkopinnan keskipisteistä, jotka useimmin ovat katto, lattia ja sivuseinät. Vastaavasti mitataan keskimääräinen sisälämpötila T_i kahdeksasta kuormatilan sisäkulmasta ja pinta-alaltaan neljän suurimman sisäpinnan keskipisteistä. Yhteensä tarvitaan siis 24 lämpötilamittaria, jotka ovat säteilysuojattuja. [7, s.21] Mittareiden avulla määritetään korin seinien keskimääräinen lämpötila laskemalla keskiarvo korin keskimääräisen ulkolämpötilan T_o ja sisälämpötilan T_i välillä. Korin seinien keskilämpötilan tulee testauksen aikana olla $+ 20 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$ [7, s.21]. Lisäksi keskimääräisiä sisä- ja ulkolämpötiloja käytetään aiemmin mainitun lämpötilaeron ΔT määrittämiseen.

Kuljetusvälineen eristyskyvyn testausmenettelyn kulku jakautuu niin kutsuttuun jatkuvuustilaan ja jatkuvuustilaa edeltävään aikaan. Testauksen ajankulku on graafisesti esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Kuljetusvälineen eristyskyvyn testausmenettelyn eteneminen.

Kokonaisuudessaan testauksen minimikesto on 18 tuntia, jonka viimeistä 12 tuntia sanotaan jatkuvuustilaksi. Testauksen kulkuun liittyy tiettyjä lämpötilan ja -tehon vaihtelurajoja, jotka varmistavat tarpeeksi tasaiset mittausolosuhteet. Esimerkiksi jatkuvuustilan aikana kuljetusvälineen ulko- ja sisälämpötila saavat vaihdella välillä $\pm 0,3$ K ja jatkuvuustilaa edeltävän kuuden tunnin aikana $\pm 1,0$ K. Kuormatilan sisä- ja ulkolämpötilan tulee lisäksi olla jatkuvuustilassa niin tasainen, ettei lämpötilaero kahden lämpötilan mittauspisteen välillä ylitä arvoa 2 K. Lisäksi, kun mitataan lämmitysteho kolmen tunnin ajalta jatkuvuustilan alusta ja lopusta, niin että mittausten välille jää kuusi tuntia, saa ero lämpötehojen arvoissa olla enintään 3 %.

Kuljetusvälineen kokonaislämmönsiirtokertoimen laskemiseen käytetään niin sanotun jatkuvuustilan vähintään 6 viimeisen tunnin ajalta mitattuja lämpötiloja T_i ja T_o sekä lämmitystehoja P . Jatkuvuustilassa testaustilan lämpötilan tulee olla lähes vakio ja olosuhteiden lähes muuttumattomat. [7, s.22]

4.2 Laboratorion rakenteen ja välineiden mitoitus

Elintarvikkeiden kuljetusvälineiden testauslaboratorion mitoitukseen liittyy haaste kooltaan hyvin erilaisten ajoneuvojen testaamisesta. Testaustilan sekä itse testaamisessa käytettävän mittausvälineistön tulisi soveltua niin suurien yli 19 m pituudeltaan olevien puoliperävaunujen kuin pienien kuorma-autojenkin testaukseen, jotta tilan suunnittelu- ja rakennuskustannuksille saataisiin vastinetta mahdollisimman hyvin. Tässä työssä tehdään suurpiirteinen mitoitus testauslaboratoriolle, jossa saataisiin testattua pituudeltaan suurimpia Suomessa sallittuja puoli- ja täysperävaunuja sekä pienempiä jakoautoiksi tarkoitettuja kuorma-autoja.

Aiemmin todettiin, että testaustilan tulee olla eristetty, jotta siellä voidaan ylläpitää lähes vakiota lämpötilaa. Testaustilan ja kuljetusvälineen kuormatilan välillä tulee voida ylläpitää testausjakson ajan 25 asteen lämpötilaeroa [7, s.23]. Käytettäessä sisätilan lämmitysmenetelmää tulee testaustilassa olla matalampi lämpötila kuin kuormatilassa. Testaustilanteessa voitaisiin pyrkiä esimerkiksi ulkolämpötilaan $T_o = 5\text{ °C}$ ja sisälämpötilaan $T_i = 30\text{ °C}$. Testaustilan mittojen optimoinnissa kannattaa mitat pitää mahdollisimman pieninä lämpötilanhallinnan kannalta sekä lisäksi tilan jäähdytyksessä tai lämmityksessä käytettävän energian säästämiseksi.

