

Meri Lehtisaari

TEOLLINEN INTERNET: Langaton tiedonsiirto ja käytännön esimerkkejä

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Valkama
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Meri Lehtisaari: Teollinen internet: Langaton tiedonsiirto ja käytännön esimerkkejä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Huhtikuu 2023

Digitalisaation voimakas kasvu sekä teollisuuden kokema murros ovat herättäneet teollisuuden yritykset. Internetin tarjoamat hyödyt on huomioitu myös teollisuuden yrityksissä yhä enenevässä määrin. Yritykset haluavat kerätä dataa prosesseistaan ja hyödyntää sitä toimintansa kehittämisessä. Tämän takia tuotanto- sekä toimintatapoja on jo monessa yrityksessä lähdetty uudistamaan. Uudistuksilla tavoitellaan digitalisaation tuomia hyötyjä, kuten prosessien optimointia, ennustettavuutta ja tuottavuuden kasvua.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on selventää teollisen internetin (engl. Industrial Internet) käsitteistöä. Lisäksi työn tavoitteena on tarkastella teollisen internetin yleistä toimintaperiaatetta sekä sen mahdollisia sovelluskohteita teollisuudessa. Työssä teollisen internetin rakennetta käydään läpi teknologiapinon taso kerrallaan. Työssä tutustutaan myös teollisen internetin sovelluksissa hyödynnettäviin eri kattavuusalueiden langattomiin verkkoteknologioihin ja vertaillaan niiden ominaisuuksia.

Työ on luonteeltaan kirjallisuuskatsaus ja aineistona on käytetty pääosin tieteellisiä artikkeleita, yritysten verkkosivuja ja tuotedokumentteja sekä muita tekstilähteitä. Tutkimusmenetelmä on kuvailevan kirjallisuuskatsauksen ja systemaattisen kirjallisuuskatsauksen prosessimallin yhdistelmä suppeassa koossa.

Etenkin teollisuuden suuret yritykset, kuten esimerkiksi ABB, Fastems ja Sandvik ovat panostaneet uusien teknologioiden suunnitteluun, hankintaan ja käyttöönottoon. Käyttökohteet vaihtelevat yrityksestä riippuen ja siten myös tarvittavat tiedonsiirtokapasiteetit, -nopeudet ja -etäisyydet vaihtelevat. Näin ollen erilaisille langattomille tiedonsiirtoteknologioille on tarvetta. Työssä tarkastellaan esimerkiksi lyhyen kantaman RFID-tunnisteita, joita voidaan hyödyntää halvan kappalehintansa vuoksi myös yksittäisissä edullisissa tuotteissa. Yksilöivien tunnisteiden avulla voidaan parantaa muun muassa tuotteen jäljitettävyyttä. Katsauksen pohjalta voidaan todeta, että teollinen internet parantaa useimmissa tapauksissa työn tuottavuutta, luotettavuutta sekä mukautuvuutta ja on sovelluskelpoinen työkalu nykyaikaisessa teollisuudessa. Toisaalta digitaalisten ratkaisujen lisääntyminen voi tuoda mukanaan uudenlaisia haasteita. Työssä tarkastellaan myös teollisen internetin käyttöön liittyviä yleisimpiä kompastuskiviä, kuten tietoturvaan, tuotteiden integraatioon sekä kerätyn datan analysointiin liittyviä haasteita.

Avainsanat: Industrial Internet, Internet of Things, Industrial internet of Things, wireless communication

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämän työn aihe oli helppo valita, sillä teollinen internet on noussut käsitteenä useasti esiin suorittamillani kursseilla. Aihe on mielestäni mielenkiintoinen etenkin teollisen internetin sovelluskohteiden vuoksi. Halusin perehtyä aiheeseen syvemmin, sillä työn aihe tukee myös vapaavalintaisten opintojeni teemoja.

Haluan kiittää kandidaatintyöni ohjaajaa Mikko Valkamaa työn ohjauksesta sekä hyvien pointtien esittämisestä. Haluan myös kiittää kaikkia muita, jotka ovat tukeneet sekä kannustaneet minua työni aikana.

Tampereella, 22.4.2023

Meri Lehtisaari

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEOLLINEN INTERNET	2
2.1 Sensorit ja datankeruu	4
2.2 Tietoliikenne.....	5
2.3 Tietovarastot ja analytiikka	5
2.4 Sovellus ja digitaalinen palvelu	7
3. TEOLLISEN INTERNETIN LANGATTOMAT TIEDONSIIRTOTEKNOLOGIAT	9
3.1 Langattoman tiedonsiirron perusteet	9
3.2 RFID	11
3.3 Lyhyt kantama.....	12
3.3.1 Bluetooth Low Energy	12
3.3.2 ZigBee	13
3.3.3 Vertailu	14
3.4 Keskipitkä kantama	14
3.4.1 Wi-Fi	14
3.4.2 DASH7	15
3.4.3 Vertailu	15
3.5 Pitkä kantama	15
3.5.1 Mobiiliverkot.....	15
3.5.2 LoRa	17
3.5.3 Vertailu	18
4. HYÖDYNTÄMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ	19
4.1 Tapaus Fastems ja Norbert Kempf CNC-Teknik	19
4.2 Tapaus Sandvik	20
4.3 Tapaus ABB.....	20
5. YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

5G	Viidennen sukupolven mobiiliverkko (engl. Fifth Generation)
AP	Tukiasema (engl. Access Point)
API	Ohjelmarajapinta (engl. Application Programming Interface)
BLE	Bluetoothin energiatehokkaampi versio (engl. Bluetooth Low Energy)
FFD	Täysitoiminen toimilaite (engl. Full-Function Device)
FMS	Joustava tuotantojärjestelmä (engl. Flexible Manufacturing System)
ID	Tunniste (engl. Identifier)
IEEE	Kansainvälinen tekniikan alan järjestö (engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IoT	Esineiden internet (engl. Internet of Things)
ISI	Symbolien välinen häiriö (engl. Intersybol Interference)
ISM	Radiotaajuusalue (engl. Industrial, Scientific and Medical)
ISO	Kansainvälinen standardoimisjärjestö (engl. International Organization for Standardization)
LAN/WLAN	Lähiverkko (engl. Local Area Network/ Wireless LAN)
LoRa	Pitkän kantaman langaton tiedonsiirtotekniikka (engl. Long Range)
LOS	Suora näköyhteys (engl. Line of Sight)
MMS	Fastemsin tuotannonohjausjärjestelmä (engl. Manufacturing Management System)
NoSQL	Tietokanta (engl. Not only Structured Query Language)
PAN/WPAN	Likiverkko (engl. Personal Area Network/ Wireless PAN)
RFD	Rajoitettutoiminen toimilaite (engl. Reduced-Function Device)
RFID	Lyhyen kantaman langaton tiedonsiirtoteknologia (engl. Radio Frequency Identification)
SIG	Bluetooth standardeja valvova standardointijärjestö (engl. Bluetooth Special Interest Group)
SNR	Signaali-kohinasuhde (engl. Signal to Noise Ratio)
SQL	Standardoitu kyselykieli/tietokanta (engl. Structured Query Language)
VPN	Virtuaalinen erillisverkko (engl. Virtual Private Network)
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
WAN/WWAN	Suuralueverkko (engl. Wide Area Network/ Wireless WAN)
Hz	Taajuuden yksikkö

1. JOHDANTO

Tulevaisuustalo Sitra on laatinut vuonna 2020 listan megatrendejä, eli useista ilmiöistä koostuvia yleisiä kehityssuuntia tai laajoja muutoksen kaaria [1]. Megatrendit ovat siis globaaleja ilmiöitä, joilla odotetaan olevan pitkäkestoisia ja merkittäviä vaikutuksia yhteiskuntaan. Sitran julkaisemissa megatrendikorteissa, kuten myös Sijoittaja.fi:n vuonna 2021 listaamissa megatrendeissa oli useita teknologian kehitykseen liittyviä samankaltaisuuksia. Molemmissa listauksissa oli tavalla tai toisella mainittu muun muassa tuotantotapojen ja toimintamallien muutos, etänä tapahtuva vuorovaikutus sekä esineiden internet. [2], [3]

Teollisuus on ollut muutaman viime vuosikymmenen ajan suuressa murroksessa ja samanlaisen kehityssuunnan uskotaan jatkuvan vielä pitkään. Kun teollisen internetin mahdollistamat hyödyt ovat nousseet yritysten tietoisuuteen, on tuotanto- sekä toimintatapoja ryhdytty uudistamaan. Yhä useampi teollisuuden koneista ja laitteista onkin jo jollakin tapaa yhteydessä toisiin laitteisiin ja joko jakaa tuottamaansa- tai hyödyntää muilta saamaansa dataa. Riippumatta siitä, onko laite langallisesti vai langattomasti yhdistetty, osapuolet voivat silti kommunikoida keskenään verkon sallimissa rajoissa. Sovelluskohde tosin voi määritellä sopivan tavan liittyä verkkoon. Esimerkiksi mobiliteettia vaativa laite on järkevää yhdistää verkkoon langattomasti.

