



**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

Uusien teknologioiden hyödyntäminen kylmäketjulongistiikan hallinnassa

Toimitusketjujen johtamisen
kandidaatintutkielma

Laatija:
Helmi Rauta

Ohjaaja:
KTT Sini Laari

10.12.2024
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

Oppiaine: Toimitusketjujen johtaminen

Tekijä: Helmi Rauta

Otsikko: Uusien teknologioiden hyödyntäminen kylmäketjalogistiikan hallinnassa

Ohjaaja: KTT Sini Laari

Sivumäärä: 38 sivua

Päivämäärä: 10.12.2024

Maailmaa ravisuttanut COVID19 -pandemia, väestön noussut elintaso, laajentuva globalisaatio; lukuisat asiat ovat myötävaikuttaneet lämpötilaherkkien tuotteiden kysynnän räjähdysmäiseen kasvuun. Siinä missä ihmisten laatu- ja saatavuusvaatimukset elintarvikkeille ovat kasvaneet ja kylmässä säilytettäviä rokotteita on täytynyt kuljettaa ympäri maailman mahdollisimman nopeasti, on kylmäketjalogistiikka kohdannut merkittäviä haasteita. Koska kylmäketjun ylläpitäminen on lämpötilaherkkien tuotteiden laadun ja turvallisuuden kannalta välttämättömyys, ovat organisaatiot jo vuosikymmeniä pyrkineet panostamaan tehokkaisiin pakastin- ja jäähdytysjärjestelmiin kaikissa toimitusketjun vaiheissa. Fyysisten kylmäratkaisujen merkittävyys jää kuitenkin taka-alalle, mikäli kylmäketjun integriteettiä ei pystytä todistamaan varmaksi. Teknologisen kehityksen tuomat mullistukset tarjoavat keinoja tehostaa kylmäketjologistiikan hallintaa ja vastata sen kokemiin haasteisiin.

Tämän tutkielman tavoitteena on tarkastella olemassa olevan kirjallisuuden pohjalta kylmäketjologistiikan erityispiirteitä ja haasteita, sekä tutkia ja vertailla keinoja, miten esineiden internetiä, lohkoketjuteknologiaa ja digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää kylmäketjologistiikan hallinnassa. Kirjallisuuden pohjalta voidaan todeta, että teknologioiden käyttöönotto tarjoaa lukuisia etuja organisaatioille esimerkiksi kylmäketjologistiikan laadunvalvonnan, hävikin minimoimisen sekä kuljetusten tehostamisen saralla. Teknologiaratkaisujen uutuudesta ja haasteista huolimatta saattaa niiden implementoimisesta tulla tulevaisuudessa välttämätöntä.

Avainsanat: kylmäketju, kylmäketjologistiikka, kylmäketjologistiikan hallinta, esineiden internet, lohkoketjuteknologia, digitaalinen kaksonen

SISÄLLYS

1	Johdanto	6
1.1	Johdatus aiheeseen	6
1.2	Tutkielman tavoite	7
2	Kylmäketjulongistiikka	8
2.1	Määritelmä ja ominaispiirteet	8
2.2	Kylmäketjulongistiikan haasteet	8
2.2.1	Laatu ja turvallisuus	8
2.2.2	Jäljitettävyys	9
2.2.3	Kustannukset ja hävikki	10
2.2.4	Ympäristövaikutukset ja sääntely	10
3	Teknologiaratkaisut	12
3.1	Esineiden internet ja RFID	12
3.2	Lohkoketjuteknologia	15
3.3	Digitaalinen kaksonen	17
4	Kylmäketjulongistiikan hallinta teknologian avulla	21
4.1	Laadun takaaminen ja jäljitettävyys	22
4.2	Kuljetusten tehostaminen	23
4.3	Hävikin ja ympäristövaikutusten minimointi	25
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	27
	Lähteet	30

KUVIOT

Kuvio 1. IoT:n arkkitehtuuri (Soumyalatha 2016)	13
Kuvio 2. Transaktioiden virtaus lohkoketjuteknologiassa (Rajasekaran ym. 2022)	16
Kuvio 3. Digitaalisen kaksosen komponentit ja interpretaatioprosessi (VanDerHorn & Mahadevan 2021)	18

TAULUKOT

Taulukko 1. Esineiden internetin, lohkoketjuteknologian ja digitaalisen kaksosen vahvuudet ja heikkoudet	20
Taulukko 2. Esineiden internetin, lohkoketjuteknologian ja digitaalisen kaksosen mahdollisuuksia kylmäketjulongistiikan hallinnassa	28

1 Johdanto

1.1 Johdatus aiheeseen

Kylmäketjulla tarkoitetaan pilaantuvien tuotteiden toimitusketjua, jonka kaikissa vaiheissa, kuten varastoinnissa, kuljetuksessa, jakelussa ja markkinoinnissa huomioidaan lämpötilaherkkien tuotteiden vaatimat erityisolosuhteet. Lämpötilaherkkiä tuotteita ovat esimerkiksi tuoretuotteet, pakasteet, jotkin rokotteet ja veri. Kylmäketjولوجistiikan erityisluonteen takia se vaatii monimutkaisempaa hallintaa ja suurempia investointeja suhteessa tavallisiin logistiikkajärjestelmiin. (Yu ym. 2018.)

Kylmäketjولوجistiikkaan liittyy monia haasteita. Kylmäketjولوجistiikka on perinteisiä logistiikkajärjestelyjä riskialttiimpaa, sillä tuotteiden säilyvyysaika on lyhyt, toimitusetaisyydet pitkiä ja jäljitettävyyden laadun takaamiseksi kriittistä. Kylmäketjولوجistiikkaan liittyy säännöksiä, joiden avulla pyritään varmistamaan tuotteiden käyttöturvallisuus. Kannattavuusnäkökulmasta katsoen myös kustannukset ja hävikin määrä ovat kylmäketjولوجistiikassa suurempia. (Tsai & Pawar 2018.) Kylmäketjولوجistiikka vaatii perinteisiä kuljetuksia enemmän energiaa ja polttoainetta. Päästömäärien sääntelyn lisääntyessä energiatehokkaiden kylmäketjujen tarve kasvaa. (Shi ym. 2022.)

Kylmäketjولوجistiikan tärkeys nousi keskiöön COVID-19-pandemian aikana, kun virusrokotteita tuli valmistaa, varastoida ja toimittaa ympäri maailmaa nopeasti, kuitenkin kylmäketju huomioiden. Rokotteiden kylmäketjun ylläpitäminen on äärimmäisen tärkeää, sillä niiden tehokkuus laskee nopeasti lämpötilan ollessa väärä. (Pambudi ym. 2021.) Koronapandemian aikana kaikki logistiikkaverkostot kohtasivat haasteellisia tilanteita. Esimerkiksi ruuhkat aiheuttivat kuitenkin erityistä painetta juuri kylmäketjua vaativille kuljetuksille, joissa aikataulu oli laadun takaamiseksi vaativa. (Shi ym. 2022.)

Myös noussut elintaso asettaa paineita kylmäketjولوجistiikan kehittämiseksi. Ihmiset kiinnittävät enemmän huomiota ruoan laatuun ja kuluttavat lämpötilaherkkiä tuotteita yhä runsaammin. (Si 2022.) Vähittäiskauppioiden on lisäksi vastattava kasvavaan kysyntään lämpötilaherkkien tuotteiden verkkokaupan osalta (Shi ym. 2022).

Lämpötilaherkkien tuotteiden toimitusketjut muodostuvat sekä fyysistä valmistus-, varastointi- ja kuljetusratkaisuista, että näitä monitoroivista hallintajärjestelmistä. Kylmäketjولوجistiikan haasteellisuuden ja kasvaneen kysynnän takia tehokkaiden hallintaratkaisujen löytämisestä on tullut

viime vuosina keskeinen tavoite sekä yrityksille että valtioille (Abdurahman & Çeken 2019). Kylmäketjulongistiikan hallinnassa on alettu hyödyntämään monia ”uusia teknologioita” (eng. emerging technologies). Näitä teknologioita ovat esimerkiksi esineiden internet, lohkoketju ja digitaalinen kaksonen.

1.2 Tutkielman tavoite

Tämän tutkielman tarkoituksena on tutkia ja vertailla keinoja, miten esineiden internetiä, lohkoketjuteknologiaa ja digitaalista kaksosta voidaan hyödyntää kylmäketjulongistiikan hallinnassa. Tarkastelussa olevat teknologiaratkaisut ovat informaatiopohjaisia jäljitys-, monitorointi- ja kommunikaatoratkaisuja, eikä suoria kylmä- tai kuljetusjärjestelmiä, kuten pakastimia. Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Tutkielmassa vastataan kahteen tutkimuskysymykseen. Tutkielmassa käsitellään aiheeseen johdattelevasti kylmäketjulongistiikan erityispiirteitä ja haasteita:

- Mitkä ovat kylmäketjulongistiikan erityispiirteet ja haasteet?

Tutkielman tavoitetta lähestytään kokoavalla tutkielmakysymyksellä:

- Miten kylmätuotteiden toimitusketjun hallintaa voidaan tehostaa hyödyntäen teknologiaa?

Teknologiaratkaisuihin pohjautuvia hallintaa tehostavia keinoja ja esimerkkejä esitetään olemassa olevan kirjallisuuden pohjalta kolmesta eri kategoriasta:

1. Laadun takaaminen ja jäljitettävyys
2. Kuljetusten tehostaminen
3. Hävikin ja ympäristövaikutusten minimointi

2 Kylmäketjulogistiikka

2.1 Määritelmä ja ominaispiirteet

Kylmäketjulla tarkoitetaan lämpötilaherkkien hyödykkeiden, kuten joidenkin rokotteiden, kemikaalien ja ruokien toimitusketjua. Toimitusketjun kaikissa vaiheissa, kuten varastoinnissa, tuotannossa, kuljetuksessa, jakelussa ja markkinoinnissa huomioidaan kylmäketjun lämpötilavaatimukset tuotteiden turvallisuuden ja laadun, nopean toimitusajan sekä sujuvan logistiikkaprosessin takaamiseksi. (Ruiz-Garcia & Lunadei 2010; Yu ym. 2018.)

Lämpötilaherkät tuotteet poikkeavat toimitusketjuiltaan normaaleista tuotteista, sillä niiden säilyvyysaika on lyhyt ja riski laadun heikkenemiseen suuri. Vaihtelut toimitusketjun olosuhteissa altistavat tuotteet laatuhäiriöille ja luovat turvallisuusriskejä. Kylmäketjulogistiikan tehokas toiminta edellyttää sujuvaa tiedonkulkua osapuolien välillä erityisesti laadun takaamisen, kustannusten minimoimisen sekä toimitus- ja varastointiaikojen hallinnan kannalta. (Tsang ym. 2016.)

Kylmäketjulogistiikan kysyntä on kasvanut lähivuosina. Elintason nousun seurauksena ihmisillä on korkeammat odotukset ostamiensa tuotteiden laadun, turvallisuuden ja käytännöllisyyden suhteen. Tästä syystä vaatimukset kylmäketjulogistiikalle ovat usein perinteistä logistiikkaa korkeammat esimerkiksi toimitusajan suhteen. (Wang ym. 2020.)

Erityisesti Covid 19 -pandemian aikana kylmäketjulogistiikan merkitys kasvoi. Tehokas ja nopea toimitusketju on välttämätön nopeasti muuttuvan viruksen riskinhallinnassa, jotta väestön sairaustapaukset ja viruksen leviäminen voidaan minimoida. (Pambudi ym. 2021.)

2.2 Kylmäketjulogistiikan haasteet

2.2.1 Laatu ja turvallisuus

Kylmäketjulogistiikkaan liittyy monia kriittisiä riskejä, minkä takia sitä voidaan pitää perinteistä logistiikkaa haasteellisempänä. Kylmäketjulogistiikan tärkein tehtävä on kuljetettavien tuotteiden laadun ja turvallisuuden takaaminen. Häiriöt kylmäketjun missä tahansa vaiheessa tekevät koko kylmäketjusta hyödyttömän, sillä tuotteet ovat altistuneet lämpötilavaihtelulle, eikä niiden laatua pystytä siten enää takaamaan. (Mejjaouli & Babiceanu 2018; Han ym. 2021.)

Elintarvikkeiden kylmäketjun rikkoutuminen lisää riskiä mikrobien kehittymiselle, joka puolestaan voi johtaa elintarvikkeiden välityksellä tarttuviin sairauksiin (Jol ym. 2006). Arvioiden mukaan elintarvikkeiden välityksellä tarttuvat sairaudet kustantavat Yhdysvalloissa vuosittain yli 50 miljardia

dollaria. Vuosittaisista sairastuneista yli 120 000 vaatii sairaalahoitoa ja 3000 menehtyy. (Mercier ym. 2017.)

