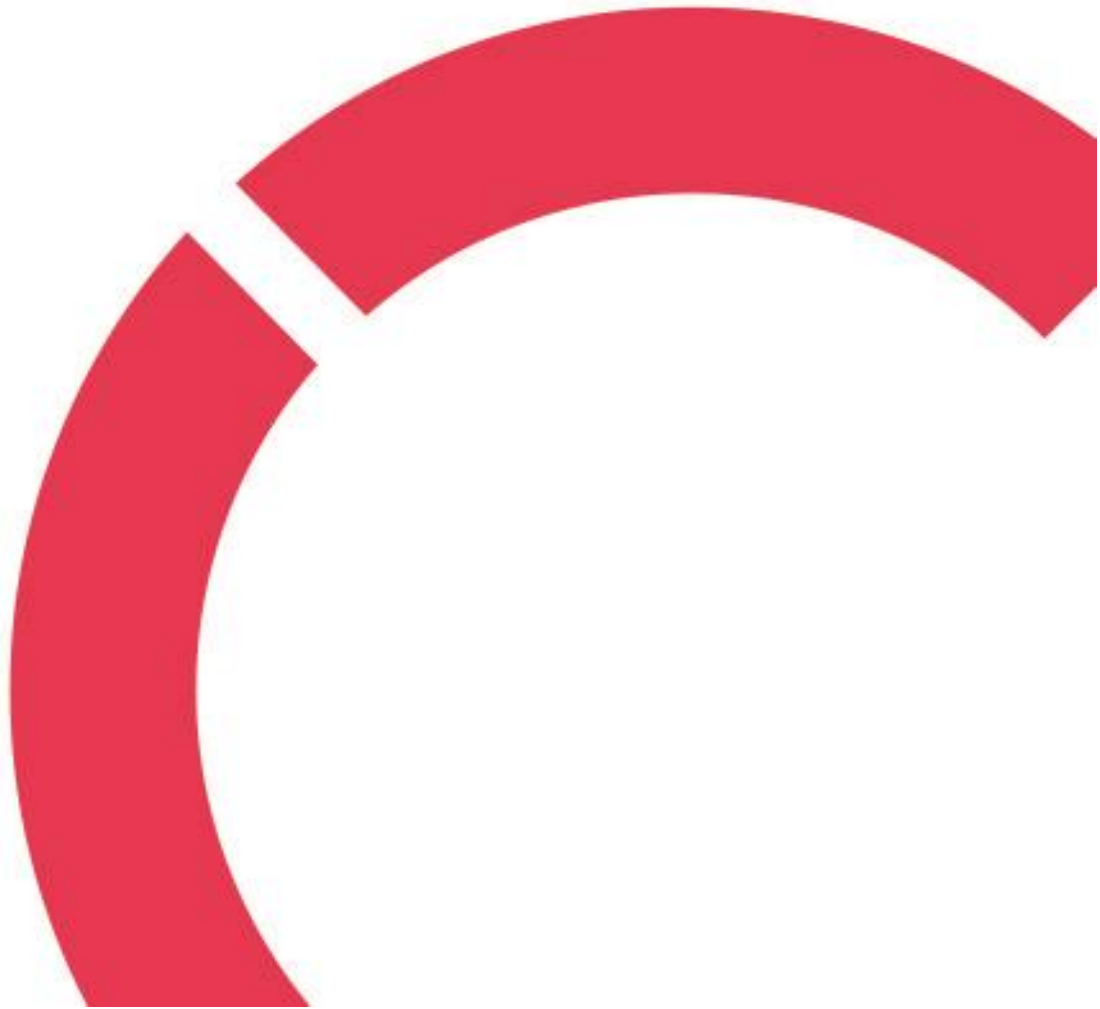


**Henrik Mulari**

**BLOCKCHAIN JA NFT TEOLLISUUDESSA**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Tieto- ja viestintäteknikan koulutus  
Kevät 2025**



## TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Toukokuu 2025	<b>Tekijä/tekijät</b> Henrik Mulari
<b>Koulutus</b> Insinööri (AMK), tieto- ja viestintätekniikka	<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK	
<b>Työn nimi</b> BLOCKCHAIN JA NFT TEOLLISUUDESSA		
<b>Työn ohjaaja</b> Henry Paananen	<b>Sivumäärä</b> 34	
<p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Blockchain- ja NFT-teknologioiden roolia ja vaikutuksia teollisuusverkoissa. Kevennetyn systemaattisen katsauksen avulla selvitettiin, miten teknologiat vaikuttavat tuotantoketjuihin, millä teollisuuden aloilla niitä hyödynnetään, mitä konkreettisia käyttötarkoituksia niillä on ja mitä tulevaisuuden mahdollisuuksia teknologiat tarjoavat erityisesti Industry 5.0:ssa.</p> <p>Tuloksista ilmeni, että Blockchain ja NFT parantavat merkittävästi tietoturvaa, läpinäkyvyyttä, tiedon jäljitettävyyttä ja prosessien automatisointia erityisesti silloin, kun ne yhdistetään muihin Industry 4.0-teknologioihin, kuten IoT ja big data. Vaikka teknologioilla on vielä haasteita, kuten korkea energiankulutus ja integraatiokustannukset, niiden kehitys näyttää lupaavalta.</p>		
<b>Asiasanat</b> Blockchain, Industry 4.0, Industry 5.0, NFT, Smart contract		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> May 2025	<b>Author</b> Henrik Mulari
<b>Degree programme</b> Bachelor of Engineering, Information and Communications Technology		
<b>Name of thesis</b> BLOCKCHAIN AND NFT IN INDUSTRY		
<b>Centria supervisor</b> Henry Paananen	<b>Pages</b> 34	
<p>This thesis explored the role and impact of blockchain and NFT technologies in industrial networks. Through a simplified systematic literature review, the study examined how these technologies influence production chains, in which industrial sectors they are utilized, what practical use cases they offer, and what future opportunities they may provide, particularly in the context of Industry 5.0.</p> <p>The findings indicate that blockchain and NFTs significantly enhance cybersecurity, transparency, traceability of information, and process automation especially when integrated with other Industry 4.0 technologies such as IoT and big data. Although challenges remain, such as high energy consumption and integration costs, the development of these technologies appears promising.</p>		

<p><b>Key words</b> Blockchain, Industry 4.0, Industry 5.0, NFT, Smart contract</p>
---

## **KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**

### **Block (Lohko)**

Lohko sisältää transaktioita sekä viittauksen edelliseen lohkoon. Uudet lohkot liittyvät aikajärjestyksessä osaksi lohkoketjua.

### **CID (Content Identifier)**

CID tarkoittaa sisältötunnistetta, jota käytetään esimerkiksi hajautetuissa tallennusjärjestelmissä, kuten IPFS:ssä. Se on eräänlainen digitaalinen sormenjälki (hash), joka muodostuu tiedoston sisällön perusteella. Jos tiedoston sisältö muuttuu edes hieman, myös sen tunniste muuttuu. CID:n avulla voidaan siis varmistaa tiedoston alkuperä ja onko sitä muutettu.

### **DAG (Directed Acyclic Graph)**

DAG:lla on tapa järjestää tietoa niin, että jokainen osa (eli solmu) on yhdistetty toiseen tietyssä järjestyksessä. Tätä rakennetta käytetään esimerkiksi lohkoketjuteknologiaan liittyvissä järjestelmissä, joissa tapahtumat pitää kirjata selkeässä järjestyksessä.

### **Digital twin (digitaalinen kaksonen)**

Digitaalinen kaksonen tarkoittaa virtuaalista kopiota fyysisistä objekteista, prosesseista tai järjestelmistä. Sen avulla voidaan seurata ja mallintaa, miten oikea versio toimii käytännössä. Oikeaan koneeseen asennetuilla antureilla digitaalinen kaksonen saa niiden kautta reaaliaikaista tietoa ja pysyy ajan tasalla koneen tilasta. Tämän avulla voidaan testata, ennakoida vikoja ja tehdä parempia päätöksiä ilman, että tarvitsee kokeilla asioita suoraan oikeassa laitteessa. Se säästää aikaa, rahaa ja vähentää riskejä.

### **DLT (Distributed Ledger Technology)**

DLT eli hajautettu tilikirjateknikka, on tapa tallentaa tietoa moneen paikkaan samaan aikaan. Sen sijaan, että tieto olisi vain yhdessä keskitetyssä tietokannassa, se on jaettu usealle tietokoneelle (solmuille), jotka pitävät kirjaa samoista tapahtumista. Kun joku lisää uutta tietoa, se päivittyy kaikkialle automaattisesti.

### **ERC-1155**

ERC-1155 on älysopimusstandardi Ethereum-lohkoketjussa, joka mahdollistaa sekä uniikkien (NFT), että vaihdettavien (fungible) tokenien hallinnan yhdessä ja samassa sopimuksessa. Aiemmin tarvittiin erilliset sopimukset erityyppisille tokeneille, mutta ERC-1155 yhdistää ne kätevästi yhteen.

## **ERC-20**

Ethereum-tokenien standardi, jota käytetään vaihdettavien (fungible) tokenien luomiseen. Vaihdettavat tokenit ovat samanarvoisia toistensa kanssa.

## **ERC-721**

NFT-standardi Ethereum-lohkoketjussa. Jokainen token on ainutlaatuinen ja ei-vaihdettava (non-fungible). Ei-vaihdettavat tokenit ovat uniikkeja ja niitä ei voi vaihtaa keskenään.

## **Ether (ETH)**

Ethereumin oma digitaalinen valuutta. Sitä käytetään maksuvälineenä Ethereum-verkossa esimerkiksi silloin, kun halutaan siirtää rahaa, käyttää älysopimuksia tai luoda tokeneita. Etheriä tarvitaan myös maksamaan ns. ”gas fee”, eli verkkomaksu, joka menee niille, jotka käsittelevät ja vahvistavat tapahtumia lohkoketjussa.

## **Ethereum**

Hajautettu ohjelmoitava lohkoketjunalusta, joka tukee älysopimuksia ja NFT:itä. Ethereumin avulla voidaan rakentaa ohjelmia, joita ei hallitse yksittäinen taho.

## **EVM (Ethereum Virtual Machine)**

Ethereumin virtuaalikone, joka suorittaa älysopimuksia.

## **Gas fees**

Ethereumin verkkomaksu, joka maksetaan ETH-valuutassa älysopimusten suorittamisesta tai transaktioista.

## **Genesis block**

Lohkoketjun ensimmäinen lohko.

## **Hash**

Kryptografinen tunniste/digitaalinen sormenjälki, joka yksilöi lohkon tai datan sisällön. Tätä käytetään lohkoketjussa tarkistamaan tiedon aitouden. Jos hash ei täsmää, jotain on muuttunut.

## **Hyperledger**

Yrityskäyttöön suunniteltu lohkoketjualusta. Hyperledgerin tavoitteena on tarjota turvallisia, skaalautuvia ja tehokkaita lohkoketjuratkaisuja esimerkiksi toimitusketjuihin, terveydenhuoltoon tai rahoitukseen.

## **Industry 4.0**

Industry 4.0 tarkoittaa teollisuuden neljättä vallankumousta, jossa perinteiseen tuotantoon tuodaan mukaan digitaalisia teknologioita. Tavoitteena on tehdä teollisuudesta älykkäämpää, tehokkaampaa ja joustavampaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että koneet voivat kommunikoida keskenään internetin kautta (IoT), tuotantoa voidaan ohjata tekoälyn avulla ja järjestelmät voivat tehdä päätöksiä automaattisesti.

## **Industry 5.0**

Industry 5.0 on seuraava askel Industry 4.0:stä. Ihmiskeskeinen lähestymistapa teollisuuteen, jossa korostetaan teknologian ja ihmisten yhteistyötä.

## **IPFS (InterPlanetary File System)**

Hajautettu tiedostojen tallennusjärjestelmä, jota käytetään esim. NFT-sisällön säilyttämiseen. Toisin kuin tavalliset verkkopalvelut, joissa tiedostot tallennetaan yhteen paikkaan esimerkiksi palvelimelle, IPFS hajauttaa sisällön monelle eri koneelle ympäri verkkoa. Tiedostot löytyvät niiden sisällön perusteella, johon käytetään CID-tunnisteita (Content Identifier).

## **Konsensusalgoritmi**

Konsensusalgoritmi on tapa, jolla lohkoketjuverkon osallistujat pääsevät yhteisymmärrykseen siitä, mikä tieto on oikeaa ja voidaan lisätä lohkoketjuun. Koska verkossa ei ole keskitettyä tahoa, tarvitaan sääntöjä, joiden avulla kaikki voivat luottaa siihen, että uudet lohkot ja tapahtumat ovat aitoja ja hyväksytyjä.

## **Merkle-puu**

Merkle-puu on lohkoketjuteknologiassa käytetty tietorakenne, joka mahdollistaa suurten tietomäärien tehokkaan ja turvallisen tarkistamisen. Se rakentuu niin, että yksittäiset tiedot (esimerkiksi tapahtumat)

tiivistetään hash-funktiolla ja yhdistetään pareittain, kunnes lopulta muodostuu yksi ainut hash, jota kutsutaan Merkle-juureksi. Tämän rakenteen ansiosta on mahdollista todentaa, että jokin tieto kuuluu osaksi kokonaisuutta ilman, että koko tietorakennetta tarvitsee tarkistaa.

### **Minting (minttaus)**

Minttaus tarkoittaa digitaalisen omaisuuserän, kuten NFT:n (non-fungible token) tai kryptovaluutan, luomista lohkoketjuun. Kun digitaalinen sisältö mintataan, siitä tehdään pysyvä osa lohkoketjua, eli sille luodaan uniikki tunniste.

### **NFT (Non-Fungible Token)**

NFT eli Ei-vaihdeettava tokeni on uniikki digitaalinen omaisuuserä. NFT:n avulla voidaan todentaa omistajuus ja alkuperä digitaalisessa ympäristössä.

### **Node (solmu)**

Solmu tarkoittaa yksittäistä tietokonetta tai laitetta, joka on osa lohkoketjuverkkoa. Jokainen solmu voi tallentaa kopion koko lohkoketjusta, osallistua uusien lohkojen vahvistamiseen, jakaa tietoa muiden solmujen kanssa.

### **Nonce**

Satunnaisarvo, jota käytetään PoW-konsensusalgoritmissa löytämään validi lohko. PoW-konsensusalgoritmissa louhijat säätävät nonce-arvoa toistuvasti yrittäessään löytää sopivan hashin, joka täyttää verkon ennalta määrittelemät ehdot. Kun sopiva nonce löydetään, lohko voidaan hyväksyä osaksi lohkoketjua.

### **Peer-to-peer**

Vertaisverkko, laitteet (solmut) ovat keskenään suoraan yhteydessä ilman keskitettyä palvelinta. Käyttäjät jakavat resursseja, kuten tiedostoja, laskentatehoa tai verkkoyhteyksiä suoraan toisilleen.

### **PoS (Proof of Stake)**

konsensusmekanismi, jota käytetään lohkoketjuverkoissa vahvistamaan ja lisäämään uusia lohkoja ketjuun ilman tarvetta suurille laskentatehoille.

### **PoW (Proof of Work)**

Lohkoketjujen käyttämä alkuperäinen konsensusmekanismi, jossa verkon solmut ratkaisevat monimutkaisia matemaattisia ongelmia lisätäkseen uusia lohkoja lohkoketjuun.