Tässä työssä perehdytään teollisen internetin käsitteistöön ja toimintaperiaatteisiin. Toisessa luvussa selvitetään yleisellä tasolla, mitä teollinen internet tarkoittaa ja millaisia mittalaitteita, tietoliikenneverkkoja, järjestelmiä sekä sovelluksia sen toteuttamiseen liittyy. Lisäksi luvussa tarkastellaan, millaisia teollisen internetin käyttöön liittyviä haasteita eri tasoilla voidaan kohdata. Tämän jälkeen kolmannessa luvussa vastataan kysymykseen, millaisia langattomia verkkoja voidaan hyödyntää teollisessa internetissä. Luvussa käydään ensin läpi langattoman tietoliikenteen perusteita ja sen jälkeen esitellään eri kantaman langattomia verkkoteknologioita ja vertaillaan niiden ominaisuuksia. Työssä perehdytään muun muassa RFID-, Bluetooth-, Wi-Fi- sekä mobiiliverkkoteknologioihin. Neljännessä luvussa perehdytään syvemmin langattomia teknologioita hyödyntäviin teollisen internetin sovelluskohteisiin. Luvussa esitellään kolme eri sovelluskohdetta, jotka hyödyntävät eri tiedonsiirtonopeuksia sekä kantamia. Lopuksi esitetään yhteenveto, jossa kootaan työn keskeisimmät kohdat.

2. TEOLLINEN INTERNET

Tietoliikenteen ja tietotekniikan keskusliitto FiCom ry:n toteuttaman tutkimuksen mukaan vuonna 2021 noin 40 prosentilla vähintään kymmenen henkilöä työllistävästä suomalaisista yrityksistä oli käytössä internetin välityksellä hallittavia laitteita tai järjestelmiä. FiComin toteuttamassa esineiden internetin käytön vertailussa teollisuuden yrityksillä käyttö oli yksi korkeimmista. Teollisuuden yritysten hyödyntämä esineiden internet oli tässä tutkimuksessa rinnastettu teolliseksi internetiksi. [4] Käyttötarkoituksista merkittävin oli toimitilojen turvallisuuden valvonta 32 prosentin osuudellaan, mutta teollisuudessa tämän osa-alueen osuus lienee samaa tasoa kuin esimerkiksi kuntoon perustuvan huollon tai tuotantoprosessin osuudet. [5] Toimitilojen turvallisuuden valvonnan osuus oli luultavasti siitä syystä suuri, että sitä voidaan hyödyntää yrityksissä toimialasta riippumatta.

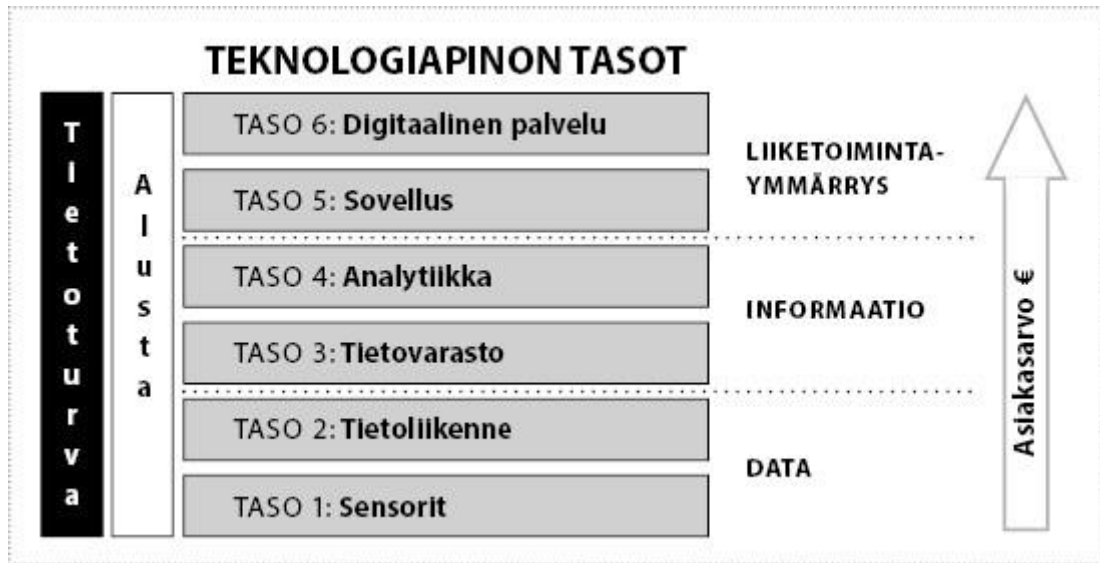
Teollisen internetin avulla pyritään yleensä edistämään toiminnan tehokkuuden kasvua. Esimerkiksi laitteiden käytön optimointi sekä ennakoiva huoltotarpeiden kartoitus tuovat pitkällä aikavälillä merkittäviä säästöjä. Kuten tietoliikenne- ja elektroniikkateollisuusyrittäjä Ciscon artikkelissakin mainitaan, pyritään teollisen internetin avulla edistämään myös esimerkiksi työntekijöiden turvallisuutta ja tuotannon laatuvaatimuksissa pysymistä [6].

Oman prosessin tehostamisen ohella yritys voi hyödyntää teollista internetiä niin sanottujen älytuotteiden kehittämiseen. Älytuote tarkoittaa tuotetta, jossa on dataa tuottavia antureita. Data voi olla joko tuotetoimittajan, asiakkaan tai molempien käytettävissä. Yritys voi hyödyntää kerättyä dataa sekä tuotekehityksessä, että asiakasymmärryksensä parantamisessa ja asiakas puolestaan voi hyödyntää saamaansa dataa tilannekuvauksen saamiseen tai tuotteen käytön optimoimiseen. [6]

Lähestyttäessä asiakasrajapintaa voidaan kehittää palvelukeskeistä tarjoamaa, eli teollisen internetin avulla voidaan kehittää palveluja, joista asiakas hyötyy ja jotka edistävät yrityksen liiketoimintaa [7]. Kaikille yrityksille nämä kaksi viimeistä palvelullistamisen vaihetta eivät välttämättä realisoidu tuotteen laadusta riippuen. Yrityksen, joka valmistaa esimerkiksi tavallisia muttereita, on tuskin järkevää liittää tuotteisiinsa mittausdataa tuottavia antureita.

J. Collinin sekä A. Saarelaisen teollista internetiä käsittelevässä kirjassa ”Teollinen internet” esitettiin havainnollistava kuva siitä, millaisista osakokonaisuuksista teollinen

internet koostuu. Teknologiaapino on jaettu tietoturvan ja alustan lisäksi kuuteen eri tasoon, jotka kuvaavat kaikkea sitä, mitä teollisen internetin muodostamiseen tarvitaan.



Kuva 1: Teollisen internetin teknologiapinon tasot [8]

Eri tasojen saumaton yhteistyö on välttämättömyys koko ketjun sujuvalle toiminnalle. Alusta nivoo teknologiapinon tasot toisiinsa ja mahdollistaa tasojen yhteisen toiminnan ja hallinnan. Alustalle ei ole olemassa standardia, mutta Collinin ja Saarelaisen kirjassa sitä kuvaillaan aineellisen ja virtuaalisen maailman yhtymäkohdaksi, joka kokoaa eri lähteistä saadun informaation yhteen. Osa toiminnallisuuksista ja teknologisesta infrastruktuurista voi myös sisältyä itse alustaan. [8] Alusta on siis eräänlainen rajapinta, jossa teknologiapinon tasot kohtaavat ja se tarjoaa niin sanotusti käyttöliittymän sekä pääsyn teknologiapinon tasojen toimintoihin.

