



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Konsta Raunio

Lohkoketjuteknologian edut ilmailuteollisuuden läpinäkyvyydessä ja seurattavuudessa

Kandidaatintutkielma

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Tuotantotalous

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Konsta Raunio		
Tutkielman nimi:	Lohkoketjuteknologian edut ilmailuteollisuuden läpinäkyvyydessä ja seurattavuudessa: Kandidaatintutkielma		
Tutkinto:	Kauppateiden kandidaatti		
Oppiaine:	Tuotantotalous		
Työn ohjaaja:	Tauno Kekäle		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	32

TIIVISTELMÄ:

Ilmailuteollisuus on yksi maailman säädellyimmistä toimialoista, ja sääntelyn tarkoituksena on varmistaa lentokelpoisuus sekä turvallisuus kaikissa olosuhteissa. Tämän tutkielman tavoitteena on perehtyä ilma-alusten osien ja varaosien jäljitettävyyteen, kartoittaa nykyisten seurantajärjestelmien heikkouksia sekä selvittää, miten lohkoketjuteknologiaa voidaan hyödyntää toimitusketjun läpinäkyvyyden ja seurattavuuden tehostamisessa. Tutkimus on toteutettu systemaattisena kirjallisuuskatsauksena.

Yksi suurimmista haasteista nykyisissä järjestelmissä on niiden paperipohjaisuus ja tiedon silottuminen eri toimijoiden välillä, mikä altistaa tiedon häviämislle ja inhimillisille virheille. Tämä heikkous mahdollistaa väärennettyjen ja hyväksymättömien osien pääsyn toimitusketjuihin, aiheuttaen merkittäviä riskejä ilmailuturvallisuudelle.

Kirjallisuuskatsauksen tulokset osoittavat, että lohkoketjuteknologialla on mahdollista ratkaista näitä heikkouksia, tarjoamalla muuttumattoman ja keskittämättömän tietokannan, joka mahdollistaa osien katkeamattoman elinkaarihallinnan. Lisäksi yhdistämällä lohkoketjut esineiden internettiin (IoT), sähköisiin RFID tunnisteisiin ja digitaalisiin kaksosiin, saadaan seurantatietoja automatisoitua. Näiden lisäksi hyödyntämällä älysovimuksia saadaan vähennettyä manuaalista työtä ja parannettua huoltohistorian luotettavuutta

Vaikka yleisesti lohkoketjuteknologialla on hyvät mahdollisuudet parantaa tiedon epäsymmetriaa, sekä parantaa järjestelmän läpinäkyvyyttä, on lohkoketjujen suurempi adoptio hidastunut yleisten standardien puutteeseen ja järjestelmän vaatimaan korkeaan alkuinvestointiin.

AVAINSANAT: Lohkoketju, Ilmailuala, Jäljitettävyyys, Läpinäkyvyys, Toimitusketju

Sisällys

1	Johdanto	6
1.1	Tutkimuksen tavoitteet	6
1.2	Tutkimusmenetelmä ja aiheen rajaus	7
1.3	Tutkielman rakenne	9
2	Ilmailualan sääntely	10
2.1	Kansainvälinen ja kansallinen sääntely	10
2.2	Jäljennettävyyden vaatimukset	11
2.3	Nykyiset heikkoudet	12
2.4	Väärennetyt ja hyväksymättömät osat	13
3	Lohkoketjuteknologia	14
3.1	Lohkoketjuteknologian toiminta	14
3.2	Lohkoketjutyypit	15
3.2.1	Julkiset luvattomat lohkoketjut	16
3.2.2	Yksityiset ja luvalliset lohkoketjut	16
3.2.3	Konsortiolohkoketjut	16
3.3	Lohkoketjuteknologian jäljitettävyys ja läpinäkyvyys	17
3.4	Älysopimukset	19
3.5	Rajoitteet	19
3.5.1	Taloudelliset haasteet	20
3.5.2	Teknologiset haasteet	20
3.5.3	Sääntelyn haasteet	20
3.5.4	Datan laadun haasteet	21
4	Lohkoketju teknologian hyödyntäminen ilmailuteollisuudessa	22
4.1	Komponenttien elinkaarenhallinta	22
4.1.1	Sähköiset tunnisteet	22
4.1.2	Digitaaliset kaksoiset	23
4.1.3	Älysopimukset	23
4.2	Huoltohistorian luotettavuuden parantaminen	24

4.3	Väärennösten torjunta läpinäkyvän toimitusketjun avulla	24
4.4	Tietojen jakaminen ja yhteistyö	25
5	Yhteenveto	27
5.1	Tutkimuksen arviointi	27
5.2	Tulevaisuus ja jatkotutkimukset	27
6	Lähteet	29
	Liitteet	32
	Liite 1. Tekoälyn käyttö tutkimuksessa	32

Kuviot

Kuvio 1. Yksinkertainen esitys lohkoketjujen toiminnasta. (Geeksforgeeks 2025)	15
Kuvio 2. Yksinkertaisen transaktion tietojen tallentaminen: Perinteiset vs. lohkoketjujärjestelmät. (Gaur ja Gaiha 2020)	18

Taulukot

Taulukko 1. Lohkoketjuteknologian potentiaaliset käyttökohteet ilmailuteollisuudessa. Mallinnettu (Lopes;Rita ja Treiblmaier 2021)	7
Taulukko 2. Vertaileva analyysi AC Airlinesin toimitusketjun hallinnasta ennen lohkoketjuteknologian käyttöönottoa ja sen jälkeen. Mukailten (Zhang 2024)	26

Lyhenteet

BtB:	Back to Birth, eli aukoton dokumentaatio osien koko elinkaaren ajalta valmistuksesta nykyhetkeen.
EASA:	Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto.
ERP:	Toiminnanohjausjärjestelmä.
FAA:	Yhdysvaltain ilmailuhallinto.
ICAO:	Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö.
IoT:	Esineiden internet.
RFID:	Radiotaajuinen etätunniste.

1 Johdanto

Ilmailuteollisuus on laaja kokonaisuus, joka pitää sisällään valtavan määrän eri alojen toimijoita ja näiden välisiä monimutkaisia toimitusketjuja. Samalla se on yksi maailman säädellyimmistä toimialoista, jossa lentokelpoisuus ja turvallisuus ovat kaiken toiminnan perusta. Kuten Ho & ym. (2021) toteavat, tämän ylläpitämiseksi kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO on asettanut standardit ja suositukset, joita kansalliset viranomaiset, kuten EASA ja FAA, valvovat ja toteuttavat omilla alueillaan.

Vaikka ala vaatii tarkkaa sääntelyä ja datan eheyttä, tutkimuksissa on havaittu vakavia puutteita nykyisissä käytänteissä. Esimerkiksi Efthymiou & ym. (2022) huomauttavat, että lähes 90 % kaikista liikennekoneiden huoltodokumenteista on yhä paperisia. Tämä johtaa heikkoon datan säilyvyyteen ja ongelmiin lentokoneen lentokelpoisuuden todentamisessa. Siksi on kriittistä etsiä korvaavia teknologioita, joilla voidaan parantaa datan läpinäkyvyyttä, eheyttä ja jaettavuutta. Tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan lohkoketjuteknologian potentiaalia näiden haasteiden ratkaisijana.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on selvittää, miten lohkoketjuteknologiaa voidaan hyödyntää ilmailuteollisuuden läpinäkyvyyden parantamisessa, sekä seurattavuudessa. Samalla pyritään selvittämään miten lohkoketjuteknologia voi parantaa aitousvarmennusta, tehostaa sääntelyn noudattamista ja poistaa epäsymmetristä tietoa toimijoiden väliltä. Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

Tutkimuskysymykset:

- Minkälaisia vaatimuksia jäljitettävyydellä on ilmailualalla?
- Miten jäljitettävyyttä voidaan tehostaa lohkoketjuteknologialla?
- Miten voidaan välttyä väärennyksiltä?