### **SHA-256**

Kyseinen teknologia on matemaattinen toiminto, joka ottaa mitä tahansa digitaalista tietoa ja luo siitä 256-bittisen hashin. Tätä hashia käytetään todisteena siitä, että tieto on alkuperäistä eikä sitä ole muutettu. Hash toimii kuin digitaalinen sormenjälki, jos sisältö muuttuu vähänkin, myös sormenjälki muuttuu täysin.

### **Smart contract (Älysopimus)**

Älysopimus on ohjelmoitu sopimus, joka toimii lohkoketjussa. Älysopimus suoritetaan automaattisesti ennalta määriteltyjen ehtojen täytyessä. Se korvaa perinteisen välikäden, kuten pankin tai viranomaisen ja varmistaa, että sopimuksen osapuolet noudattavat ehtoja ilman manuaalista valvontaa.

### **Token**

Lohkoketjussa käytettävä digitaalinen arvo- tai omaisuuserä, jota voidaan käyttää monin eri tavoin – esimerkiksi maksuvälineenä tai todistuksena omaisuudesta. Token ei ole sama asia kuin lohkoketjun oma kryptovaluutta, vaan se on yleensä luotu lohkoketjun päälle älysopimuksen avulla. Tokeneita on kahta päätyyppiä, fungible tokens ja non-fungible tokens (NFT:t).

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 MITÄ OVAT BLOCKCHAIN JA NFT</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Blockchain toimintaperiaate</b> .....	<b>2</b>
2.1.1 Lohkoketjun kerrokset .....	3
2.1.2 DLT (Distributed Ledger Technology) .....	4
2.1.3 Lohkoketjun arkkitehtuuri .....	6
2.1.4 Merkle-puu .....	6
2.1.5 Konsensusalgoritmi.....	7
2.1.6 PoW ja PoS .....	7
2.1.7 Smart Contracts .....	8
2.1.8 Blockchain-alustat.....	9
2.1.9 Lohkojen muodostusvaihe.....	9
2.1.10 Kryptovaluutat ja Ethereum.....	9
<b>2.2 Mikä on NFT</b> .....	<b>10</b>
2.2.1 NFT ominaisuudet.....	11
2.2.2 Minting .....	11
2.2.3 Token-standardeja .....	12
2.2.4 IPFS .....	14
<b>2.3 Industry 4.0</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4 Industry 5.0</b> .....	<b>15</b>
<b>2.5 Blockchain ja NFT teollisuudessa</b> .....	<b>15</b>
<b>3 TUTKIMUSKYSYMYKS JA TUTKIMUSMENETELMÄ</b> .....	<b>17</b>
3.1 Tiedonhakustrategia .....	17
3.2 Tutkimuskysymys .....	18
3.3 Tiedonhaku .....	18
<b>4 TUTKIMUSKYSYMYSTEN KÄSITTELY</b> .....	<b>21</b>
4.1 Millä tavoin Blockchain- ja NFT-teknologia ovat vaikuttaneet teollisuusverkkoihin? .....	21
4.2 Millä teollisuuden aloilla Blockchain- ja NFT-teknologiaa käytetään?.....	23
4.3 Mitkä ovat Blockchainin ja NFT:n keskeisimmät käyttötarkoitukset ja hyödyt teollisuusverkoissa? .....	24
4.4 Mitkä ovat Blockchain- ja NFT-teknologian tulevaisuuden näkymät teollisuusverkoissa? .....	27
<b>5 YHTEENVETO LÄHTEISTÄ</b> .....	<b>30</b>
<b>6 POHDINTA</b> .....	<b>32</b>
<b>LÄHTEET</b> .....	<b>34</b>

# 1 JOHDANTO

Blockchain- ja NFT-teknologiat ovat tällä hetkellä kasvavassa roolissa teollisuusverkoissa, joissa niiden käyttö lisääntyy jatkuvasti. Kyseisiä teknologioita on hyödynnetty useammalla muullakin teknologian alalla esimerkiksi NFT-taiteena, joita on myyty OpenSea-nimisellä verkkosivustolla. Tällä hetkellä kyseiset teknologiat yhdessä ovat vielä tietynlaisessa kehitysvaiheessa, ja onkin mielenkiintoista tietää, missä vaiheessa teknologiat ovat tällä hetkellä suhteessa teollisuusverkkoihin.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia Blockchainin ja NFT:n roolia teollisuusverkoissa. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan, millä tavoin Blockchain- ja NFT-teknologiat vaikuttavat teollisuusverkkoihin, millä teollisuuden aloissa niitä hyödynnetään, mitä käyttötarkoituksia ja hyötyjä niillä on sekä millaisia tulevaisuuden mahdollisuuksia näihin teknologioihin liittyy.

Aluksi luon vahvan teoreettiseen pohjan ennen kuin siirryn tutkimuskysymyksiin. Tutkimuskysymyksissä aion selvittää, mikä on nykyinen tilan Blockchainilla ja NFT:llä teollisuusverkoissa. Selvitettyäni teknologioiden tilan teen yhteenvedon vastauksista ja arvioin teknologiat teollisuusverkoissa selvittäen niiden roolin, nykyisen tilan ja sen missä teknologioita käytetään. Lopuksi teen katsauksen teknologioiden tulevaisuuteen teollisuusverkoissa.

Työn tarkoituksena on muodostaa ajankohtainen ja kokonaisvaltainen kuva siitä, kuinka näitä teknologioita voidaan käytännössä hyödyntää teollisissa ympäristöissä ja millaisia vaikutuksia niillä on nyt ja tulevaisuudessa. Teen tutkielman kevennetyllä systemaattisella katsauksella eri lähteisiin, jotka löytyvät Centrian omasta verkkokirjastosta.

## 2 MITÄ OVAT BLOCKCHAIN JA NFT

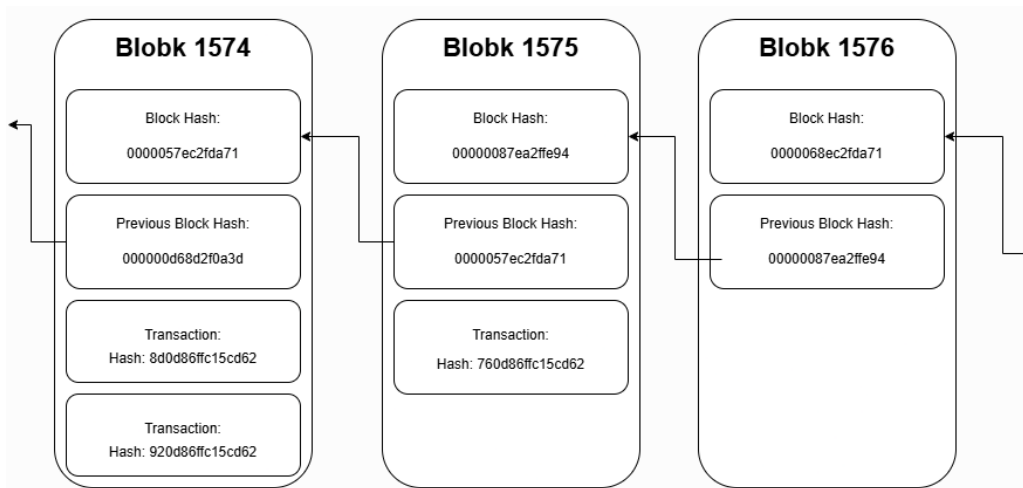
Kautta aikojen ihmisillä on ollut tarvetta saada omat tuotteet ja valuutat suojatuiksi väärinkäytöksiltä. Nykyään muun muassa verkkokauppojen ja verkkopankkien käyttö kasvaa jatkuvasti, joten monimutkaisuus, tehottomuus ja uhat ovat kasvaneet perinteisissä tietoliikennejärjestelmissä. Olikin siis tarve saada teknologioita, jotka olisivat nopeita ja luotettavia, joihin ei sisältyisi ylimääräisiä kustannuksia. (Vadapalli 2020.)

Ethereum, Blockchain-pohjainen alusta, kehitettiin vuonna 2014, ja se toi mukanaan käsitteen älysopimuksista. Nämä itseohjautuvat sopimukset on kirjoitettu koodiin, mikä mahdollistaa niiden automaattisen täytäntöönpanon ilman välikäsiä. Ethereumin myötä kehittäjät saivat mahdollisuuden luoda hajautettuja sovelluksia lohkoketjun päälle ja he loivat Blockchain-tekniikan käyttötarkoituksia perinteisen valuutan ulkopuolelle. (Razi, Devrani, Abhyankar, Chalapathi, Hassija & Guizani 2024.)

Vuonna 2018 tammikuussa Ethereum-lohkoketjuun otettiin käyttöön ERC-721-token-standardi, joka mahdollisti NFT:iden luomisen. Toisin kuin perinteiset kryptovaluutat, NFT:t ovat ainutlaatuisia ja jakamattomia, mikä mahdollisti yksilöllisten digitaalisten varojen, kuten taiteen, musiikin ja muiden mediamuotojen luomisen ja kaupankäynnin. (Razi ym. 2024.)

### 2.1 Blockchain toimintaperiaate

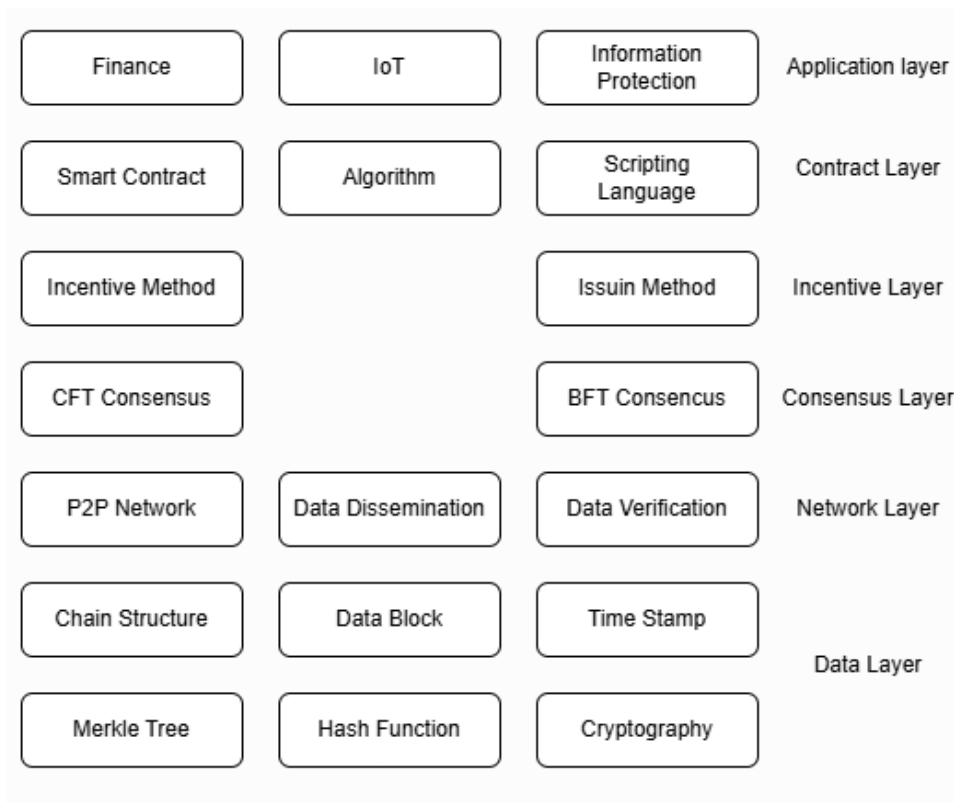
Blockchain eli lohkoketju nimensä mukaan linkittää eri lohkot toisiinsa. Lohkot tallentavat ja vahvistavat tiedon tapahtumien ajasta ja niiden järjestyksestä. Jokainen lohko sisältää hash-koodin, joka on digitaalinen sormenjälki eli yksilöivä tunniste. Hash pitää lohkoissa tiedon siitä, mikä on edellinen lohko, ja myös tiedon siitä, mikä on kyseisen lohkon hash. (Vadapalli 2020.) Jokainen lohko on riippuvainen sisällöstään ja lohkoketjun edellisestä lohkosta, mikä tarkoittaaakin sitä, että lohkot ovat riippuvaisia edellisestä lohkosta aina ensimmäiseen lohkoon asti, jota kutsutaankin genesislohkoksi. (Di Francesco Maesa & Mori 2020.) Jos yksittäisen lohkon tietoja muokataan, koko lohkoketju täytyisi päivittää, sillä jokainen lohko on sidoksissa edelliseen. Tämän ansiosta ja vahvojen algoritmien vuoksi lohkoketjut ovat erittäin turvallisia ja vaikeasti manipuloitavia. (Razi ym. 2024.) Alla oleva kuvio 1 havainnollistaa lohkoketjun toimintaa (KUVIO 1).



KUVIO 1. Blockchainin perustoimintaperiaate (mukaillen Vadapalli 2020).

### 2.1.1 Lohkoketjun kerrokset

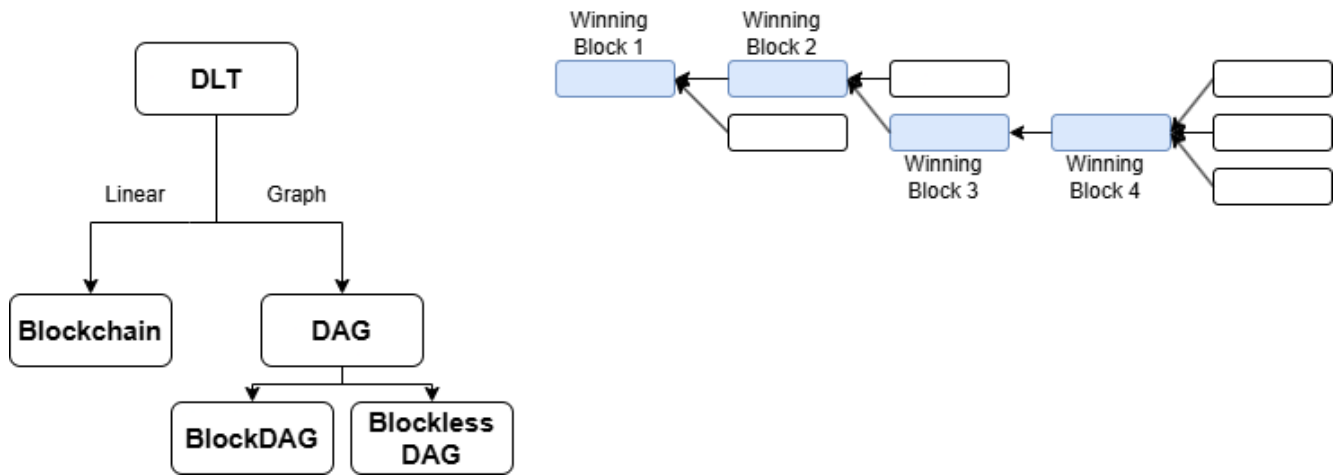
Lohkoketju voidaan jakaa eri kerroksiin. Lohkoketjujen teknologiat toki vaihtelevat käyttötarkoitusten mukaan, mutta ne myötäilevät samaa rakennetta. Ne ovat data-, verkko-, konsensus-, kannustin-, sopimus- ja sovelluskerros. Datakerros muodostuu lohkoista ja tietorakenteista, kuten Merkle-puista. Sen avulla tiedot tallennetaan turvallisesti ja järjestyksessä hyödyntämällä mm. aikaleimoja ja kryptografiaa. Verkkokerros yhdistää kaikki solmut vertaisverkoksi, joka mahdollistaa transaktioiden välityksen ja tietojen varmuuden koko verkossa. Konsensuskerros määrittää solmut, joilla on oikeus kirjata tietoja lohkoketjuun. Se varmistaa tietojen yhtenäisyyden ja turvallisuuden konsensusalgoritmien avulla. Kannustinkerros sisältää palkitsemis- ja rangaistusmekanismeja, jotka motivoivat solmuja ylläpitämään verkon toimintaa ja laskentatehoa. Sopimuskerros koostuu älykkäistä sopimuksista, jotka ovat automaattisesti suoritettavia ohjelmia tiettyjen ehtojen täytyessä. Nämä sopimukset mahdollistavat lohkoketjun mukauttamisen erilaisiin käyttökohteisiin. Sovelluskerros yhdistää edellä mainitut kerrokset käytännön sovelluksiksi. (Xiong, Chen, Wu, Zhao & Yi 2022.) Kuviossa 2 ovat lohkoketjun kerrokset (KUVIO 2).