Testaustilan mitoituksessa tulee lämpötilan säädettävyyden lisäksi huomioida esimerkiksi rakennuskustannusten kasvaminen tilan kasvamisen myötä, mutta myös tilan käytännöllisyys ja turvallisuus testattaessa suurimpia perävaunuja, jotta testaustilaan jää liikkumavaraa. Mitoitettaessa testaustilaa ja sen välineitä tarkastellaan suurta puoli- ja täysperävaunua sekä pientä kuorma-autoa, jollaisia haluttaisiin testaustilassa testata. Testaustilan leveys ja korkeus ovat riippumattomia ajoneuvotyypistä, sillä Suomessa elintarvikkeiden kuljetusvälineen maksimileveys on 2,6 m ja maksimikorkeus 4,4 m riippumatta ajoneuvotyypistä. Huomioidaan molempia dimensioita mitoittaessa lämpötilamittareiden mitoitus 10 cm päähän ulkopinnoista. Lisäksi leveyttä mitoittaessa huomioidaan vapaa kulku kuljetusvälineen ohi.

Testaustilan pituus taas riippuu ajoneuvotyypistä. Perävaunujen suurimpiin sallittuihin pituuksiin tulee huomioida lämpömittareiden sekä testaajan kulkureitin lisäksi kuljetusvälineen takaovien edestä ulospäin aukeavan perälaudun viemä tila, ja täysperävaunun aisan mitta. Edellä mainitut seikat huomioon ottaen voitaisiin testaustila mitoittaa pituudeltaan, korkeudeltaan ja leveydeltään vastaaviin mittoihin noin 24 m x 5 m x 4 m, jotta tilassa mahdollistaisiin testaamaan uusia, suurempia peräkärriä. Mitat ovat suuntaa antavia.

Tarkastellaan seuraavaksi kuormatilan sisälle sijoitettavaa lämmityslaitteistoa. Lämmittimenä voitaisiin käyttää puhaltimella varustettuja lämmitysvastuksia [7, s.22]. Lämmityslaitteiston kuluttama teho riippuu kaavan 6 mukaisesti vaadittavasta kokonaislämmönsiirtokertoimesta, kuljetusvälineen geometrisesta pinta-alasta (2) sekä lämpötilaerosta testaustilan sekä kuormatilan välillä, joka on määrätty ATP-sopimuksessa arvoksi 25 °C [7, s.23]. Taulukossa 7 on esitetty tulokset laskennasta, jossa on laskettu kaavalla 6 lämmitysteho W neljälle erilaiselle testattavalle kuljetusvälineelle. Tarkastellaan suurimman sallitun pituisen puoliperävaunun sekä pienen kuorma-auton testaukseen tarvittavia lämmitystehoja ja molemmille ajoneuvotyypille myös arvot FRC- ja FNA-luokitteluvaati-

muksissa. Laskennassa on käytetty samoja materiaalipaksuuksia, kuin aikaisemmin alaluvussa 3.4 kylmäkoneiden jäähdytystehoja laskettaessa. Taulukon 7 puoliperävaunut (PPV 2 ja PPV 4) ovat samat kuin jäähdytystehojen laskennassa.

Taulukko 7. Kuljetusvälineiden testauksessa tarvittavien lämmityslaitteistoiden lämmitysteho P [W], kuljetusvälineiden geometrinen pinta-ala A [m²], kokonaislämmönsiirtokerroin k [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] ja vaadittava lämpötilaero ΔT .

	KA 1	KA 2	PPV 2	PPV 4
Luokitus	FNA	FRC	FNA	FRC
A [m ²]	65,48	65,78	235,26	236,24
k [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]	0,7	0,4	0,7	0,4
ΔT	25	25	25	25
Lämmitysteho P [W]	1146	658	4117	2362

Kuljetusvälineen eristyskykyä testatessa ATP-luokituksen määräävä arvo on kokonaislämmönsiirtokerroin k , joka taulukossa 7 on vakio kummallekin ATP-luokalle. Taulukossa esitetty laskenta kertoo lämmitystehon maksimiarvon, sillä FNA- ja FRC-luokituksille kuljetusvälineille k -arvon tulee olla yhtä suuri tai pienempi kuin kokonaislämmönsiirtokerroimen raja-arvo. Jos päästään testauksessa raja-arvoa pienempään arvoon, tarvittu lämmitysteho on myös pienempi. Laskennan perusteella lämmityslaitteiston lämmitystehon tulisi olla säädettävissä noin välillä 600–4200 W.

Lämmittimessä olevan puhaltimen vaatimuksena mainittiin aiemmin myös 40–70-kertainen ilman tuotto kuormatilan tilavuuteen nähden [7, s.22]. Tarkastellaan puhaltimen ilman tuoton vaatimusta pienimmän ja suurimman testattavan kuormatilan tapauksessa taulukossa 8.