Laadun takaaminen on erityisen tärkeää farmaseuttisissa tuotteissa. Useat lääkkeet tulee säilyttää tarkasti oikeassa lämpötilassa, jotta niiden turvallisuus säilyy. Mikäli lämpötilaherkän lääkkeen kylmäketju pettää, lääke saattaa menettää sen eheyden tai tehokkuuden. Rokotteiden kylmäketjun standardilämpötila on useimmissa rokotteissa 2–8 celsiusastetta. (Castiaux 2010.) Jotkin rokotteet vaativat kuitenkin sitäkin kylmempiä säilytyslämpötiloja. Esimerkiksi Pfizerin SARS-CoV-2 rokote tulee säilyttää -80 °C ja -60 °C välillä, joka tekee sen varastoinnista ja kuljetuksesta haastavaa (Meo ym. 2021).

Laatuvaatimusten toteutumista kylmäketjussa on myös siksi tärkeää seurata, ettei tuotteen loppukäyttäjällä yleensä ole pääsyä siitä kertovaan dataan. Loppukäyttäjät luottavat sen sijaan liiankin herkästi tuotteen ”viimeisen käyttöpäivään” laatua ja turvallisuutta arvioidessaan. Mahdollinen häiriö kylmäketjun jossain vaiheessa on saattanut kuitenkin alentaa merkittävästi tuotteen laatua, jolloin tieto viimeisestä käyttöpäivästä on harhaanjohtava ja turvallisuusriski todellisuudessa suurempi. (Menon ym. 2021.)

2.2.2 Jäljitettävyys

Jäljitettävyydellä viitataan toimitusketjun kontekstissa mahdollisuuteen päästä käsiksi kaikkeen toimitusketjun vaiheita ja tuotteen elinkaarta käsittelevään rekisteröityyn tietoon. Toimiviin jäljitelyjärjestelmiin investoimisen avulla voidaan minimoida riskejä, vähentää kustannuksia, saada ajankohtaista tietoa tuotteen tilasta ja saavuttaa kilpailuetua. (Olsen & Borit 2013.)

Kylmäketjولوجistiikassa tuotteiden lämpötilan jäljittäminen ja monitorointi on välttämätöntä laadun ja turvallisuuden takaamiseksi (Óskarsdóttir & Oddson 2019). Kylmäketjujen monimutkaisuus ja tiedon välityksen puute toimitusketjun osapuolien välillä tekevät monitoroinnista kuitenkin haasteellista. Kylmäketjuja valvovat järjestelmät poikkeavat usein osapuolien välillä toisistaan, jolloin lämpötiladatan jakaminen on haastavaa. (Raab ym. 2011.) Kylmäketjujen tiedonsiirron luotettavuus on keskeinen ongelma; koska jokainen toimitusketjun osapuoli hallinnoi jäljitelytietoja itse, antaa se mahdollisuuden tietojen peukaloinnille (Zhang ym. 2022).

Reuters raportoi vuonna 2014 tapauksesta, jossa Yhdysvaltain suurin lääkejakeija McKesson Corporation väitti valheellisesti säilyttäneen rokotteita kuljetuksen aikana oikeassa lämpötilassa. Todellisuudessa lämpötilaa jäljittävät monitorit eivät olleet toimineet kunnolla, joka rikkoi yrityksen sopimusta Yhdysvaltain tautikeskuksen (eng. The Centers for Disease Control and Prevention, CDC)

kanssa. McKesson joutui maksamaan CDC:lle 18 miljoonaa dollaria korvauksina. Jäljitysjärjestelmien puutteellisuuden takia rokotteiden turvallisuutta ja tehokkuutta ei pystytty takaamaan. (*Reuters 8.8.2014.*)

2.2.3 Kustannukset ja hävikki

Kylmäketjulogistiikka on osoittautunut perinteistä logistiikkaa haastavammaksi myös kustannustehokkuuden ja hävikin näkökulmasta. Kylmäketjulogistiikka tuottaa perinteistä logistiikkaa enemmän kustannuksia (Yu ym. 2018). Muun muassa tuotteiden laatua, kuljetusten tehokkuutta ja ympäristövaikutuksia koskevat vaatimukset tekevät kustannustehokkuuden tavoittelusta monimutkaista. Toimitusketjun osapuolien laaja verkosto vaatii vahvaa johtamista, jotta kustannushyötyjen tavoittelu ei jätä laatuvaatimusten toteutumista varjoonsa. (Fan ym. 2021.)

Merkittävä riski kylmäketjulogistiikassa on tuotteiden pilaantuminen tai käyttökelvottomuus. Jopa 30 prosenttia lämpötilaherkistä tuotteista päätyy hävikiksi, kun tuotteet jäävät käyttämättä joko kylmäketjun katkeamisen tai päiväyksen umpeutumisen takia (Virtanen ym. 2014; Marchi & Zanoni 2022). Elintarvikkeiden vähittäiskauppiat kärsivät heikoista käyttökatteista ja varaston suoriutumiskyvystä kylmäketjun riskien, kuten jäljitettävyyden puutteen, myöhästymisen ja lämpötilavaihteluiden takia (Srivastava ym. 2014). Kylmäketjulogistiikan kehityksestä huolimatta myös farmaseuttisten tuotteiden hävikki on suurta. Kuljetettavien rokotteiden arvo on kymmenkertaistunut, jonka takia kylmäketjun heikkoudesta johtuva hävikki johtaa yhä merkittävimpiin taloudellisiin menetyksiin. (Ashok ym. 2017.)

2.2.4 Ympäristövaikutukset ja sääntely

2000-luvulla huoli ympäristöä kohtaan on asettanut yritykset asemaan, jossa paine madaltaa logistiikkajärjestelyjen ympäristövaikutusta on suuri. Koska lämpötilaherkkien tuotteiden varastoinnissa, toimituksessa ja muissa elinkaaren vaiheissa tulee ylläpitää alhaista lämpötilaa, kuluttaa kylmäketjulogistiikka suuremman määrän energiaa verrattuna perinteiseen logistiikkaan (Zhang ym. 2019).

Globalisaation seurauksena kasvavat kuljetusetäisyydet ja -määrät lisäävät logistiikkapalvelujen energiankulutusta ja päästöjä entisestään (Tang & Li 2021). Kylmäketjujen energiakulutuksen on arvioitu muodostavan jopa 30 prosenttia maailman koko energiankulutuksesta, ja 15 prosenttia maailman fossiilipolttoaineesta kuluu elintarvikkeiden kylmäratkaisuihin (Adekomaya ym. 2016). Lisäksi on arvioitu, että noin 40 prosenttia kaikista ruokatuotteista on kylmässä säilytettäviä,

vaikkakin tämän luvun voidaan olettaa kasvavan tulevaisuudessa (Meneghetti & Monti 2014; Adekomaya 2016). Tästä syystä sekä valtiot että kansainväliset organisaatiot ovat kehittäneet säännöksiä kuljetussektorin päästöjen vähentämiseksi.

Lukuisien tahojen asettamien säännöksiä tarkoituksena on asettaa selkeät standardit kylmäketjuille ja valvoa niiden toteutumista. Esimerkiksi EU:n asettama elintarvikesäädäntö (EY N:o 852/2004) velvoittaa elintarvikealan ammattilaiset varmistamaan, että kaikissa toimitusketjun vaiheissa huomioidaan tuotteiden vaatimat erityisjärjestelyt. Elintarvikehygieniasetus (EY N:o 853/2004) koskee sen sijaan eläinperäisiä tuotteita ja asettaa niiden säilytykselle tietyt lämpötilarajat, joita ei saa ylittää. Yleisenä ohjesääntönä lääkkeiden kuljetuksessa pidetään hyvää jakelukäytäntöä (Good Distribution Practice, GDP), joka varmistaa muun muassa oikeat kuljetusolosuhteet ja suotuisat toimitusajat (World Health Organisation 2005). Siinä missä sääntely pyrkii varmistamaan tuotteiden integriteetin, luo sen noudattaminen myös yrityksille haasteita (Shi ym. 2022).

Lukuisista asetuksista ja määräyksistä huolimatta kylmäketjologistiikka kärsii yhtenäisten hallintastandardien ja -järjestelmien puutteesta (Bai ym. 2023). Tämä vaikeuttaa globaalien toimitusketjujen hallintaa ja heikentää luottamusta tuotteiden aitoutta ja turvallisuutta kohtaan.

3 Teknologiaratkaisut

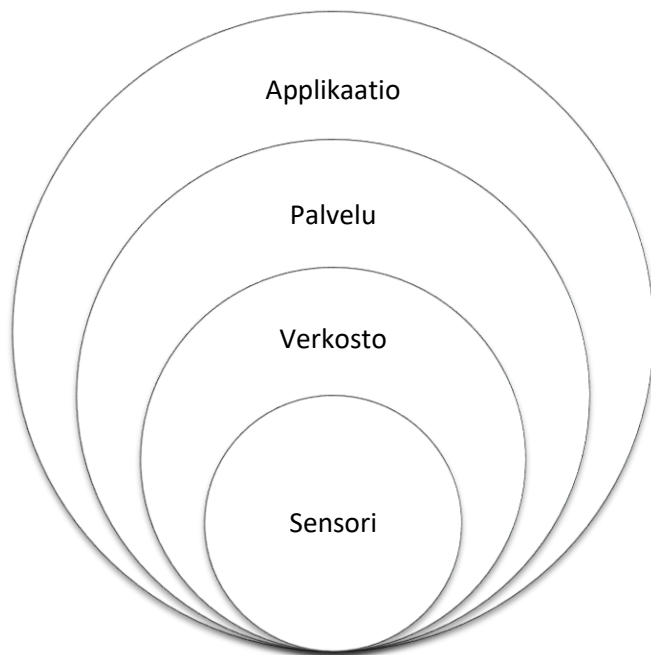
Kylmien tuotteiden toimitusketjuissa hyödynnetään tieto- ja viestintäteknologiaa tuotteiden kuljetusolosuhteiden jäljittämiseen ja hallintaan. Nämä teknologiat auttavat toimitusketjujen johtajia ylläpitämään tehokkaita ja luotettavia logistiikkajärjestelmiä. (Mustafa ym. 2024.) Perinteisimpiin monitorointiteknologioihin sisältyvät esimerkiksi data-analytiikka ja esineiden internet, joiden avulla pystytään keräämään ja jakamaan reaaliaikaista tietoa tuotteiden tilasta. Viime vuosina myös uudemmat teknologiat, kuten lohkoketju, ovat nousseet kriittisiksi elementeiksi kylmäketjun hallinnassa. Lohkoketjuteknologiaa voidaan pitää perinteisiä jäljitysmenetelmiä vähemmän haavoittuvaisena manipulaatiolle ja hakkeroinnille. (Bamakan ym. 2021.) Esineiden internetin ja muiden tukevien teknologioiden kehityksen seurauksena myös digitaalisen kaksosen merkitys on noussut lukuisilla sektoreilla tutkimuksen keskiöön (Jones ym. 2020).

Tässä alaluvussa käsitellään eri teknologiaratkaisuja ja niiden ominaispiirteitä, heikkouksia ja vahvuuksia. Teknologiaratkaisuja tarkastellaan sekä yleisestä että toimitusketjujen näkökulmasta.

3.1 Esineiden internet ja RFID

Esineiden internet, englanniksi Internet of Things (IoT), viittaa järjestelmiin, joissa erilaiset fyysiset esineet ja laitteet ovat yhteydessä internetiin, jolloin ne pystyvät keräämään ja jakamaan dataa. Järjestelmän avulla esineitä pystytään monitoroimaan ja seuraamaan etäyhteyksin. (Chen & Chen 2016, 1; Brous ym. 2020.) IoT:n määrittely ei kuitenkaan ole yksinkertaista, sillä ”esineellä” voidaan viitata mihin tahansa asiaan, joka pystyy siihen liitetyllä sensorilla keräämään ja jakamaan dataa ilman manuaalista interventiota. Internetiin yhdistetyt laitteet muodostavat siten monimutkaisen ja laajan informaatiojärjestelmän. (Mouha 2021.)