KUVIO 2. Blockchain kerrokset (mukaillen Hussein, Salama & El-Rahman 2023).

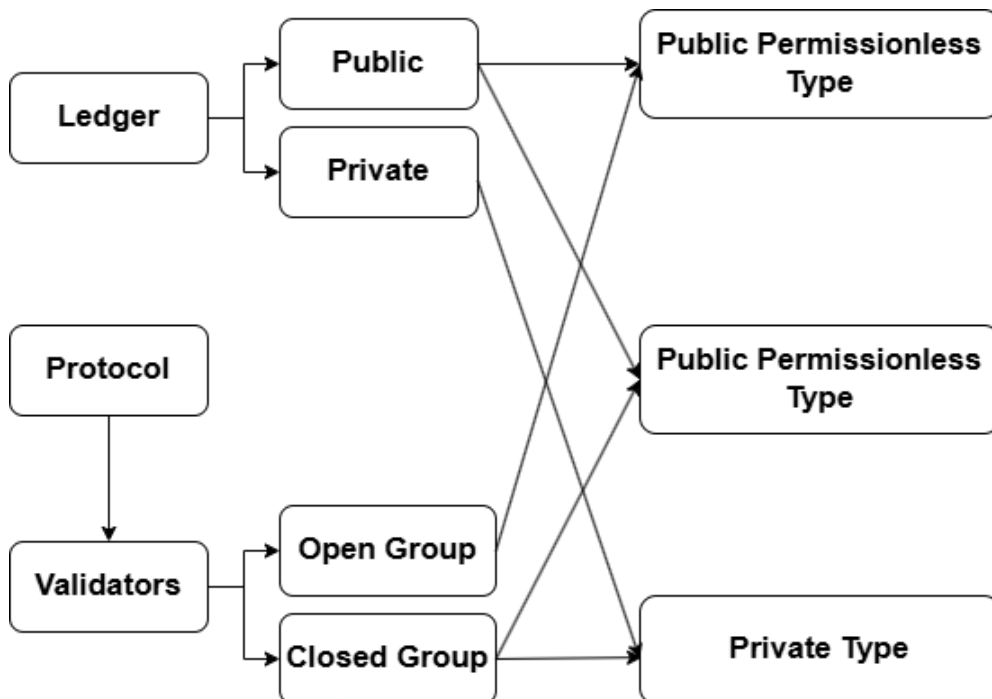
### 2.1.2 DLT (Distributed Ledger Technology)

Lohkoketjuteknologia toimii tietokantarakenteena. DLT tarkoittaa yleisesti hajautettuja tietokantarakenteita. Ne on jaettu useamman lohkon kesken, joita voidaan päivittää konsensusmekanismin avulla. Lineaarinen rakenne lohkoketjuissa auttaa päättämään, mikä ketju on oikea. Oikeaksi lohkoketjuksi valitaan pisin lohkoketju. On myös olemassa DAG-ketjuja, jotka ovat verkkomaisia rakenteita. Niiden suurin eroavaisuus on se, että lohkoketjuissa transaktiot lisätään peräkkäin eli lineaarisesti, kun taas DAG:issa transaktiot voivat tapahtua rinnakkain ja viitata useampiin aikaisempiin transaktioihin. (Ramadoss 2022.) Tässä opinnäytetyössä tutkimme Blockchainia joten DAG-konseptia ei tässä sen tarkemmin käsitellä. Alla oleva kuvio havainnollistaa, miten DLT-teknologia toimii (KUVIO 3).



KUVIO 3. DLT perustoimintaperiaate (mukaiillen Ramadoss 2022).

Lohkoketjuteknologia voi vaihdella käyttötarkoitusten perusteella. Niitä on julkinen ja luvaton (public permissionless), julkinen ja luvallinen (public permissioned) sekä yksityinen (private) tyyppi. Julkinen ja luvaton lohkoketjuteknologia on täysin julkinen, ja kuka tahansa voi liittyä verkkoon sekä osallistua validoijana konsensusmekanismin kautta. Julkinen ja luvallinen lohkoketju näkyy julkisesti, mutta validoijat ovat suljettu ryhmä, jotka valitaan hallinnoivan tahon tai algoritmin perusteella. Yksityinen tyyppi näkyy vain sen jäsenille, ja myös validoijat ovat suljettu ryhmä, jotka valitaan hallinnoivan tahon toimesta. (Ramadoss 2022.) Alla oleva kuvio havainnollista lohkoteknologia kategoriointia (KUVIO 4).



KUVIO 4. Lohkoketjuteknologian kategoriointia (mukaiillen Ramadoss 2022).

### 2.1.3 Lohkoketjun arkkitehtuuri

Lohkoketju muodostuu aikajärjestyksessä ketjutetuista tietolohkoista, joista ensimmäistä kutsutaan alkulohkoksi (genesis block). Jokainen lohko sisältää transaktioita, jotka kuvaavat arvon siirtoa ja ovat vahvistettuja digitaalisella allekirjoituksella (hash). (Xiong ym. 2022.)

Lohko koostuu kahdesta osasta: lohkon otsikosta ja lohkon rungosta. Lohkon otsikko sisältää mm. versionumeron, edellisen lohkon hash-arvon (PrevBlock Hash), Merkle-puun juuren, aikaleiman, vaikeustason nykyiselle lohkolle ja nonce-arvon, joka lasketaan solmun laskentatehon perusteella. Nonce-arvo on satunnaisesti valittu luku, jota eri louhijat yrittävät ratkaista. Lohkon runko sisältää puolestaan transaktioiden määrän sekä itse transaktiot, jotka on varustettu digitaalisilla allekirjoituksilla. (Xiong ym. 2022.)

Solmut (nodes) ovat tietokoneita tai muita laskentalaitteita, jotka tarjoavat laskentatehoa lohkoketjun vertaisverkossa (peer-to-peer). Lohkoketjuverkko koostuu joukosta solmuja, jotka kommunikoivat keskenään käyttäen tiettyä lohkoketjun vertaisverkkoprotokollaa. Näiden solmujen tehtävänä on organisoida ja koordinoita lohkoketjun hajautettua toimintaa. Solmut voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan: Lähetysolmut (broadcast nodes) lähettävät ja vastaanottavat pieniä määriä tietoa verkossa. Täydet solmut (complete nodes) tallentavat koko lohkoketjun historian, varmistavat tietojen oikeellisuuden ja jatkavat transaktiot muille solmuille. Louhintasolmut (mining nodes) sisältävät merkittävän laskentatehon, luovat uusia lohkoja ja levittävät transaktioita verkossa. Näitä solmuja kutsutaan myös louhijoiksi (miners). (Xiong ym. 2022.)

### 2.1.4 Merkle-puu

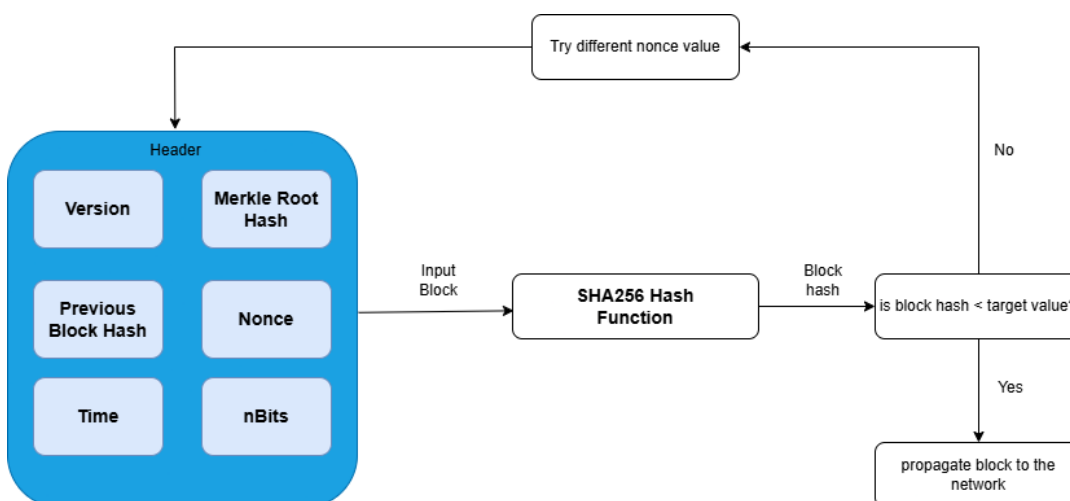
Perusperiaate Merkel-puussa perustuu hash-arvojen järjestämiselle ja niiden yhdistämiselle. Yksittäiset dataelementit saavat oman digitaalisen sormenjäljen (hash) ja ne sijoitetaan binääripuuhun. Jokainen lehtisolmu (leaf node) sisältää yhden dataelementin hash-arvon. Lehtisolmut yhdistetään pareittain siten, että ylemmän tason lehtisolmu sisältää kahden alemman tason lehtisolmun hash-arvot. Tätä prosessia jatketaan niin kauan, kunnes jäljellä on enää root-solmu, jota sisältää kaiken datan, jota puussa on. (Liu, Luo, Liu & Xia 2021.)

## 2.1.5 Konsensusalgoritmi

Konsensusalgoritmi on tapa, jolla lohkoketjuverkon tietokoneet (eli solmut) sopivat yhdessä siitä, mikä tieto on oikeaa ja voidaan tallentaa lohkoketjuun. Sen avulla hajautetun verkon jäsenet, jotka eivät välttämättä tunne toisiaan tai luota toisiinsa, voivat tehdä yhteistyötä luotettavasti. Konsensusalgoritmi varmistaa, että jokainen solmu osallistuu päätöksentekoon tasavertaisesti ja auttaa koko verkkoa saavuttamaan yhteisen ymmärryksen siitä, mitä tietoja hyväksytään osaksi lohkoketjua. (Razi ym. 2024.) Seuraavassa kohdassa käymme kaksi konsensusalgoritmia läpi.

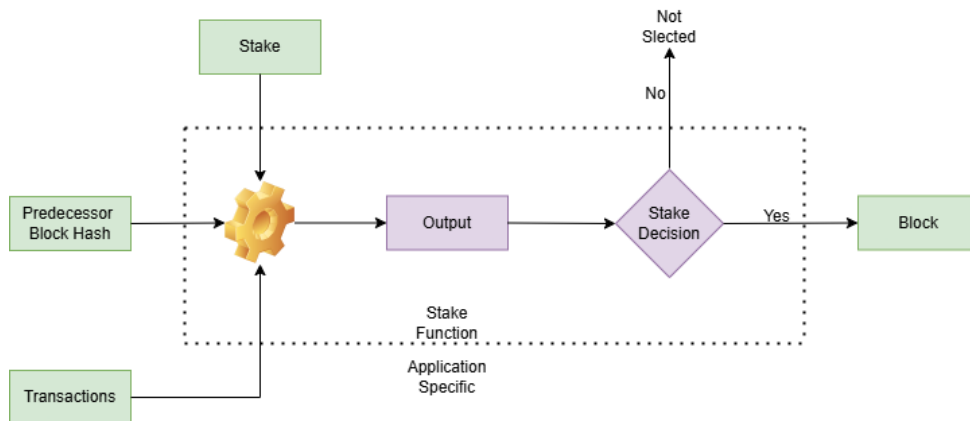
## 2.1.6 PoW ja PoS

Lohkoketjujen louhinta tarkoittaa prosessia, jossa verkon louhijat kilpailevat ratkaistakseen matemaattisia ongelmia. Ensimmäinen onnistunut louhija saa lisätä uuden lohkon ketjuun. Tämä tapahtuu Proof-of-Work (PoW) -konsensusalgoritmin avulla, jossa onnistunut louhija palkitaan kryptovaluuttayksiköillä, kuten Bitcoinilla. Prosessi kuluttaa paljon laskentatehoa, mutta se myös ylläpitää lohkoketjun turvallisuutta ja eheyttä, koska lohkojen tietojen muuttaminen edellyttäisi koko ketjun uudelleenlaskemista mikä on käytännössä lähes mahdotonta. Lohkoja yhdistetään ketjuun kryptografisten hashien avulla. Louhijan on löydettävä niin sanottu nonce (satunnainen arvo), joka tuottaa hyväksyttävän hash-arvon lohkon sisällöstä. Jos tämä ehto täyttyy, lohko hyväksytään ja tallennetaan osaksi ketjua. SHA-256 hash-algoritmia hyödynnetään Bitcoinissa säätämään vaikeustasoa, jota säädetään aina 2 016 lohkon välein, jotta hash-arvon löytäminen pysyy sopivan vaikeana. (Hussein, Salama & El-Rahman 2023.) Alapuolella kuvio louhintaprosessista (KUVIO 5).



KUVIO 5. PoW-louhintaprosessi (mukaillen Hussein, Salama & El-Rahman 2023).

Proof-of-Stake (PoS) on konsensusalgoritmi, jossa lohkojen validointi ei perustu laskentatehoon kuten PoW:ssa vaan siihen, kuinka paljon käyttäjällä on kryptovaluuttaa ”lukittuna” järjestelmään. Tämä tekee siitä huomattavasti ympäristöystävällisemmän ja vähemmän energiaa kuluttavan vaihtoehdon. PoS-järjestelmässä verkon solmut voivat osallistua lohkojen vahvistamiseen asettamalla omia varojaan panokseksi. Verkon algoritmi valitsee validoijan näiden ehdokkaiden joukosta ja valitulle solmulle myönnetään oikeus vahvistaa lohko sekä saada siitä palkkio. Valintaan ei vaikuta pelkästään varojen määrä, vaan mukana voi olla myös muita tekijöitä esimerkiksi, kuinka pitkään solmu on ollut mukana verkossa (coin age) tai satunnainen valintamekanismi. Näiden avulla pyritään varmistamaan, että kaikilla verkon osallistujilla on reilu mahdollisuus tulla valituksi validoijaksi. (Hussein, Salama & El-Rahman 2023.) Alapuolella kuvio PoS prosessista (KUVIO 6).



KUVIO 6. PoS-prosessi (mukaillen Hussein, Salama & El-Rahman 2023).

### 2.1.7 Smart Contracts

Älysopimukset ovat automaattisesti toimivia digitaalisia sopimuksia, jotka suorittavat ennalta sovittuja ehtoja ilman välikäsiä. Niiden avulla voidaan vähentää riskejä ja lisätä luottamusta eri osapuolten välillä, koska sopimukset toteutuvat automaattisesti lohkoketjussa. Tämä teknologia mahdollistaa luotettavat, tehokkaat ja väärentämättömät sopimukset, joita voidaan hyödyntää monissa eri käyttökohteissa, kuten toimitusketjujen seurannassa ja rahoituspalveluissa. Älysopimusten avulla liiketoiminnassa voidaan saavuttaa parempi vastuullisuus ja kustannustehokkuus, koska ne poistavat tarpeen kolmansien osapuolten varmistukselle ja vähentävät virheiden ja petoksen riskiä. (Razi ym. 2024.)