Tietoturvan kehittäminen on tärkeää huomioida jo heti alustan suunnittelusta lähtien [8]. Järjestelmien ja tietoliikenteen omien suojausmekanismien lisäksi tietoturvaa voidaan parantaa myös käyttäjätasolla. Yksinkertaisimmillaan tietoturvaa voidaan lisätä esimerkiksi poistamalla oletussalasanaja [9]. Myös salasanojen säännöllinen vaihtaminen ja huolellinen säilyttäminen pienentävät tietoturvariskejä. Lisäksi esimerkiksi VPN-yhteyksien (engl. Virtual Private Network) käyttäminen nettiyhteyksien suojaamisessa lisää tietoturvaa. Mikäli järjestelmässä on heikkouksia ja järjestelmä joutuu kyberhyökkäyksen uhriksi, voi järjestelmän saaminen takaisin käyttöön kestää useita viikkoja, jopa kuukausia.

2.1 Sensorit ja datankeruu

Koneisiin ja laitteisiin asennetut sensorit eli anturit tuottavat mittausdataa keräämällä informaatiota itse laitteesta tai sen ympäristöstä. Analoginen, jatkuva-aikainen mittausdata muunnetaan eli kvantisoidaan A/D-muuntimella eli analogia-digitaalimuuntimella digitaaliseen muotoon. Tämä, yleensä bittimuotoinen data, voidaan lähettää radioteitse vastaanottajalle eli teollisen internetin tapauksessa johonkin tietovarastoon.

Käyttökohteiden tarpeiden vaihtelevuuden vuoksi myös antureiden ja kameroiden valikoima on laaja. Erilaisia antureita on muun muassa lämpötila-, paine-, optinen tai sähkömagneettinen anturi. Esimerkiksi optisia antureita hyödynnetään autonomisissa ajoneuvoissa, turvallisuus- ja tarkastuskäytössä tai raaka-aineiden käsittelyssä. Optiset anturit mahdollistavat kappaleen tunnistuksen ja näin ollen myös prosessien ohjaamisen. Sähkömagneettisia antureita puolestaan voidaan VTT:n julkaisun mukaan käyttää esimerkiksi kosteus- tai asentomittauksiin. Julkaisussa mainitaan, että sähkömagneettisia antureita käytetään usein myös robottien aisteina. [10] Antureiden lisäksi laitteisiin voidaan yhdistää myös kameroita, joiden avulla voidaan toteuttaa esimerkiksi konenäköön liittyviä sovelluksia. Antureilla voi olla käyttökohteeseen soveltuvuuden lisäksi muitakin vaatimuksia, kuten pitkä akunkesto, halpa hinta tai tarkkuus. Edullinen hinta mahdollistaa anturien käytön kokeellisemmissakin kohteissa. Toisaalta taas suuremmissa hankkeissa hintavammat, hyvän tarkkuuden tai lyhyen mittausvälin omaavat komponentit eivät merkittävästi vaikuta tuotteen lopulliseen hintaan.

Käytön sekä ajan myötä anturi voi kulua, likaantua tai tarvita ohjelmistopäivityksiä. Näin ollen mittaus tuloksien tarkkuuksissa voi olla vaihtelua, eikä saatu data ole enää yhtä luotettavaa. Anturin mittaus tarkkuus saadaan takaisin alkuperäiselle tasolle puhdistamalla, kalibroimalla tai päivittämällä anturi.

Teollisessa internetissä anturit muodostavat usein anturiverkoston, jossa ne toimivat yhteistyössä keskenään sekä havainnoivat ja ohjaavat samaa ympäristöä. Tämä mahdollistaa ympäröivän tilan, teknologian sekä ihmisten välisen vuorovaikutuksen. [11] Mikäli anturi havaitsee poikkeavia mittaus tuloksia, voi tämä laukaista hälytyksen tai varoituksen esimerkiksi etävalvontajärjestelmään. Tällaisten havaintojen avulla järjestelmät saadaan pysymään toimintakuntoisina pidempään tai tuotteen laatu saadaan pysymään tasaisena, kun vikatilanteet saadaan korjattua ajoissa.

2.2 Tietoliikenne

Anturit ja niiden muodostamat anturiverkot liitetään järjestelmään tietoliikennekerroksen avulla. Tietoliikenne anturien ja järjestelmän välillä on kaksisuuntaista, eli tietoa kulkee sekä antureilta järjestelmälle, että järjestelmältä antureille. [8] Kerätty data siirretään valitun tietoliikenneverkon välityksellä tietovarastoon.

Eri käyttötarkoitukset sekä käyttöympäristöt vaativat erilaisia verkkoteknologioita, jolloin ei voida turvautua vain muutamaani eri teknologiaan. Käytettävien verkkoteknologioiden määrä, verkkojen päivitykset ja yhteensopivuus voi kuitenkin tuoda haasteita verkkoratkaisuihin. [8] Yhteensopivuusongelmat voidaan useimmiten ratkaista gateway- eli yhdyskäytävämallia hyödyntämällä. Yhdyskäytävä yhdistää kaksi eri tiedonsiirtoprotokollaa käyttävää verkkoa toisiinsa ja kaikki verkkojen välillä kulkeva tieto välittyy yhdyskäytävän läpi. [12]

Yrityksen kasvun tuottaman laajenemisen tarpeen myötä myös verkon laajentaminen saattaa tulla ajankohtaiseksi. Verrattuna langallisiin yhteyksiin, langattomien yhteyksien laajennettavuus on helpompaa ja nopeampaa. Myös langattoman teknologian hintojen lasku kiihdyttää kehitystä. [8] Näin ollen langattomien teknologioiden käyttö näyttäytyy varsin varteenotettavana tapana luoda yritysten tarvitsema verkko.

Langattomilla yhteyksillä on kuitenkin omat haasteensa. Langattomat yhteydet ovat yleensä herkempiä yhteysongelmille kuin langalliset yhteydet. Katvealueet, verkon ruuhkautuminen sekä nopeasti liikkuva päätelaite voivat aiheuttaa katkoksia yhteyksiin. Katkokset puolestaan voivat aiheuttaa muun muassa viivästyksiä työskentelyssä, tallentamattoman tiedon katoamista sekä käyttäjän turhautumista. Nämä seikat heijastuvat helposti yrityksen liiketoimintaan ja voivat aiheuttaa yritykselle lisäkustannuksia myöhästymisien ja lisätyön myötä.

2.3 Tietovarastot ja analytiikka

Tuotetusta datasta välitetään eteenpäin vain se tieto, joka on olennaista analytiikan kannalta [8]. Kaikkea kerättyä dataa ei aina siirretä suoraan tietovarastoon, vaan osa tuotetusta datasta voi jäädä käsittelyyn paikallisesti. Tätä datan prosessointia lähellä datan lähdeä kutsutaan reunalaskennaksi (engl. Edge computing). Reunalaskenta vähentää datan siirtämisen tarvetta ja näin ollen vähentää tarvittavaa kaistanleveyttä. Paikallinen datan prosessointi minimoi myös viivettä eli latenssia ja parantaa tehokkuutta. [13] Se osa datasta, joka ei jää paikalliseen käsittelyyn, kerätään tietovarastoon [8].