Nykyään IoT-teknologiaa hyödynnetään lukuisissa eri käyttöyhteyksissä. Esimerkiksi teollisuudessa esineiden internetiä hyödynnetään tuotteiden tuotannon seuraamiseen ja hallintaan. Termillä ”wearables” viitataan sen sijaan ”puettavaan teknologiaan”, eli esimerkiksi älykelloihin ja -laseihin, jotka keräävät dataa ihmiskehon toiminnoista ja jakavat sitä eteenpäin. IoT:n käyttömahdollisuudet ovat siten laajat. (Rose ym. 2015.) Ensimmäistä kertaa termiä käytti kuitenkin brittiläinen teknologiapioneeri Kevin Ashton vuonna 1999 viitatessaan toimitusketjujärjestelmiin, joissa internetiin yhteydessä olevien sensoreiden avulla voitaisiin seurata tavaroita. Vaikka IoT-teknologiaa voidaankin hyödyntää useissa eri tilanteissa, oli sen tuomat mullistukset siten myös toimitusketjuille merkittävät. (Rouf & Salaman Raja 2023.)



Kuvio 1. IoT:n arkkitehtuuri (Soumyalatha 2016)

IoT:n rakenne voidaan jakaa karkeasti neljään kerrokseen Kuvio 1:n mukaisesti. Sensorit keräävät ja säilyttävät dataa. Verkostot ovat vastuussa sensoreiden keräämän datan jakamisesta. Palvelukerros vastaa datan seulonnasta ja laitteen hallinnasta. Applikaatio on esineiden internetin ylin kerros ja toimii alustana, jonka kautta järjestelmän käyttäjä pääsee käsiksi kerättyyn dataan. (Soumyalatha 2016.)

Nykyaikaisen IoT-järjestelmän tärkeänä mahdollistajana pidetään RFID-teknologiaa (Radio Frequency Identification). Termillä viitataan radiotaajuutta hyödyntävään langattomaan kommunikaatiojärjestelmään, jota voidaan käyttää useiden objektien tunnistamiseen, seurantaan ja valvontaan (Tan & Sidhu 2022). RFID-järjestelmä muodostuu kolmesta komponentista. Ensimmäinen komponentti on esineessä oleva RFID-tunniste, joka kerää ja säilyttää dataa esineestä. Toinen komponentti on RFID-lukija, joka tunnistaa ja kerää datan esineen RFID-tunnisteesta. Kolmas komponentti on tietokanta, johon RFID-lukija lähettää tiedot esineestä ja jonka kautta järjestelmän käyttäjät vastaanottavat reaaliaikaisesti tietoa esineen tilasta. (Sun 2012.) Perinteisestä viivakoodista poiketen RFID ei vaadi visuaalista näkyvyyttä lukijan ja tunnisteiden välillä, sillä tiedon lukeminen tapahtuu radiotaajuuden välityksellä. Tällöin tunniste voi esimerkiksi sijaita esineen sisällä. Esine, johon RFID-tunniste kiinnitetään, voi olla esimerkiksi yksittäinen tuote tai kokonainen ajoneuvo. (Ruiz-Garcia & Lunadei 2010.)

IoT-järjestelmän merkittävin etu on sen kyky tehokkaasti kerätä laadukasta dataa. Järjestelmän kautta kerätty data on manuaalisesti kerättyä tietoa laadukkaampaa, sillä sitä kerätään useista eri lähteistä ja enemmän. Lisäksi datan keruu ja analysointi tapahtuu reaaliaikaisemmin, jolloin myös sen tarkkuutta voidaan pitää parempana. Suuret ja reaaliaikaiset datamassat helpottavat hallintoa ja päätöksentekoa. Informaation jatkuva päivittyminen mahdollistaa organisaation tehokkaan adaptoitumisen muuttuviin tilanteisiin. (Brous ym. 2020.)

IoT-teknologian organisaatioille tuomista mullistuksista huolimatta on järjestelmillä myös haasteensa. Lukuisat riskit tekevät IoT:n turvallisesta käyttöönnotosta ja hyödyntämisestä monimutkaista. Suurien datamäärien generointi, säilytys ja analysointi rasittaa organisaatioiden tietoinfrastruktuuria merkittävästi. (Soumyalatha 2016; Taherdoost 2023.) Lisäksi runsas heterogeeninen datankeruu kuluttaa suuria määriä energiaa ja on siten kustannuksiltaan kallista. Keskeinen IoT-järjestelmien riski on turvallisuus ja kyberhyökkäykset. Internetin välityksellä kerättävä ja jaettava tieto on riskialtis esimerkiksi ulkopuolisten toteuttamalle seurannalle, tietojen varastamiselle ja datan manipuloinnille. (Balaji ym. 2019.) Guptan ja Guamaran (2018) mukaan IoT-järjestelmien turvallisuutta ja toimivuutta olisi mahdollista parantaa luomalla yhtenäinen järjestelmäarkkitehtuuri. Organisaatioiden toisistaan poikkeavat teknologia-alustat sekä liiketoiminta- ja sovellusmallit tekevät kuitenkin yhtenäisen IoT-ratkaisun implementoinnista haastavaa ja lisäävät entisestään järjestelmän väärinkäytön riskiä.

IoT-teknologiat ovat laajalti käytettyjä toimitusketjun eri vaiheissa. Varaston hallinnassa IoT mahdollistaa reaaliaikaisen varastotasojen seurannan ilman manuaalista työtä. Läpinäkyvyyden avulla yritykset pystyvät vastaamaan nopeasti muutoksiin kysynnässä ja optimoimaan varastotasonsa. (Mouha 2021.) IoT-teknologian avulla tuotteiden, informaation ja kuljetusvälineiden seuranta ei enää vaadi manuaalista raportointia, mikä parantaa ketjun läpinäkyvyyttä ja pienentää virheiden riskiä merkittävästi. Muita IoT:n tuomia hyötyjä toimitusketjuille on ennakointi, ylläpidon tehokkuus, reittien optimointi ja hävikin vähentäminen. (Sallam ym. 2023.)

Monitahoisten toimitusketjujen osapuolet pystyvät IoT:n avulla jakamaan reaaliaikaisesti informaatiota esimerkiksi tuotteiden tuotannosta, laadusta, varastotasoista ja jakelusta. IoT tehostaa lisäksi Just-In-Time toimituksia, kun tieto toimitustarpeesta tulee reaaliaikaisesti, ilman tarvetta manuaaliselle tilaukselle. (Rejeb ym. 2019.) Toimitusketjujen kannalta uusi harppaus IoT-teknologiassa on sensoreilla varustetut autot ja muut kuljetusvälineet, jotka välittävät reaaliaikaista tietoa toimituksesta ja sen laadusta. Lisäksi sensorit pystyvät kommunikoimaan muiden ulkopuolisten

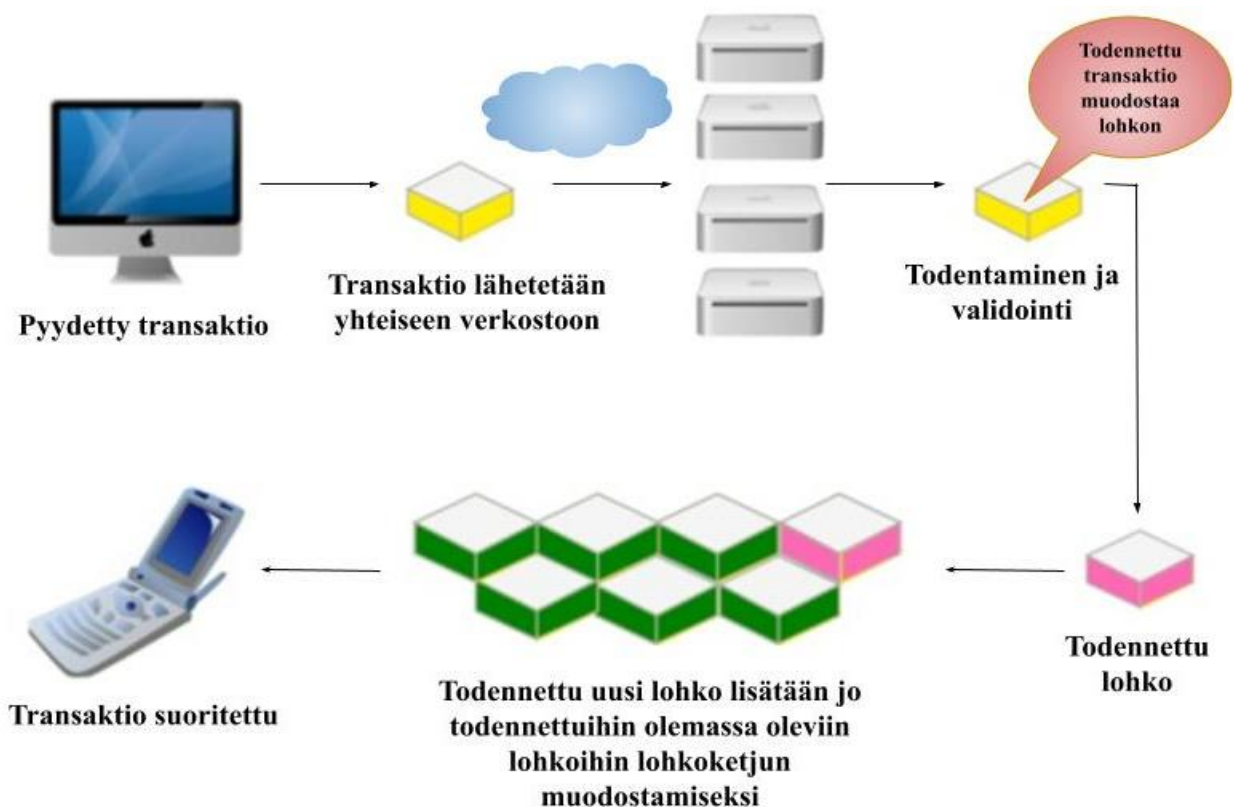
mittarien kanssa ja huomioimaan esimerkiksi poikkeavat olosuhteet, kuten ruuhkat. Tämä mahdollistaa tehokkaammat kuljetukset tuotteille. (De Vass ym. 2021.)

Esineiden internetin heikkoudet ovat myös toimitusketjuissa riskitekijä. Arkaluontoinen data esimerkiksi varastotasoista ja toimitustilanteista tekee toimitusketjujen IoT-järjestelmistä ideaaleja kohteita kyberhyökkäyksille. Koska dataa kerätään laajalti eri kohteista, myös yksityisyyden suojan kanssa on tasapainoiltava. (Sallam ym. 2023.) IoT:n haasteisiin toimitusketjuissa lukeutuu myös monimutkaisten teknologiajärjestelmien yhteensopimattomuus ja siitä seuraavat pitkät käyttöönottoajat. Järjestelmien integraatio on erityisesti haasteellista pitkien, kansainvälisten ja toisistaan poikkeavien toimitusketjujen takia, jolloin heterogeenisten järjestelmien ja data-alustojen yhdistäminen on haasteellista. (Haddud ym. 2017; Taj ym. 2023.)

3.2 Lohkoketjuteknologia

Lohkoketjuteknologia, englanniksi blockchain technology, on suhteellisen tuore jäljitysteknologia, joka nousi laajemmin ihmisten tietoisuuteen sen tunnetuimman sovellutuksen Bitcoinin kautta (Sarmah 2018). Lohkoketjuteknologian merkitys onkin juuri finanssialalla merkittävä, mutta sen hyödyntäminen myös fyysisten hyödykkeiden arvoketjujen jäljittämisessä on kasvussa (Nofer ym. 2017). Lohkoketjuteknologian käyttökohteisiin lukeutuvat myös esimerkiksi digitaaliset potilastieto- ja äänestysjärjestelmät, joissa tiedonkulun turvaaminen on erittäin tärkeää (Namasudra ym. 2021).

Lohkoketju muodostuu lohkoista, joista jokainen sisältää tietueen. Lohkotietue sisältää edellisen lohkon tiivisteen, aikaleiman sekä datan, ja lohkot ovat liitetty toisiinsa kryptografian eli suojatun salakirjoituksen avulla. Täten yksittäisen lohkon dataa on mahdotonta muuttaa ilman, että tiedot kaikissa tulevissa lohkoissa muuttuvat myös. Kuviossa 2. kuvataan transaktioiden virtausta lohkoketjussa. (Rajasekaran ym. 2022.)



Kuvio 2. Transaktioiden virtaus lohkoketjuteknologiassa (Rajasekaran ym. 2022)

Lohkoketjuteknologiaa pidetään mullistavana innovaationa etenkin turvallisuuden, läpinäkyvyyden ja muuttumattomuuden osalta. Lohkoketjun hajautuksen takia toisilleen vieraat toimijat voivat jakaa tietoa transaktioista luotettavasti. Se ei myöskään vaadi ulkoisia toimijoita valvomaan transaktioiden raportoinnin luotettavuutta. (Korpela ym. 2017; Rajasekaran ym. 2022.)