Älysopimuksien toimintaperiaate. Ensiksi sovitaan osapuolien välisistä ehdoista. Sovitut ehdot muutetaan ohjelmakoodiksi, esimerkiksi Solidity-ohjelmointikielellä. Valmis sopimus julkaistaan lohkoket-

juverkkoon. Sopimukseen määritettyjen ehtojen toteutuessa älysopimus toteutuu automaattisesti. Jokainen suoritusvaihe varmennetaan lohkoketjun solmujen kautta, mikä varmistaa tarkan sopimuksen noudattamisen. Kun kaikki sopimusehdot ovat täyttyneet, lopputulos (esim. rahansiirto tai tuotteen toimitus) toteutuu automaattisesti ja tallentuu pysyvästi lohkoketjuun. (Razi ym. 2024.)

### **2.1.8 Blockchain-alustat**

Markkinoilla on monia lohkoketjualustoja, joita yritykset hyödyntävät liiketoiminnassaan. Tunnetuimpia näistä ovat esimerkiksi Hyperledger ja Ethereum, jotka eroavat toisistaan käyttötarkoitukseltaan ja suunnitteluperiaatteiltaan. Hyperledger on avoimen lähdekoodin alusta, joka keskittyy erityisesti yritysten yhteistyöhön sekä mahdollistaa useiden eri lohkoketjujen toteuttamisen liiketoiminnan tarpeisiin. Ethereum taas on avoin, julkinen ja hajautettu alusta, jonka tärkein ominaisuus on älysopimukset (smart contracts). Ethereumilla voi rakentaa ja ottaa käyttöön hajautettuja sovelluksia (Dapps). (Farshidi, Jansen, Espana & Verkleij 2020.)

### **2.1.9 Lohkojen muodostusvaihe**

Lohkoketjun toimintaprosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Lohkon muodostusvaiheessa solmut keräävät transaktioita ja kilpailevat laskentatehollaan oikeudesta lisätä uusi lohko ketjuun. Palkkiona saadut taloudelliset hyödyt motivoivat ylläpitämään verkkoa. Konsensusvarmennusvaiheessa valmis lohko lähetetään verkon kaikille solmuille, jotka vahvistavat sen sisällön konsensusalgoritmeilla. Hyväksytyt lohkot kirjataan lohkoketjuun. Kun tiedot esimerkiksi transaktioista on hyväksytty ja varmennettu lohkoketjussa, ne tallennetaan pysyvästi verkon eri solmuihin (tietokoneisiin). Jokaisella tallennetulla tiedolla on oma aikaleimansa ja yksilöllinen tunnisteensa eli hash-arvo, joiden avulla tiedot voidaan myöhemmin jäljittää ja tarkistaa. (Xiong ym. 2022.)

### **2.1.10 Kryptovaluutat ja Ethereum**

Kryptovaluutat, kuten Bitcoin, käyttävät pääasiassa julkisen tyyppistä lohkoketjua eli julkinen ja luvaton (public permissionless) -lohkoketjuja. Ensimmäinen onnistunut digitaalinen valuutta Bitcoin julkaistiin vuonna 2009, jolloin louhittiin ohjelmiston ensimmäinen alkulohko (genesis block). Bitcoinin taustalla on useita keskeisiä teknologisia oivalluksia, jotka ovat peräisin kryptografian, konsensusmenetelmien ja vertaisverkkojen tutkimuksesta. Bitcoin hyödyntää esimerkiksi julkisen avaimen salausta, joka mahdollistaa turvallisen viestinnän ilman, että avaimia tarvitsee jakaa etukäteen. Lisäksi käytössä

on Merkle-puu, joka mahdollistaa suurten tietomäärien tehokkaan ja luotettavan tarkistamisen. Aikaleimojen avulla lohkoketjuun kirjattujen tapahtumien järjestys saadaan pysyvästi talteen. Bitcoinissa käytettävä Proof-of-Work (PoW) -menetelmä tarjoaa tavan saavuttaa yksimielisyys hajautetussa verkossa ilman keskitettyä luottamusta. Nämä teknologiat yhdessä muodostavat Bitcoinin toiminnan perustan. (Ramadoss 2022.)

Etherneum eli ohjelmoitava lohkoketju sisältää Ethereum-virtuaalikoneen (EVM). Ethereum luokitellaan julkiseksi ja luvattomaksi (public permissionless) lohkoketjuksi. Alkuperäinen Ethereum käytti Proof-of-Work (PoW) -konsensusprotokollaa. Vuonna 2022 teknologia siirtyi Proof-of-Stake (PoS) -konsensusprotokollaan. EVM on globaali hajautettu virtuaalitetokone, joka pystyy suorittamaan tietokoneelle tehtyjä ohjeita/koodia. Älysopimus on lohkoketjussa toimiva ohjelma, joka suorittaa automaattisesti ennalta määriteltäviä ehtoja. Se toimii lohkoketjun virtuaalikoneessa, jossa jokainen suoritus vaikuttaa suoraan lohkoketjun tilaan, esimerkiksi varojen siirtäminen tai uuden tiedon kirjaaminen. Ethereum-alustalla älysopimuksia voidaan kirjoittaa useilla ohjelmointikielillä, kuten Solidityllä, Javalla tai Pythonilla, mikä tekee niiden kehittämisestä joustavaa eri tarpeisiin. Ethereumissa käytettävä oma valuutta on Ether (ETH). Ethereumiin sisältyy myös transaktiomaksuja, joita kutsutaan nimellä gas fees. Ne maksetaan Etherinä aina kun suoritetaan älysopimuksia ja tapahtumia Ethereum-lohkoketjussa. (Ramadoss 2022.)

Älysopimusten avulla voidaan luoda uusia digitaalisia omaisuususeriä, joita kutsutaan tokeneiksi. Tokeneita on kahden tyyppisiä. Vaihdeettavat tokenit (fungible tokens) ovat samanarvoisia keskenään ja ne toimivat esimerkiksi digitaalisina valuuttoina. Toinen vaihtoehto ovat ei-vaihdeettavat tokenit (non-fungible tokens, NFT). Ne ovat yksilöllisiä ja ainutlaatuisia digitaalisia tiedostoja, kuten kuvat, musiikki tai videot. (Ramadoss 2022.)

## **2.2 Mikä on NFT**

Non-fungible eli ei-vaihdeettava terminä kuvaa asioita, joita ei voi muiden asioiden tai tavaroiden kesken niiden uniikkien ominaisuuksien takia vaihtaa, kuten laulu, taide ja sertifikaatit. NFT:t perustuvat lohkoketjuteknologiaan, joka toimii hajautettuna ja muuttumattomana pääkirjana tallentaen tietoja vertaisverkon solmujen kautta. Lohkoketjun eheyttä ylläpitävät solmut tutkivat uusia transaktioita ja luovat uusia lohkoja, ja näitä solmuja kutsutaan louhijoiksi (miners). Jokainen NFT sisältää lohkoketjuun tallennetun yksilöllisen tunnisteiden, joka varmistaa sen aitouden ja omistajuuden. (Razi ym. 2024.)

Tunnetuin ominaisuus NFT:llä ovat digitaaliset keräilyesineet. NFT:llä on muitakin käytännön tarkoituksia kuin vain digitaaliset keräilyesineet. Esimerkiksi kiinteistökaupassa NFT lisää läpinäkyvyyttä, koska jokainen tarjous on näkyvillä julkisesti. (Razi ym. 2024.)

### **2.2.1 NFT ominaisuudet**

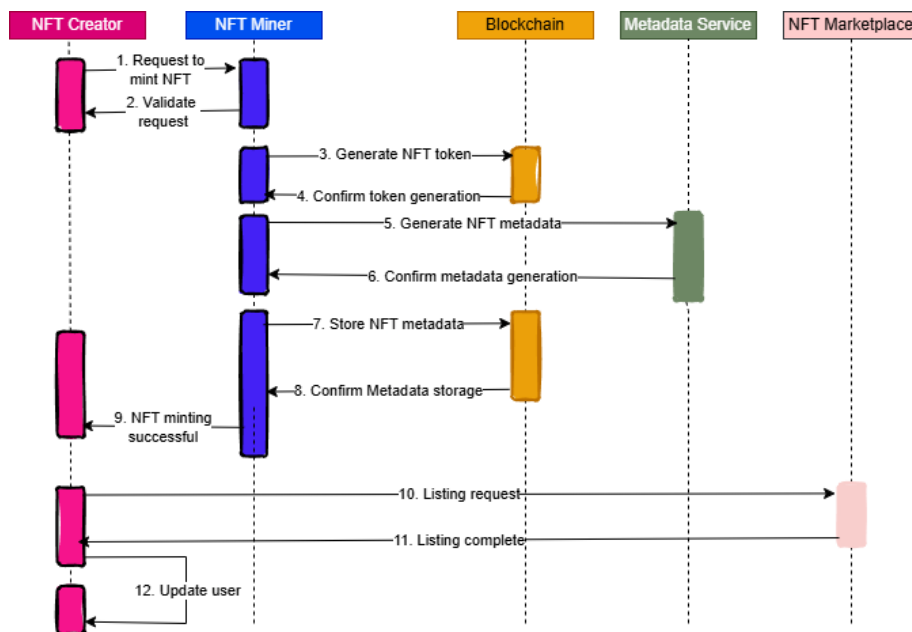
NFT:t erottuvat muista digitaalisista omaisuuseristä useiden keskeisten ominaisuuksiensa ansiosta. NFT:t ovat täysin ainutlaatuisia. Jokaisella NFT:llä on oma tunnisteensa, eikä sitä voida korvata toisella vastaavalla. Tämä tekee niistä erinomaisia yksilöllisten digitaalisten sisältöjen, kuten taideteosten omistajuuden todisteena. Omistajuus NFT:ssä perustuu lohkoketjuun, mikä takaa sen, että omistajuustiedot ovat luotettavasti ja pysyvästi tallessa. NFT:t mahdollistavat helpon ja turvallisen omistuksen siirron osapuolelta toiselle. NFT:t ovat myös yhteensopivia, eli ne voivat toimia saumattomasti eri lohkoketjualustojen ja sovellusten kanssa. Tämä tekee niistä monikäyttöisiä ja laajasti hyödynnettäviä erilaisissa ympäristöissä. (Razi ym. 2024.)

NFT:t perustuvat hajautettuun lohkoketjuun, joten niiden hallinta ei ole yhden keskitetyn tahon käsissä. Tämä parantaa turvallisuutta ja lisää läpinäkyvyyttä. Lisäksi NFT:iden tieto ja tapahtumat tallennetaan lohkoketjuun muuttumattomasti, eli historiaa ei voida jälkikäteen muokata. Tämä varmistaa luotettavan ja läpinäkyvän dokumentoinnin. NFT:t ovat myös ohjelmoitavia, eli niihin voidaan rakentaa ehtoja ja sääntöjä. Esimerkiksi jälleenmyyntiin tai lisenssien käyttöön liittyen. Kaikki NFT:hen liittyvät toiminnot, kuten luominen, siirtäminen ja tuhoaminen, ovat todennettavissa, koska ne tallennetaan pysyvästi lohkoketjuun. Näin koko NFT:n historia on läpinäkyvä ja jäljitettävissä. NFT:t ovat erittäin monipuolisia, koska ne voivat edustaa laajaa kirjoa digitaalisia sisältöjä, kuten musiikkia, elokuvia, virtuaalisia kiinteistöjä tai muita digitaalisia tuotteita. (Razi ym. 2024.)

### **2.2.2 Minting**

NFT:n minttaus tarkoittaa digitaalisen kohteen kirjoittamista lohkoketjuun. Tämä prosessi varmistaa, että NFT:n omistajuus ja alkuperä on pysyvästi todennettavissa. Digitaalinen tokeni tallennetaan lohkoketjuun, joka on hajautettu ja muuttumaton tietokanta. Kerran tallennettua tietoa ei voi enää jälkikäteen muuttaa tai poistaa. Ensimmäisessä vaiheessa käyttäjä lähettää pyynnön NFT:n luomiseksi sovelluksen kautta. Tämän jälkeen lohkoketjun louhija tarkistaa pyynnön oikeellisuuden. Jos kaikki on kunnossa, minttauspalvelu käyttää lohkoketjua NFT:n luomiseen ja järjestelmä vahvistaa tämän onnistuneesti. (Razi ym. 2024.)

Seuraavaksi luodaan NFT:lle metadata, eli siihen liittyvät tiedot, kuten nimi, kuvaus ja mahdollinen linkki digitaaliseen sisältöön. Louhija hoitaa tämän yhdessä metadatatietopalvelun kanssa. Kun metadata on valmis ja vahvistettu, se tallennetaan lohkoketjuun. Kun kaikki vaiheet on suoritettu onnistuneesti, käyttäjälle ilmoitetaan NFT:n minttauksen valmistumisesta. Jos jossain vaiheessa ilmenee virhe, siitä ilmoitetaan käyttäjälle. Lopuksi sisällöntuottaja voi pyytää NFT:n listattavaksi markkinapaikalle, jossa se voidaan asettaa myytäväksi. Markkinapaikka vahvistaa listauksen, ja siitä ilmoitetaan lopuksi sisällöntuottajalle. (Razi ym. 2024.) Alla kuvio minttausprosessista (KUVIO 7).



KUVIO 7. Minttausprosessi (mukaihen Razi ym. 2024).

## 2.2.3 Token-standardeja

Token-standardit ovat ohjeistuksia ja teknisiä määrittelyjä, jotka kertovat, miten tietynlainen tokeni, esimerkiksi NFT pitää rakentaa, säilyttää ja siirtää lohkoketjussa. Niiden tarkoituksena on varmistaa, että tokenit toimivat oikein eri järjestelmissä ja ovat yhteensopivia eri sovellusten kanssa. Eri tokeni-standardien tulisi antaa kehittäjille ja käyttäjille yhteisen viitekehys NFT:iden luomiseen, hallintaan ja vaihtamiseen eri lohkoketjuverkkojen välillä. (Razi ym. 2024.)

### 2.2.3.1 ERC-20

Suurin osa Ethereum-verkon tokeneista käyttää ERC-20-standardia. ERC-20-standardi määrittää joukon erilaisia sääntöjä, jotta se olisi yhteensopiva kaikkien Ethereum-verkkojen kanssa. Näihin toimintoihin sisältyy esimerkiksi tokenien siirto osoitteesta toiseen, saldojen tarkistus ja mahdollisuus antaa

toiselle käyttäjälle lupa käyttää omia tokeneita. Tokenien kokonaismäärä määritellään luomisvaiheessa, eikä sitä voi myöhemmin lisätä tai vähentää. Tämä tekee tarjonnasta ennakoitavaa ja kiinteää. (Razi ym. 2024.)