Tietovarasto on yleensä jokin tietokanta ja tämä voi olla tyypiltään SQL (engl. Structured Query Language) tai NoSQL (engl. Not only Structured Query Language). Tietovaraston tyyppi vaihtelee sovelluskohteesta ja datan luonteesta riippuen. SQL tyyppisistä tietokannoista tietoa voidaan hakea, muuttaa ja lisätä SQL-kyselykielellä. SQL-tietokantojen vahvuutena onkin niiden käyttäjäystävällisyys kyselykielen ymmärrettävyyden vuoksi [14]. Tiedot tallentuvat SQL kannassa tauluihin, jotka koostuvat riveistä ja yksittäiset taulut voidaan linkittää toisiinsa erityyppisten avainarvojen avulla. Tällaisten SQL-tyyppisten tietovarastojen käyttö suurien data määrien tallentamiseen on kuitenkin toistaiseksi melko tehotonta sen verrattain huonon skaalautuvuuden ja tapahtumien luotettavuudesta varmistumisen vuoksi. [15]

Jotta suuret datamäärät saadaan tehokkaasti talteen, on tietovaraston oltava skaalautuva ja nopea. NoSQL-tietokannat tarjoavat tähän haasteeseen ratkaisun. Tietokantojen kahteen suuntaan skaalautuvuus mahdollistaa resurssien lisäämisen järjestelmään niin, että suoritusteho parantuu. [15] Yksi NoSQL-tietokantojen vahvuuksista on niiden kyky käsitellä keskenään erityyppistä dataa ilman, että rakennetta tarvitse kuitenkaan määritellä etukäteen. Tietokantojen lisäksi myös pilvipalvelut tarjoavat keinon datan varastointiin. Tallennustila on edullista ja skaalautuvaa, mutta haittapuolena pilvipalveluissa on tiedonsiirrossa syntyvä latenssi ja mahdollinen katkeileva yhteys. [8]

Analytiikan tehtävänä on tuottaa hyödyllistä ja käyttökelpoista informaatiota mitatuista kohteista. Tämä informaatio mahdollistaa hyödyllisten johtopäätösten tekemisen, joiden pohjalta toimintaa voidaan seurata ja muokata haluttuun suuntaan. Ennen kuin dataa on järkevää lähteä analysoimaan syvemmin, on hyvä hahmottaa selkeä tarve: mitä halutaan tutkia ja miksi [8]. Tärkeän datan erottaminen ja sen oikeanlainen hyödyntäminen on kulmakivi optimoinnin onnistumiselle. Toisinaan tämä voi olla haastavaa, jos kerättävät datamäärät ovat valtavia tai datan analysointi ei ole tekijälle entuudestaan tuttua. Jotta analytiikasta on hyötyä, sen pitää tuottaa liiketoiminnalle lisäarvoa, kuten parantaa toiminnan laatua ja tehokkuutta tai tarjota ennustusmalleja [8].

Teollisen internetin tapauksessa kiinnostavin data liittyy usein vikatilanteisiin. Poikkeamat datavirrassa ovat usein merkki laitteen toiminnan tai tilan olosuhteiden muutoksesta. Kun tapauksia on tutkittu pidemmän aikaa ja virhetilanteita on havainnoitu sekä analysoitu, voidaan vastaisuudessa samankaltaisien tilanteiden ilmentyessä esimerkiksi laukaista automaattinen hälytys. [8] Tällaiset toistuvat ilmiöt auttavat muun muassa koneoppimisen kehittämisessä sekä uusien algoritmien ja ohjelmakoodien luomisessa. Analytiikassa on tärkeää luoda tehokkaita ja automaattisia algoritmeja, jotta manuaalisen analysoinnin resursseja saadaan vapautettua [8].

Nopeasti suuria määriä kerääntyvää ja muodoltaan vaihtelevaa dataa kutsutaan big dataksi [16]. Tämän datan luonteen perusteella analytiikan menetelmät voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan. Nämä kategoriat ovat liikkeessä ja levossa oleva data. Reaaliaikaiseen datan käsittelyyn tarvitaan nopeaa analytiikkaa, eikä liikkeessä olevaa dataa tarvitse tallentaa ennen kuin sitä voi hyödyntää, koska analysointi onnistuu suoraan datavirrasta. Tällainen analysointitapa on hyvä, kun latenssia ei sallita ja tulokset tarvitaan paikallisesti. [8] Levossa olevaa, tietokantoihin kerättyä dataa voidaan hyödyntää tapauksissa, joissa halutaan kokeilla eri lähestymistapoja tai analysointimenetelmiä. Tällöin data varastoidaan tietokantaan ja sitä voidaan täten hyödyntää useita kertoja, mikäli esimerkiksi käytettyä analysointitapaa halutaan vaihtaa. [8]

2.4 Sovellus ja digitaalinen palvelu

Vasta sovellustasolla teollinen internet näyttäytyy konkreettisenä tuotteena [8]. Yritys voi itse hyödyntää sovellusta tai myydä sitä palveluna asiakkaalle. Oli sovelluksen käyttötarkoitus kumpi tahansa, sovelluskehitystä tehdään yleensä yhteistyössä jonkin ohjelmistotalon osaajien kanssa. Sovelluskehitykseen tarvitaan yksi tai useampi ohjelmarajapinta eli API (engl. Application Programming Interface), jotta dataa voidaan lukea ja syöttää järjestelmässä. Myös sensorien statuksen tarkastelu ja erilaiset visualisoinnit järjestelmän toiminnasta auttavat sovelluskehityksessä. [8] Yrityksillä haasteeksi voi muodostua sovelluksen integroiminen omaan tai asiakkaan nykyiseen järjestelmään. Usein sovelluksia ja alustoja ei ole suunniteltu siten, että ne ovat suoraan yhteensopivia kaikkien muiden järjestelmien kanssa.

Tärkeää sovelluksen käyttöliittymän suunnittelussa on havaita ja huomioida se, mikä on olennaista käyttäjän kannalta. Eri käyttäjillä on erilaiset tarpeet sovelluksen suhteen. Esimerkiksi yritysjohdon ja tuotannon työntekijän tarvitsemat sovellusnäkömät poikkeavat toisistaan merkittävästi. Sovelluksen käyttöliittymällä on myös suuri merkitys käyttäjäkokemukseen. Etenkin asiakkaan näkökulmasta sovelluksen tulee usein olla yksinkertainen sekä nopeasti haltuun otettava, ja siitä tulee löytyä kaikki käyttäjän kannalta olennainen tieto. Mikäli sovellus ei ole käyttäjälleen havainnollinen, ei kerätty data tuota haluttua lisäarvoa.

Monet modernit sovellukset toimivat selainkäyttöisinä pilvipalveluina. Näissä etuna ovat helppo graafisten käyttöliittymien toteutus, kun koodausta tarvitaan vähemmän sekä tietoturvan parantuminen. Tietoturva parantuu, sillä laitteelle ei tallennu dataa kyseisestä järjestelmästä. Haittapuolena tällaisissa webbisovelluksissa on niiden riippuvuus

verkkoyhteydestä. Toisena vaihtoehtona on käyttöjärjestelmäkohtainen natiivisovellus, jolloin sovellus luodaan käyttöjärjestelmän luonteen mukaiseksi. [8]

Digitaalinen palvelu palvelullistaa teollisen internetin ratkaisun. Tällä tasolla itse tuote, kaikki sen lisäarvon tuoton hyödyt ja säästöt konkretisoituvat. Huomio on siis lähinnä liiketoiminta-ajattelussa. Kaikille sopivaa ratkaisua ei sellaisenaan kuitenkaan ole tarjolla, vaan yrityksen tulee soveltaa olemassa olevia teknologioita ja luoda omaa tarvettaan tukevan infrastruktuuri, joka palvelee liiketoimintaa. Asiakkaiden arvostamia yleisiä tunnuspiirteitä saamalleen palvelulle ovat: reaaliaikaisuus, ennakoitavuus, mobiliteetti sekä automaatio. [8]

3. TEOLLISEN INTERNETIN LANGATTOMAT TIEDONSIIRTOTEKNOLOGIAT

Sovelluskohteesta riippuen tarvittavat tiedonsiirtoetäisyydet voivat olla muutamista senttimetreistä kymmeneen kilometriin. Tietoliikenneverkot voidaan luokitella kolmeen tai useampaan eri kattavuusalueeseen niiden kantaman perusteella. Kattavuusalueiden rajan veto kuitenkin vaihtelee suuresti lähteen mukaan. J. Collinin ja A. Saarelaisen kirjassa ”Teollinen internet” rajan veto on karkea. Verkot on jaoteltu kolmeen eri osaan, joissa likiverkon eli PAN-verkon (Personal Area Network) kattavuusalue on muutamasta metristä noin 100 metriin, lähiverkon eli LAN-verkon (Local Area Network) satoja metrejä ja suuralueverkon eli WAN-verkon (Wide Area Network) kattavuusalue häilyvästi siitä eteenpäin. [8] Toisessa lähteessä M. Siekkinen määrittelee kattavuusalueet PAN-verkolle 50–200 m, LAN-verkolle 200 m–4 km ja WAN-verkolle 5 km– 20 km [17]. Tässä työssä verkot luokitellaan neljään eri kattavuusalueeseen. Lyhimmälle, 0–10 m kattavalle alueelle ei ole erillistä termiä. Työssä muut kattavuusalueet ovat PAN-verkko 10–100 m, LAN-verkko 100 m–5 km sekä WAN-verkko yli 5 km. Langattoman verkon tapauksessa lyhenteet ovat WPAN, WLAN ja WWAN. Kaikki sekä langattomat että langalliset verkkotekniikat voidaan luokitella jonkin edellä mainitun kattavuusalueen piiriin. Tässä luvussa käsitellään neljän eri kattavuusalueen langattomia tiedonsiirtoteknologioita ja vertaillaan keskenään niiden ominaisuuksia.