Lohkoketjuteknologian uniikki arkkitehtuuri tekee siitä muihin ratkaisuihin verrattuna turvallisemman vaihtoehdon. Järjestelmän turvallisuus perustuu hajautettuun tietokantaan, jossa lukuisissa tietokoneissa sijaitsee oma, mutta identtinen tietokanta. Hajautetun tietokannan ansioista lohkoketjua voidaankin pitää ”tamper proof -teknologiana”, jonka hakkerointi on keskitettyä tietokantaa huomattavasti haasteellisempaa. (Sarmah 2018.)

Lohkoketjuteknologia on monella tapaa mullistanut myös perinteisen logistiikka- ja toimitusketjualan. Toimitusketjun eri vaiheiden luotettavan dokumentoinnin voidaan todeta lisäävän läpinäkyvyyttä, tehokkuutta ja turvallisuutta, sekä vähentävän kustannuksia, hävikkiä ja toimitusketjun muita riskejä, kuten hakkerointia ja sopimusriitoja. (Dutta ym. 2020.) Tiedonvälitys toimitusketjun osapuolien välillä helpottuu merkittävästi, kun ne kaikki liitetään yhteiseen

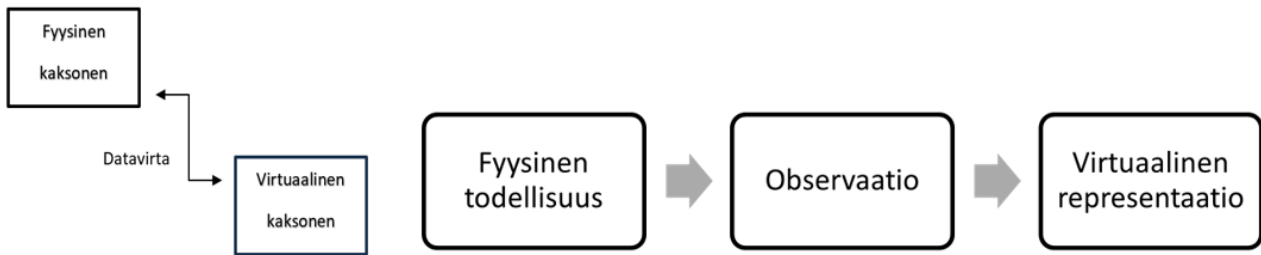
verkostoon. Läpinäkyvä kommunikaatio lisää luotettavuutta osapuolien välillä. (Korpela ym. 2017; Gurtu & Johny 2019.)

Monista hyödyistä huolimatta lohkoketjuteknologiaan liittyy edelleen epäselvyyksiä ja haasteita sen uutuuden ja poikkeavan luonteen takia. Transaktioiden kirjaamisen peruuntumattomuus saattaa aiheuttaa ongelmia tilanteissa, jossa transaktio tulisi kumota tai muuttaa. Tällaisissa tilanteissa ainoa mahdollisuus on kirjata kokonaan uusi transaktio, joka monimutkaistuttaa lohkoketjun verkostoa. (Dutta ym. 2020.) Lohkoketjuteknologian haasteisiin lukeutuvat myös käyttäjien tietämättömyys lohkoketjuteknologiaan liittyvistä säännöksistä, standardien puute, järjestelmän hitaus sekä korkea toimeenpano- ja käyttökustannus. (Namasudra ym. 2021.)

Toimitusketjujen näkökulmasta lohkoketjuteknologian haasteisiin lukeutuu toimitusketjuverkostojen laajuudesta johtuva suuri datan varastointitarve ja siitä seuraavat kustannukset. Lisäksi lukuisat kansainvälisesti toisistaan poikkeavat säädökset ja lait tekevät lohkoketjun adaptoimisesta monimutkaista. Koska toimitusketjut muodostuvat monista eri toimijoista, joiden intressit eivät aina ole linjassa keskenään, kaikki osapuolet eivät aina ole halukkaita jakamaan tietoa transaktioistaan. Tämä haaste onkin ristiriidassa lohkoketjuteknologian tuomien hyötyjen, kuten läpinäkyvyyden kanssa. (Nur ym. 2020; Jabbar ym. 2021.)

3.3 Digitaalinen kaksonen

Digitaalinen kaksonen, englanniksi digital twin (DT), viittaa fyysisen esineen virtuaaliseen ”kaksoseen”, joka vaihtaa dataa ja jäljittelee fyysisen esineen tilaa ja ominaisuuksia reaaliaikaisesti. Digitaalisen kaksosen avulla virtuaalinen ja todellinen maailma yhdistyvät. DT-teknologia kehitettiin alun perin avaruusteollisuuteen, mutta nykyään se voi tuoda monenlaisille organisaatioille kilpailuetua ja taloudellista hyötyä eri sektoreilla, kuten suunnittelussa, ylläpidossa, päätöksenteossa, etäohjauksessa ja koulutuksessa. (Jones ym. 2020; Singh ym. 2021.) Aloja, joissa digitaalista kaksosta hyödynnetään, ovat esimerkiksi teollisuus, maatalous, koulutus ja lääketiede (Singh ym. 2022).



Kuvio 3. Digitaalisen kaksosen komponentit ja interpretaatioprosessi (VanDerHorn & Mahadevan 2021)

Kuviossa 3. esitetään digitaalisen kaksosen komponentit ja datan interpretaatioprosessi. Fyysinen todellisuus ja sen virtuaalinen representaatio ovat yhteydessä toisiinsa ja jakavat dataa keskenään. Interpretaatioprosessilla viitataan datan keräämiseen fyysisestä todellisuudesta ja virtuaalisen kaksosen päivittämiseen kerätyn datan perusteella. (VanDerHorn & Mahadevan 2021.)

Digitaalisen kaksosen hyödyt perustuvat sen asemaan ”prototyyppinä”. Kaksoselle suoritettavat testit, annetut käskyt ja niistä seuraavat lopputulokset antavat pitävän arvion fyysisen esineen lopputulemasta. (Jones ym. 2020.) Kaksosen reaaliaikainen seuranta ja monitorointi antaa johdolle mahdollisuuden reagoida mahdollisiin muutoksiin ja uhkiin ennen kuin ne vaikuttavat fyysiseen kaksoseen. (Sharma ym. 2022.) Täten digitaalista kaksosta voidaan luonnehtia ”kilpenä”, jonka avulla häiriöt oikeassa esineessä voidaan ennakoita ja estää.

Digitaalinen kaksonen on mallina monimutkainen, ja se hyödyntää lukuisia eri teknologioita datan keräämiseen, mallintamiseen ja käsittelyyn. Näitä teknologioita ovat esimerkiksi IoT, tekoäly ja pilvilaskenta. (Attaran & Celik 2023.) Digitaalisen kaksosen voidaan olettaa kehittyvän näiden teknologioiden kehityksen rinnalla (Singh ym. 2021).

Toimitusketjujen osalta digitaalisen kaksosen tarkoitus on tehdä toimitusketjuista luotettavia ja kestäviä erilaisten häiriöiden ilmetessä. Teknologian käytön mahdollistajana voidaan pitää suuria ja ajankohtaisia datamassoja, joiden avulla toimitusketjujen kriittiset pisteet pystytään tunnistamaan. Toimitusketjujen tapauksessa digitaaliset kaksoset voidaan mieltää ”simulaatiomalleiksi”, joiden avulla voidaan suunnitella toimitusketjut strategisesti. (Barykin ym. 2020.) Toimitusketjun kaikki osapuolet pääsevät käsiksi reaaliaikaiseen tietoon kaksosen tilasta. Simulaatiossa mahdolliset päätökset ja niistä seuraavat lopputulemat tulevat siis kaikille osapuolille näkyviin virtuaalikaksosen välityksellä. Tämä parantaa toimitusketjun performanssia ja vähentää riskejä. (Marmolejo-Saucedo 2020; Wang ym. 2022.)

Kuten muihinkin uusiin teknologiaratkaisuihin, myös digitaaliseen kaksoseen liittyy lukuisia sen käyttöä monimutkaistavia haasteita. Vaadittavan IT-infrastruktuurin laajuus voi osoittautua ongelmalliseksi. Infrastruktuurin tulee olla tehokas, jotta DT-teknologia voi saavuttaa sen yrityksille tuomat hyödyt. Tehokkaan infrastruktuurin avulla mahdollistetaan sujuva datavirta. Kuitenkin myös itse datan on oltava laadukasta ja tasaista, jotta sen analysoiminen johtaa relevantteihin lopputuloksiin. (Fuller ym. 2020.) Vastaavien teknologiaratkaisujen tavoin on digitaalisen kaksosen hyödyntämisen taustalla yksityisyyteen ja luotettavuuteen liittyvä turvallisuusriski. Täten turvallisuusprotokollien tarkka noudattaminen on erityisen tärkeää. Digitaalisen kaksosen uutuuden takia on myös tärkeää huomioida sen mahdolliset puutteet ja virheet ja huomioida nämä käytön yhteydessä. (Botín-Sanabria ym. 2022.)

Digitaalisen kaksosen implementointi logistiikka- ja toimitusketjuprosesseihin on suhteellisen uusi tutkimusalue. Täten käyttöönotossa on huomioitava merkittävä määrä eri vaikutustekijöitä. Logistiikkaketjut sisältävät erittäin suuria määriä dataa, jolloin haasteelliseksi osoittautuu tehokas datan analysointi. (Agarwal ym. 2024.) Digitaalisen kaksosen implementointia toimitusketjuun helpottaa pienennetty datakanta. Tällöin virtuaalisen ja fyysisen kaksosen samankaltaisuus on kuitenkin luonnollisesti heikompi, eikä teknologia pysty tarjoamaan maksimaalista hyötyään. Suurten datamassojen takia DT-teknologian käyttöönotto toimitusketjujen hallinnassa on kallista ja aikaa vievää. (Moshood ym. 2021.)

Taulukossa 1. esitetään esineiden internetin, lohkoketjuteknologian sekä digitaalisen kaksosen vahvuudet ja heikkoudet.

Taulukko 1. Esineiden internetin, lohkoketjuteknologian ja digitaalisen kaksonen vahvuudet ja heikkoudet

	Vahvuudet	Heikkoudet
Esineiden internet	<ul style="list-style-type: none"> • tehokas datankeräys • reaaliaikaisuus • ei vaadi manuaalista työtä 	<ul style="list-style-type: none"> • suuri datan varastointitarve • turvallisuusriskit, kuten kyberhyökkäykset • järjestelmien puuttuvat standardit ja yhteensopimattomuus
Lohkoketjuteknologia	<ul style="list-style-type: none"> • läpinäkyvyys ja luotettavuus osapuolien välillä • peukaloimattomuus ja turvallisuus • ei vaadi ulkoista valvontaa 	<ul style="list-style-type: none"> • peruuntumattomuuden haasteet • monimutkaisuus ja korkeat kustannukset • osapuolien poikkeavat intressit
Digitaalinen kaksonen	<ul style="list-style-type: none"> • suunnittelun ja ennakkoinnin mahdollistaminen • reaaliaikainen seuranta • laajat käyttömahdollisuudet 	<ul style="list-style-type: none"> • vaativa IT-infrastrukturi • yksityisyyteen liittyvä turvallisuusriski • vaatii suurten datamassojen läpikäyntiä ollakseen luotettava

4 Kylmäketjulongistiikan hallinta teknologian avulla

Kylmäketjun ylläpitäminen on lukuisille tuotekategorioille välttämättömyys. Teknologian kehittyessä uusia kylmäketjulongistiikan kuljetusratkaisuja, kuten erilaisia pakastimia ja kylmäkontteja, pidettiin mullistuksena alan tehokkuuden näkökulmasta. Uusien kylmäratkaisujen merkittävyys jää kuitenkin taka-alalle, mikäli kylmäketjun integriteettiä ei pystytä todistamaan varmaksi. (Pajic ym. 2024.)

Teknologisen kehityksen tuomat uudet hallintajärjestelmät ovat avainasemassa kylmäketjun läpinäkyvyyden, tehokkuuden ja luotettavuuden parantamisessa. Luomalla niin sanottu ”älykäs toimitusketju” on johtajilla mahdollisuus lisätä tuotteiden turvallisuutta, vähentää hävikkiä ja parantaa kustannustehokkuutta. (Badia-Melis ym. 2018.) Muita läpinäkyvyyden tuomia etuja ovat esimerkiksi mainehaittojen ehkäisy, markkina-aseman vahvistaminen, asiakastyytyväisyyden parantaminen ja säännösten seuranta. Lisäksi toimitusketjun läpinäkyvyys helpottaa kommunikaatiota sekä toimitusketjun osapuolien että asiakkaan välillä. (Óskarsdóttir & Oddsson 2019.)