ERC-20-tokenit ovat mahdollisia myös jakaa pienempiin yksiköihin, mikä mahdollistaa joustavamman käytön esimerkiksi päivittäisessä kaupankäynnissä. Tätä ominaisuutta hallitaan desimaaliasetuksella. Tokenien omistajuus liittyy tiettyyn Ethereum-osoitteeseen, jota hallitaan yksityisavaimella. Näiden avainten suojaaminen on kriittistä, jotta ulkopuoliset eivät pääse käsiksi tokeneihin. Tokenien siirtäminen tapahtuu siirtofunktion avulla, joka tarkistaa, onko lähettäjällä riittävästi saldoa ja päivittää sitten lähettäjän ja vastaanottajan saldot asianmukaisesti. Jos halutaan antaa lupa toiselle osapuolelle käyttää omia tokeneita, se tehdään hyväksymistoiminnon (approve) kautta. Tämä on tyypillistä esimerkiksi hajautetuissa kaupankäyntialustoissa. ERC-20-tokenit voivat lähettää automaattisia ilmoituksia esimerkiksi siirroista tai hyväksynnöistä. Näitä tapahtumia voidaan hyödyntää muissa älysovimuksissa erilaisten toimintojen käynnistämiseen. (Razi ym. 2024.)

#### 2.2.3.2 ERC-721

ERC-721 on non-fungible token (NFT) -standardi Ethereum lohkoketjussa. Se määrittää sääntöjä ja rajapintoja (API), joiden avulla NFT:iden on mahdollista toimia yhteensopivasti eri sovellusten ja alustojen kanssa. Jokainen NFT on sidottu yksittäiseen Ethereum-osoitteeseen ja sen siirtäminen toiselle onnistuu vain tietyn lohkoketjufunktion kautta. Näin omistajuus on aina jäljitettävissä ja hallittavissa. NFT:t ovat kokonaisuksia, joita ei voi jakaa pienempiin osiin. Ne eroavat näin ollen täysin esimerkiksi ERC-20-tokeneista, joita voidaan pilkkoa. Kun NFT on luotu, sen sisältö ja ominaisuudet säilyvät muuttumattomina. NFT:hin voidaan liittää erilaisia tietoja, kuten nimi, kuvaus tai visuaalista sisältöä, jotka kuvaavat kyseistä digitaalista omaisuutta. (Razi ym. 2024.)

#### 2.2.3.3 ERC-1155

Vuonna 2018 julkaistiin Ethereum-lohkoketjussa monitokeninen standardi nimeltään ERC-1155. Standardi on laajennus ERC-721-standardille. ERC-1155 mahdollistaa vaihdettavien ja ei-vaihdettavien tokenien luomisen saman älysovimuksen sisällä. ERC-721-standardissa jokainen tokeni on täysin yksilöllinen, kun taas ERC-1155 älysovimuksessa on monia tokeneita, jotka voivat olla vaihdettavia tai ei-vaihdettavia. Tämän avulla useamman tokenin hallinta on helpompaa, joka tekee koko lohkoketjusta tehokkaamman ja kustannustehokkaamman. Standardissa on joukko erilaisia funktioita, joiden avulla

mahdollistetaan yhteensopivuus muiden Ethereum-verkossa toimivien sopimusten ja sovellusten kanssa. (Razi ym. 2024.)

#### **2.2.4 IPFS**

IPFS eli Interplanetary File System on Protocol Labsin kehittämä teknologia, joka koostuu useista eri verkkoprotokollista. IPFS:n ideana on tallentaa tiedostot hajautetusti useille solmuille, joista ne voidaan hakea niiden sisällön perusteella tarpeen mukaan. Tämä sisältöpohjainen lähestymistapa yhdistettynä järjestelmän kykyyn välttää saman datan tallennus useaan kertaan (deduplikointi) tekee tietojen käsittelystä ja säilytyksestä erittäin tehokasta. (Daniel & Tschorsch 2022.)

NFT:n luomisen yhteydessä siihen liitetään metatietoa, johon kuuluu esimerkiksi tunniste (CID) ja yksilöllinen ID-numero. CID on IPFS:n luoma hash, joka toimii osoitteena NFT:n varsinaiseen sisältöön. Koska datan tallentaminen suoraan lohkoketjuun on kallista ja tehotonta, itse sisältö tallennetaan hajautettuun IPFS-tiedostojärjestelmään. Lohkoketjuun jää talteen vain kyseisen sisällön hash, eli tunniste. Tämä ratkaisu auttaa varmistamaan NFT:n aitouden ja ehkäisee väärentämistä, sillä tietoa ei voi muokata jälkikäteen. IPFS:n ideana on tallentaa tiedosto hajautetusti useille verkon solmuille, jolloin NFT:n sisältö säilyy paremmin saatavilla ja läpinäkyvänä ilman keskitettyjä palvelimia. (Hasan, Salah, Battah, Madine, Yaqoob, Jayaraman & Omar 2022.)

### **2.3 Industry 4.0**

Teollisen vallankumouksen historiassa kehitys on myötäillyt ajan muuttuvia tekijöitä. Edistävänä tekijöinä on ollut teknologian kehitys ja informaatioteknologian integrointi. Noin vuonna 1970 automaation käyttöönotto yleistyi elektroniikan ja IT:n avulla. Tämä johti valmistusprosessien automatisointiin. Industry 4.0 eli teollinen vallankumous 4.0 voidaan kuvailla koneen ja ihmisen tasapainona teollisuudessa. (Vyas & Gupta 2022.)

Industry 4.0 pyrkii vastaamaan digitalisaation luomiin uusiin tarpeisiin kehittämällä älykkäitä ja hajautettuja järjestelmiä. Siihen liittyvät olennaisesti esimerkiksi esineiden internet (IoT), big data ja pilvipalvelut, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen vuorovaikutuksen ja tiedonhallinnan. Lisäksi älykkäät ratkaisut, kuten 3D-tulostus ja autonomiset robotit tehostavat varastointia ja tuotantoa entisestään. (Vyas & Gupta 2022.)

Blockchain-tekniikan avulla voidaan ratkaista tietoturva-asteita, koska sen avulla saadaan läpinäkyvyyttä ja hajautettua tiedonsiirtoa, joka poistaa tarpeen kolmansille osapuolille. Blockchainin ydintoimintoja ovat älysojimat, hajautetut tilikirjat ja konsensusmenetelmät, jotka takaavat datan aitouden ja luotettavuuden. Näiden avulla esimerkiksi todennukset ja valtuutukset on mahdollista ratkaista älysojimatusten kautta. Blockchain-tekniikka Industry 4.0:ssa ratkaisee monia tekniikkasiasioita haasteita ja tarjoaa älykkään alustan erilaisille mahdollisuuksille. (Vyas & Gupta 2022.)

## **2.4 Industry 5.0**

Industry 4.0:n painopiste on enemmän teknologialähtöisessä teollisuuden muutoksessa kuin ihmiseen ja yhteiskuntaan liittyvissä näkökulmissa. Tämä huolenaihe johti Industry 5.0 käsitteen syntyamiseen. Vuonna 2015 esitettiin käsite ”Industrial Upcycling”, joka korostaa ihmisten ja uusien tekniikkasiasioiden yhteistyötä tuotannossa. Keskeisenä ajatuksena on se, että tekniikkasiasioiden tulisi toimia työkaluina ihmisten tukena, eikä korvata heitä. (Jefroy, Azarian & Yu, 2022.)

Lohkoketjujen avulla voidaan parantaa järjestelmien läpinäkyvyyttä ja luottamusta etenkin silloin, kun käsitellään digitaalista omaisuutta tai yksilön oikeuksia. Näin voidaan toteuttaa esimerkiksi yksilöllisiä tuotantomalleja, joissa asiakas voi osallistua tuotteen suunnitteluun ja valmistukseen turvallisesti ja avoimesti. Lisäksi lohkoketju tarjoaa vastauksia Industry 5.0:n tietoturva-asteisiin erityisesti silloin, kun käsitellään suuria määriä dataa älylaitteiden, tekoälyn ja robottien välillä. Konsensusmekanismit varmistavat, että järjestelmässä jaettu tieto on luotettavaa, muuttumatonta ja kaikkien osapuolten todennettavissa. Tällä on erityistä merkitystä esimerkiksi tuotannossa ja digitaalisissa kaksoissa (Digital twins), joissa reaaliaikainen ja luotettava tiedonsiirto on kriittistä. (Verma, Bhattacharya, Madhani, Trivedi, Bhushan, Tanwar, Sharma 2022.)

Lohkoketjutekniikka mahdollistaa myös uusien digitaalisten omistajuus- ja identiteettimallien (kuten NFT) hyödyntämisen Industry 5.0:ssa tukien yksilöllisten tuotteiden tunnistamista, räätälöintiä ja jäljitettävyyttä. Näin lohkoketju toimii keskeisenä mahdollistajana inhimillisemmän, turvallisemman ja älykkäämmän teollisen tulevaisuuden rakentamisessa. (Verma ym. 2022.)

## **2.5 Blockchain ja NFT teollisuudessa**

Blockchain-tekniikan avulla on mahdollista seurata valmistusprosessia luotettavasti. Blockchainiin voidaan tallentaa tietoja ajankohdista ja prosesseista, jonka avulla voidaan esimerkiksi tarkistaa valmistaja, eränumero, valmistuspäivämäärä ja mahdollisesti jopa ohjelmat mitä on käytetty valmistusprosessissa. Tämän avulla voidaan ongelmatilanteissa päästä mahdollisiin juurisyihin kiinni läpinäkyvästi ja joustavasti. Lohkoketjua voidaan myös hyödyntää kollektiivisena kokoelmana, joita voivat useammat tahot tarkastella tarpeen vaatiessa. (Vadapalli 2020.)

Kun koneet kommunikoivat keskenään, ne voivat itse tallentaa tärkeitä tapahtumia lohkoketjuun. Tämä tekee toiminnasta tehokkaampaa, tarkempaa ja kustannustehokkaampaa. Logistiikassa lohkoketjua voidaan hyödyntää erityisesti IoT-laitteiden ohjauksessa ja prosessien automatisoinnissa. Nykyään kansainvälinen rahtiliikenne vaatii useiden toimijoiden yhteistyötä, kuten valmistajien, kuljetusyritysten ja tulliviranomaisten. Blockchain- ja NFT-tekniikka mahdollistaa eri systeemien yhteensopivuuden riippumatta siitä, mitä järjestelmää toimijat käyttävät. Lohkoketju tarjoaa tähän ratkaisun toimimalla yhteisenä ja luotettavana tietokantana, jossa lähetyksiä, kuten rahtikontteja voidaan seurata reaaliajassa erijärjestelmissä. Lisäksi älysovitukset voidaan ohjelmoida päivittymään automaattisesti IoT-alustojen kautta, mikä mahdollistaa entistä sujuvamman ja älykkäämmän kansainvälisen kaupankäynnin. (Vadapalli 2020.)

Teorian ja muutaman esimerkin pohjalta on nähtävissä, että Blockchain- ja NFT-tekniikat voivat tuoda merkittäviä hyötyjä myös teollisuuteen. Seuraavassa luvussa syvennyttään tarkemmin tutkimuskysymyksiin ja aiheen nykytilanteeseen akateemisen kirjallisuuden avulla.

### **3 TUTKIMUSKYSYMYS JA TUTKIMUSMENETELMÄ**

Tutkimusmenetelmänä tässä opinnäytetyössä toimii kevennetty systemaattinen katsaus. Aion tutkia akateemisia lähteitä ja artikkeleita, joita aihealueesta löytyy. Tarkastelen tutkimuskysymystä nojaten lähteistä löytämiini vastauksiin. Tutkimuskysymyksenä toimii tässä opinnäytetyössä, millä tavoin Blockchain- ja NFT-teknologiat ovat vaikuttaneet teollisuusverkkoihin.

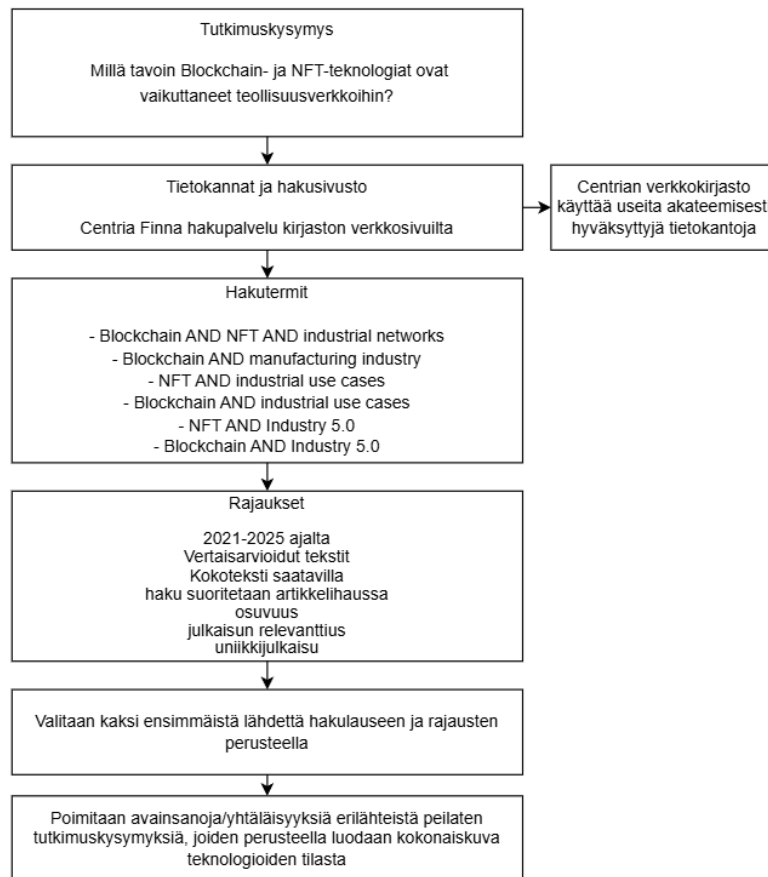
#### **3.1 Tiedonhakustrategia**

Hakustrategiana aion käyttää tiettyjä hakusanoja tiedonhakuun. Aion käyttää hakusanoina tai hakulauseina:

- Blockchain AND NFT AND industrial networks
- Blockchain AND manufacturing industry
- NFT AND industrial use cases
- Blockchain AND industrial use cases
- NFT AND Industry 5.0
- Blockchain AND Industry 5.0

Tietolähteinä tässä opinnäytetyössä käytetään Centria-ammattikorkeakoulun oman kirjaston verkkosivun hakupalvelua. Kyseisen palvelun kautta on pääsy useisiin eri tietokantoihin, mikä mahdollistaa kattavan ja monipuolisen tiedonhaun. Kirjaston hakupalvelun avulla tehdyt haut rajataan vertaisarvioituihin julkaisuihin, joiden koko tekstit ovat saatavilla. Tällä tavoin pyritään varmistamaan käytetyn tiedon akateeminen luotettavuus ja laatu.

Aineisto rajataan julkaisuihin, jotka ovat ilmestyneet vuosina 2021–2025, jotta työssä käytetty tieto on mahdollisimman ajantasaista ja relevanttia. Lähteiden valintaprosessissa arvioidaan ensin artikkelien otsikkojen ja tiivistelmäosuuksien perusteella niiden merkitystä ja relevanssia tutkimuskysymyksille. Lisäksi hakutulosten joukosta poistetaan päällekkäiset tulokset, ja valintaan otetaan ainoastaan uniikit lähteet, jotka täydentävät monipuolisesti tutkimuksen tietoperustaa.



KUVIO 8. Kevennetyn systemaattisen katsauksen eteneminen tutkimuskysymyksen pohjalta

### 3.2 Tutkimuskysymys

Tutkimuksen pääkysymys on: Millä tavoin Blockchain- ja NFT-teknologiat ovat vaikuttaneet teollisuusverkkoihin?