- Mitkä ovat lohkoketjuteknologian suurimmat hyödyt ilmailuteollisuuden läpinäkyvyydessä?

1.2 Tutkimusmenetelmä ja aiheen raja

Tutkielma on tehty systemaattisena kirjallisuuskatsauksena. Aineistona on pyritty käyttämään vain vertaisarvioituja akateemisia artikkeleita, alan standardeja ja avoimesti saatavilla olevia artikkeleita. Saatavilla olevan aineiston merkityksellisyyden ylläpitämiseksi on sitä myös rajattu iän mukaan viimeisimpään kuuteen vuoteen, sillä alan teknologia on nopeasti kehittyvää ja tieto vanhenee nopeasti. Aineistoja on haettu erilaisista tietokannoista kuten IEEE Electronic Library, Directory of Open Access Scholarly Resources ja Google Scholar. Tutkimus aineistoa haettiin seuraavilla hakulauseilla, (Blockchain OR Logistics) AND "Aerospace industries", "Aerospace industries" AND (logistics OR blockchain) ja Blockchain AND logistics AND "Aerospace industries".

Lohkoketjuteknologialla on ilmailualalla useita eri tyylisiä käyttökohteita, ne vaihtelevat kanta-asiakas ohjelmista aina toimitusketjujen hallintaan saakka. Taulukko 1 kokoaa yhteen merkittävimmät käyttökohteet ja niiden sovellukset ilmailualalla.

Taulukko 1. Lohkoketjuteknologian potentiaaliset käyttökohteet ilmailuteollisuudessa. Mallinnettu (Lopes;Rita ja Treiblmaier 2021)

Käyttökohde	Sovellukset ilmailualalla
Huollon hallinta	Lohkoketjuun voidaan tallentaa valmistajien, lentoyhtiöiden ja huolto-organisaatioiden (MRO) dokumentaatio. Komponenttien huoltosykli on helposti todennettavissa.
Identiteetinhallinta	Älysovimukset auttavat miehistön ja matkustajien henkilöllisyyden

Käyttökohde	Sovellukset ilmailualalla
	varmentamisessa, estäen identiteettivarkauksia ja parantaen matkustajakokemusta.
Kanta-asiakasohjelmat	Teknologia tehostaa lentopisteiden ansaitsemista ja käyttöä digitalisoimalla kanta-asiakasohjelmat token-pohjaisiksi.
Toimitusketjun hallinta	Lohkoketjulla parannetaan lentokoneen osien jäljitettävyyttä ja varmistetaan varaosien aitous luotettavalla ja muuttumattomalla tavalla.
Maksuliikenne	Lentoyhtiöt ja matkatoimistot voivat tehdä yhteistyötä ja hoitaa maksuja reaaliaikaisesti ja läpinäkyvästi.

Tutkimus on rajattu käsittelemään lohkoketjuteknologian hyödyntämistä ilmailuteollisuuden toimitusketjujen hallintaan ja erityisesti lentokoneiden osien ja varaosien jäljitettävyyteen, seurattavuuteen ja aitousvarmennukseen. Kirjallisuuskatsauksen keskiössä on osien koko elinkaaren dokumentointi, eli Back to Birth (BtB) dokumentaatio. Lohkoketjuteknologian osalta ei ole tarkoitusta syventyä sen tekniseen puoleen tai algoritmeihin vaan keskittyä lohkoketjuihin strategisena ja operatiivisena työkaluna, joka on yhdistettävissä muihin Industry 4.0 teknologioihin. Ulkopuolelle on myös jätetty lohkoketjusovellukset, jotka liittyvät matkustajakokemuksiin, kuten kanta-asiakasohjelmat ja lipunmyynti, sillä ne eivät liity suoraan operatiiviseen turvallisuuteen tai osien toimitusketjujen läpinäkyvyyteen.

1.3 Tutkielman rakenne

Tutkielma koostuu viidestä pääluvusta ja näiden alaluvuista. Ensimmäisessä pääluvussa keskitytään tutkielman pohjustamiseen, esittelyyn ja rajaamiseen. Toisessa ja kolmannessa pääluvussa selvennetään tutkimusaiheeseen liittyviä käsitteitä, teorioita ja säännöksiä. Neljännessä pääluvussa syvennytään siihen, miten aiempien lukujen teorioita yhdistellään kirjallisuudessa. Viimeinen, viides pääluku vastaa tutkimuskysymyksiin, arvioi tutkielman luetettavuutta, sekä ehdottaa mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Lopuksi löytyy lähdeluettelo ja muut oheistiedostot.

2 Ilmailualan sääntely

Ilmailuteollisuuden turvallisuutta pyritään ylläpitämään kansainvälisillä sääntelykehyksillä, joiden tarkoituksena on varmistaa lentokelpoisuus kaikissa olosuhteissa. Turvallisuuden hallinta ei ole ainoastaan itse lentotoimintaan rajoittuvaa, vaan se kattaa myös muut lentokoneisiin liittyvät toiminnot kuten huoltamisen ja osien valmistamisen logistiikkoineen. Tähän pyritään pääsemään standardoimalla käytäntöjä, teknillisillä vaatimuksilla ja kansainvälisillä valvontaprosesseilla (Abeyratne 2024).

Suurelta osin sääntelyn perusta rakentuu kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön (ICAO) asettamiin normeihin ja tiukkoihin osien jäljitettävyyksivaatimuksiin (Ho, ym. 2021). Vaatimusten keskiössä on näiden toimintojen läpinäkyvyys ja katkeamaton jäljitettävyyden säilyttäminen (Ho, ym. 2021). Tämä luo suuren haasteen tiedon eheyden säilyttämiseen, kun komponentit vaihtavat elinkaarensa aikana useasti organisaatiosta toiseen.

2.1 Kansainvälinen ja kansallinen sääntely

Kuten aiemmin todettu sääntelyn viitekehys perustuu ICAO:n asettamiin normeihin. Näitä normeja tulee jokaisen jäsenvaltion panna käytäntöön omassa kansallisessa lainsäädännössä. Tällaisia viranomaisia ovat esimerkiksi Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto EASA ja Yhdysvaltain ilmailuhallinto FAA. Nämä virastot asettavat yksityiskohtaiset vaatimukset lentokoneiden ja niiden osien suunnittelulle, valmistukselle ja jatkuvalle lentokelpoisuudelle omilla kansallisilla alueillaan.

Euroopassa EASA:n tehtävä on luoda sääntelykehys ja määrittellä vaatimukset ja menetelmät lentokelpoisuuden määrittämiseksi. Tätä varten on olemassa EU:n asetus N:o 1321/2014, missä määritellään tekniset vaatimukset ja hallinnolliset menettelyt jatkuvan lentokelpoisuuden varmistamiseksi (EASA 2025). Tämän asetuksen keskeisiä osia ovat Part-M, jossa määritellään jatkuvan lentokelpoisuuden hallinta ja Part-145,

jossa puolestaan huolto-organisaatioiden hyväksyntä, jotka edellyttävät, että huolto-organisaatioilla on oltava käytössään ajantasainen huoltokirjanpito ja menetelmät osien alkuperän todentamiseksi (EASA 2025). Komponenttien osalta EASA Form 1 on tärkeä asiakirja, sillä sitä käytetään todistamaan, että valmistettu tai huollettu osa on tehty hyväksytyjen standardien mukaan.