Autooituja monitorointijärjestelmiä on jo vuosia kehitetty hallitsemaan kylmien tuotteiden toimitusketjuja. Nämä järjestelmät hyödyntävät pitkälti IoT-teknologiaa, joka toimii reaktiivisena vastapainona proaktiivisille jäähdytysjärjestelmille kylmäketjun hallinnassa. (Chen ym. 2023.) Laatuvaatimusten ja volyymin kasvun takia IoT-järjestelmien puutteellisuuteen ja heikkouksiin on alettu kiinnittää enemmän huomiota. Erityisesti elintarvikkeissa, kuten tuoreissa hedelmissä, saattaa IoT-teknologian ja sensoreiden suora käyttö heikentää tuotteiden laatua ja lisätä riskiä ristikontaminaatiolle. Eriävät kuljetusolosuhteet ja -vaatimukset ovatkin luoneet uudenlaisia kriteerejä valvontajärjestelmille. Uusien vaatimusten seurauksena tutkimus on suuntautunut yhä enemmän digitaalisen kaksosen kaltaisiin järjestelmiin. (Han ym. 2021.)

Perinteisempiä IoT- ja RFID-ratkaisuja ei suinkaan olla kuitenkaan hylkäämässä. Hyödyntämällä uusia teknologioita, kuten lohkoketjua IoT:n kanssa samanaikaisesti, on arvoketjun osapuolien mahdollista saavuttaa täysin uusi tehokkuuden taso. (Rejeb ym. 2019.)

Tässä alaluvussa tarkastellaan IoT:n, lohkoketjun ja digitaalisen kaksosen merkitystä kylmien toimitusketjujen hallinnan näkökulmasta. Teknologiaratkaisujen tuomia hyötyjä esitetään kolmesta eri kategoriasta: laadun takaaminen ja jäljitettävyys, kuljetusten tehostaminen sekä hävikin ja ympäristövaikutusten minimointi. Tästä jaosta huolimatta on tärkeää huomioida laadunvalvonnan merkitys kaikissa toimitusketjun prosesseissa ja tavoitteissa. Laadun ja turvallisuuden varmistamisen

merkitys on kylmäketjulongistiikassa erittäin suuri ja tekee eron lämpötilaherkkien ja tavallisten tuotteiden toimitusketjujen välille.

4.1 Laadun takaaminen ja jäljitettävyys

Globaalistuneen maailman ja kaupankäynnin seurauksena toimitusketjut ovat pidempiä ja niiden jäljittäminen yhä haastavampaa. Jäljittämisen tärkeimpänä motiivina voidaan pitää kuljetettavien tuotteiden laadun ja turvallisuuden takaamista. Lämpötilaherkkien tuotteiden luonteen takia mahdollisten lämpötilahäiriöiden havaitseminen ajallaan on välttämätöntä, jotta niihin reagointi tapahtuu ajoissa. (Óskarsdóttir & Oddsson 2018.) Uudet teknologiat parantavat mahdollisuuksia tehokkaaseen valvontaan ja edistävät siten tuotteiden laatuvaatimusten toteutumista (Mejjaouli & Babiceanu 2018).

IoT:n tuomat hyödyt kylmätuotteiden laadunvalvontaan perustuvat pääasiassa tihentyneeseen ja automoituun lämpötilaraportointiin. IoT:n avulla tuotteiden laatua voidaan valvoa ja tehdä ennakoivia päätöksiä reaaliaikaisen datan perusteella. (Prim ym. 2021.) Konkreettisia esimerkkejä IoT:n hyödyntämisestä laadunvalvonnassa löytyy runsaasti muun muassa elintarvikealalta. Esimerkiksi Opasvitayaruxin ym. (2022) toivat tutkimuksessaan esiin sensoriteknologiaa hyödyntävän ”sähköisen nenän” (eng. the electric nose), jota voidaan käyttää tuotteiden, kuten lihan, hedelmien ja kalan laadunvalvontaan hajun perusteella. Juustopakkaukseen kiinnitetyllä RFID-sensorilla pystytään artikkelin mukaan sen sijaan tarkkailemaan tuotteen lämpötilan lisäksi myös mahdollisia homeesiintymiä, kypsymisastetta ja kontaminaatiota. IoT:n hyödyntämisen mahdollisuudet laadun ja turvallisuuden varmistamisessa ovat siten viime vuosien kehityksen seurauksena merkittävät. IoT-ratkaisuja hyödyntävät järjestelmät ovat kasvattaneet suosiotaan myös madaltuneiden käyttökustannuksien seurauksina. Edelleen kyseisten järjestelmien haasteeksi osoittautuu kuitenkin relevantin datan erittely ja tiedon laaja-alaisuus. (Ndraha ym. 2018.)

Lohkoketjut tukevat kylmien toimitusketjujen turvallisuutta lisäämällä transaktioiden ja osapuolien välisen kommunikaation läpinäkyvyyttä (Dutta ym. 2020). Siinä missä IoT-laitteiden avulla pystytään keräämään reaaliaikaista dataa tuotteiden lämpötilasta, varmistaa lohkoketjuteknologia datan turvallisen siirron ja peukaloimattomuuden. Lohkoketjun avulla kaikki toimitusketjun osapuolet saavat luotettavaa ja reaaliaikaista tietoa tuotteen laatuustatuksesta, mikä sekä lisää toimitusketjun tehokkuutta että varmistaa tuotteiden autenttisuuden. (Bamakan ym. 2021.)

Lohkoketjuteknologia hyödyttää kaikkia toimitusketjun jäseniä. Esimerkiksi elintarvikkeen kylmäketjussa tuoteturvallisuusviranomaiset pääsevät käsiksi koko kylmäketjun informaatioon.

Asiakkailla on pääsy tarpeellisiin tuotetietoihin, kun taas muut toimitusketjun osapuolet pystyvät valvomaan laatuvaatimusten toteutumista ja sidosryhmien toimintaa sekä toimitusketjun alku- että loppupäässä. (Qian ym. 2022.) Rokotteiden kohdalla lohkoketju voi tallentaa tiedot kaikista toimitusketjun vaiheista valmistuksesta jakeluun. Mendonçan ym. (2021) mukaan lohkoketjuverkoston hallinnoija voi esimerkiksi olla Maailman terveysjärjestö (World Health Organization, WHO), joka pääsee siten käsiksi luotettavaan dataan rokotteiden olosuhteista kaikissa toimitusketjun vaiheissa. Näin rokotteiden turvallisuutta ja laatua pystytään valvomaan.

Yhdistämällä IoT-sensoreiden keräämän reaaliaikaisen datan ja lohkoketjuteknologian mahdollistaman luotettavan tiedonkulun voidaan tehokkaasti vähentää tuotehuijauksia (Taj ym. 2023). Datan peruuntumattomuuden ansiosta mahdollisia lämpötilahäiriöitä tai tuotteiden alkuperiä ei pystytä vääristelemään.

Digitaalinen kaksosen rooli fyysisen tuotteen “virtuaalisena representaationa” sekä edistää lämpötilaherkän tuotteen laadunvalvontaa, mutta luo myös tarkemmat kriteerit tuotteen toimitusketjun olosuhteille. Defraeye ym. (2019) tarkastelivat tutkimuksessaan digitaalisen kaksosen hyödyntämistä mangon laadunvalvonnassa. Eksoottisten hedelmien pitkissä toimitusketjuissa ideaalien lämpötilavaatimusten asettaminen saattaa osoittautua haastavaksi, ja liian lämpimät tai kylmät kuljetusolosuhteet voivat alentaa merkittävästi hedelmän laatua. Luomalla mangolle sen komponentteja ja ominaisuuksia mallintava digitaalinen kaksonen on mahdollista simuloida potentiaalisia lämpötilavaikutuksia ja laadun heikkenemistä. Sen sijaan Shrivastava ym. (2023) loivat tutkimuksessaan digitaalisen kaksosen avulla mansikalle parhaan pakkausratkaisun laadun optimoimiseksi. Mansikkaa pidetään yhtenä haastavimmista elintarvikkeista laadun säilyttämisen kannalta (Ramírez ym. 2020). Tutkimusten valossa voidaankin todeta digitaalinen kaksonen tarjoavan merkittäviä mahdollisuuksia tulevaisuuden laadunvalvonnassa.

4.2 Kuljetusten tehostaminen

Lämpötilaherkiltä tuotteilta, kuten elintarvikkeilta vaaditaan tavallista nopeampaa ja oikea-aikaisempaa toimitusta niiden pilaantuvuuden takia. (Qi ym. 2022.) Lämpötilaherkkien tuotteiden logistiikkaprosessia voidaan tehostaa vähentämällä ylimääräistä prosessointia. Suoraviivaisen logistiikkaprosessin voidaan todeta edesauttavan oikea-aikaista toimitusta, vähentävän kustannuksia ja vahvistavan tuotteen integriteettiä. (Pajic´ ym. 2024.)

Kuljetusten merkitys lämpötilaherkkien tuotteiden toimitusketjussa on suuri, sillä ne muodostavat yli 80 prosenttia koko toimitusketjun kestosta (Ji ym. 2015). Lämpötilaherkkien tuotteiden kuljetuksia

hankaloittaa toimitusketjun monimutkaisuus ja pituus. Esimerkiksi laivoista, lentokoneista ja ajoneuvoista muodostuvat multimodaaliset kuljetukset ovat riskialttiimpia kylmäketjuhäiriöille, sillä tuotteita siirretään kuljetusvälineestä toiseen. Eri kuljetusmuotojen yhtymäkohdissa tuotteet saattavat altistua pitkiksi ajoiksi epäsuotuisille olosuhteille, joka heikentää niiden integriteettiä. (Badia-Melis ym. 2018.)

Teknologian avulla on mahdollista sekä tehostaa kuljetuksia että lisätä datavirtaa toimitusketjun osapuolien välillä (Pajic´ ym. 2024). Internetiin yhdistettyjen RFID-tunnisteiden avulla voidaan kerätä dataa kylmätuotteiden sijainnista tunnisteseen liitetyn ajoneuvo- tai konttinumeron avulla. Tällöin tilauksen tehneellä taholla, kuten ruokakaupalla, on mahdollisuus seurata kuljetuksen statusta ja tuotteiden laatua. Mikäli kylmäketjussa on tapahtunut häiriötä, pystyy vähittäiskauppa peruuttamaan tilauksen jo ennen sen saapumista, vähentäen samalla ylimääräisiä palautuksia ja prosessointia. Myös kuljettajalla on mahdollisuus havaita mahdolliset lämpötilahäiriöt hyvissä ajoin ilman ulkopuolista seurantaa. (Yu ym. 2018.) Koska IoT-tekniikan avulla pystytään seuraamaan tuotteiden tilaa reaaliaikaisesti, myös häiriöihin reagointi tehostuu. Nopean reagoinnin ansiosta voidaan muun muassa minimoida myöhästyneistä kuljetuksista aiheutuneet kustannukset. Lisäksi koko toimitusprosessi tehostuu, kun kaikki logistiikan osapuolet ovat tietoisia erän tilannestatkuksesta eikä esimerkiksi ylimääräisiä odotuskustannuksia synny. (Cil ym. 2022.) Reaaliaikainen tiedonvälitys parantaa Just-In-Time-toimitusten sujuvuutta ja tehokkuutta (Rejeb ym. 2019).

Kuten edellä on mainittu, lohkoketjuteknologia tehostaa kylmien toimitusketjujen hallintaa parantamalla läpinäkyvyyttä, luotettavuutta ja osapuolten välistä kommunikaatiota. Sen tuomat hyödyt fyysisen toimituksen tehostamisessa eivät siten välttämättä ole yhtä konkreettisesti näkyvillä verrattuna esineiden internetiin. Lohkoketjuteknologia voi kuitenkin epäsuorasti kasvattaa myös lämpötilaherkkien tuotteiden toimitusprosessin tehokkuutta.

Suurien investointi- ja operointikustannusten takia lämpötilaherkkien tuotteiden kuljetusprosessi on usein ulkoistettu niihin erikoistuneille palveluntarjoajille (Singh ym. 2018). Lohkoketjuteknologian tuoman läpinäkyvyyden ansiosta kuljetusyrityksen toimintaa ja suorituskykyä on mahdollista seurata ja arvioida. Lohkoketjuun tallennetun datan avulla on mahdollista myös määrittää mahdollisen lämpötilahäiriön tarkka tapahtumapaikka ja syy, jolloin korvausvastuuseen osataan asettaa oikea taho. Lohkoketjuteknologian tuoman läpinäkyvyyden voidaan siten todeta tehostavan kuljetuksia, koska se kannustaa kuljetusprosessin toteuttavaa tahoja toimimaan parhaalla mahdollisella tavalla ja vähentää mahdollisuuksia peukalointiin. (Zhang ym. 2023.)