3.1 Langattoman tiedonsiirron perusteet

Tiedonsiirron kannalta olennaista on huomioida se, miten radiotie vaikuttaa lähetettyyn signaaliin. Useat langattomat tiedonsiirtoteknologiat hyödyntävät näköyhteyttä eli Line of Sight:ia (LOS) toiminnassaan. Näköyhteys tarkoittaa ideaalitapauksessa sitä, ettei lähettimen ja vastaanottimen välillä ole esteitä ja signaali etenee niiden välillä suoraviivaisesti. Tällöin vastaanotetusta signaalista saadaan siepattua teho P_R Friisin kaavan mukaisesti.

$$P_R = G_T G_R P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2, \quad (1)$$

missä G_T on lähettimen vahvistus, G_R on vastaanottimen vahvistus, P_T on lähetysteho, λ on käytetty aallonpituus ja d on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys. [18] Kuten kaavasta voidaan havaita, aallonpituuden pienenytessä, eli taajuuden kasvaessa, vastaanotettu teho heikkenee. Toisaalta taas mitä pidempi välimatka vastaanottimen ja lähettimen välillä on, sitä laajemmalle pinta-alalle signaalin energia jakautuu, sillä pinta-

ala kasvaa neliöllisesti etäisyyden funktiona. Tämä radiotien aiheuttama vaimennus desibeleissä saadaan laskettua vapaan tilan vaimennuksen (engl. Free-Space Path Loss) kaavalla

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 [dB], \quad (2)$$

joka voidaan esittää myös muodossa

$$L = 32,44 + 20 \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \log_{10}(d_{km}) [dB]. \quad (3)$$

Kaavassa f on käytetty taajuus MHz-asteikolla ja d on etäisyys kilometreissä.

Vapaan tilan vaimennus ei kuitenkaan sellaisenaan ole todelliseen ympäristöön käyttökelpoinen approksimaatio. [18] Tämä johtuu siitä, ettei luonto noudata ideaaliolosuhteita ja esimerkiksi rakennettu ympäristö aiheuttaa huomattavaa signaalin vaimenemista. Signaali vaimenee jokaisella heijastuksella ja samalla se kulkee pidemmän matkan. Heijastukset puolestaan saa signaalin kulkemaan monitie-etenemisellä.

Monitie-etenemisessä (engl. Multipath Propagation) signaali saapuu antennille kahta tai useampaa reittiä pitkin. Signaalit heijastuvat tyypillisesti ilmakehän kerroksista, rakennusten seinistä sekä muista ympäristön esteistä. Signaalin komponentit saapuvat tämän vuoksi antennille eri aikaisesti ja niiden vaiheet sekä amplitudit vaihtelevat satunnaisesti. Tällöin komponentit voivat joko vahvistaa tai vaimentaa toisiaan. Monitie-etenemisen seurauksena syntyy myös ISI-häiriötä (engl. Intersymbol Interference). Tässä häiriömuodossa heijastumisien vuoksi viivästyneet signaalit vääristävät seuraavan symbolin tulkintaa.

Merkittävin kohinan lähde radiotiellä on kuitenkin lämpökohina. Luonnon lämpökohina voi siirtoetäisyyttä kasvatettaessa ja siirtovaimennuksen kasvaessa muodostua signaalin laatua rajoittavaksi tekijäksi. Kohinaa ei voida poistaa, mutta signaalin erottumista kohinan seasta voidaan parantaa lisäämällä signaalin tehoa.

Signaalin kantamaa mallintaa vapaan tilan vaimennuksen lisäksi signaalin ja kohinan tehon suhdetta kuvaava SNR (engl. Signal to Noise Ratio). Jotta signaali voidaan vastaanottaa, täytyy hyötysignaalin erottua kohinasta. Tämä tarkoittaa sitä, että vastaanotettavan tehon ja kohinan suhteen on oltava tapauskohtaisesti määräytyvän minimi signaali-kohinasuhteen (SNR) verran. Tämä luku kuvaa siis sitä, kuinka pitkän etäisyyden jälkeen signaali on vielä lähetysetaisyydellä. Eli toisin sanoen signaali pystytään vielä erottamaan kohinan seasta ja viestintä on mahdollista.

$$SNR = \frac{P_S}{P_N}, \quad (4)$$

jossa P_S on signaaliteho ja P_N on kohinateho. Sama voidaan esittää myös desibeleinä, jolloin kaava on muotoa

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right) [dB]. \quad (5)$$

Myös kaistanleveydellä on vaikutusta kantamaan. Mitä kapeampi kaistanleveys on, sitä pidempi kantama saadaan. Kapeammalla kaistanleveydellä kohinan ja häiriöiden vaikutus itse signaaliin on vähäisempää. Näin ollen signaali vääristyy vähemmän. Toisaalta tällöin myös bittinopeus laskee ja tiedonsiirtonopeus hidastuu.

3.2 RFID

RFID (engl. Radio Frequency Identification) on lyhimmän kattavuusalueen verkkoteknologia. RFID:n kattavuusalue on pisimmillään noin 6 m:n luokkaa, mutta kattavuusalue riippuu täysin käytetystä teknologiasta. RFID-tunnisteita on neljää erilaista ja ne toimivat taajuuksilla 125–134 kHz, 13,56 MHz, 868–956 MHz ja 2,45 GHz. [19]

RFID ei ole uusi teknologia, mutta sen käyttö on lähivuosina yleistynyt hintojen laskun vuoksi. RFID-tunnisteet eivät ole vielä yhtä edullisia kuin perinteiset viivakoodit, jotka ovat käytännössä ilmaisia tulostettavuuden vuoksi, mutta RFID-tunnisteet tarjoavat enemmän ominaisuuksia. RFID-tunnisteen lukemiseen riittää, että laite on kantaman sisällä, kun taas perinteisen viivakoodin lukuun tarvitaan poikkeuksetta näköyhteys. Tämä tarjoaa tunnisteille laajat käyttömahdollisuudet. RFID-tunniste tukee myös laajempaa skaalaa yksilöllisiä tunnuksia sekä ne voivat sisältää muuta lisätietoa tuotteesta, kuten valmistaja tai tuotteen tyyppi [19]. Muita hyötyjä ovat reaaliaikaisuus, lukuvarmuus, hyvä kulutuskestävyys, tietoturvaominaisuudet sekä vähäinen virrankulutus.