Vastaavasti Yhdysvalloissa FAA säätelee alaa liittovaltion ilmailumääräysten 14 CFR kautta. FAA:n määräykset edellyttävät vastaavanlaista dokumentaatiota, ja esimerkiksi FAA Form 8130-3 toimii EASA Form 1:n vastineena osien lentokelpoisuuden todistamisessa (EASA 2025). FAA on myös julkaissut ohjeistuksia esim. AC 120-78A sähköisten allekirjoitusten käytöstä, mikä luo puolestaan pohjaa digitaalisten ratkaisujen hyödyntämiselle (FAA 2024). Vaikka sääntely on perinteisesti ollut konservatiivista, EASA on todennut, etteivät nykyiset säännökset estä lohkoketjuteknologian kaltaisten uusien ratkaisujen käyttöä, vaan ne voivat päinvastoin parantaa digitaalisten sertifikaattien eheyttä ja luotettavuutta (Romano, ym. 2024).

2.2 Jäljennettävyyden vaatimukset

Jäljitettävyys voidaan jakaa kahteen kategoriaan, historiallisen tilan seurantaan ja nykyisen sijainnin tai kunnan seurantaan (Ho, ym. 2021). Jotta osia voidaan käyttää ilmailualuksissa ja saada nämä täyttämään ilmakelpoisuuden vaatimukset ovat jäljitettävyysvaatimusten täytyminen ehtona (Ho, ym. 2021). Keskeisiä vaatimuksia jäljitettävyydelle ovat:

Back to Birth (BTB), eli aukoton dokumentaatio osien koko elinkaaren ajalta valmistuksesta nykyhetkeen (Efthymiou, ym. 2022). Tämän vuoksi jokaiselta kriittiseltä osalta täytyy löytyä sen osan kriittiset tietojoukot (Koutromanos 2025). Samaa dokumentaatiota voidaan hyödyntää myös korjatuissa ja uudelleen käytetyissä osissa, jolloin tietoihin lisätään huoltajat, miksi on ollut rikki ja koska se on korjattu (Koutromanos 2025)).

Kriittiset tietojoukot vastaavat osan yksilöllisistä tiedoista ja mahdollistavat sen erottelemisen muista vastaavista osista. (Koutromanos 2025)). Näihin voi lukeutua osanumero, sarjanumero, elinkaarirajoitukset ja muita tietoja (Ho, ym. 2021). Näiden tietojen puuttuminen tai puutteellisuus johtaa ilma-aluksen lentokieltoon ja vaatii kalliit aikaa vievät prosessit tietojen uudelleen hankintaan ja järjestelyyn (Romano, ym. 2024).

EASA:n ja FAA:n vaatimusten mukaan jokaisella asennettavalla osalla on oltava todistus, joka vahvistaa sen vaatimustenmukaisuuden. Ilman täydellistä jäljitettävyyttä ja asianmukaisia asiakirjoja, osaa ei voida pitää lentokelpoisena, eikä sitä saa asentaa ilma-alukseen. Tämä vaatimus korostuu erityisesti elinikärajoitettujen osien eli Life-Limited Parts kohdalla, joiden käyttöikä on rajattu tiettyyn tunti- tai syklinmäärään väsymismurtumien ehkäisemiseksi (Efthymiou, ym. 2022). Jos osan historiaan jää aukkoja, se on usein romutettava tai se vaatii kalliin uudelleensertifioinnin, mikäli se on edes mahdollista.

2.3 Nykyiset heikkoudet

Nykyaikaisen ilmailuteollisuuden suurimpia heikkouksia on sen teknologisesti vanhentuneet käytännöt dokumentaatiossa, sillä esimerkiksi arviolta 90 prosenttia kaikkien kaupallisten lentokoneiden huoltokirjaukset ovat yhä paperisia (Efthymiou, ym. 2022). Tämä altistaa kriittisen tiedon katoamiselle ja inhimillisille virheille dokumentoidessa. Mikä puolestaan johtaa merkittävien kuluerien syntymiseen osien uudelleen sertifioinnista tai vaihtamisesta uusiin.

Toinen merkittävä haittatekijä on eri toimijoiden välille syntyneet siiloutuneet tietojärjestelmät (Zhang 2024). Tämä tarkoittaa sitä, että eri toimijoiden välillä kuten valmistaja, huolto-organisaatio ja lentoyhtiö ERP-järjestelmät eivät kykene tiedonsiirtoon saumattomasti (Ho, ym. 2021). Tämän takia syntyy myöhästymisiä osien

identifioinnissa, mikä puolestaan pitää lentokoneita pidempään maattuna huollonaikana ja pahimmassa tapauksessa lentoturvallisuus vaarantuu (Zhang 2024).

Yhteistoiminnan puute ja huonosti säilyvät dokumentaatiot luovat merkittävän esteen aukottoman BTB- historian ylläpitämiselle, joka on välttämätön lentokelpoisuuden todentamiseen (Efthymiou, ym. 2022). Lisäksi paperiset tiedot hidastavat auditointiprosesseja, jolloin virheiden havaitsemiseen kuluu enemmän aikaa.

2.4 Väärennetyt ja hyväksymättömät osat

Väärennetyistä ja hyväksymättömistä osista muodostuu yksi ilmailualan suurimmista turvallisuusriskeistä. Alan asiantuntijat arvioivat, että jopa kymmenen prosenttia Yhdysvalloissa liikkuvista varaosista on hyväksymättömiä, ja näiden osien yhteenlaskettu arvo kohoaa jopa miljardiin dollariin (Kotha 2022). Kuten Kotha toteaa ”Väärennetty osa on luvaton kopio, jäljitelmä, korvaava osa tai muokattu osa, joka tietoisesti esitetään virheellisesti alkuperäisen tai valtuutetun valmistajan määritellyn aitona osana.” Näissä väärennöksissä on usein kyse tahallisesta harhaanjohtamisesta, kuten romutettujen osien myymisestä uusina tai osien käyttöikämerkintöjen väärentämisestä. Tämä luo toimijoiden välille luottamuspulaa ja kasvattaa lentämiseen liittyviä riskejä.

Hyväksymättömien osien ongelma ei rajoitu vain ulkoisten toimijoiden markkinoille tuomiin varastettuihin tai kierrätettyihin osiin, vaan koskee se myös laillisia valmistajia, sillä näiden alihankkijat ovat joissain tapauksissa valmistaneet osia luvatta ja myyneet ne aitoina (Efthymiou, ym. 2022). Erityisen riskin nämä hyväksymättömät osat luovat silloin kun ne pääsevät kriittisiin järjestelmiin, kuten moottoreihin tai laskutelineisiin. Näissä tilanteissa puhutaan keskeisen vikapisteen (single point of failure) osista, jotka ovat yleensä myös elinikärajoitettuja osia (Life Limited Part), kuten laskutelineet (Kotha 2022). Tällaisen osan selvittäessä tai hajotessa on koneet maattava välittömästi ja osat vaihdettava.