Kylmien tuotteiden kuljetusreitillä on suuri merkitys kustannusten näkökulmasta. Tehokas kuljetusreitti vähentää kustannuksia ja helpottaa lämpötilaherkkien tuotteiden oikea-aikaista toimitusta. (Liu ym. 2021.) IoT:n ja lohkoketjuteknologian avulla voidaan monitoroinnin ja seurannan lisäksi muodostaa datan perusteella optimaalinen kuljetusreitti tuotteille (Rani ym. 2021).

Myös digitaalisella kaksosella on roolinsa kuljetusten tehostamisessa. Digitaalisen kaksosen mahdollistaman ennakoinnin avulla voidaan esimerkiksi pienentää häiriöiden riskiä ja varmistaa toiminnan jatkuvuus lisäämällä välineistön luotettavuutta (Werbińska-Wojciechowska ym. 2024). Digitaalisen kaksosen avulla voidaan myös havaita mahdolliset pullonkaulat toimitusketjussa. Pullonkaulojen havaitseminen on lämpötilaherkkien tuotteiden kohdalla kriittistä, sillä myöhästymiset ja häiriöt altistavat tuotteet laadun heikkenemiselle. Digitaalisen kaksosen avulla voidaan myös tehostaa varastonhallintaa, jonka seurauksena kuljetusten optimointi helpottuu. (Huang ym. 2024.)

4.3 Hävikin ja ympäristövaikutusten minimointi

Lämpötilaherkkien tuotteiden toimitusketjut vaativat erityisolosuhteita kaikissa toimitusketjun vaiheissa. Tästä syystä kylmäketjulongistiikka kuluttaa myös enemmän energiaa (Song ym. 2020). Esimerkiksi kylmäketjulongistiikassa käytettävät rekat aiheuttavat jopa 30 prosenttia enemmän päästöjä verrattuna tavallisiin rekkoihin (Bai ym. 2021). Lisäksi tiedetään, että kylmäketjujen lämpötilahäiriöistä seuraava tuotehävikki on merkittävä globaali haaste (Ruiz-Garcia & Lunadei 2010). Kylmäketjulongistiikkaa voidaankin pitää juuri suuren energiakulutuksen, hävikin, päästöjen ja näihin liittyvien säännöksiä takia haasteellisena alana kestävän kehityksen ja ekologisuuden näkökulmasta. Uusien teknologioiden avulla on mahdollista alentaa myös ympäristöllisiin tekijöihin liittyviä riskejä.

IoT-laitteiden avulla voidaan tehokkaasti vähentää hävikkä reaalitajan monitoroinnin ja reagoinnin avulla. Järjestelmän avulla on mahdollista ilmoittaa häiriöistä niin, että niihin ehditään reagoimaan tarpeeksi nopeasti. (Bai ym. 2023.) Koska dataa säilytetään keskitetyssä pilvIDatakannassa, pystytään häiriöilmoitus lähettämään usealle eri taholle samanaikaisesti. Mikäli lämpötilahäiriö esiintyy esimerkiksi valvomattomien yötuntien aikana, ei reagointi ole vain yhden laitteen tai järjestelmänvalvojan vastuulla. Hajautetun valvonnan ansiosta on siten mahdollista lisätä reaktiokykyä ja hävikin syntymistä. (Jiang ym. 2024.) Sensoridatan avulla voidaan tehostaa hävikin hallintaa myös varastointivaiheessa. Perinteisen FIFO-periaatteen (First-In-First-Out) sijasta tuotteiden jakelujärjestys voidaan määrittää niiden jäljellä olevan käyttöajan perusteella. (Bai ym. 2023.)

Päästöjä ja energiankulutusta on mahdollista pienentää esimerkiksi internetiin yhdistettyjen pienoiskoptereiden (eng. drone) avulla, jotka seuraavat ruuhkatilanteita ja mahdollistavat siten optimaalisen toimitusreitit ja -ajoituksen (Taj ym. 2023). Lisäksi ajoneuvoihin asennettavat sensorit voivat kerätä dataa esimerkiksi ajoneuvon nopeudesta ja polttoaineen kulutuksesta. Reaaliaikaisen ja luotettavan datan ansiosta on mahdollista monitoroida päästöjä tarkemmin. (Yin ym. 2024.)

Ympäristövaikutusten vähentämiseksi on tärkeää tavoitella mahdollisimman suoraviivaista ja katkeamatonta kylmätuotteiden toimitusketjua. Lohkoketjuteknologian tuoman läpinäkyvyyden ja transaktioiden selkeyden ansiosta takaisinventojen määrä ja ylimääräinen prosessointi vähenee. (Stroumpoulis ym. 2021.) Luotettava ja reaaliaikainen tiedonvälitys toimitusketjun sidosryhmien välillä helpottaa esimerkiksi kysynnän ennustamista (Mukherjee ym. 2022). Kysynnän ennustamisen voidaan todeta vähentävän hävikkiä.

Myös digitaalisen kaksosen roolia hävikin hallinnassa voidaan pitää merkittävänä. Siinä missä perinteiset ennustamis- ja suunnittelustrategiat jättävät usein huomiotta tuotteiden toisistaan poikkeavat läpimeno- ja säilyvyysajat, luo digitaalinen kaksosen yhdistettynä IoT-järjestelmien reaaliaikaiseen datankeruuseen keinon monitoroida hävikin syntymistä tehokkaasti. Digitaalisen kaksosen avulla on mahdollista lisätä johtajien ymmärrystä erilaisten häiriöiden vaikutuksesta toimitusketjuun ja luoda niiden perusteella tarkkoja suunnitelmia hävikin minimoimiseksi. Digitaalisesta kaksosesta on hyötyä myös tilanteissa, joissa suunnittelusta huolimatta esiintyy ylitarjontaa; esimerkiksi ylijääneistä elintarvikkeista on mahdollista ilmoittaa ruokapankeille ajoissa niin, että tuotteet ehditään yhä jakamaan laadun osittaisesta heikkenemisestä huolimatta. (Sengupta & Dreyer, 2023.) Koska digitaalisen kaksosen avulla tuotteen toimitusketjun olosuhteet voidaan säätää optimaaliseksi, vältetään turhalta energiankulutukselta esimerkiksi varastointi- ja kuljetusvaiheessa (Bai ym. 2023).

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tutkielmassa käsiteltiin kylmäketjulogistiikan haasteita, sekä esineiden internetin, lohkoketjuteknologian ja digitaalisen kaksosen tuomia mahdollisuuksia, ottaen huomioon kylmäketjulogistiikan erityispiirteet. Tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

- Mitkä ovat kylmäketjulogistiikan erityispiirteet ja haasteet?
- Miten kylmätuotteiden toimitusketjun hallintaa voidaan tehostaa hyödyntäen teknologiaa?

Tutkielman rakenne muodostui johdannon lisäksi kylmäketjulogistiikan erityispiirteiden ja haasteiden läpikäymisestä, uusien teknologiaratkaisujen esittelemisestä, sekä lopuksi teknologioiden merkityksen ja mahdollisuuksien tarkastelusta kylmäketjulogistiikan hallinnan näkökulmasta. Kylmäketjulogistiikan haasteiksi todettiin tarkat laatu- ja turvallisuusvaatimukset, kustannustehokkuuden ylläpitäminen, suuret hävikkimäärät, merkittävät ympäristövaikutukset ja laaja sääntely.

Esineiden internetin, lohkoketjuteknologian ja digitaalisella kaksosen ollessa informaatiopohjaisia ratkaisuja, korostui niiden merkitys etenkin toimitusketjun läpinäkyvyyden, kommunikaation luotettavuuden sekä laadunvalvonnan saralla. Näiden mahdollisuuksien seurauksena todettiin teknologiaratkaisuiden hyödyntämisellä olevan positiivinen vaikutus myös kuljetusten tehostamiseen, hävikkiin, energiankulutukseen, päästömääriin sekä kustannustehokkuuteen.

Tieteelliset tutkimukset korostivat laadun takaamisen merkitystä kylmäketjulogistiikassa. Koska lämpötilaherkkien tuotteiden laadun ja turvallisuuden takaaminen ohjaa kaikkia kylmäketjulogistiikan prosesseja, voidaan sitä pitää perinteisen logistiikan ja kylmäketjulogistiikan erottavana tekijänä. Tarkasteltaessa esimerkiksi strategioita lämpötilaherkkien tuotteiden hävikin vähentämiseen, on tärkeää huomioida hävikin syntyvän juuri laadun heiketessä. Laadun takaamisen merkitys on myös kuljetuksissa keskeinen, sillä liian hitaat tai väärään aikaan ajoittuvat kuljetukset voivat altistaa tuotteet pilaantumiselle.

Taulukko 2. esittelee tieteellisissä tutkimuksissa esiin nostettuja teknologioiden tarjoamia hyödyntämismahdollisuuksia. Ratkaisut eivät ole toisensa poissulkevia, vaan niitä voidaan hyödyntää eri käyttötarkoituksissa toisiaan tukevasti.

Taulukko 2. Esineiden internetin, lohkoketjuteknologian ja digitaalisen kaksosen mahdollisuuksia kylmäketjulongistiikan hallinnassa

	Esineiden internet	Lohkoketju	Digitaalinen kaksosen
Laadun takaaminen ja jäljitettävyys	<p>Reaaliaikainen ja automoitu lämpötilan seuranta nopeuttaa reagointia ja helpottaa laadunvalvontaa.</p> <p>Esimerkiksi ”sähköinen nenän” avulla pystytään havaitsemaan elintarvikkeiden laatumuutokset, jolloin välttyään turvallisuusriskeiltä.</p>	<p>Datan peukaloimattomuuden turvaaminen lisää läpinäkyvyyttä ja luotettavuutta osapuolien välillä. Lohkoketjun hallinnoija voi esimerkiksi olla WHO, jolloin se pääsee käsiksi luotettavaan dataan rokotteiden turvallisuudesta. Tuotehujauksien riski pienenee.</p>	<p>Helpottaa reaaliaikaista laadunvalvontaa sekä luo tarkemmat kriteerit toimitusketjun olosuhteille. Voidaan esimerkiksi simuloida tuotteen lämpötilamuutoksia tai löytää optimaalinen pakkausratkaisu tuotteelle.</p>
Kuljetusten tehostaminen	<p>Kuljetusten reaaliaikainen seurannan avulla voidaan vähentää prosessointia, pienentää myöhästymisten riskiä ja lyhentää odotusaikoja. Häiriöihin reagoinnista tulee mahdollista kaikille toimitusketjun osapuolille, esimerkiksi vähittäiskauppiaille. Muun muassa Just-In-Time-toimitukset tehostuvat.</p>	<p>Ulkoistetun kuljetuspalvelun luotettavuus paranee. Mahdollisen häiriön aiheutuessa sen lokaation osoittaminen helpottuu ja korvausvastuuseen osataan asettaa oikea taho eikä ”jälkiä” pysty peittelemään.</p> <p>Optimaalisen kuljetusreitit löytäminen sujuvoituu.</p>	<p>Pystytään valvomaan välineistön tasoa ja luotettavuutta. Pullonkaulojen havaitseminen helpottuu. Varastohallinnasta tulee tehokkaampaa.</p>
Hävikin ja ympäristövaikutusten minimointi	<p>Reaaliaikainen ja laaja informointi häiriötilanteista pienentää hävikin syntymisen riskiä. Myös varaston järjesteleminen pilaantumispäivän mukaan vähentää hävikkiä. Ajoneuvoihin asennettavien sensorien avulla voidaan monitoroida päästöjä. Ruuhkatilanteita voidaan seurata drone-lennokkien avulla.</p>	<p>Läpinäkyvyyden ansiosta takaisinvetojen määrä ja ylimääräinen prosessointi vähenee. Tehokas tiedonvälitys sidosryhmien välillä helpottaa muun muassa kysynnän ennustamista, jolloin hävikin syntymisen riski pienenee.</p>	<p>Huomioi tuotteiden poikkeavat säilyvyys- ja läpimenoajat. Säättämällä toimitusketjujen olosuhteet optimaaliseksi välttyään ylimääräiseltä energiankulutukselta.</p> <p>Helpottaa johtoa hävikkiä ja energiakulutusta koskevassa päätöksenteossa.</p>

Tutkimukset korostivat kylmäketjulongistiikan hallinnan moninaisuuden haastetta. Esimerkiksi Badia-Melis ym. (2018) toivat tutkimuksessaan esiin lukuisten tekijöiden vaikuttavan siihen, ettei yksiselitteistä ja kaikille sopivaa ratkaisua kylmäketjulongistiikan hallintaan ja haasteisiin vastaamiseen ole. On kuitenkin selvää, että toimitusketjujen monimutkaistuessa entisestään voi teknologian hyödyntäminen olla tulevaisuudessa suosituksen sijaan välttämättömyys.