RFID-tunnisteet voidaan jakaa kolmeen luokkaan: passiivisiin, puolipassiivisiin ja aktiivisiin. Aktiiviset tunnistet vaativat virtalähteen, joten tunniste on joko kiinni verkkovirrassa tai siinä on paristo. Pariston elinikä määrittää myös tunnisteen eliniän,

mutta laitteen elinikää voi yleensä jatkaa vaihtamalla pariston. [19] Paristojen elinikä on muutaman vuoden luokkaa [20]. Paristot lisäävät tunnisteen hintaa ja kokoa, joten aktiiviset tunnisteen eivät välttämättä sovellu kaikista pienimpiin sovelluskohteisiin. Aktiivisessa tunnisteen on virtalähteen lisäksi antenni, mikrosiru ja kapselointi eli komponentin alusta. Aktiivinen tunnisteen lähettää signaaliaan itsenäisesti ja koko ajan. Aktiivisella tunnisteen voidaan saavuttaa pidemmät lukuetaisytydet sekä suurempi muistikapasiteetti verrattuna puolipassiivisiin ja passiivisiin tunnisteenisiin. Tämä selittää miksi aktiivisten tunnisteen virrankulutus on suurempi. [20]

Passiivinen tunnisteen saa virtansa RFID-lukijalta lukutilanteessa. RFID-lukija tuottaa passiivisille ja puolipassiivisille tunnisteenille virran Faradayn induktiolain mukaisesti. Lukijan muuttuva magneettikenttä aiheuttaa virtasilmukkaan, eli tässä tapauksessa antenniin jännitteen, jonka seurauksena silmukassa alkaa kiertää sähkövirta. Lisäksi lukija vastaanottaa ja prosessoi vastaanottamansa tiedon. Lukijalla voidaan myös muuttaa tai lisätä tunnisteen olevaa tietoa. Passiivinen tunnisteen ei siis tarvitse erillistä virtalähdettä, minkä vuoksi tunnisteenesta voidaan tehdä hyvin pieni. Tunnisteen voidaan koota esimerkiksi tarran sisään. Passiivinen tunnisteen koostuu antennista, mikrosirusta sekä kapseloinnista. Tunnisteen antenni kerää lukijan lähettämän energian sekä siirtää tunnisteen tunnuksen lukijalle. Siru puolestaan sisältää tiedon ja koordinoi sen lukijalaitteelle. Kapselointi suojaa antennia ja mikrosirua ympäristöltä. [19]

Puolipassiivisilla tunnisteenilla on oma virtalähde, mutta tunnisteen ei lähetä signaaliaan jatkuvasti aktiivisen tunnisteen tapaan. Puolipassiivisilla tunnisteenilla on suurempi toimintasäde kuin passiivisilla, mutta pienempi kuin aktiivisilla tunnisteenilla. [21]

3.3 Lyhyt kantama

3.3.1 Bluetooth Low Energy

Bluetooth on lyhyen kantaman langaton verkkoteknologia, jonka on kehittänyt Bluetooth Special Interest Group (SIG). Teknologia luotiin alun perin mahdollistamaan kahden laitteen välinen langaton kommunikointi ilman muita verkkolaitteita. Bluetoothista on kaksi eri versiota, Bluetooth Classic sekä Bluetooth Low Energy (BLE). BLE on Bluetoothin energiatehokkaampi versio ja sen avulla kommunikaatio eri laitteiden välillä on laajempaa mesh-ominaisuuden vuoksi [22]. Tämä ominaisuus mahdollistaa useista laitteista koostuvien verkkojen muodostamisen ja laitteiden välisen vapaan kommunikaation verkon välityksellä. Yleisimmät BLE:n sovelluskohteet ovat erilaisia ohjaus- ja valvontasovelluksia [23].

Sekä Bluetooth Classic että BLE toimivat lisensoimattomalla 2.4 GHz:n ISM (engl. Industrial, Scientific and Medical) taajuuskaistalla. BLE hyödyntää 40:tä kahden MHz:n kanavaa yhdessä Adaptive Frequency Hopping:n kanssa. Bittinopeudet vaihtelevat BLE:n tapauksessa 125 kB/s ja 2 Mb/s välillä. [22] BLE:n latenssi on parhaimmillaan noin 676 μ s:n luokkaa ja kantama on lähestulkoon identtinen Bluetooth Classicin kanssa. Ulkotiloissa kantama on noin 100–200 m:n luokkaa ja sisätiloissa 20–40 m:n luokkaa. [23]

Nimensä mukaisesti BLE on suunniteltu vähän virtaa kuluttavaksi tiedonsiirtoyhteydeksi. Nappiparistoilla toimivan BLE-laitteen käyttöikä vaihtelee yleensä muutamasta päivästä jopa yli 10 vuoteen [23]. Käyttöään suuri vaihtelu riippuu täysin käytetystä bittinopeudesta sekä lähetettävien datapakettien määrästä.

BLE:n sekä Bluetooth Classicin protokollapino koostuu Controllerista ja Hostista. Host on käyttäjärjestelmän kaltainen ja se huolehtii prosessorin toiminnasta. Controller on puolestaan järjestelmäpiiri, joka sisältää sekä fyysisen- että siirtokerroksen. [23]

3.3.2 ZigBee

ZigBee on ZigBee Alliancen kehittämä IEEE 802.15.4-standardin mukainen lyhyen kantaman verkkoteknologia. Teknologia on matalatehoinen ja siinä on alhainen tiedonsiirtonopeus. Teknologia on suunnattu etenkin teollisuussovelluksiin, jotka eivät tarvitse suuria tiedonsiirtonopeuksia, kuten automaatio- ja etäohjaussovellukset. Teknologia hyödyntää muun muassa mesh-verkkotopologiaa ja sen vuoksi ZigBee-verkko voi olla hyvinkin suuri, tuhansia laitteita. [24]

ZigBee toimii maailmanlaajuisesti lisensoimattomalla 2.4 GHz:n radiotaajuudella. Teknologian tiedonsiirtonopeus tällä taajuudella on parhaimmillaan 250 kb/s. Lisäksi Euroopassa on käytössä 868 MHz:n taajuus, jolla tiedonsiirtonopeus on 20 kb/s ja Amerikassa on käytössä 915 MHz:n taajuus, jolla nopeus on parhaimmillaan 40 kb/s. [24]

ZigBee järjestelmä koostuu useasta komponentista. Toimilaite voi olla täysitoimintoinen FFD (engl. Full-Function Device) tai rajoitettu- RFD (engl. Reduced-Function Device) toimilaite. Verkostoon on kuuluttava yksi FFD, joka toimii koordinaattorina. FFD voi toimia kolmella eri tavalla: koordinaattorina, reitittimenä tai toimilaitteena. RFD on puolestaan tarkoitettu erittäin yksinkertaisiin sovelluksiin, sellaisiin, joissa ei tarvitse lähettää suuria tietomääriä. FFD voi kommunikoida sekä FFD:n että RFD:n kanssa, kun taas RFD voi kommunikoida ainoastaan FFD:n kanssa. [24]

Teknologian kantama on noin 10–75 metriä, mutta ulkotiloissa voidaan saavuttaa tätä pidempikin kantama. Latenssi riippuu täysin käytetystä verkkotopologiasta sekä verkossa olevien laitteiden määrästä. Parhaimmillaan latenssi voi olla vain kymmeniä mikrosekunteja. Laitteiden akunkesto on useista kuukausista useisiin vuosiin, sillä laitteiden virrankulutus on hyvin pientä. Teknologia on myös kustannustehokas. ZigBee-verkon rakentamiseen tarvitaan vain neljällä moduulia. Verkon edullisuus perustuu myös avoimen standardin hyödyntämiseen. [24]

3.3.3 Vertailu

Molempien verkkoteknologioiden, Bluetooth Low Energyyn sekä ZigBeen kustannukset ovat verrattain alhaiset vähäisten laitteiden tarpeen vuoksi. Molemmat teknologiat ovat myös matalatehoisia ja toimilaitteiden akunkestit ovat keskimäärin muutamista kuukausista useisiin vuosiin. Suurimmat erot ovat ne, että Bluetooth Low Energy tarjoaa korkeammat bittinopeudet 2.4 MHz:n taajuudella ja BLE:n kantama on myös hieman pidempi.

3.4 Keskipitkä kantama

3.4.1 Wi-Fi

Wi-Fi on tavaramerkki Wi-Fi Alliancen kehittämälle WLAN-verkolle (Wireless Local Area Network) eli langattomalle lähiverkolle. Kaikki Wi-Fi versiot perustuvat IEEE:n 802.11 WLAN-verkkojen standardin eri versioihin. Wi-Fi 7 on uusin, lähivuosina markkinoille saapuva versio. Wi-Fi ratkaisut eivät varsinaisesti ole IoT- tai teollisen internetin teknologioita, mutta niitä voidaan kutsua IoT:n ja teollisen internetin mahdollistajiksi.