3 Lohkoketjuteknologia

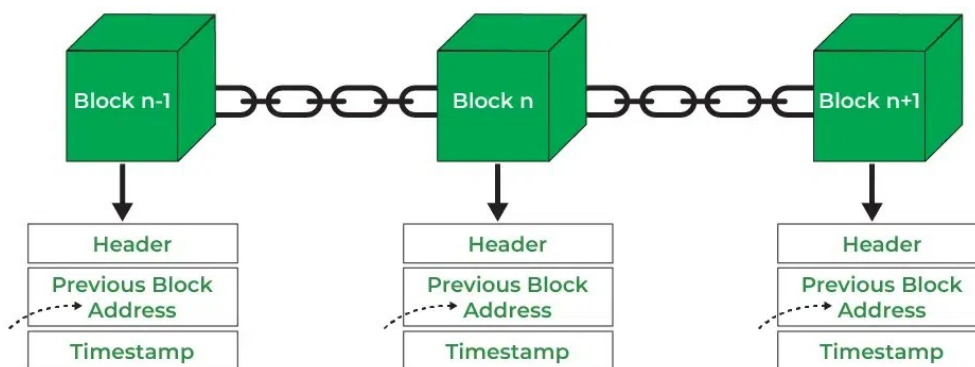
Lohkoketju on digitaalinen hajautettu ja muuttumaton tietokanta, joka mahdollistaa erilaisten transaktioiden kirjaamisen ja seurannan yhdestä muuttumattomasta lähteestä (Susnjara ja Smalley (n.d)). Tämän lisäksi lohkoketjuteknologia sisältää vielä monia erilaisia ominaisuuksia kuten älysovimukset ja epäsymmetrinen salaus varmistaen, että tiedon oikeellisuus pysyy varmistettavana ja ulkopuoliset eivät pääse siihen käsiksi luvatta (Dutta, ym. 2020). Ensimmäinen merkittävä käyttökohte lohkoketjuteknologialle oli kryptovaluutta Bitcoin, jonka tarkoitus oli luoda vertaisverkkoon perustuva digitaalinen valuutta (Susnjara ja Smalley (n.d)).

Lohkoketjut voidaan luokitella niiden käyttöoikeuksien ja hallintomallin perusteella yleisesti kolmen tyyppiin julkisiin, yksityisiin ja konsortiolohkoketjuihin (Li, ym. 2021). Julkiset lohkoketjut toimivat hyvin kryptovaluutoille kuten Bitcoin, sillä ne mahdollistavat kenen tahansa liittymisen osaksi verkkoa ja osallistua transaktioiden vahvistamiseen. Tällainen julkinen verkko on samalla luvaton (permissionless), eli se ei vaadi käyttäjiltään lupaa tai kutsua osallistumiseen (Susnjara ja Smalley (n.d)). Ilmailuteollisuudessa ja toimitusketjujen kanssa on yleisempää käyttää yksityisiä tai luvallisia (permissioned) verkkoja, jolloin osallistujat ovat tunnistettuja ja pääsy on rajattu vain valtuutetuille toimijoille arkaluontoisen tiedon suojaamiseksi (Susnjara ja Smalley (n.d)).

3.1 Lohkoketjuteknologian toiminta

Lohkoketjuteknologia koostuu nimensä mukaisesti tietolohkoista, näihin lohkiin tallennetaan tiedot tapahtuneista muutoksista. Tämän lisäksi lohkoketjuihin tallennetaan se aika, milloin tämä tapahtuma on liitetty osaksi lohkoketjua ja viittaus edellisestä lohkoista (Susnjara ja Smalley (n.d)). Koska jokaisesta lohkoista löytyy viittaus edelliseen lohkoon, vaatisi minkä tahansa lohkon muuttaminen kaikkien seuraavien lohkojen uudelleen laskennan, mikä on mahdotonta ilman verkoston enemmistön

suostumusta (Dutta, ym. 2020). Näin saadaan luotua tarkka kronologinen lohkojen ketju, jota on käytännössä mahdotonta jälkikäteen luvottomasti muokata. Tätä rakennetta mallinnetaan taulukossa Kuvio 1.



Kuvio 1. Yksinkertainen esitys lohkoketjujen toiminnasta. (Geeksforgeeks 2025)

Järjestelmän toiminta perustuu vertaisverkkoon, jonka sisältämät solmukohtat ylläpitävät identtisiä kopioita tilikirjasta (Ho, ym. 2021). Näitä solmuja voidaan lisätä tietokantaan yleensä konsensusmekanismeilla kuten proof of work tai proof of stake menetelmällä. Näiden uusien solmujen eli transaktioiden lisääminen nimensä mukaan vaatii verkkoon osallistujilta yhteisymmärrystä, tässä apuna toimivat nämä eri konsensusmekanismit (Li, ym. 2021). Kun uusi solmu luodaan, tulee siitä kopio kaikkien mukana olevien koneiden luomaan verkkoon.

3.2 Lohkoketjutyypit

Lohkoketjuteknologia voidaan rakenteensa ja pääsynhallintansa mukaan luokitella eri tyypeihin. Kirjallisuudessa nämä jaetaan tyypillisesti julkisiin (public), yksityisiin (private) ja konsortiolohkoketjuihin (consortium), joita määrittelee lisäksi se, ovatko ne luvallisia (permissioned) vai luvattomia (permissionless) (Susnjara ja Smalley (n.d)). Lohkoketjutyypin valinta on tärkeää, sillä se määrittää järjestelmän skaalautuvuuden, tietosuojan tason ja hallintomallin (Romano, ym. 2024). Seuraavissa kappaleissa on esitelty nämä tarkemmin.

3.2.1 Julkiset luvattomat lohkoketjut

Julkiset lohkoketjut ovat tunnettuja kryptovaluutoista kuten Bitcoin, nämä ovat täysin avoimia ja hajautettuja verkkoja. Kuka tahansa voi liittyä verkkoon, lukea sen sisältämää dataa, lähettää transaktioita ja osallistua niiden hyväksyntään eli konsensusprosessiin täyden nimettömyyden suojassa (Li, ym. 2021). Koska verkossa ei ole keskitettyä hallintoa eikä osallistujien identiteettejä tunneta, järjestelmän turvallisuus perustuu usein laskentatehoa vaativiin konsensusalgoritmeihin, kuten työtodisteeseen (Proof of Work) (Ho, ym. 2021). Vaikka tällä voidaan taata korkean muuttumattomuus, sen avoimuus, alhainen transaktionopeus ja suuri energiankulutus tekevät siitä pääosin soveltumattoman toimitusketjujen ja teollisuuden tarpeisiin.

3.2.2 Yksityiset ja luvalliset lohkoketjut

Yksityiset lohkoketjut toimivat päinvastaisella periaatteella. Verkkoon pääsyä ja osallistumisoikeutta pystytään säätelemään tiukasti. Luvallisissa (permissioned) verkoissa jokaisen osallistujan identiteetti on tunnettu ja järjestelmän ylläpitäjä tai valtuutettu taho päättää, kuka saa lukea tietoja tai osallistua transaktioiden hyväksyntään (Susnjara ja Smalley (n.d)). Koska solmut ovat tunnettuja ja luotettuja organisaatioita, yksityiset lohkoketjut voivat hyödyntää kevyempiä ja nopeampia konsensusmekanismeja, mikä parantaa järjestelmän skaalautuvuutta ja transaktionopeutta merkittävästi.