Taulukko 8. Kuljetusvälineiden testauksessa tarvittavien lämmityslaitteistoiden lämmitysteho.

	KA 1	PPV 4
Kuormatilan tilavuus [m ³]	30	147
Puhallusilman tuotto (min) [m ³ /h]	1181	5876
Puhallusilman tuotto (max) [m ³ /h]	2067	10283

Taulukosta 8 nähdään, että puhalluslaitteiston ilmantuoton tulee olla noin välillä 1200–10300 m³/h. Lisäksi lämmityslaitteistoa mitoittaessa tulee muistaa huomioida, että lämmön virtaus sai korkeintaan olla 1 W/cm² ja ilman virtausnopeus lämpömittareiden kohdalla tuli olla 1–2 m/s.

Kuljetusvälineen eristystehon testaustilan sekä itse testauksen kulku vaativat tarkkaa valmistelua, mutta huolellisesti suunniteltu testauslaboratorio voisi olla suureksi hyödyksi tuotekehityksessä sekä laadun varmistamisessa tavanomaisen ATP-luokituksen testaamisen lisäksi. Entistä suuremmat kuormatilat, kuljetusvälineiden monipuolisuus ja kasvavat suoritusvaatimukset energiankäytön sekä lämpötekniisten ominaisuuksien puolesta tekevät kuljetusvälineiden testaamisesta tulevaisuudessa yhä kasvavamman kehitystarpeen kohteen.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Elintarvikkeiden kuljetukseen Suomessa liittyy suuri määrä huomioitavia asioita niin lainsäädäntöön, energiatehokkuuteen kuin kuljetusvälineiden ostajienkin vaatimuksiin liittyen. Muutokset kuljetusvälineiden koossa sekä vaatimukset muunneltavuudessa erilaisiin kuljetustarpeisiin lisäävät huolellisen suunnittelun ja laadunvalvonnan tärkeyttä. Lämpötilahallitun kuljetusvälineen mitat, rakenne-elementtien materiaalit, lisävarusteet sekä koneelliseen jäähdyttämiseen käytetty jäähdytystekniikka vaihtelevat jonkin verran valmistajasta sekä kuljetusvälineen ostajan vaatimuksista riippuen. Kukin kuljetusväline on tarkasti suunniteltu kokonaisuus, jonka eri osasten yhteensopivuus ja toimivuus on varmistettava elintarvikkeiden kuljetuksen vaatimusten toteutumiseksi.

Kuljetusvälineiden ulkomittoja rajoittavat Suomessa tieliikenteen lainsäädäntö, ja kuljetusvälineen pinta-aloja sekä materiaaleja ja niiden ainevahvuuksia rajoittavat kuljetusvälineen eristyskykyvaatimukset ATP-sopimuksessa. Suuria muutoksia kuljetusvälineiden kokoihin on tuonut uusi asetus, joka nosti suurimpia sallittuja ajoneuvo- ja ajoneuvoyhdistelmien pituuksia suurimmillaan yksittäisen kuljetusvälinetyypin tapauksessa 6 m ja ajoneuvoyhdistelmien tapauksessa noin 9 m. Kuljetusvälineessä kuljetettavan tavarán määrää halutaan myös kasvattaa erilaisilla lisävarusteilla, kuten välitasoratkaisuilla, jolloin korin riittävästä eristyskyvystä on huolehdittava. Mahdollisena kehityskohtena kuormatilan jäähdyttämisessä ovat faasinmuutosmateriaalit, jotka mahdollistaisivat kylmäkoneelta vaadittavan jäähdytystehon vähenemisen.

Kylmäkoneiden kehityskohtena ovat yhä energiatehokkaampien käyttövoimien hyödyntäminen, kuten erilaiset hybridivariaatiot polttomoottorille sekä esimerkiksi lämmön hyödyntäminen käyttövoimana termistä kompressoria tai aurinkoenergiaa hyödyntämällä. Jäähdytysprosesseissa voitaisiin hyödyntää myös useampaa jäähdytystekniikkaa yhdessä. Lisäksi jäähdytysjärjestelmien kehityssuuntana ovat yhä ympäristöystävällisempien kylmäaineiden käyttö, kuten esimerkiksi luonnollisten kylmäaineiden hyödyntäminen.