Tutkimuksen alakysymyksiä ovat:

1. Millä teollisuuden aloilla Blockchain- ja NFT-teknologiaa käytetään?
2. Mitkä ovat Blockchainin ja NFT:n keskeisimmät käyttötarkoitukset ja hyödyt teollisuusverkoissa?
3. Mitkä ovat Blockchain- ja NFT-teknologian tulevaisuuden näkymät teollisuusverkoissa?

### 3.3 Tiedonhaku

Haku suoritettiin Centria-ammattikorkeakoulun Finna-hakupalvelulla (<https://centria.finna.fi>), joka hakee samanaikaisesti useista tietokannoista, kuten IEEE/IEE Electronic library, DOAJ Directory of Open Access Journals, ABI/Inform Complete (ProQuest) ja Academic Search Complete (EBSCO). Haku suoritettiin 1.4.2025.

Hakusanat/hakulause	Rajaukset	Hakutulosten määrä
Blockchain AND NFT AND industrial networks	2021–2025 ajalta, Vertaisarvioidut ja kokoteksti, artikkelihaku, osuvuus, julkai- sun relevanttius	373

Näistä hakutuloksista valitsen seuraavaksi kaksi ensimmäistä.

1. AlKhader, Jayaraman, Salah, Sleptchenko, Antony & Omar 2023
2. Munoz-Ausecha, Gómez, Ruiz-Rosero & Ramirez-Gonzalez 2023

Hakusanat/hakulause	Rajaukset	Hakutulosten määrä
Blockchain AND manufacturing industry	2021–2025 ajalta, Vertaisarvioidut ja kokoteksti, artikkelihaku, osuvuus, julkai- sun relevanttius	10419

Näistä hakutuloksista valitsen seuraavaksi kaksi ensimmäistä.

1. Leng, Ye, Zhou, Zhao, Liu, Guo & Fu 2021
2. Teng, Shang, Wang, Kuo & Lu 2025

Hakusanat/hakulause	Rajaukset	Hakutulosten määrä
NFT AND industrial use cases	2021–2025 ajalta, Vertaisarvioidut ja kokoteksti, artikkelihaku, osuvuus, julkai- sun relevanttius	1018

Näistä hakutuloksista valitsen seuraavaksi kaksi ensimmäistä.

1. Hasan, Madine, Musamih, Jayaraman, Salah, Yaqoob & Omar 2022
2. Wu, Liu & Weng 2023

Hakusanat/hakulause	Rajaukset	Hakutulosten määrä
Blockchain AND industrial use cases	2021–2025 ajalta, Vertaisarvioidut ja kokoteksti, artikkelihaku, osuvuus, julkai- sun relevanttius	14108

Näistä hakutuloksista valitsen seuraavaksi kaksi ensimmäistä.

1. Rahman, Islam, Band, Muhammad, Hasan & Tiwari 2023

2. Menon & Jain 2024

Hakusanat/hakulause	Rajaukset	Hakutulosten määrä
NFT AND Industry 5.0	2021–2025 ajalta, Vertaisarvioidut ja kokoteksti, artikkelihaku, osuvuus, julkai- sun relevanttius	193

Näistä hakutuloksista valitsen seuraavaksi kaksi ensimmäistä.

1. De Giovanni 2023

2. Agarwal & Alathur 2023

Hakusanat/hakulause	Rajaukset	Hakutulosten määrä
Blockchain AND Industry 5.0	2021–2025 ajalta, Vertaisarvioidut ja kokoteksti, artikkelihaku, osuvuus, julkai- sun relevanttius	1616

Näistä hakutuloksista valitsen seuraavaksi kaksi ensimmäistä.

1. Wang, Chen, Xiao, Su, Govindan & Skibniewski 2023

2. Naguji, Kumar Jadav, Tanwar, Pau, Sharma, Alqahtani & Tolba 2024.

Hakutulosten suuren määrän vuoksi (yhteensä 27 727 tulosta) opinnäytetyön aineistoksi rajattiin yhteensä kaksitoista lähdettä. Jokaisen kuuden keskeisen hakulauseen osalta valittiin kaksi ensimmäistä julkaisua osuvuusjärjestyksen ja rajausten perusteella. Näin varmistettiin aineiston relevanttius ja käytännöllisyys opinnäytetyön kannalta.

## 4 TUTKIMUSKYSYMYSTEN KÄSITTELY

Tässä luvussa perehdymme tutkimuskysymyksiin tarkemmin. Tarkoituksena on peilata tutkimuskysymyksiä hakutuloksiin ja löytää vastauksia tutkimuskysymyksiin lähteiden avulla. Tarkastelun tavoitteena on selvittää, millä tavoin Blockchain- ja NFT-teknologiat vaikuttavat teollisuusverkkoihin, millä teollisuuden aloilla niitä hyödynnetään, mitkä ovat niiden käyttötarkoitukset ja hyödyt sekä millaisia tulevaisuuden mahdollisuuksia teknologioihin liittyy. Jokaisessa kohdassa aion käyttää neljää eri lähdettä rajatakseni mahdollisimman tarkasti avainasiat esille.

### 4.1 Millä tavoin Blockchain- ja NFT-teknologia ovat vaikuttaneet teollisuusverkkoihin?

Blockchain- ja NFT-teknologioita hyödynnetään juuri niissä piirteissä mitkä ovat niille ominaisia. NFT-teknologia voi auttaa seuraamaan tuotteiden tai tietojen kulkua sekä hallitsemaan ja turvaamaan niiden omistajuutta. Lohkoketjuteknologian avulla taas voidaan toteuttaa tapahtumia, kuten tietojen tallennusta tai siirtoa, erittäin turvallisesti. Tiedot pysyvät muuttumattomina ja niitä on mahdoton peukaloida, mikä lisää järjestelmän luotettavuutta.

AlKhaderin ym. (2023) tulosten mukaan lohkoketju tarjoaa merkittäviä kustannusetuja ja luodut älysovimukset ovat turvallisia, ilman huomattavia haavoittuvuuksia. Tämä osoittaa, että lohkoketju- ja NFT-teknologia eivät ole vain teoreettisia konsepteja, vaan niillä on jo nyt käytännön sovelluksia, jotka vaikuttavat positiivisesti teollisuusverkkojen rakenteeseen ja toimintavarmuuteen.

Munoz-Ausechan ym. (2023) tutkimuksen tavoitteena oli kehittää ratkaisu omaisuuden hallintaan ja omaisuuden siirtoon. Tutkimustuloksissa todettiin lohkoketjuteknologian tarjoavan mahdollisuuden kehittää joustavia ja teknisesti edistyneitä ratkaisuja monenlaisiin käyttötarpeisiin. Se toimii erityisen hyvin tilanteissa, joissa korostuvat läpinäkyvyys, tiedon muuttumattomuus, turvallisuus ja kustannustehokkuus. Ethereum-lohkoketju erottuu muista hajautetuista järjestelmistä, koska sen ympärille on rakentunut laaja kehittäjäyhteisö ja tarjolla on paljon valmiita työkaluja sekä avoimen lähdekoodin kirjastoja. Lisäksi Ethereumissa käytettävä ohjelmointikieli Solidity mahdollistaa erittäin monipuolisten toimintojen rakentamisen ja Ethereum yhteensopivuuden erilaisten verkkoteknologioiden kanssa. Lähteessä myös mainittiin siitä, miten osa tutkimukseen osallistujista suhtautui pessimistisesti uusiin teknologioihin. Tämä ilmeni varsinkin silloin, kun olemassa oleva järjestelmä oli ollut jo pitkään käytössä.

Teng ym. (2025) käsittelevät Blockchain-tekniikan käyttöönottoon liittyviä tekijöitä teollisuudessa. Tutkimuksessa käy ilmi Blockchain-tekniikan vaikuttavan positiivisesti tietoturvaan, järjestelmien yhteensopivuuteen ja ulkoiseen prosessinhallintaan. Tutkimuksen mukaan onnistunut käyttöönotto edellyttää johdon tukea, teknologisia investointeja ja henkilöstön osaamisen kehittämistä, mikä viittaa lohkoketjun kokonaisvaltaiseen vaikutukseen teollisuusverkoissa. Organisaation tulisi investoida IT-infrastruktuuriin ja henkilökunnan koulutukseen, jotta uuden tekniikan käyttöönotto olisi mahdollisimman sujuvaa ja mutkatonta. Tämän avulla tekniikka olisi mahdollisimman onnistunut käyttötarkoituksessaan.

Hasanin ym. (2022) mukaan NFT-tekniikka on osoittautunut merkittäväksi työkaluksi teollisuusverkkojen digitalisoinnissa. NFT:iden avulla fyysiset esineet voidaan muuntaa digitaalisiksi kaksosiksi, joiden omistajuus ja alkuperä voidaan varmentaa lohkoketjussa. Tämä mahdollistaa tuotteiden jäljitettävyyden koko toimitusketjun ajan aina raaka-aineista loppuasiakkaalle asti. Lisäksi NFT:t parantavat toimitusketjujen läpinäkyvyyttä ja turvallisuutta, torjuvat väärennöksiä ja mahdollistavat digitaalisten omaisuususerien autentikoinnin. Näiden ominaisuuksien ansiosta NFT-tekniikka tukee teollisuusverkkojen luotettavaa ja tehokasta toimintaa sekä vahvistaa luottamusta digitaalisissa kauppatahtumissa.

Kaikilla lähteillä on siis erilainen tulokulma kysymystä kohtaan. Taulukossa 1 on koonti lähteistä, vastamaan pääkysymykseen tässä opinnäytetyössä. Ensimmäisessä sarakkeessa on lähde ja toisessa avainsanat kyseisistä lähteistä.

Taulukossa 1 on koonti avainsanoista.

AlKhaderin ym. 2023	Turvallisuus ja kustannustehokkuus
Munoz-Ausechan ym. 2023	Läpinäkyvyys, tiedon muuttumattomuus, turvallisuus ja kustannustehokkuus
Teng ym. 2025	Turvallisuus, järjestelmien yhteensopivuus ja ulkoinen prosessinhallinta.
Hasanin ym. 2022	Turvallisuus ja tietojen eheys, jäljitettävyyden ja läpinäkyvyys, kustannustehokkuus ja skaalautuvuus, yhteensopivuus ja käytännön sovellukset

Lähteiden perusteella voidaan todeta, että Blockchain- ja NFT-tekniikat vaikuttavat teollisuusverkoissa turvallisuuteen, kustannustehokkuuteen, läpinäkyvyyteen, tiedon muuttumattomuuteen sekä yhteensopivuuteen eri järjestelmien ja tekniikoiden kanssa. Nämä ominaisuudet ovat myös keskeisiä elementtejä molempien tekniikoiden teoreettisessa viitekehyksessä, mikä vahvistaa niiden soveltuvuuden teollisiin käyttökohteisiin.

## 4.2 Millä teollisuuden aloilla Blockchain- ja NFT-teknologiaa käytetään?

Blockchainia ja NFT:tä käytetään monipuolisesti erilaisiin tarkoituksiin, kuten NFT taiteeseen ja tuotannon seurantaan. Onkin siis mielenkiintoista tietää millä aloilla kyseisiä teknologioita on jo hyödynnetty. Lähteiden perusteella useissa eri alan yrityksissä kyseisiä teknologioita on jo hyödynnetty niiden tuomien hyötyjen puitteissa, kuten tuotannon seurannassa.

Teng ym. (2025) tutkimus on tehty 362 eri teollisuudenalan toimijalle Kiinan Sichuanin alueella. Lähteessä tarkoituksena on selvittää, miten Blockchainin käyttöönotto etenee ja miten se tulisi tehdä teollisuudessa. Lähteestä itsestään ei käy ilmi mitä eri aloja on kyseessä, mutta tämä lähde määrällisesti jo osoittaa Blockchainin roolin olevan jo isossa roolissa Kiinan Sichuanin alueella. Tämän perusteella Blockchain-teknologiaa on jo hyödynnetty laajasti erialoilla Kiinan Sichuanin alueella.

Hasan ym. (2022) käsittelevät tutkimuksessaan NFT- ja Blockchain-teknologioiden käyttöä laaja-alaisesti teollisessa metaversumissa, kattaen muun muassa valmistavan teollisuuden, autoteollisuuden, öljy- ja kaasuteollisuuden, pelialan, kiinteistöalan, lääke- ja kemianteollisuuden sekä infrastruktuuri- ja kaupunkisuunnittelun. NFT:t toimivat sekä todistuksina omistajuudesta että digitaalisina kaksosina, joita käytetään muun muassa kunnossapidon hallintaan, simulaatioihin, toimitusketjujen seurantaan ja digitaalisten tuotteiden kaupallistamiseen.

Menon & Jain (2024) tutkimus koskee lohkoketjuteknologiaa, jota on hyödynnetty konkreettisesti maatalous- ja elintarviketeollisuudessa erityisesti toimitusketjujen läpinäkyvyyden lisäämiseksi. Alan innovaatiot yhdistävät lohkoketjut muihin Industry 4.0 teknologioihin, kuten big dataan, IoT:hen, RFID- ja NFC-teknologioihin, parantaen toimitusketjujen reagoitokykyä ja jäljitettävyyttä.

Naguji ym. (2024) tutkivat Blockchain-teknologiaa maanrekisteröintijärjestelmässä, joka liittyy erityisesti maatalouteen ja teollisuus 5.0 ympäristöihin. Tutkimuksessa esitetään älykkääseen maarekisteriin perustuva ratkaisu, jossa tekoälyalgoritmit suodattavat vilpillisen tiedon ennen kuin luotettavat tiedot tallennetaan lohkoketjuun. Älysopimuksia hyödynnetään maanomistustietojen validoinnissa, ja lopullinen data tallennetaan hajautetusti IPFS-järjestelmään, mikä mahdollistaa turvallisen ja läpinäkyvän rekisteröintiprosessin ilman välikäsiä. Ratkaisu palvelee sekä maataloussektoria että julkista hallintoa tarjoamalla kehittyneen ja automatisoidun tavan hallinnoida maaomaisuutta.

Vaikuttaisi siltä, että Blockchainia ja NFT:tä hyödynnetään jo runsaasti eri teollisuuden aloilla. Lähteistä kävi ilmi niiden vaikuttavan seuraavilla aloilla:

- Valmistava teollisuus
- Autoteollisuus
- Öljy- ja kaasuteollisuus
- Lääke- ja kemianteollisuus
- Infrastruktuuri- ja kaupunkisuunnittelu
- Maatalous- ja elintarviketeollisuus

Yhdessä lähteessä ei käynyt varsinaisesti ilmi missä eri aloilla Blockchainia ja NFT:tä on hyödynnetty mutta laajuus tutkimuksessa koski 362 eri toimijaa teollisuuden alalla. Vaikuttaisikin siltä, että kyseisiä teknologioita voidaan hyödyntää lähes missä tahansa eri teollisuuden alalla, joissa on tarvetta esimerkiksi tuotannon seurantaan.

#### **4.3 Mitkä ovat Blockchainin ja NFT:n keskeisimmät käyttötarkoitukset ja hyödyt teollisuusverkoissa?**

Tässä luvussa esitellään Blockchain- ja NFT-tekniikan keskeisimmät käyttötarkoitukset ja hyödyt teollisuusverkoissa. Tarkastelun kohteena ovat erityisesti ne ominaisuudet, joiden avulla teknologiat tarjoavat käyttökohteita esimerkiksi toimitusketjujen hallintaan, prosessien automatisointiin ja digitaalisen omaisuuden suojaamiseen.