3.2.3 Konsortiolohkoketjut

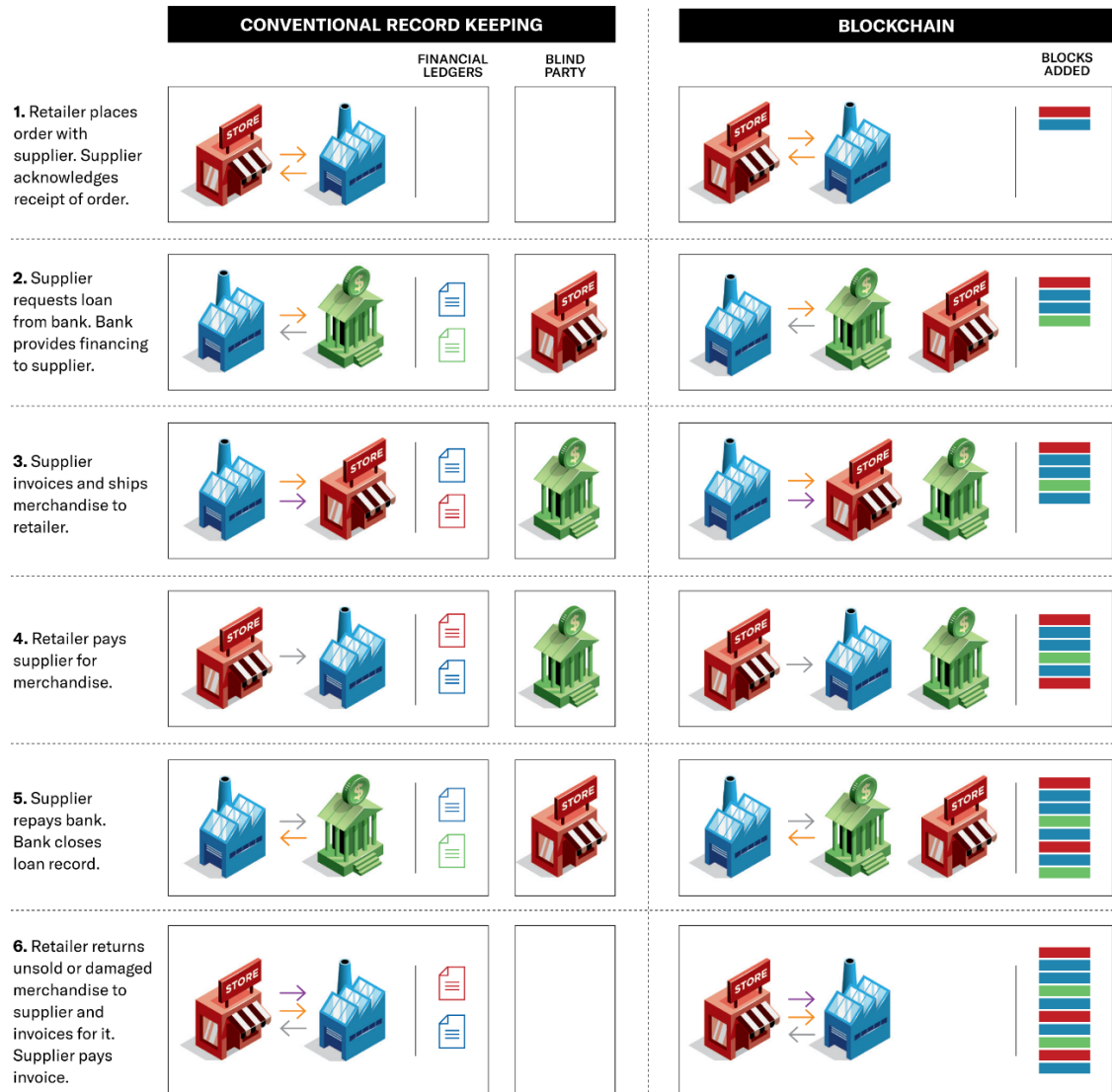
Konsortiolohkoketjut yhdistävät julkisten ja yksityisten verkkojen ominaisuuksia. Näissä hallintavastuu ei ole yhdellä keskitetyllä toimijalla, vaan se on jaettu ennalta valitun organisaatioiden ryhmän, eli konsortion, kesken (SAP 2024). Tämä malli on toimintatavoiltaan parhaiten soveltuva toimitusketjuissa, joissa useiden eri osapuolten on tehtävä yhteistyötä jaetuina vastuina (Susnjara ja Smalley (n.d)). Esimerkiksi

ilmailualalla konsortio voi koostua viranomaisista, osien alkuperäisvalmistajista ja lentoyhtiöistä, jotka yhdessä ylläpitävät verkkoa ja hyväksyvät transaktioita.

3.3 Lohkoketjuteknologian jäljitettävyys ja läpinäkyvyys

Logistiikassa ja toimitusketjun hallinnassa lohkaketjuteknologia tarjoaa ratkaisun perinteisten keskitettyjen järjestelmien ongelmiin, kuten tiedon siiloutumiseen ja läpinäkyvyyden puutteeseen. Teknologia mahdollistaa tuotteiden ja komponenttien aukottoman jäljitettävyyden koko niiden elinkaaren ajan aina raaka-aineista loppukäyttäjälle ja uudelleen käyttäjille (Susnjara ja Smalley (n.d)).

Koska lohkaketju tilikirjat ovat kaikille osapuolille jaetut, pysyvät tiedot ajan tasalla, vähentäen tiedon epäsymmetriaa ja eliminoi tarpeen aikaa vieville manuaalisille täsmäytyksille eri organisaatioiden välillä (Ho, ym. 2021). Kuvio 2. Havainnollistaa tätä yritysten välistä tiedon siirtoa, verraten perinteisen ja lohkaketjulla toteutetun tiedonsiirron välistä eroa. Perinteisessä mallissa toimitusketjuun syntyy sokeita osapuolia tarkoittaen, että ne eivät saa tietoa muiden yritysten käymistä tiedonvaihoista. Lohkoketjussa jokainen tapahtuma lisätään yhteiseen, kaikkien osapuolten näkemään tilikirjaan, jolloin kaikki ovat tietoisia tapahtumista. Ilmailualalla tämä tarkoittaisi sitä, että osatoimittajan ja huolto-organisaation väliset tiedot eivät välittyisi itse lentoyhtiölle.



Kuvio 2. Yksinkertaisen transaktion tietojen tallentaminen: Perinteiset vs. lohkoketjujärjestelmät. (Gaur ja Gaiha 2020)

Tämän lisäksi lohkoketju voidaan yhdistää teollisuus 4.0 tuomiin esineiden internetin, jolloin saadaan käyttöön muun muassa RFID-tunnisteet ja digitaaliset kaksoet. RFID-tunnisteiden avulla tiedonkeruu voidaan automatisoida ja osalle voidaan luoda digitaalinen kaksonen, joka päivittyy reaaliajassa esineen liikkeiden mukana (Ho, ym. 2021). Tämä parantaa merkittävästi toimitusketjun läpinäkyvyyttä, auttaa torjumaan väärennettyjä osia ja tehostaa varastonhallintaa.

3.4 Älysopimukset

Älysopimukset ovat yksi lohkoketjuteknologian tärkeimpiä sovellusalueita, joilla lohkoketjut muutetaan pelkistä tietovarastoista osaksi autonomiaa. Ne ovat lohkoketjuun sisällytettyjä, itsetoteutuvia ohjelmia, jotka valvovat ja toimeenpaneavat sopimusehtoja automaattisesti, kun ennalta määritellyt kriteerit täyttyvät (Susnjara ja Smalley (n.d)).

Käytännössä nämä älysopimukset toimivat ”Jos tämä niin tuo” logiikalla. Esimerkiksi sopimukseen voidaan kirjata, että kun yritykselle saapuva paketti on kuitattu vastaan otetuksi ja tarkistetuksi niin tililtä siirretään summa automaattisesti lähettäjän tilille. Tämä mahdollistaa manuaali- ja valvontavapaan tapahtumaketjun. Älysopimusten käytön ja välikäsien vähentymisen ansiosta voidaan havaita useita parannuksen kohteita lohkoketjuissa kuten, kasvanut vastekyky, läpimenoaikojen lasku ja transaktiokustannusten pieneneminen (Ibrahim ja Fernando, Blockchain Technology to Improve AerospaceSupply Chains 2023). Ilmailualalla älysopimuksien on havaittu pystyvän tehostamaan esimerkiksi lentokoneiden ja niiden osien huoltotöitä, sillä nämä ovat käytännössä täysin sopimus pohjaisia, jolloin älysopimuksilla saataisiin tätä prosessia automatisoitua (Efthymiou, ym. 2022).

3.5 Rajoitteet

Kirjallisuutta tarkastellessa voidaan tunnistaa muutamia toistuvia rajoitteita lohkoketjuteknologian hyödyntämisestä. Nämä rajoitteet voidaan jakaa taloudellisiin, teknologisiin, sääntelyllisiin sekä datan laatuun liittyviin. Seuraavaksi näistä neljästä rajoitteesta hieman tarkemmin.