Kuormatilan pituuden kasvattaminen on tuonut mukanaan haasteen vaaditun sisälämpötilan saavuttamisesta sekä kuormatilan lämpötilan tasaisuudesta tarpeeksi tehokkaalla ilmankierrolla. Alaluvussa 3.4 todettiin laskennallisesti, että 6 vuoden kuluttua valmistumisesta suurimmat vaadittavat jäähdytystehot ovat FNA-luokitellulla kuljetusvälineellä 6620 W ja FRC-luokitellulla kuljetusvälineellä 6330 W. Verratessa tehovaatimuk-

sia kahden Suomessa merkittävimmän kylmäkoneiden valmistajan kylmäkoneiden jäähdytystehoihin, jotka ovat tehokkaimmissa koneissa välillä 10100–10400 W, tällä hetkellä kylmäkoneiden jäähdytystehot riittävät vaadittuihin teho vaatimuksiin. Tulee kuitenkin huomioida, että tarpeeksi suuri jäähdytyslaitteiston puhallusteho sekä ilman kierto ovat tärkeitä kuormatilan lämpötilaan vaikuttavia ominaisuuksia, jotta haluttu sisälämpötila säilyy varmasti koko kuormatilassa tarpeeksi tasaisena.

Puhallusteho jää työssä tehdyn yksinkertaisen laskennallisen puhallustehotarkastelun mukaan osassa kuljetuksista liian pieneksi. Laskennan mukaan tarvittava puhalluksen tilavuusvirta suurimmalle mahdolliselle puoliperävaunulle tuoreita kasviksia kuljettaessa olisi 8800–11800 m³/h ja pakasteita kuljettaessa 4300–5700 m³/h. Vertailukohteena käytetyissä kylmäkoneissa vastaavat maksimitilavuusvirrat ovat kuitenkin välillä 5700–6000 m³/h, jolloin ne eivät riitä täyttämään suoriteltuja arvoja.

Elintarvikkeiden kuljetusvälineiden kehittämisen ja valvonnan tukena voitaisiin käyttää testauslaboratoriota, joka soveltuisi käyttökohteeltaan ja kooltaan hyvin erilaisten kuljetusvälineiden testaamiseen. Testauslaboratorio tulisi suunnitella sellaiseksi, että kuljetusvälineiden vaatimustenmukaisuus voitaisiin taata ja erilaisia muunnoksia voitaisiin tarkasti vertailla myös kehitystarkoituksessa. Toisena testausmahdollisuutena voitaisiin pitää tietokoneella tehtävää virtausmallinnusta.

Kuljetusvälineissä sekä käytettävissä jäähdytyslaitteistoissa tapahtuu jatkuvaa muutosta, jotta ne voivat vastata nykyhetken sekä tulevaisuuden kuljetustarpeisiin elintarvikkealalla. Tarpeeksi pitkälle tulevaisuuteen katsova kehitystyö ja innovaatiot yhä parempien kuljetusvälineiden valmistamiseksi tulevat takaamaan elintarvikkeiden laadun ja turvallisuuden kuluttajille myös tulevaisuudessa.

LÄHTEET

- [1] Tavaraliikenteen määrä. Motiva. (2019). Saatavilla [viitattu 6.4.2021]: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/perustietoa_liikenteesta/tavaraliikenteen_maara
- [2] Kuorma-autoilla kuljetettiin tavaroita vuonna 2020 hieman edellisvuotta vähemmän. Suomen virallinen tilasto (SVT): Tieliikenteen tavarankuljetukset. Tilastokeskus. (2021). Saatavilla [viitattu 16.8.2021]: https://www2.tilastokeskus.fi/til/kttav/2020/kttav_2020_2021-04-21_tie_001_fi.html
- [3] L. Luoto, P. Rantti, L. Rask, A. Seppälä, S. Tolonen, H. Torkkel, M. Touru. Lämpötilahallittavien elintarvikekuljetusten logistiikkaopas. Yleinen teollisuusliitto (YTL). Forssa, Suomi. (2007). s. 142.
- [4] Liikennejärjestelmän nykytila ja toimintaympäristön muutokset. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä 4/2020. (2020). s. 162.
- [5] Pitkät rekat yleistyvät liikenteessä. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. (2019). Saatavilla [viitattu 17.6.2021]: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/pitkat-rekat-yleistyvat-liikenteessa>
- [6] Kotimaan kuorma-autoliikenteen suoritteet tavaralajeittain, 2011–2020 - Taulukko 119b. Tilastokeskus. (2021). Saatavilla [viitattu 16.8.2021]: https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_lii_kttav/stat-fin_kttav_pxt_119b.px/
- [7] Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomissio, sisämaanliikennekomitea. Helposti pilaantuvien elintarvikkeiden kansainvälisiä kuljetuksia ja tällaisissa kuljetuksissa käytettävää erityiskalustoa koskeva sopimus. Yhdistyneet kansakunnat. (2017). Myyntinro: E.17.VIII.2. s. 97.
- [8] VAK Oy. VAK tuotteet. Saatavilla [viitattu 26.5.2021]: <https://vak.fi/fi/tuotteet/>
- [9] P. Rantti. ATP-vuosi 2020. Luonnonvarakeskus (Luke). Saatavilla [viitattu 19.7.2021]: <https://www.luke.fi/atp-sopimuksen-uudet-saannokset/>
- [10] THERMO KING PRODUCT SHEETS — technical specifications and features & options. Thermo King. (2020). Saatavilla [viitattu 19.7.2021]: Download Center - Thermo King
- [11] Tieliikennelaki. L 10.8.2018/729. Liite 7.2. (2018). Saatavissa [viitattu 8.7.2021]: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2018/20180729>
- [12] S.A Tassou, G. De-Lille, Y.T. Ge. Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport, in: Applied Thermal Engineering. (2009). Vol. 29. pp. 1467–1477.
- [13] Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 407/2013. Annettu Helsingissä 6.6.2013. Saatavilla [viitattu 12.7.2021]: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130407>