Leng ym. (2021) kertovat siitä, miten Blockchainin keskeisimmät hyödyt teollisuusverkoissa liittyvät tiedon jäljitettävyyteen, läpinäkyvyyteen, tietoturvan parantamiseen sekä prosessien automatisointiin. Blockchain tarjoaa useita keskeisiä hyötyjä erityisesti valmistusjärjestelmien turvallisuuden, luotettavuuden ja tehokkuuden näkökulmasta. Blockchain mahdollistaa hajautetun ja läpinäkyvän tavan tallentaa tuotantoprosessiin liittyviä tapahtumia. Tämä tekee datan manipuloinnista erittäin vaikeaa ja vähentää kyberhyökkäysten riskiä, mikä on tärkeää, sillä nykyiset keskitetyt järjestelmät ovat usein haavoittuvia ja tarjoavat rajallisen jäljitettävyyden.

Lisäksi Blockchain parantaa datan läpinäkyvyyttä, koska kaikki tapahtumat verkossa kirjataan muuttumattomana, joka on kaikkien osapuolien tarkasteltavana. Älysovimukset mahdollistavat prosessien au-

tomatisoinnin ilman kolmansien osapuolien tarvetta. Hajautettu malli myös lisää joustavuutta ja vakautta järjestelmässä, koska järjestelmä ei ole riippuvainen yksittäisestä hallintapisteestä. (Leng ym. 2021.)

AlKhader ym. (2023) tutkimus näyttää Blockchain-tekniikka tarjoavan teollisuusverkoissa tietoturvaa ja mahdollisuuden luottamuksen rakentamiseen eri toimijoiden välillä. Blockchainin hajautettu rakenne takaa sen, että järjestelmässä tapahtuvat toiminnot ovat luotettavia ja muuttumattomia. Tämä on erityisen tärkeää digitaalisessa valmistuksessa ja laadunhallinnassa, joissa datan eheys ja läpinäkyvyys ovat keskeisiä tekijöitä tuotantoprosessien onnistumisessa.

NFT-tekniikka tarjoaa keinon hallita ja suojata digitaalisia omaisuuseriä teollisessa kontekstissa. NFT:n avulla voidaan todentaa digitaalisen sisällön, kuten suunnittelutiedostojen tai ohjelmistojen omistajuus ja aitous. Tämä tekee niistä hyödyllisen työkalun esimerkiksi aineettoman omaisuuden suojaamiseen, missä luotettava tapa osoittaa omistusoikeus voi olla ratkaiseva tekijä kilpailukykyyn ja innovaation kannalta. (AlKhader ym. 2023.)

Menon & Jain (2024) tutkimuksen mukaan Blockchain-tekniikkaa pidetään lupaavana ratkaisuna maatalous- ja elintarviketeollisuudessa toimitusketjujen läpinäkyvydessä. Tekniikka tarjoaa keinon seurata ja todentaa elintarvikkeiden alkuperä, käsittelyvaiheet ja toimitusprosessi luotettavasti ja läpinäkyvästi. Blockchainin rooli korostuu entisestään, kun sitä yhdistetään muihin teollisuus 4.0-tekniologioihin, kuten esineiden internetiin (IoT), RFID-tunnisteisiin tai big dataan. Näiden tekniologioiden avulla voidaan parantaa toimitusketjujen reagoitukykyä ja prosessien valvontaa.

Vaikka hyödyt ovat selkeitä, Blockchainin käyttöönottoon liittyy edelleen haasteita. Merkittäviä esteitä ovat maiden väliset erot digitaalisessa infrastruktuurissa, osaamistasossa ja tekniikan tuntemuksessa. Tämä voi johtaa siihen, että tekniikan kehitys ja soveltaminen keskittyy lähinnä kehittyneisiin maihin, vaikka suurimmat toimitusketjuongelmat ovat usein kehittyvissä maatalousvaltaisissa talouksissa. Lisäksi käytännön toteutusta hidastavat tekniset kysymykset, kuten datan standardointi, hallintamallit, skaalautuvuus ja investointikustannukset, jotka on ratkaistava ennen laajempaa käyttöönottoa. (Menon & Jain 2024.)

Munoz-Ausecha ym. (2023) tutkimukseen osallistujat olivat erityisesti tyytyväisiä turvallisempaan ja joustavampaan tapaan suorittaa transaktioita. Tutkimuksessa käy ilmi, että kolmansien osapuolien hyväksyntä omaisuutta siirtäessä, esimerkiksi RFID-tunnistettua sisältöä Blockchainin, älysopimusten, NFT:iden ja RFID-teknologiden avulla todettiin toimivana ja toisiaan tukevana kokonaisuutena.

Blockchain-teknologia mahdollistaa monipuolisten ja kompleksien sovellusten kehittämisen eri käyttötarkoituksiin. Se toimii tehokkaana vaihtoehtona perinteiselle keskitettyyn ohjelmistoarkkitehtuuriin perustuvalla järjestelmäkehityksellä erityisesti silloin, kun korostuvat järjestelmän läpinäkyvyys, muuttumattomuus ja tietoturva. Ethereum-verkko tarjoaa tässä yhteydessä erityisiä etuja, kuten laajan valikoiman valmiita kehitystyökaluja ja avoimen lähdekoodin kirjastoja, sekä mahdollisuuden rakentaa älysopimuksia tehokkaasti Solidity-ohjelmointikielellä. (Munoz-Ausecha ym. 2023.)

Lähteistä löytyi monipuolisesti erilaisia käyttötarkoituksia ja hyötyjä, joissa Blockchain ja NFT ovat parhaimmillaan teollisuusverkoissa. Lähteistä löytyi tietty toistuva teema, joissa kyseiset teknologiat olivat elementissään. Taulukon vasemmalla puolella on lähde ja oikealla puolella koonti avainsanoista, jotka ilmenivät lähteistä tutkimuskysymystä ajatellen.

Taulukossa 2 on koonti avainsanoista.

Leng ym. 2021	Tiedon jäljitettävyys, läpinäkyvyys, tietoturvan parantaminen, prosessien automatisointi älysopimusten avulla, hajautettu hallinta.
AlKhader ym. 2023	Tietoturva ja luotettavuus, läpinäkyvä ja eheä datan hallinta, luottamuksen rakentaminen eri toimijoiden välillä, digitaalisen omaisuuden hallinta ja suojaaminen.
Menon & Jain 2024	Läpinäkyvyys, luotettava ja varmennettava tiedon hallinta, tehostettu reagointikyky ja prosessien valvonta
Munoz-Ausecha ym. 2023	Turvallisemmat ja joustavammat transaktiot, kolmansien osapuolien hyväksyntä ja todentaminen, erilaisten teknologioiden yhteiskäyttö, läpinäkyvyys, muuttumattomuus, tietoturva

Blockchain- ja NFT-teknologiat tarjoavat teollisuusverkoissa useita merkittäviä hyötyjä ja käyttötarkoituksia. Blockchainin avulla voidaan parantaa järjestelmien läpinäkyvyyttä, tiedon jäljitettävyyttä ja tietoturvaa. Sen hajautettu rakenne mahdollistaa muuttumattoman ja luotettavan datan hallinnan, mikä tukee tehokasta prosessien valvontaa ja luottamuksen rakentamista eri toimijoiden välillä.

Älysopimusten avulla voidaan automaattisesti toteuttaa sopimuksia ilman välikäsiä, mikä tehostaa toimintaa ja vähentää inhimillisiä virheitä. Blockchain toimii erityisen hyvin yhdessä muiden Industry

4.0-tekniologioiden, kuten IoT:n, RFID:n ja big datan kanssa, mahdollistaen reaaliaikaisen ja älykkään ohjauksen monimutkaisissa toimitusketjuissa.

NFT-tekniologia puolestaan mahdollistaa digitaalisen omaisuuden hallinnan ja aitouden todentamisen. Sen avulla voidaan suojata aineetonta omaisuutta, kuten suunnittelutiedostoja tai ohjelmistoja, ja varmistaa omistajuus selkeästi ja luotettavasti. Kokonaisuutena tarkasteltuna Blockchain ja NFT tarjoavat joustavan, turvallisen ja läpinäkyvän ratkaisun teollisuusverkkojen hallintaan.

#### **4.4 Mitkä ovat Blockchain- ja NFT-tekniologian tulevaisuuden näkymät teollisuusverkoissa?**

Tämä kysymys on hieman hankalampi lähteä rajaamaan lähteistä. Lähteistä esille saatu tieto ei vastaa täydellisesti siihen mihin suuntaan tekniologia on menossa, koska kyseiset tekniologiat teollisuuden piirissä ovat vielä osittain uusia. Tähän kysymykseen toki löytyi lähteistä mukavasti erilaisia kokeiluja, joita oli tehty blockchain:lle ja NFT:ille.

Agarwal & Alathur (2023) tutkimuksessa kerrotaan metaversumista eli virtuaalisesta maailmasta, jossa ihmiset voivat olla vuorovaikutuksessa toistensa ja digitaalisten elementtien kanssa. Tämä kehityksen suunta voi olla merkittävässä roolissa Industry 5.0:ssa, koska se korostaa ihmisen ja tekniologian välistä yhteistyötä. Päättäjien näkökulmasta metaversumin laajeneva käyttö edellyttää uusien säädösten ja standardien luomista muun muassa yksityisyyden suojan, tietoturvan, immateriaalioikeuksien ja ympäristövaikutusten osalta. Tämä vaatii tiivistä yhteistyötä teollisuuden asiantuntijoiden ja lainsäätäjien välillä. Käytännön toimijoille metaversumi tarjoaa mahdollisuuksia lisätä tuottavuutta ja innovatiivisuutta mahdollistamalla paikkariippumattoman ja ajasta riippumattoman yhteistyön. Sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi virtuaalitapahtumien järjestämisessä sekä asiakaskokemuksen parantamisessa.

Lisäksi metaversumi tukee digitaalisten kaksosten rakentamista eli fyysisten objektien tai järjestelmien digitaalisia malleja, joita voidaan seurata ja analysoida reaaliaikaisesti ennakoivaa huoltoa ja tehokkuuden parantamista varten. Yhteenvetona metaversumi voi mullistaa Industry 5.0:n toimintatapoja edistämällä yhteistyötä, viestintää, koulutusta ja innovaatiota samalla, kun se alentaa kustannuksia ja parantaa tehokkuutta. Toisaalta sen käyttöönotto tuo mukanaan myös uusia haasteita, kuten tietosuojan, kyberturvallisuuden ja etiikkaan liittyviä kysymyksiä. (Agarwal & Alathur 2023.)

Wang ym. (2023) käsittelevät Blockchain-tekniologian käyttöönottoa toimitusketjuissa. Lähteestä käy ilmi, että Blockchain-tekniologian käyttöönoton esteitä ovat tallennuskapasiteetin rajoitteet, taloudelli-

sien kannustimien puutteet, korkeat integraatiokustannukset, korkea energian kulutus sekä datan jakamisen sääntelyn puute. Lähteestä löytyy myös näihin mahdollisia ratkaisuja, kuten pilottihankkeet ja sääntelyn kehittäminen. Lähteen mukaan yritysten tulisi kehittää valmiuksia erityisesti integraatioon ja datan hallinnan osalta. Lähteen perusteella kyseiset ongelmat hidastavat Blockchain-tekniikan käyttöönottoa toimitusketjuissa teollisuus 5.0:ssa.

De Giovanni (2023) tutkii metaversumitekniikan roolia industry 5.0 siirtymässä. Lähteessä käsitellään Blockchainia ja NFT:tä osana metaversumitekniikkaa. Lähteestä käy ilmi Blockchain-tekniikan kuluttavan valtavan määrän energiaa, mutta auttaa toimitusketjujen läpinäkyvyydessä ja niiden jäljitettävyydessä. Lähteestä löytyy myös taloudellinen näkökulma, josta käy ilmi metaversumin mahdollistavan digitaalisten tuotteiden uudenlaiset markkinat NFT:n muodossa. Yritykset voivat luoda uusia liiketoimintamalleja, testata tuotteita virtuaalisesti ja vähentää varastointia ja ylikapasiteettia. Metaversumin mahdollisuus luoda virtuaalidollisuus auttaa tuotekehityksessä.

Naguji ym. (2024) esittelevät tutkimuksessaan lohkoketjuun ja tekoälyyn perustuvan maarekisterijärjestelmän, joka on suunniteltu tukemaan maataloutta ja Industry 5.0:n vaatimuksia. Järjestelmä yhdistää tekoälyalgoritmit epäluotettavan datan suodattamiseen ja lohkoketjun turvalliseen tiedonhallintaan, jolloin maarekisterit voidaan tallentaa läpinäkyvästi ja muuttumattomasti ilman välikäsiä. Lisäksi tiedot viedään hajautettuun IPFS-järjestelmään, joka mahdollistaa tehokkaan ja pysyvän datan säilytyksen. Tämä lähestymistapa osoittaa, miten lohkoketjutekniikka voi tehostaa teollisia tietojärjestelmiä, parantaa luotettavuutta ja edistää digitalisaatiota.

Useat lähteet korostavat Blockchainin roolia toimitusketjujen läpinäkyvyyden, jäljitettävyyden ja tietoturvan parantamisessa. Älysovimukset ja hajautetut verkot voivat vähentää välikäsien tarvetta ja korruptionriskiä sekä mahdollistaa luotettavamman tiedonhallinnan esimerkiksi maarekistereissä. Samalla kuitenkin Blockchainin käyttö kuluttaa valtavasti energiaa, mikä tekee siitä ympäristön kannalta haastavan tekniikan. Energiakulutukseen liittyvät ongelmat ovat toistuva huolenaihe kaikissa tarkasteluissa lähteissä. Lähteissä myös mainitaan integraation tärkeys, jossa painotettiin kehitystä kyseisten tekniikoiden integraatiossa.

NFT-tekniikan kautta avautuu mahdollisuus täysin uudenlaisten digitaalisten markkinoiden syntymiseen. Metaversumin kaltaisissa ympäristöissä yritykset voivat myydä tuotteita virtuaalisesti, testata konsepteja digitaalisessa muodossa ja vähentää fyysisen varastoinnin tarvetta. Tämä mahdollistaa

myös materiaalien ja resurssien säästön sekä tuotantoprosessien tehostamisen. Näin NFT:t tukevat myös digitalisaation tavoitteita, kuten resurssitehokkuutta ja tuotteiden kehittämistä.

Kollektiivisesti lähteet osoittavat, että Blockchain ja NFT:t voivat olla keskeisiä asioita Industry 5.0:n mukaisessa siirtymässä, mutta niiden tulevaisuus teollisuusverkoissa riippuu kyvystä ratkaista teknologisten hyötyjen ja haittojen välinen tasapaino. Teknologioiden kehittämisessä tulisi huomioida ympäristölliset, sosiaaliset ja hallinnolliset näkökulmat. Näin varmistetaan, että Blockchain- ja NFT-tekniikat tukevat teollisuuden kehittymistä älykkääksi, osallistavaksi ja kestäväksi tulevaisuutta edistäväksi kokonaisuudeksi.

## 5 YHTEENVETO LÄHTEISTÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, millä tavoin Blockchain- ja NFT-teknologiat ovat vaikuttaneet teollisuusverkkoihin, millä teollisuuden aloilla niitä hyödynnetään, mitkä ovat niiden keskeisimmät käyttötarkoitukset ja hyödyt sekä millaisia tulevaisuuden näkymiä teknologioihin liittyy. Kevennetyn systemaattisen katsauksen perusteella voidaan todeta, että Blockchain- ja NFT-teknologiat ovat ottaneet yhä keskeisemmän roolin modernissa teollisuudessa.