3.5.1 Taloudelliset haasteet

Yksi merkittävimmistä käyttöönoton esteistä on teknologian vaatima korkea alkuinvestointi. Lohkoketjujärjestelmien käyttöönotto edellyttää huomattavia resursseja ohjelmistojen sekä laitteiston rakentamiseen ja ylläpitoon (Li, ym. 2021). Tämä kustannustaakka muodostuu erityiseksi esteeksi pienemmille toimijoille, joille liittyminen alan laajuisiin lohkaketjuverkostoihin voi olla taloudellisesti ylivoimaista (Efthymiou, ym. 2022).

3.5.2 Teknologiset haasteet

Skaalautuvuus on iso ongelma lohkoketjuteknologioiden kanssa, sillä jotta hajautettavuus ja turvallisuus saadaan ylläpidettyä, pitää jokainen tapahtuma käsitellä kaikissa solmukohtissa (Li, ym. 2021). Kun datan määrä kasvaa hidastuu verkko samaan aikaan. Tämä luo haasteita verrattuna perinteisiin maksujärjestelmiin, jotka on suunniteltu hallitsemaan suurempia datamääriä. Tehokkuuden ylläpitämiseksi voisi tietoa säilyttää lohkoketjun ulkopuolella, mutta tällöin se myös on alttiina häviämislle ja muuttumiselle, joka rikkoo kanssa lohkoketjuteknologian alkuperäistä käyttötarkoitusta.

3.5.3 Sääntelyn haasteet

Ilmailuala on valtavan säänneltyä, jolloin vielä kohtuullisen tuore lohkoketjuteknologia ilman vakiinnutettuja globaaleja standardeja ja lainsäädäntöä luo haasteen sen käytettävyyteen (Li, ym. 2021). Kansallisten ilmailuviranomaisten, kuten FAA:n ja EASA:n asettamien yhtenäisten globaalien standardien puute ei houkuttele yrityksiä ottamaan riskiä ja siirtymään uudenlaiseen järjestelmään (Efthymiou, ym. 2022). Myös säädösten sekä tietosuoja-asetusten ja lohkoketjun peruuttamattoman luonteen välinen ristiriita luo juridista epävarmuutta koko toimialaan (Ibrahim ja Fernando, Blockchain Technology to Improve Aerospace Supply Chains 2023).

3.5.4 Datan laadun haasteet

Älysovimusten ongelma on lohkoketjujen eristetty järjestelmä. Jotta voidaan luoda sopimuksia mitkä toteutuvat joidenkin ulkoisten signaalien avulla tarvitaan oraakkeleita, eli datasyötteitä. Nämä ovat monesti erilaisia IOT laitteita, joka luo mahdollisuuden virheelliseen datasyötteeseen mikä puolestaan voi aktivoida peruuttamattoman toimenpiteen älysovimuksen toimesta (Gaur ja Gaiha 2020). Tämä rikkoo lohkoketjuteknologian perusidea tuomalla riippuvuutta kolmansien osapuolien luotettavuuteen.

4 Lohkoketjuteknologian hyödyntäminen ilmailuteollisuudessa

Tässä luvussa siirrytään teknologian teoreettisista perusteista sen käytännön sovellutuksiin. Vaikka lohkaketjuteknologian laajempi soveltaminen on alalla vielä vähäistä, niin tarkasteltu aineisto tunnistaa sille silti useita käyttökohteita.

Seuraavissa alaluvuissa esitellään kirjallisuuskatsauksen tuloksia neljältä eri ilmailuteollisuuden osa-alueella ja miten näissä voidaan lohkaketjuteknologiaa käyttää pääsemään yli keskeisimmistä haasteista. Tarkastelu on jaettu loogisiin kokonaisuuksiin, jotka kattavat komponenttien elinkaarihallinnan, huoltohistorian luotettavuuden parantamisen, väärennösten torjunnan läpinäkyvän toimitusketjun avulla sekä sidosryhmien välisen tietojen jakamisen ja yhteistyön.

4.1 Komponenttien elinkaarenhallinta

Kuten aikaisemmin todettu, ilmailuteollisuudessa on tarkat vaatimukset komponenttien historiatietojen säilytettävyyteen koko niiden elinkaaren ajalta (Efthymiou, ym. 2022). Lohkoketjuteknologia tarjoaa tähän useita ratkaisuja, kuten muuttumattomasta rakenteestaan, johtuvan datan säilyvyyden. Seuraavaksi on esitelty muutama merkittävä lohkaketjuteknologian ja sen lisäsovellusten tuomaa ratkaisua komponenttien elinkaarihallintaan.

4.1.1 Sähköiset tunnistet

Tutkimukset korostavat osien seurannan muuttamisen perinteisestä manuaalisesta kirjauksesta, digitaalisia radiotaajuisia etätunnisteita (RFID) ja esineiden internetin (IoT) sensoreita hyödyntävään seurantaan (Ho, ym. 2021). RFID tunnistet voitaisiin kiinnittää fyysisiin osiin, jolloin niiden tietoja voidaan seurata ja lukea eri elinkaaren vaiheissa. Kun sähköiset tunnistet ovat osa lohkaketjuja ne tarjoavat turvallisen ja suoraviivaisen tavan

kerätä tietoa osasta, joka samalla minimoi inhimillisiä virheitä ja takaa tiedon läpinäkyvyyden (Ibrahim;Fernando ja Shaharudin, ym. 2024). Esimerkiksi IoT- sensorit voivat kerätä automaattisesti tietoa kuljetuksessa olevan osan ympäristöstä, jolloin voidaan havaita ja tallentaa mahdolliset poikkeamat lohkoketjuun myöhempää tarkastelua varten.

4.1.2 Digitaaliset kaksoset

Fyysisiä osia voidaan yhdistää myös niille tehtyihin digitaalisiin vastikkeisiin, kuten digitaalisiin kaksosiin (Ho, ym. 2021). Digitaaliset kaksoset päivittyvät reaaliajassa, minkä ansiosta tiedot alkuperäisen osan tiedoista kuten omistajuus, huoltohistoria ja kunto päivittyvät reaaliajassa vastaten fyysisen osan tilaa. Kun digitaalinen kaksonen integroidaan lohkoketjuteknologiaan, saadaan aikaiseksi kryptografisesti suojattu virtuaalinen vastine fyysiselle osalle (Ho, ym. 2021).

Reaaliaikainen tieto on tärkeää erityisesti elinikärajoitettujen osien kohdalla, sillä niiden tarkat tiedot on kyettävä tunnistamaan jatkuvasti (EASA 2025). Kun elinkaaritiedot ovat saatavilla muuttumattomassa lohkoketjussa, pystytään välttämään mahdollisia ennenaikaisia osien hylkäämisiä tai ylikäytön aiheuttamia vaaratilanteita.

4.1.3 Älysopimukset

Komponentin elinkaaren hallinnassa älysopimukset liittävät yllä mainitut sähköiset tunnisteet ja digitaaliset kaksoset osaksi kokonaisvaltaista hallintaa. Kun esimerkiksi mekaanikon skannaama RFID-tunniste tai IoT-sensori vahvistaa, että tietty huoltotoimenpide on suoritettu asianmukaisesti, älysopimus voi automaattisesti päivittää osan lentokelpoisuustodistuksen lohkoketjuun, vapauttaa huoltolaskun maksuun ja siirtää osan omistajuuden takaisin lentoyhtiölle (Gaur ja Gaiha 2020). Tämä

vähentää merkittävästi manuaalista työn määrää ja ehkäisee inhimillisiä virheitä virtaviivaistaen koko toimitusketjun läpimenoaikoja (Ho, ym. 2021).