Wi-Fi-reitittimet voivat toimia joko 2.4 tai 5.0 GHz:n taajuudella. Tällä hetkellä yleisin käytössä oleva Wi-Fi-versio, eli Wi-Fi 5 perustuu 802.11ac-standardiin, jonka maksimi tiedonsiirtonopeus on 1.3 Gb/s. Uudemmallalla 802.11ax-standardiin perustuvalla Wi-Fi 6:lla voidaan saavuttaa jopa 10 Gb/s suuruiset siirtonopeudet. [25] Wi-Fi käyttää samaa 2.4 GHz:n ISM-taajuuskaistaa Bluetoothin kanssa, joten kyseinen kaista on usein ruuhkaisempi suuremman käyttäjäkunnan vuoksi.

Wi-Fi-järjestelmä koostuu AP:sta (engl. Access Pointista) eli tukiasemasta, reitittimestä sekä toimilaitteesta. Wi-Fi-verkon kattavuusalue on ulkotiloissa parhaimmillaan noin 100 m:n luokkaa, mutta kattavuusalueen laajuus riippuu Wi-Fi versiosta [26].

3.4.2 DASH7

DASH7 on avoimen lähdekoodin tiedonsiirtoteknologia, jota kehittää DASH7 Allianssi. Tämä pienitehoinen keskipitkän kantaman teknologia on suunniteltu yksityisiä verkkoja hyödyntäville toimilaitteille. [27] DASH 7 teknologia perustuu ISO 18000-7 standardiin ja se on suunnattu etenkin anturitoimilaitteille. Teknologia soveltuu kaupunkien ja teollisuuden verkkoasennuksiin, jotka yhdistävät toimilaitteita ja viestinsovelluksia.

DASH 7:lla on jopa 500 m:n kantama. Teknologia palvelee lähes reaaliaikaista seuranta ja luotettavuutta vaativia kohteita. Luotettavuus varmistetaan säännöllisillä yhdyskäytävän kautta kulkevilla signaalien vastaanoton tarkistuksilla. DASH7-teknologian latenssi on noin yhden sekunnin luokkaa. [28] Teknologia soveltuu parhaiten lyhyiden ja satunnaisten datapakettien lähetykseen. Pakettien koko on rajoitettu 256 tavuun eli 2,048 kilobittiin. Kommunikointi perustuu komentoihin, ei säännölliseen synkronointiin. [29] Melko lyhyen latenssin ja säännöllisten pakettien lähetyksen vuoksi toimilaitteiden akunkestoksi arvioidaan eri lähteiden mukaan noin 5 vuotta. Bittinopeudet teknologialla jää kuitenkin melko alhaisiksi, ne ovat noin 166,7 kb/s:n luokkaa.

DASH7 hyödyntää taajuuksia 433, 868 ja 915 MHz, joista 433 MHz on lisenssivapaa kaista. Kyseinen taajuus tarjoaa pitkän etenemisetaisyyden sekä paremman tunkeutumisen. Riippuen nopeudesta ja käytetystä taajuuskaistasta DASH7-teknologian kattavuusalue voi olla 100 m:sta aina muutamaan kilometriin. Laitteet voidaan myös konfiguroida skannaamaan viestejä useammalta kanavalta. [30]

3.4.3 Vertailu

Teknologioista Wi-Fi tarjoaa nopeammat tiedonsiirtonopeudet verrattuna DASH7:ään. DASH7 tarjoaa puolestaan lähetyksille luotettavuuspalvelua erillisillä lähetyksen luotettavuuden tarkastuksilla. Lisäksi DASH7 on näistä kahdesta teknologiasta energiatehokkaampi. Tämä selittyy alhaisemmilla tiedonsiirtonopeuksilla. DASH7 tarjoaa myös pidemmän kantaman kuin vastaavat Wi-Fi-ratkaisut.

3.5 Pitkä kantama

3.5.1 Mobiiliverkot

Cellular- eli solukoverkkoteknologiat (tai mobiiliverkot) ovat pitkän kantaman sovelluksia. Niiden toimintaperiaate eroaa ei-solukoverkko teknologioista, sillä nimensä mukaisesti solukoverkot hyödyntävät toiminnassaan ns. soluja, eli alueita, joihin tietyn tukiaseman kantama ylettyy. Solukoverkkojen yhteyksiä hyödyntävät yleensä mobiililaitteet, jotka ovat suunniteltu sekä liikkumaan että viestimään yhtäaikaaisesti.

Verkon kokonaiskapasiteetti määräytyy käytössä olevien tukiasemien lukumäärän mukaisesti. Tukiasemia voidaan tarvita useita ja keskitetyn järjestelmän pitää kyetä hallitsemaan yhtäaikaisesti jopa kymmeniä miljoonia käyttäjiä. Matkapuhelinverkoilla tukiasemia täytyy yleensä olla muutaman kilometrin välein, jotta voidaan taata luotettavat viestinyhteydet. [18] Suuremmissa kaupungeissa tukiasemia voidaan tarvita jopa 100 metrin välein verkon suuren kapasiteetin tarpeen vuoksi. Tukiasemia tarvitaan runsaasti myös siksi, että rakennettu ympäristö sekä muut esteet heikentävät signaalin tehoa.

Usea päätelaite voi käyttää yhtä tukiasemaa samanaikaisesti ja yksi päätelaite voi sijaita useamman tukiaseman peittoalueella. Jotta tukiaseman taajuuskaista saadaan jaettua maksimaaliselle määrälle käyttäjiä siten, että myös tiedonsiirtonopeus maksimoituu, tulee toteutuksessa hyödyntää solukoverkkoa. [18] Tukiaseman kapasiteetti jaetaan päätelaitteiden välillä mahdollisimman tehokkaasti pääsynhallintamenetelmien avulla. Nämä hallintamenetelmät voivat hyödyntää eri taajuuksia, aikoja, koodeja tai näiden yhdistelmiä. [18]

Laajaa ja luotettavaa solukoverkkoa rakennettaessa solut menevät osittain päällekkäin, jolloin vierekkäiset kaistat häiritsevät toisiaan, mikäli ne käyttävät samaa taajuutta. Nykyaikaisissa verkoissa tämä ei ole ongelma, sillä häiriöitä voidaan hallita. Vierekkäiset solut voivat käyttää myös eri taajuuskaistoja, jotta ylimääräiset häiriöt, kuten ylikuuluminen saadaan minimoitua. Jo käytettyä taajuutta voidaan hyödyntää riittävän välimatkan jälkeen uudelleen. Solujen koot vaihtelevat noin 50 m–35 km välillä. Käytetty solun koko pienenee, mitä korkeampia taajuuksia käytetään. Tämä johtuu siitä, että korkeat taajuudet vaimenevat nopeammin kuin matalat. Solut voidaan jakaa myös pienempiin osiin eli sektoreihin. Sektorit ovat alueita solun sisällä, joissa on käytössä keskenään eri taajuudet. Tämä on mahdollista suuntaavien antennien avulla. Tyypillisesti solussa on kolme sektoria. [18]

Solun optimaalinen muotokieli muistuttaa kuusikulmiota. [18] Muoto on suotuisin geometria, kun halutaan maksimoida taajuuksien tehokas käyttö. Kuusikulmio muodostelmissa samat taajuudet saadaan sijoiteltua järkevästi mahdollisimman kauas toisistaan.

Laitteen liikuessa sen tulee mahdollisesti siirtyä solusta toiseen yhteyden säilyttämiseksi. Tukiaseman ja puhelimen välisen signaalin heikentyessä matkapuhelinkeskus selvittää, onko jokin toinen tukiasema paremmin kuuluvissa ja mikäli on, niin suoritetaan solunvaihto. Solunvaihdossa keskus käynnistää paremmin kuulevalla tukiasemalla liikennekanavan, jolle mobiililaitte saa vaihtamiskäskyn. [18]

Solukoverkkoteknologialla saavutetaan verrattain suuret datamäärät ja korkeat nopeudet muihin pitkän kantaman teknologioihin verrattuna. Tämä johtuu tukiasemien tiheästä verkostosta. Esimerkiksi 5G:n siirtonopeus voi parhaimmillaan olla 1Gb/s. Mobiiliverkkoteknologioilla on verrattain korkeat käyttökustannukset. Verkon ylläpitoon tarvitaan useita laitteita, mikä nostaa kustannuksia.