Blockchain- ja NFT-teknologioiden vaikutukset teollisuusverkkoihin näkyvät erityisesti turvallisuudessa, kustannustehokkuudessa, läpinäkyvyydessä, tiedon muuttumattomuutena ja järjestelmien yhteensopivuuden edistäjänä. Älysovimusten ja hajautettujen rakenteiden avulla on voitu vähentää kolmansien osapuolien tarvetta ja samalla lisätä prosessien automaatiota ja luotettavuutta. NFT-teknologia puolestaan tuo uudenlaisen tavan hallita ja todentaa digitaalista omaisuutta. Blockchain ja NFT ovat myös keskeisiä teknologioita esimerkiksi Industry 4.0:ssa ja Industry 5.0:ssa.

Teknologioita hyödynnetään jo monilla eri teollisuudenaloilla, kuten valmistavassa teollisuudessa, autoteollisuudessa, öljy- ja kaasuteollisuudessa, lääke- ja kemianteollisuudessa, infrastruktuuri- ja kaupunkisuunnittelussa sekä maatalous- ja elintarviketeollisuudessa. Useat tutkimukset osoittavat, että teknologiat ovat sovellettavissa lähes kaikille toimialoille, joissa on tarvetta esimerkiksi tuotannon, toimitusketjujen tai omaisuuden hallintaan.

Kyseiset teknologia tarjoavat käyttötarkoituksia ja hyötyjä, kuten tuotannon jäljitettävyyden, datan muuttumattomuutta, turvallisuuden parantamista, prosessien automatisointia sekä digitaalisten omaisuuden autentikoinnin ja suojan. Yhdessä muiden Industry 4.0-teknologioiden kanssa, kuten IoT, big data ja RFID, ne mahdollistavat reaaliaikaisen ohjauksen ja läpinäkyvän tiedonhallinnan teollisuusverkoissa.

Tulevaisuudennäkymät teollisuusverkoissa näyttäytyvät lupaavina mutta myös haasteellisina.

Blockchainin ja NFT:n rooli korostuu erityisesti Industry 5.0-siirtymässä, jossa painotetaan kestävyyttä, ihmiskeskeisyyttä ja älykkäitä ratkaisuja. Samalla teknologioihin liittyy ratkaistavia haasteita, kuten korkea energiankulutus, datan hallinnan sääntely ja integraatiokustannukset. Metaversumi ja NFT:t avaavat kuitenkin mahdollisuuksia uusien liiketoimintamallien, virtuaalisen tuotekehityksen ja resurssitehokkuuden kehittämiseen.

Kokonaisuutena tarkasteltuna Blockchain- ja NFT-teknologiat eivät ole enää pelkästään lupaavia innovaatioita, vaan ne muodostavat jo nyt konkreettisia ja monipuolisia ratkaisuja teollisuusverkkojen kehittämisessä. Niiden merkitys kasvaa edelleen tulevaisuudessa, mikäli teknologioiden käyttöönotossa onnistutaan tasapainottamaan teknologiset, taloudelliset ja ympäristölliset näkökulmat.

## 6 POHDINTA

Lähdevalinnat tässä tutkielmassa on rajattu hyvin käyttämällä rajausmääritelmiä, joiden avulla haku voidaan replikoida hakukriteerien perusteella. Haku suoritettiin Centrian omassa verkkokirjastossa, jossa voidaan rajata haku vertaisarvioituihin, kokotekstin ja osuvuuden perusteella löytyviin teoksiin. Näin varmistettiin hakutulosten olevan akateemisesti hyväksytyjä teoksia ja mahdollisimman hyvin vastaamaan hakukysymyksiä. Hakukriteerit sisälsivät vuosien 2021–2025 aikana julkaistut tutkimukset varmistaakseni lähteiden olevan ajantasaisia. Myös hakuprosessissa kävin läpi teksteistä tiivistelmiä varmistaakseni lähteiden olevan ajantasaisia. Yksi lähde jäi pois, koska se sisälsi tutkimustuloksia vuosien 2015–2017 ajalta. Haussa myös jätettiin pois ja valittiin seuraava lähde, jos lähde oli jo aiemmin tullut eri hakusanalla vastaan. Kokonaisuudessaan lähteet olivat laadukkaita ja asiat, joita haettiin tutkimuskysymysten perusteella, kävivät ilmi useammasta lähteestä samassa kontekstissa.

Haun rajoittavana tekijänä on ajankäyttö ja opinnäytetyön laajuus. Haku rajoitettiin kahteen ensimmäiseen lähteeseen, jotka hakukriteereillä valittiin. Kaikkiaan tutkimuslähteitä on kaksitoista kappaletta. Kokonaisuudessaan hakuja oli yli 27 000 kappaletta. Kaikkien hakutulosten läpikäyminen tässä opinnäytetyössä olisi ollut liian suuri työ. Tämän takia varteenotettavia lähteitä jäi käsittelemättä ja niistä saatu tieto jäi käymättä läpi. Hakuprosessissa valituista lähteistä kahta ei käytetty tutkimustulosten avaamisessa. Niiden sisältö ei vastannut täysin sitä mitä haettiin. Yhdessä lähteessä käsiteltiin tarkemmin pilvipalveluita, kun taas opinnäytetyö keskittyy enemmän Blockchain- ja NFT-teknologiaan. Toisesta lähteestä en ottanut materiaalia, koska sen näkökulma ei koskenut teollisuutta vaan enemmän kuluttajapuolta.

Tulokset hakukysymyksiin, joihin halusin vastauksen, yllättivät minut ja sainkin niistä näkökulmaa uudella tavalla käsiteltäviä teknologioita kohtaan. Esimerkiksi en ole aikaisemmin ajatellut kuinka paljon Blockchainin PoW konsensusmekanismi kuluttaa energiaa johtuen siitä, että kyseinen mekanismi varmistaa kaikkien osallistujien olevan samaa mieltä transaktiosta. Tämä kyseinen aihe tuli myös tässä opinnäytetyössä uutena minulle. Näillä teknologioilla on suuri määrä erilaisia hyötyjä, joita voidaan hyödyntää parantamaan tietoturvaa, luomaan läpinäkyvyyttä esimerkiksi tuotantoketjuissa ja hallinnoimaan digitaalista omaisuutta.

Opinnäytetyöprosessissa opin valtavan määrän uutta kyseisistä teknologioista. Alkutiedot itselläni perustuivat hyvin vähäiseen ymmärrykseen, miten teknologiat toimivat, mutta niiden läpikäynti ja lähteistä asioiden etsiminen on luonut vankan pohjan itselleni siitä, miten teknologiat toimivat. Opin samalla tiedonhakutaitoja ja metodeja, miten opinnäytetyö kannattaisi tehdä järjestelmällisesti. Opinnäytetyö on myös vahvistanut sitä, että jonain päivänä haluan työskennellä näiden teknologioiden parissa. Omaan nyt ymmärryksen, miten Blockchain ja NFT vaikuttavat teollisuusverkkoihin.

## LÄHTEET

- Agarwal, A. & Alathur, S. 2023. Metaverse revolution and the digital transformation: Intersectional analysis of Industry 5.0. *Transforming government*, 17(4), 688-707. Saatavissa: [doi:10.1108/TG-03-2023-0036](https://doi.org/10.1108/TG-03-2023-0036). Viitattu 01.04.2025
- AlKhader, W., Jayaraman, R., Salah, K., Sleptchenko, A., Antony, J. & Omar, M. 2023. Leveraging blockchain and NFTs for quality 4.0 implementation in digital manufacturing. *Journal of manufacturing technology management*, 34(7), 1208-1234. Saatavissa: [doi:10.1108/JMTM-05-2023-0172](https://doi.org/10.1108/JMTM-05-2023-0172). Viitattu 01.04.2025
- Daniel, E. & Tschorsch, F. 2022. IPFS and Friends: A Qualitative Comparison of Next Generation Peer-to-Peer Data Networks. *IEEE Communications surveys and tutorials*, 24(1), 31-52. Saatavissa: [doi:10.1109/COMST.2022.3143147](https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3143147). Viitattu 25.3.2025.
- De Giovanni, P. 2023. Sustainability of the Metaverse: A Transition to Industry 5.0. *Sustainability*, 15(7), 6079. Saatavissa: [doi:10.3390/su15076079](https://doi.org/10.3390/su15076079). Viitattu 01.04.2025
- Di Francesco Maesa, D. & Mori, P. 2020. Blockchain 3.0 applications survey. *Journal of parallel and distributed computing*, 138, 99-114. Saatavissa: [doi:10.1016/j.jpdc.2019.12.019](https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2019.12.019). Viitattu 24.3.2025.
- Farshidi, S., Jansen, S., Espana, S. & Verkleij, J. 2020. Decision Support for Blockchain Platform Selection: Three Industry Case Studies. *IEEE transactions on engineering management*, 67(4), 1109-1128. Saatavissa: [doi:10.1109/TEM.2019.2956897](https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2956897). Viitattu 26.3.2025.
- Hasan, H. R., Salah, K., Battah, A., Madine, M., Yaqoob, I., Jayaraman, R. & Omar, M. 2022. Incorporating Registration, Reputation, and Incentivization Into the NFT Ecosystem. *IEEE access*, 10, 76416-76433. Saatavissa: [doi:10.1109/ACCESS.2022.3192388](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3192388). Viitattu 24.3.2025.
- Hussein, Z., Salama, M. A. & El-Rahman, S. A. 2023. Evolution of blockchain consensus algorithms: A review on the latest milestones of blockchain consensus algorithms. *Cybersecurity (Singapore)*, 6(1), 30-22. Saatavissa: [doi:10.1186/s42400-023-00163-y](https://doi.org/10.1186/s42400-023-00163-y). Viitattu 25.3.2025.
- Jefroy, N., Azarian, M. & Yu, H. 2022. Moving from industry 4.0 to industry 5.0: What are the implications for smart logistics? *Logistics*, 6(2), 1-27. Saatavissa: [doi:10.3390/logistics6020026](https://doi.org/10.3390/logistics6020026). Viitattu 09.04.2025.
- Leng, J., Ye, S., Zhou, M., Zhao, J. L., Liu, Q., Guo, W., . . . Fu, L. 2021. Blockchain-Secured Smart Manufacturing in Industry 4.0: A Survey. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Systems*, 51(1), 237-252. Saatavissa: [doi:10.1109/TSMC.2020.3040789](https://doi.org/10.1109/TSMC.2020.3040789). Viitattu 01.04.2025
- Liu, H., Luo, X., Liu, H. & Xia, X. 2021. *Merkle Tree: A Fundamental Component of Blockchains*. Saatavissa: [doi:10.1109/EIECS53707.2021.9588047](https://doi.org/10.1109/EIECS53707.2021.9588047). Viitattu 25.3.2025.

- Menon, S. & Jain, K. 2024. Blockchain Technology for Transparency in Agri-Food Supply Chain: Use Cases, Limitations, and Future Directions. *IEEE transactions on engineering management*, 71, 106-120. Saatavissa: [doi:10.1109/TEM.2021.3110903](https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3110903). Viitattu 01.04.2025
- Munoz-Ausecha, C., Gómez, J. E. G., Ruiz-Rosero, J. & Ramirez-Gonzalez, G. 2023. Asset Ownership Transfer and Inventory Using RFID UHF TAGS and Ethereum Blockchain NFTs. *Electronics (Basel)*, 12(6), p. 1497. Saatavissa: [doi:10.3390/electronics12061497](https://doi.org/10.3390/electronics12061497). Viitattu 01.04.2025
- Naguji, F., Kumar Jadav, N., Tanwar, S., Pau, G., Sharma, G., Alqahtani, F. & Tolba, A. 2024. Green-Land: A Secure Land Registration Scheme for Blockchain and AI-Enabled Agriculture Industry 5.0. *IEEE access*, 12, 120994-121009. Saatavissa: [doi:10.1109/ACCESS.2024.3451627](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3451627). Viitattu 01.04.2025
- Rahman, A., Islam, M. J., Band, S. S., Muhammad, G., Hasan, K. & Tiwari, P. 2023. Towards a blockchain-SDN-based secure architecture for cloud computing in smart industrial IoT. *Digital communications and networks*, 9(2), 411-421. Saatavissa: [doi:10.1016/j.dcan.2022.11.003](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.11.003). Viitattu 01.04.2025
- Ramadoss, R. 2022. Blockchain technology: An overview. *IEEE potentials*, 41(6), 6-12. Saatavissa: [doi:10.1109/MPOT.2022.3208395](https://doi.org/10.1109/MPOT.2022.3208395) Viitattu 26.3.2025.
- Razi, Q., Devrani, A., Abhyankar, H., Chalapathi, G. S. S., Hassija, V. & Guizani, M. 2024. Non-Fungible Tokens (NFTs)-Survey of Current Applications, Evolution, and Future Directions. *IEEE open journal of the Communications Society*, 5, 2765-2791. Saatavissa: [doi:10.1109/OJCOMS.2023.3343926](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2023.3343926). Viitattu 26.3.2025.
- Teng, Y., Shang, K., Wang, H., Kuo, S. & Lu, C. 2025. The implementation of blockchain adoption in China's manufacturing industry: The technology organization environment (TOE) method. *Humanities & social sciences communications*, 12(1), 376-11. Saatavissa: [doi:10.1057/s41599-025-04570-z](https://doi.org/10.1057/s41599-025-04570-z). Viitattu 01.04.2025
- Vadapalli, R. 2020. Blockchain Fundamentals Textbook. Edition 1.1. UAE. Blockchainprep. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/345045424\\_BLOCKCHAIN\\_FUNDAMENTALS\\_TEXT\\_BOOK\\_Fundamentals\\_of\\_Blockchain/](https://www.researchgate.net/publication/345045424_BLOCKCHAIN_FUNDAMENTALS_TEXT_BOOK_Fundamentals_of_Blockchain/) Viitattu 26.3.2025.
- Verma, A., Bhattacharya, P., Madhani, N., Trivedi, C., Bhushan, B., Tanwar, S., . . . Sharma, R. 2022. Blockchain for Industry 5.0: Vision, Opportunities, Key Enablers, and Future Directions. *IEEE access*, 10, 69160-69199. Saatavissa: [doi:10.1109/ACCESS.2022.3186892](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186892). Viitattu 09.04.2025.
- Vyas, S. & Gupta, S. 2022. *Blockchain and Industry 4.0 – A study*. Elsevier Ltd. Saatavissa: [10.1016/j.matpr.2022.03.544](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.544). Viitattu 09.04.2025.
- Wang, Z., Chen, Z., Xiao, L., Su, Q., Govindan, K. & Skibniewski, M. J. 2023. Blockchain adoption in sustainable supply chains for Industry 5.0: A multistakeholder perspective. *Journal of innovation & knowledge*, 8(4), 100425. Saatavissa: [doi:10.1016/j.jik.2023.100425](https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100425). Viitattu 01.04.2025
- Wu, C., Liu, C. & Weng, T. 2023. Critical Factors and Trends in NFT Technology Innovations. *Sustainability*, 15(9), 7573. Saatavissa: [doi:10.3390/su15097573](https://doi.org/10.3390/su15097573). Viitattu 01.04.2025

Xiong, H., Chen, M., Wu, C., Zhao, Y. & Yi, W. 2022. Research on Progress of Blockchain Consensus Algorithm: A Review on Recent Progress of Blockchain Consensus Algorithms. *Future internet*, 14(2), 47. Saatavissa: [doi:10.3390/fi14020047](https://doi.org/10.3390/fi14020047). Viitattu 25.3.2025.