Koska esitetyt teknologiaratkaisut vaativat suuria investointeja ja monimutkaista toimitusketjuverkostojen konfigurointia, voivat yritykset joutua tasapainottelemaan kustannusten sekä hyötyjen välillä. Esimerkiksi Ashok ym. (2017) totesivat tutkimuksessaan, että kansainvälisen rokotusallianssi GAVI:n (Global Alliance for Vaccines and Immunization) toiminnan näkökulmasta kylmäketjuinfrastruktuurin kustannukset ovat vähäiset suhteessa rokotteiden arvoon. Pienemmille organisaatioille ja yrityksille teknologiaratkaisujen käyttöönotto voi kuitenkin olla haastavaa rajallisten resurssien vuoksi. Tulevaisuudessa tämä saattaa aiheuttaa ongelmia esimerkiksi pienille elintarviketoimittajille, jotka saattavat jäädä kehittyneiden toimitusketjuverkostojen ulkopuolelle puutteellisen tietoinfrastruktuurin ja teknologian takia.

Myös maantieteelliset erot voivat vaikeuttaa teknologiaratkaisujen implementointia. Toisistaan poikkeavat tieto- ja liikenneinfrastruktuurit, vaihteleva laatuvaatimus ja elintaso kuin myös kulttuuriset erot tekevät kylmäketjulongistiikan hallinnasta monimutkaista. Standardit ovat usein puutteellisia sekä teknologioiden että itse kylmäketjun toiminnan kannalta.

Lisäksi on tärkeää huomata, ettei tehokas kylmäketjulongistiikan hallinta aina suoranaisesti poista häiriöiden riskejä. Teknologisen kehityksen mahdollistaman tehokkaan tiedonvälityksen ja ennakkoinnin avulla voidaan parantaa organisaation kykyä reagoida häiriöihin sekä ennaltaehkäistä niitä. Siinä missä esimerkiksi IoT-ratkaisut pyrkivät vähentämään manuaalista työtä, on riski inhimillisiin virheisiin edelleen olemassa. Lohkoketjuteknologian peruuntumaton tiedonvälitys minimoi mahdollisuudet peukalointiin, mutta vaatii käyttäjiltään laajaa yhteistyötä ollakseen toimiva. Myös digitaalinen kaksonen vaatii käyttäjiltään laajaa tietämystä teknologian toiminnasta ja on siten altis inhimillisille virheille.

Tutkielmassa hyödynnettävissä tieteellisissä tutkimuksissa käsiteltiin pitkälti yhden, korkeintaan kahden teknologiaratkaisun merkitystä kylmäketjulongistiikan hallinnan näkökulmasta. Tutkimuksissa huomioitiin ajoittain järjestelmien riippuvuussuhteet, kuten esimerkiksi IoT:n merkitys digitaalisen kaksohen rakentamisessa sekä lohkaketjuteknologian ja IoT:n samanaikaisen käytön hyötyjä. Kolmen teknologiaratkaisun implementoimisen konkreettinen toteutus jäi kuitenkin vähemmälle huomiolle; millainen on organisaatioiden todellinen mahdollisuus ja kiinnostus hyödyntää näitä teknologioita? Voidaan kuitenkin todeta, että esimerkiksi tarkempien järjestelmästandardien luominen saattaisi tehdä teknologioiden käyttöönotosta yrityksille houkuttelevampaa.

Lähteet

- Abdurahman, Dini – Çeken, Celal (2019) Simulation Modeling of An IoT Based Cold Chain Logistics Management System. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, Vol 2 (2), 89-100.
- Adekomaya, Oludaisi – Jamiru, Tamba – Sadiku, Rotimim – Huan, Zhongjie (2016) Sustaining the shelf life of fresh food in cold chain – A burden on the environment. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55 (2), 1359–1365.
- Agarwal, Vernika – Sahai, Seema – Sahay, Namita (2024) Navigating the digital landscape: prioritizing challenges in supply chain management of digital twin implementation. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
- Ashok, Ashvin – Brison, Michael – LeTallec, Yann (2017) Improving cold chain systems: Challenges and solutions. *Vaccine*, Vol. 35, 2217–2223.
- Attaran, Mohsen – Celik, Bilge G. (2021) Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, Vol 6.
- Badia-Melis, R. – Mc Carthy, U. – Ruiz-Garcia, L. – Garcia-Hierro, J. – Villalba, J.R. (2018) New trends in cold chain monitoring applications - A review. *Food Control*, Vol. 86, 170–182.
- Bai, Lin – Liu, Minghao – Ying, Sun (2023) Overview of Food Preservation and Traceability Technology in the Smart Cold Chain System. *Foods*, Vol 12 (15).
- Bai, Qinyang – Yin, Xaiyoqin – Lim, Ming K. – Dong, Chenchen (2021) Low-carbon VRP for cold chain logistics considering real-time traffic conditions in the road network. *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 122 (2), 521–543.
- Balaji, Subramanian – Nathani, Karan – Santhakumar, Rathnasamy (2019) IoT technology, applications and challenges: a contemporary survey. *Wireless personal communications*, Vol. 108, 363–388.
- Bamakan, Seyed M. H. – Maghaddam, Shima G. – Manshadi, Sajedeh D. (2021) Blockchain-enabled pharmaceutical cold chain: Applications, key challenges, and future trends. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 302.
- Barykin, Sergey Y. – Bochkarev, Andrey A. – Kalinina, Olga V. – Yadykin, Vladimir K. (2020) Concept for a Supply Chain Digital Twin. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, Vol. 5 (6), 1498–1515.
- Botín-Sanabria, Diego M. – Mihaita, Adriana-Simona – Peimbert-García, Rodrigo E. – Ramírez-Moreno, Mauricio A. – Ramírez-Mendoza, Ricardo A. – Lozoya-Santos, Jorge de J. (2022)

- Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, Vol 14.
- Brous, Paul – Janssen, Marijn – Herder, Paulien (2020) The dual effects of the Internet of Things (IoT): A systematic review of the benefits and risks of IoT adoption by organizations. *International Journal of Information Management*, Vol. 51.
- Castiaux, Ernest (2010) An introduction to cold chain management. *Journal of GXP Compliance*, Vol. 14 (4), 19–22.
- Chen, David – Ouyang, Manlu – Shi, Duo (2023) The Impact of IoT on Cold Chain Logistics.
- Chen, Min – Chen, Shigang (2016) RFID technologies for internet of things. *Springer International Publishing*.
- Cil, Ahmet Y. – Abdurahman, Dini – Cil, Ibrahim (2022) Internet of Things enabled real time cold chain monitoring in a container port. *Journal of Shipping and Trade*, Vol. 7 (9).
- Defraeye, Thijs – Tagliavini, Giorgia – Wu, Wentao – Prawiranto, Kevin – Schudel, Seraina – Kerisima, Mekdim – Verboven, Pieter – Bühlmann, Andreas (2019) Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation & Recycling*, Vol. 149, 778–794.
- Dutta, Pankaj – Choi, Tsan-Ming – Somani, Surabhi – Butala, Richa (2020) Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 142.
- Fan, Yun – de Kleuver, Caroline – de Leeuw, Sander – Behdani, Behzad (2021) Trading off cost, emission, and quality in cold chain design: A simulation approach. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 158.
- Fuller, Aidan – Fan, Zhong – Day, Charles – Barlow, Chris (2020) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, Vol. 8, 108952–108971.
- Gupta, B.B. – Quamara, Megha (2018) An overview of Internet of Things (IoT): Architectural aspects, challenges, and protocols. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Vol. 32 (21).
- Gurtu, Amulya – Johny, Jestin (2019) Potential of blockchain technology in supply chain management: a literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 49 (9), 881–900.
- Haddud, Abubaker – DeSouza, Arthur – Khare, Anshuman – Lee, Huei (2017) Examining potential benefits and challenges associated with the Internet of Things integration in supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 28 (8), 1055–1085.

- Han, Jia-Wei – Zuo, Min – Zhu, Wen-Ying – Zuo, Jun-Hua – Lü, En-Li – Yang, Xin-Ting (2021) A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 109, 536–551.
- Huang, Ying – Ghadge, Abhijeet – Yates, Nicky (2024) Implementation of digital twins in the food supply chain: a review and conceptual framework. *International Journal of Production Research*, Vol. 62 (17), 6400–6426.
- Jabbar, Sohail – Lloyd, Huw – Hammoudeh, Mohammad – Adebisi, Bamidele – Raza, Umar (2021) Blockchain-enabled supply chain: analysis, challenges, and future directions. *Multimedia Systems*, Vol. 27, 787–806.
- Ji, Yingfeng – Yang, Hualong – Zhou, Yong (2015) Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickup for Cold-chain Logistics. *Proceedings of the 2015 International Conference on Modeling, Simulation and Applied Mathematics*. Atlantis Press, 70–74.
- Jiang, Shaojun – Jia, Sumei – Guo, Hungjun (2024) Internet of Things (IoT)-enabled framework for a sustainable Vaccine cold chain management system. *Heliyon*, Vol. 10 (7).
- Jol, Simon – Kassianenko, Alex – Wszol, Kazimierz – Oggel, Jan (2006) The Cold Chain, one link in Canada's food safety initiatives. *Food Control*, Vol. 18 (6), 713–715.
- Jones, David – Snider, Chris – Nassehi, Aydin – Yon, Jason – Hicks, Ben (2020) Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 29, 36–52.
- Korpela, Kari – Hallikas, Jukka – Dahlberg, Jukka (2017) Digital supply chain transformation toward blockchain integration. *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences*, 4182–4191.
- Liu, Zheng – Guo, Hangxin – Zhao, Yuanjun – Hu, Bin – Shi, Lihua – Lang, Lingling – Huang, Bangtong (2021) Research on the optimized route of cold chain logistics transportation of fresh products in context of energy-saving and emission reduction. *Mathematical Biosciences and Engineering*, Vol. 18. (2), 1926–1940.
- Marchi, Beatrice – Zaroni, Simone (2022) Cold Chain Energy Analysis for Sustainable Food and Beverage Supply. *Sustainability*, Vol. 14.
- Marmolejo-Saucedo, Jose A. (2020) Design and Development of Digital Twins: A Case Study in Supply Chains. *Mobile Networks and Applications*, Vol. 25, 2141–2160.
- Mejjaouli, Sobhi – Babiceanu, Radu F. (2018) Cold supply chain logistics: System optimization for real-time rerouting transportation solutions. *Computers in Industry*, Vol. 95, 68–80.
- Mendonça, Ronan - Gomes, Otavio - Vieira, Luiz - Vieira, Marcos - Vieira, Alex - Nacif, José (2021). Blockcoldchain: Vaccine cold chain blockchain.