4.2 Huoltohistorian luotettavuuden parantaminen

Huoltohistorian tallentaminen liittyy vahvasti yleiseen komponenttien elinkaarihallintaan. Lähteet painottavat, että nykyisillään järjestelmä on erittäin haavoittuvainen tiedon muuttumiseen, sillä suurin osa nykyisestä järjestelmästä on paperipohjaista (Efthymiou, ym. 2022). Lohkoketjuteknologialla pystyttäisiin korvaamaan tämä haavoittuva rakenne, korvaamalla se hajautetulla ja kryptografisesti salatulla tietokannalla, joka olisi varmempi tuhoutumista ja peukalointia vastaan (Efthymiou, ym. 2022).

Tallentamalla huoltotoimenpiteet ja tarkastukset lohkaketjuun voisivat organisaatiot taata tiedon varman eheyden, mikä puolestaan nostaisi yleistä luottamusta toimialalla. Tämän lisäksi voitaisiin rutiininomaisten tarkastuksien ja huoltojen hyväksymiset automatisoida älysovimuksilla, jolloin nopeutuisi sopimusten käytäntöönpano ja ne eivät pääsisi unohtumaan.

4.3 Väärennösten torjunta läpinäkyvän toimitusketjun avulla

Yksi vakavimmista turvallisuushista ilmailualalla on väärennettyjen ja hyväksymättömien osien pääsy toimitusketjuihin (Rusu, ym. 2022). Tämänkaltaisten osien käytöllä voi olla katastrofaalisia seurauksia. Koska lohkaketjun historia on käytännössä muuttumaton, tarjoaa se suoja väärennettyjen osien syöttämiseltä toimitusketjuihin. Väärennetyiltä osilta puuttuu verkon solmujen vahvistama aikaleimattu historia, jolloin ne pystytään havaitsemaan aitojen joukosta (Li, ym. 2021). Käyttämällä yksityistä lohkaketjuverkkoa voidaan lisäksi varmistaa, että vain valtuutetut

toimijat pääsevät osallistumaan osien kirjaukseen, jolloin hyväksymättömät ulkopuoliset toimijat jäävät järjestelmän ulkopuolelle (Susnjara ja Smalley (n.d)).

Lohkoketjuteknologiaa voidaan tukea liittämällä osiin RFID-tunnisteita ja IoT-laitteita, jolloin osien fyysisestä liikkeestä jää järjestelmään tarkka ja reaaliaikainen seurantatieto (Koutromanos 2025). Näiden teknologioiden yhdistelmällä kyetään varmistamaan toimitusketjun eheys ja todentamaan, ettei osien alkuperäketju ole katkennut missään vaiheessa.

4.4 Tietojen jakaminen ja yhteistyö

Ilmailun toimitusketjut ovat monitahoiset kuten (Romano, ym. 2024) ovat todenneet. Siihen kuuluu myyjiä, palveluntarjoajia ja asiakkaita. Myyjiä ovat kaikki osavalmistajat ja heidän alihankkijansa, palveluntarjoajia ovat muun muassa huoltoyritykset ja asiakkaita lentoyhtiöt. Näillä kaikilla toimijoilla on erillisiä toiminnanohjausjärjestelmiä (ERP), jotka aiheuttavat tiedon hajautumista ja siiloutumista (Gaur ja Gaiha 2020).

Lohkoketjut tarjoavat ratkaisun tähän tiedon epäsymmetriaan, tarjoamalla osapuolten välisen jaetun vertaisverkon, joka toimii osapuolten välisenä yhden totuuden lähteen (single source of truth) (Koutromanos 2025). Lohkoketjuteknologia mahdollistaa välittömän ja turvallisen tiedonjaon, mikä puolestaan lisää luottamusta toimijoiden välillä (Ahmad, ym. 2021). Lisäksi tässäkin yhteistyön lisääjänä voidaan hyödyntää älysovimuksia, joilla pystyttäisiin parantamaan toimijoiden välistä tehokkuutta ja nopeutta vähentämällä ylimääräisiä hallinnollisia ja manuaalisia vaiheita (Efthymiou, ym. 2022). Käyttämällä älysovimuksia molemmat osapuolet pystyvät tietämään tarkkaan missä vaiheessa mitäkin tapahtuu.

Zhangin (2024) tutkimuksessa on tutkittu AC Airlinesin tapausta, jossa he adoptoivat lohkoketjuteknologian osaksi toimitusketjujen hallintaansa. Tapauksesta voidaan huomata, että tiedon parantaminen materiaalien sijainnista ja laadusta vaikutti

positiivisesti yrityksen kykyyn laskea varaston keskimääräistä hintaa jopa 40 prosenttia. Myös hätätilanteisiin reagointiaika lyheni 72 tunnista 24 tuntiin, ja toimitusketjun häiriöistä aiheutuneet vuosittaiset kustannukset putosivat 75 prosenttia. Lohkoketjuteknologian käyttöönoton tuomat hyödyt ja säästöt AC Airlinesin toimitusketjussa on koottu vertailevaan yhteenvetoon Taulukko 2. Vertaileva analyysi AC Airlinesin toimitusketjun hallinnasta ennen lohkoketjuteknologian käyttöönottoa ja sen jälkeen. Mukailleen Taulukko 2.

Taulukko 2. Vertaileva analyysi AC Airlinesin toimitusketjun hallinnasta ennen lohkoketjuteknologian käyttöönottoa ja sen jälkeen. Mukailleen (Zhang 2024)

Mittarit	Ennen käyttöönottoa	Käyttöönoton jälkeen	Muutos
Materiaalien hankintasykli	45 päivää	30 päivää	Lyheni 33 %
Keskimääräinen varaston hinta	5 miljoonaa kuukaudessa	3 miljoonaa kuukaudessa	Pieneni 40 %
Toimitusketjun läpinäkyvyys	Heikko (manuaalinen tiedonkäsittely, seurantavaikeuksia)	Hyvä (reaaliaikainen tiedonjako, muuttumattomat tietueet)	Parani merkittävästi
Hätätilanteiden reagointiaika	72 tuntia	24 tuntia	Lyheni 66 %
Toimitusketjun häiriöiden vuosikustannus	20 miljoonaa	5 miljoonaa	Pieneni 75 %

Kuten tutkimuksesta voidaan huomata, lohkoketjuteknologian käyttöön ottaminen auttoi AC Airlinesiä saavuttamaan tehokkaamman toiminnan tason ja paremman reagointikyvyn, sillä kaikilla osapuolilla oli saatavilla reaaliaikaista tietoa varaston tilanteesta. Tämä osoittaa hyvin, että jaettuun tilikirjaan perustuva malli vahvistaa koko toimitusketjun toimintavarmuutta ja tuottaa taloudellista lisäarvoa.

5 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa selvitettiin systemaattisen kirjallisuuskatsauksen avulla, kuinka lohkoketjuteknologia voi hyödyttää ilmailualan läpinäkyvyyttä ja jäljitettävyyttä. Tutkimuksessa havaittiin alalla vallitseva suuri kiinnostus teknologiaa kohtaan sekä tunnistettiin sille useita potentiaalisia käyttötarkoituksia, kuten komponenttien elinkaaren hallinta ja väärennösten torjunta. Merkittävimmäksi esteeksi lohkoketjuteknologioiden laajamittaiselle käyttöönotolle nousivat puuttuvat globaalit standardit ja vakiintuneiden toimintamallien puute. Lisäksi teknologian vaatimat suuret alkuinvestoinnit voivat muodostua kynnyksymykseksi erityisesti pienemmille toimijoille.