- [14] Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 31/2019. Annettu Helsingissä 10.1.2019. Saatavilla [viitattu 12.7.2021]: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190031#Pidp447018448>
- [15] ATP-luokat ja lämpötilat. Luonnonvarakeskus (Luke). Saatavilla [viitattu 9.7.2021]: <https://www.luke.fi/atp-luokat-ja-lampotilat/>
- [16] P. Laine. VAK Oy. (2021).
- [17] R. Seppänen, L. Mannila, M. Kervinen, I. Parkkila, P. Konttinen, L. Karkela, T. Yli-Kokko. Maol taulukot. Matemaattisten Aineiden Opettajien liitto MAOL ry. Keuruu, Suomi. (2014). Vol 1.–4. s.175.
- [18] H.D. Young. University Physics. Table 15–5. Addison-Wesley. 8 th. Ed. (1992). p. 1356.
- [19] P.B.T. Jara, J.J.A. Rivera, C.E.B. Merino, E.V. Silva, G.A. Farfán. Thermal behavior of a refrigerated vehicle: Process simulation, in: International Journal of Refrigeration. (2019). Vol 100. pp. 124–130.
- [20] Y.A. Cengel, M.A. Boles. Thermodynamics, in: An Engineering Approach. McGraw-Hill. 8th Ed. (2015). p. 1115.
- [21] A. Rai, S.A. Tassou. Environmental impacts of vapour compression and cryogenic transport refrigeration technologies for temperature controlled food distribution, in: Energy Conversion and Management. RCUK Centre for Sustainable Energy Use in Food Chains, Institute of Energy Futures, Brunel University London. (2017). Vol. 150. pp. 914–923.
- [22] Drive Technology. FRIGOBLOCK. Saatavilla [viitattu 6.8.2021]: <http://www.frigoblock.com/en/technology-environment/electric-drives.html>
- [23] J. Koehler, W.J. Tegethoff, D. Westphalen, M. Sonnekalb. Absorption refrigeration system for mobile applications utilizing exhaust gases, in: Heat and Mass Transfer. Springer-Verlag. (1997). Vol 32. pp.333-340.
- [24] L. Zheng, W. Zhang, F. Liang, S. Lin, X. Jin. Experimental Studies of Phase Change and Microencapsulated Phase Change Materials in a Cold Storage/Transportation System with Solar Driven Cooling Cycle. Energies. (2017). p. 11
- [25] M.L. Hoang, P. Verboven, J. De Baerdemaeker, B.M Nicolai. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics, in: International Journal of Refrigeration. (2000). Vol. 23. pp.127-140.
- [26] F-kaasusetuksen vaikutukset 2020. Porkka. (2019). Saatavilla [viitattu 21.7.2021]: <https://porkka.fi/f-kaasusetusten-vaikutukset/>
- [27] Kylmäaineiden jaottelu. Darment. (2019). Saatavilla [viitattu 8.8.2021]: <https://darment.fi/kylmaaineiden-jaottelu/>
- [28] A. Mota-Babiloni, P. Makhnatach. Predictions of European refrigerants place on the market following F-gas regulation restrictions, in: International Journal of Refrigeration. (2021). Vol. 127. pp.101–110.

- [29] Products. Carrier – Transicold. Saatavilla [viitattu 19.7.2021]: <https://www.carrier.com/truck-trailer/en/uk/products/>