- Meneghetti, Antonella – Monti, Luca (2014) Greening the food supply chain: an optimisation model for sustainable design of refrigerated automated warehouses. *International Journal of Production Research*, Vol. 53 (21), 6567–6587.
- Menon, Karthik – Thomas, Kevin – Thomas, Jim – Titus, Denil – James, Divya (2021) ColdBlocks: quality assurance in cold chain networks using blockchain and IoT. *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security: Proceedings of IEMIS 2020*. Springer Singapore, Vol. 1, 781–789.
- Meo, S. A. – Bukhari, I. A. – Akram, J. – Meo, A. S. – Klonoff, D. C. (2021) COVID-19 vaccines: comparison of biological, pharmacological characteristics and adverse effects of Pfizer/BioNTech and Moderna Vaccines. *European Review for Medical & Pharmacological Sciences*, Vol. 25 (3), 1663–1669.
- Mercier, Samuel – Villeneuve, Sebastien, Mondor, Martin – Uysal, Ismail (2017) Time–Temperature Management Along the Food Cold Chain: A Review of Recent Developments. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, Vol. 16 (4), 647–667.
- Moshood, Taofeeq D. – Nawanir, Gusman – Sorooshian, Shahryar – Okfalisa, Okfalisia (2021) Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics. *Applied System Innovation*, Vol. 4 (2).
- Mouha, Radouan A. Internet of Things (IoT) (2021) *Journal of Data Analysis and Information Processing*, Vol. 9, 77–101.
- Mukherjee, Archana – Singh, Rajesh – Mishra, Ruchi – Bag, Surajit (2022) Application of blockchain technology for sustainability development in agricultural supply chain: justification framework. *Operations Management Research* Vol. 15, 46–61.
- Mustafa, Muhammad F. M. S. – Navaranjan, Namasivayam – Demirovic, Amer (2024) Food cold chain logistics and management: A review of current development and emerging trends. *Journal of Agriculture and Food Research*, Vol. 18.
- Namasudra, Suyel – Deka, Ganesh C. – Johri, Prashant – Hosseinpour, Mohammad – Gandomi, Amir H. (2021) The Revolution of Blockchain: State-of-the-Art and Research Challenges. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 28, 1497–1515.
- Ndraha, Nodali – Hsiao, Hsin-I – Vlajic, Jelena – Yang, Ming-Feng – Lin, Hong-Tang V. (2018) Time-temperature abuse in the food cold chain: Review of issues, challenges, and recommendations. *Food Control*, Vol. 89, 12–21.
- Nofer, Michael – Gomber, Peter – Hinz, Oliver – Schiereck, Dirk (2017) Blockchain. *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 59 (3), 183–187.

- Nur, Muhammad R. – Hakim, Luqman – Amrozi, Yusuf (2020) Challenges in using blockchain for supply chain management information systems. *Jurnal Teknik Industri*, Vol. 15 (2), 82–92.
- Olsen, Petter – Borit, Melania (2013) How to define traceability. *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 29 (2), 142–150.
- Opasvitayarux, Pakorn – Setamanit, Siri-on – Assarut, Nuttapol – Visamitanan, Krisana (2022) Antecedents of IoT adoption in food supply chain quality management: an integrative model. *Journal of International Logistics and Trade*, Vol. 20 (3), 135–170.
- Óskarsdóttir, Kristín – Oddson, Guðmundur Valur (2019) Towards a decision support framework for technologies used in cold supply chain traceability. *Journal of Food Engineering*, Vol. 240, 153–159.
- Pajic´, Vukasin – Andrejic´, Milan – Chatterjee, Prasenjit (2024) Enhancing Cold Chain Logistics: A Framework for Advanced Temperature Monitoring in Transportation and Storage. *Mechatronics and Intelligent Transportation Systems*, Vol. 3 (1), 16–30.
- Pambudi, Nugroho A. – Sarifudin, Alfian – Gandidi, Indra M. – Romadhon, Rahmat (2021) Vaccine cold chain management and cold storage technology to address the challenges of vaccination programs. *Energy Reports*, Vol. 8, 955–972.
- Prim, Alexandre L. – Nicchellatti, Tiago P. – Mendes, Roberto G. (2021) Improving cold-food quality control through the Internet of Things and big data. *Supply Chain 4.0: Improving Supply Chains with Analytics and Industry 4.0 Technologies*, Vol. 171.
- Qi, Tingting – Ji, Jun – Zhang, Xuelai – Liu, Lu – Xu, Xinhong – Ma, Kunlin – Gao, Yintao (2022) Research progress of cold chain transport technology for storage fruits and vegetables. *Journal of Energy Storage*, Vol. 56.
- Qian, Jianping – Yu, Qiangyi – Jiang, Li – Yang, Han – Wu, Wenbin (2022) Food cold chain management improvement: A conjoint analysis on COVID-19 and food cold chain systems. *Food Control*, Vol. 137
- Raab, Verena – Petersen, Brigitte – Kreyenschmidt, Judith (2011) Temperature monitoring in meat supply chains. *British Food Journal*, Vol. 113 (10), 1267–1289.
- Rajasekaran, Arun S. – Azees, Maria – Al-Turjman, Fadi (2022) A comprehensive survey on blockchain technology. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol 52.
- Ramírez, José A. – Castañón-Rodríguez, Juan F. – Uresti-Marín, Rocío M. (2020) An exploratory study of possible food waste risks in supermarket fruit and vegetable sections. *Food Science and Technology*, Vol 41, 967–973.
- Rani, Poonam – Jain, Vibha – Joshi, Mansi – Khandelwal, Muskan – Rao, Shivani (2021) A Secured Supply Chain Network for Route Optimization and Product Traceability Using

- Blockchain in Internet of Things. Teoksessa: *Data Analytics and Management. Proceedings of ICDAM.*, toim. Khanna, A. – Gupta, D. – Pólkowski, Z. – Bhattacharyya, S. – Castillo, O, Vol 54, 637–647. Springer, Singapore.
- Rejeb, Abderahman – Keogh, John G. – Treiblmaier, Horst (2019) Leveraging the Internet of Things and Blockchain Technology in Supply Chain Management. *Future Internet*, Vol. 11 (7).
- Reuters (2014) McKesson pays \$18 mln in temperature monitor false claims case. <<https://www.reuters.com/article/business/mckesson-pays-18-mln-in-temperature-monitor-false-claims-case-idUSL2N0QE1R9/>>, haettu 6.12.2024.
- Rose, Karen – Eldridge, Scott – Chapin, Lyman (2015) The Internet of Things: An Overview. Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World. *The internet society (ISOC)*, Vol. 80.
- Rouf, Abdur – Salaman Raja, S (2023) Applications of Internet of Things (IoT) in the Academic Libraries. *Ingenious Librarianship: Enriching Self-Reliance*, 135–146.
- Ruiz-Garcia, Luis –Lunadei, Loredana (2010) Monitoring cold chain logistics by means of RFID. *Sustainable radio frequency identification solutions*, 37–50.
- Sallam, Karam M. – Mohamed, Ali W. – Mohamed, Mona (2023) Internet of Things (IoT) in Supply Chain Management: Challenges, Opportunities, and Best Practices. *Sustainable Machine Intelligence Journal*, Vol. 2 (3).
- Sarmah, Simanta S. (2018) Understanding Blockchain Technology. *Computer Science and Engineering*, Vol 8. (2), 23–29.
- Sengupta, Sourav – Dreyer, Heidi (2023) Realizing zero-waste value chains through digital twin-driven S&OP: A case of grocery retail. *Computers in Industry*, Vol. 148.
- Sharma, Angira – Kosasih, Edward – Zhang, Jie – Brintrup, Alexandra – Calinescu, Anisoara (2022) Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 30.
- Shi, Yube – Lin, Yun – Lim, Ming K. – Tseng, Ming-Lang – Tan, Changlu – Li, Yan (2022) An intelligent green scheduling system for sustainable cold chain logistics. *Expert Systems with Applications*, Vol. 209.
- Shrivastava, Chandrima – Schudel, Seraina – Shoji, Kanaha – Onwude, Daniel – da Silva, Fatima P. – Turan, Deniz – Paillart, Maxence – Defraeye, Thijs (2023) Digital twins for selecting the optimal ventilated strawberry packaging based on the unique hygrothermal conditions of a shipment from farm to retailer. *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 199.

- Si, Yang (2022) Agricultural Cold Chain Logistics Mode Based on Multi-Mode Blockchain Data Model. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2022 (1).
- Singh, Maulshree – Fuenmayor, Evert – Hinchy, Eoin P. – Qiao, Yuansong – Murray, Niall – Devine, Declan (2021) Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*, Vol. 4 (2).
- Singh, Maulshree – Srivastava, Rupal – Fuenmayor, Evert – Kuts, Vladimir – Qiao, Yuansong – Murray, Niall – Devine, Declan (2022) Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences*, Vol 12.
- Singh, Rajesh – Gunasekaran, Angappa – Kumar, Pravin (2018) Third party logistics (3PL) selection for cold chain management: a fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS approach. *Annals of Operations Research*, Vol. 267, 531–553.
- Song, Mei-xian – Li, Jun-qing – Han, Yun-qi – Han, Yu-yan – Liu, Li-Li – Sun, Qun (2020) Metaheuristics for solving the vehicle routing problem with the time windows and energy consumption in cold chain logistics. *Applied Soft Computing Journal*, Vol 95.
- Soumyalatha, Shruti G. H. (2016) Study of IoT: understanding IoT architecture, applications, issues and challenges. *1st International Conference on Innovations in Computing & Net-working (ICICN16), CSE, RRCE. International Journal of Advanced Networking & Applications*, Vol. 478.
- Srivastava, Samir K. – Chaudhuri, Atanu – Srivastava. Rajiv K. (2014) Propagation of risks and their impact on performance in fresh food retail. *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 26 (3), 568–602.
- Stroumpoulis, Asterios – Kopanaki, Evangelia – Oikonomou, Maria (2021) The Impact of Blockchain Technology on Food Waste Management in the Hospitality Industry. *ENTRENOVA - ENTERprise REsearch InNOVation*, Vol. 7 (1), 419–428.
- Sun, Chunling (2012) Application of RFID Technology for Logistics on Internet of Things. *AASRI Procedia*, Vol. 1, 106 – 111.
- Taherdoost, Hamed (2023) Security and Internet of Things: Benefits, Challenges, and Future Perspectives. *Electronics*, Vol. 12.
- Taj, Soonh – Imran, Ali S. – Kastrati, Zenun – Daudpota, Sher M. – Memon, Raheel A. – Ahmed, Javed (2023) IoT-based supply chain management: A systematic literature review. *Internet of Things*, Vol 24.
- Tan, Weng C. – Sidhu, Manjit S. (2022) Review of RFID and IoT integration in supply chain management. *Operations Research Perspectives*, Vol. 9.

- Tang, Wei – Li, Junfeng (2021) Analysis of energy consumption status and development trend of cold chain logistics. *E3S Web of Conferences*, Vol. 269.
- Tsai, Kune-Muh – Pawar, Kulwant S. (2018) Special Issue on Next-Generation Cold Supply Chain Management: Research, Applications and Challenges. *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 29 (3), 786–791.
- Tsang, Y. P. – Choy, K. L. – Poon, T. C. – Koo, P.S. – Ho, H. Y. (2016) An IoT-based Occupational Safety Management System in Cold Storage Facilities, *International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation*, 7–13.
- VanDerHorn, Eric – Mahadevan, Sankaran (2021) Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, Vol. 145.
- Vass, Tharaka, de – Shee, Himanshu – Miah, Shah J. (2021) IoT in Supply Chain Management: Opportunities and Challenges for Businesses in Early Industry 4.0 Context. *Operations and Supply Chain Management*, Vol. 14 (2), 148–161.
- Virtanen, Juha – Yang, Fan – Ukkonen, Leena – Elsherbeni, Atef – Babar, Amir – Sydänheimo, Lauri (2014) Dual port temperature sensor tag for passive UHF RFID systems. *Sensor Review*, Vol. 34 (2), 154–169.
- Wang, Lu – Deng, Tianhu – Shen, Zuo-Jun M. – Hu, Hao – Qi, Yongzhi (2022) Digital twin-driven smart supply chain. *Frontiers of Engineering Management*, Vol. 9 (1), 56–70.
- Wang, Minxi – Wang, Yajie – Liu, Wei – Ma, Yu – Xiang, Longtao – Yang, Yunqi – Li, Xin (2020) How to achieve a win–win scenario between cost and customer satisfaction for cold chain logistics? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 566.
- Werbińska-Wojciechowska, Sylwia – Giel, Robert – Winiarska, Klaudia (2024) Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation System – Systematic Review. *Sensors*, Vol. 24 (18), 6069.
- World Health Organization, Organisation Mondiale De La Sante (2005) Good Distribution Practices (GDP) for Pharmaceutical Products.
- Yin, Yuanxing – Wang, Huan – Deng, Xiaojun (2024) Real-time logistics transport emission monitoring-Integrating artificial intelligence and internet of things. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 136.
- Yu, Zhang – Tianshan, Ma – Khan, Syed A. R. – Sharif, Arshian (2018) The Study on Efficient Cold Chain Logistics. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*, Vol. 290, 475–478.

- Zhang, Li-Yi – Tseng, Ming-Lang – Wang, Ching-Hsin – Xiao, Chao – Fei, Teng (2019) Low-carbon cold chain logistics using ribonucleic acid-ant colony optimization algorithm. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 233, 169–180.
- Zhang, Xinghua – Sun, Yongjie – Sun, Yongxin (2022) Research on Cold Chain Logistics Traceability System of Fresh Agricultural Products Based on Blockchain. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Vol. 2022 (1).
- Zhang, Xuefeng – Li, Zhe – Li, Guo (2023) Impacts of blockchain-based digital transition on cold supply chains with a third-party logistics service provider. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 170.