5.1 Tutkimuksen arviointi

Tutkimus toteutettiin systemaattisena kirjallisuuskatsauksena, mikä mahdollisti laajan ja kattavan kokonaiskuvan muodostamisen lohkoketjuteknologian nykytilasta ilmailualalla. Menetelmä tuo kuitenkin omat rajoitteensa, sillä yritysten omat sisäiset lohkoketjuratkaisut ovat usein liikesalaisuuksia, eikä niistä ole saatavilla riittävästi julkista akateemista kirjallisuutta.

Lohkoketjujen operatiivinen hyödyntäminen on ilmailualalla vasta varhaisessa vaiheessa, minkä vuoksi pitkän aikavälin empiiristä tutkimustietoa hyödyistä ei ole vielä riittävästi saatavilla. On myös huomioitava, että teknologia kehittyy nopeasti, jolloin nykyiset tekniset haasteet, kuten skaalautuvuusongelmat, saattavat ratketa lähitulevaisuudessa.

5.2 Tulevaisuus ja jatkotutkimukset

Lohkoketjuteknologian laajamittainen käyttöönotto vaatii ennen kaikkea globaalien standardien vakiintumista sekä viranomaisten, kuten EASA ja FAA aktiivista osallistumista

sääntelykehysten päivittämiseen. Jatkotutkimukselle on selkeä tarve, ja tulevaisuudessa tutkimuksissa voisi keskittyä erityisesti jo käytössä olevien lohkoketjuratkaisujen operatiivisen toimivuuden ja kustannustehokkuuden arviointiin.

Tämä tutkielma rajattiin käsittelemään lohkoketjujen hyödyntämistä operatiivisessa sektorissa, kuten osien jäljitettävyydessä, jolloin esimerkiksi matkustajakokemukseen liittyvät sovellukset jäivät tarkastelun ulkopuolelle. Eri käyttöalueiden vertailu ja laajempi tutkimus voisi auttaa tunnistamaan ne osa-alueet, joilla lohkoketjuteknologia tuottaa suurimman lisäarvon ilmailualalle.

6 Lähteet

- Abeyratne, Ruwantissa. 2024. *Aviation Safety Law and Regulation : A Commentary on the Safety Annexes to the Chicago Convention*. Ethics International Press Limited.
<https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=31290030>.
- Ahmad, R. W, K Salah, R Jayaraman, H. R Hasan, I Yaqoob, ja M Omar. 2021. "The role of blockchain technology in aviation industry." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36(3) 4-15. doi:10.1109/MAES.2020.3043152.
- Cao, P, G Duan, J Tu, Q Jiang, X Yang, ja C Li. 2023. "Blockchain-based process quality data sharing platform for aviation suppliers." *IEEE Access*, 11 19007-19023. doi:10.1109/ACCESS.2023.3246984.
- Dutta, Pankaj, Tsan-Ming Choi, Surabhi Somani, ja Richa Butala. 2020. "Blockchain technology in supply chain operations: Applications, challenges and research opportunities." *Transportation research part e: Logistics and transportation review*, 142 102067. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102067>.
- EASA. 2025. "Easy Access Rules for Continuing Airworthiness (Regulation (EU) No 1321/2014)." *EASA*. 10. Syyskuu. Haettu 21. Joulukuuta 2025. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-continuing-airworthiness-regulation-eu-no>.
- Efthymiou, M, K McCarthy, C Markou, ja J. F O'connell. 2022. "An exploratory research on blockchain in aviation: the case of maintenance, repair and overhaul (MRO) organizations." *Sustainability*, 14(5) 2643. <https://doi.org/10.3390/su14052643>.
- FAA. 2024. *AC 120-78B - Electronic Signatures, Electronic Recordkeeping, and Electronic Manuals*. 11. Jouluun. https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/1043396.
- Gaur, V, ja A. Gaiha. 2020. "Building a transparent supply chain." *Harvard Business Review*, 98(3), May–June: 94–103. Haettu 18. December 2025. <https://hbr.org/2020/05/building-a-transparent-supply-chain>.

- Geeksforgeeks. 2025. *Blockchain Structure*. 23. Heinäkuu. Haettu 13. Maaliskuun 2026.
<https://www.geeksforgeeks.org/ethical-hacking/blockchain-structure/>.
- Ho, G.T.S, Ming Yuk Tang, Kun Yat Tsang, Valerie Tang, ja Ka Yin Chau. 2021. "A blockchain-based system to enhance aircraft parts traceability and trackability for inventory management." *Expert Systems with Applications* 179 115101.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115101>.
- Ibrahim, A, ja Y Fernando. 2023. "Blockchain Technology to Improve Aerospace Supply Chains." *Global Business and Management Research* 15.
<https://www.proquest.com/scholarly-journals/blockchain-technology-improve-aerospace-supply/docview/2852024594/se-2>.
- Ibrahim, A, Y Fernando, M. S Shaharudin, Y Ganesan, N. H Ahmad, A Amran, ja K. L Lee. 2024. "Aerospace supply chains using blockchain technology: implications for sustainable development goals." *Foresight* 26 (3) 470-486. doi:10.1108/FS-06-2023-0110.
- Kotha, V. 2022. "Counterfeiting in aviation supply chain, its consequences, and block chain as a potential solution: An awareness and hazard-based analysis." *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology* 13(12) 26-41. https://iaeme.com/Home/article_id/IJARET_13_12_003.
- Koutromanos, Georgios. 2025. "Enhancing Aircraft Parts Traceability in the Aviation Supply Chain through Blockchain Technology: A Grounded Theory Approach." <https://apothesis.eap.gr/archive/item/218230>.
- Li, X, P. L Lai, C. C Yang, ja K. F Yuen. 2021. "Determinants of blockchain adoption in the aviation industry: Empirical evidence from Korea." *Journal of Air Transport Management* 97 102139. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102139>.
- Lopes, D. P, P Rita, ja H. Treiblmaier. 2021. "The impact of blockchain on the aviation industry: Findings from a qualitative study." *Research in Transportation Business & Management* 41 100669. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100669>.
- Romano, M, B. M Cavaleiro Reis, L. F. F. M Santos, ja P Carvalho. 2024. "3D printing and blockchain: aeronautical manufacturing in the digital era." *Production & Manufacturing Research* 12. <https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2368731>.

- Rusu, M, V Soare, S Tonoiu, ja O. Blajina. 2022. "Considerations regarding the risk of using counterfeit products in the aerospace industry." *INCAS Bulletin* 14(4). doi:10.13111/2066-8201.2022.14.4.17.
- SAP. 2024. *Mikä on lohkoketjuteknologia?* Haettu 17. Helmikuun 2026. <https://www.sap.com/finland/products/technology-platform/what-is-blockchain.html>.
- Susnjara, S, ja I Smalley. (n.d). "What is blockchain?" *IBM*. Haettu 28. Marraskuu 2025. <https://www.ibm.com/think/topics/blockchain>.
- Zhang, C. 2024. "Research on Transparency and Optimization of Aviation Materials Supply Chain based on Blockchain." *2024 IEEE 13th International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. IEEE. 334–339. doi:10.1109/CSNT.2024.56.

Liitteet

Liite 1. Tekoälyn käyttö tutkimuksessa

Tutkielmaa tekemisessä on käytetty Googlen:n Gemini 3.1 pro -kielimallia. Tekoälyä on käytetty apuna kirjoittamisessa kielen oikeellisuuden tarkistamisessa. Tämän lisäksi sitä on hyödynnetty englanninkielisten termien tarkistamisessa ja selittämisessä, sekä aineiston oikeinymmärryksen tarkistamisessa. Tiedostan tekoälyn käyttöön liittyvät riskit ja otan täyden vastuun tutkielman sisällöstä ja laadusta.