3.5.2 LoRa

Toinen hieman samantyyppinen tiedonsiirtoteknologia on LoRa (engl. Long Range). LoRa on Semtech Corporationin kehittämä pitkän kantaman tiedonsiirtoteknologia, joka on suunniteltu etenkin akkukäyttöisten laitteiden yhdistämiseen internetiin [31]. Teknologia on siis pienitehoinen ja LoRa-laitteet ovat saman kaltaisia kuin matkapuhelimet. LoRa laitteita on kolmea eri tyyppiä: paristokäyttöiset anturit, paristokäyttöiset toimilaitteet sekä pääkäyttöiset toimilaitteet. Niissä on sekä anturi- että internet-ratkaisu samassa kokonaisuudessa. Laitteissa on siis oma akku ja yhteys toimii, kun laite on tukiaseman kantaman sisällä. [32] LoRan kantama on parhaimmillaan noin 15 km näköyhteyden säilyessä ja kaupunkialueella kantama on noin 5 km:n luokkaa [33].

Tiedonsiirtoteknologian verkkotopologiana on tähtitopologia, eli laitteet ovat yhdistetty keskusverkkopalvelimeen, jonka kautta kaikki tietoliikenne kulkee vastaanottajalle. Tähtitopologian erityisiä hyötyjä ovat laitteiden helppo yhdistettävyyys, keskitetty verkon hallinta sekä parempi luotettavuus. Luotettavuus paranee, kun yksittäiset laitteet eivät vaikuta koko verkon toimintaan. Haittapuolena on vaara verkon kaatumiseen keskuslaitteen vikaantuessa. [34] Verkkoon tarvitaan vain muutama konfiguroitu yhdyskäytävä palvelemaan useita päätesolmuja. Näin ollen laite- ja käyttökustannukset pysyvät melko alhaisina. [33]

LoRa hyödyntää ortogonaalisia hajautuskertoimia pidentämään akun käyttöikää optimoimalla yksittäisen laitteen tehotasoa ja datanopeutta. Laitteiden tehonkulutus lepotilassa on joitakin milliwatteja ja laitteille arvioidaan jopa 10 vuoden akunkestoa. Lähellä yhdyskäytävää sijaitsevan laitteen hajautuskerroin voi olla matalampi kuin kaukana sijaitsevan laitteen. [33] Tämä johtuu siitä, että lähetettävät signaalit vaimenevat kulkiessaan radiotiellä. Pitkillä matkoilla signaalin prosessivahvistuksen eli hajautetun kaistanleveyden suhde hajauttamattomaan kaistanleveyteen tulee olla suurempi ja vastaanottoherkkyyden pienempi, jotta signaali voidaan vastaanottaa mahdollisimman bittivirheettömänä [33].

Pitkän akunkeston saavuttamiseksi täytyy kuitenkin tehdä paljon kompromisseja. LoRan tapauksessa tämä tarkoittaa matalamman datanopeuden lisäksi pienempiä pakettikokoja ja pidempää latenssia sekä sitä, että paketteja voidaan lähettää vain

muutamia kertoja päivässä. Datanopeus vaihtelee 0,3–50 kb/s välillä ja viestejä voidaan päivän aikana lähettää noin 10 kappaletta per laite. Teknologia soveltuu siis sovelluksiin, jotka vaativat pitkän kantaman tai rakennusten sisäisiä yhteyksiä useiden laitteiden välillä, ja jotka vaativat pitkän akunkeston sekä keräävät vain pieniä määriä dataa. [33]

3.5.3 Vertailu

Mobiiliverkoilla ja LoRalla on sekä yhtäläisyyksiä, mutta myös paljon eroavaisuuksia. Suurin yhtäläisyys on se, että molemmat ovat pitkän kantaman teknologioita. Verkkoon liitettävien laitteiden tyyppi on myös hyvin samankaltainen. Molemmat teknologiat ovat myös käytössä maailmanlaajuisesti. Eroja ovat muun muassa teknologioiden hyödyntämät taajuudet, latenssi ja käyttölaitteiden akunkesto. Kuitenkin ehkä merkittävin ero on tiedonsiirron puolella. Mobiiliverkot tukevat huomattavasti suurempia datansiirtonopeuksia kuin LoRa-verkot. LoRa teknologia on pienitehoinen, toisin kuin mobiiliverkot. Suuret datanopeudet ja lyhyet latenssit kuluttavat suhteellisen paljon virtaa toimiakseen. LoRa on näin ollen energiatehokkaampi. Toisaalta taas teknologioita yleensä sovelletaan hyvin erilaisiin sovelluskohteisiin. LoRa on myös halvempi, koska verkko tarvitsee vähemmän laitteita toimiakseen.

4. HYÖDYNTÄMINEN KÄYTÄNNÖSSÄ

Teollisuudessa internettiä hyödyntävien käyttökohteiden määrä kasvaa koko ajan. Muun muassa tarvittavan siirtonopeuden, tiedonsiirtokapasiteetin, luotettavuuden sekä kantaman tarve vaihtelee suuresti sovelluskohteen mukaan. Reaaliaikaisuutta vaativat sovelluskohteet vaativat korkeita tiedonsiirtonopeuksia, suurta tiedonsiirtokapasiteettia sekä lyhyttä latenssia. Kaikki sovelluskohteet eivät kuitenkaan vaadi verkolta tällaisia ominaisuuksia, vaan tiedonsiirrolle riittää usein hieman kohtuullisemmat vaatimukset. Tässä luvussa tarkastellaan kolmea eri kantaman sovelluskohdetta, joilla on erilaiset tarpeet langattoman verkon ominaisuuksien suhteen.

4.1 Tapaus Fastems ja Norbert Kempf CNC-Teknik

Norbert Kempf CNC-Teknik on automatisoinut tuotantojärjestelmänsä ottamalla käyttöön Fastemsin FMS:n, eli joustavaan valmistusjärjestelmän (engl. Flexible Manufacturing System). [35] FMS yhdistää materiaalihissin avulla koneistuskeskukset, robotit sekä materiaaliasemat ja latausasemat toisiinsa. Joustava valmistus puolestaan tarkoittaa sitä, että kappaleen tai sarjakoon vaihtumisesta huolimatta tuotanto jatkuu keskeytyksettä. Automaatio lyhentää asetusajoja ja virtauttaa tuotantoa, jolloin tuotantojärjestelmän tuottavuus kasvaa.

Ennen järjestelmän automatisointia työkalujen manuaalisia kuljetuksia oli noin 300 kappaletta päivässä. Automaation sekä työkalunhallintajärjestelmän avulla manuaalinen työkalujen kuljettamisen tarve poistui. Tämän lisäksi automaattinen työkalujen kuljettaminen sekä keskitetty työkaluvarasto mahdollistivat jokaisen tuotteen työstön jokaisella koneistuskeskuksella. Järjestelmään liitettävien työstökoneiden tulee käyttää samanlaisia, standardoituja työkaluliitäntöjä yhteisten työkaluvaraston vuoksi. [35]

Norbert Kempf:n järjestelmässä tietyt robotit toteuttavat työkalujen kuljetukset koneistuskeskuksille. Robotti tunnistaa työkalun sen yksilöivästä RFID-sirusta. Jokainen työkaluja käsittelevä robotti on siis varustettu RFID-lukijalla ja lukija skannaa työkalun ennen siirtoa. [35] Jokaisessa työkalussa on siis passiivinen RFID tunniste. Sovelluskohteessa ei vaadita suurta tiedonsiirtokapasiteettia, joten RFID on varsin pätevä vaihtoehto ja tarjoaa paremmat ominaisuudet, kuin perinteinen viivakoodi.

Tunnisteseen voidaan tallentaa identifioivan tunnuksen lisäksi myös muuta tietoa työkalusta. Tarkemmat tiedot työkaluista ovat Norbert Kempf:n tapauksessa Fastemsin tuotannon hallintajärjestelmässä eli MMS:ssä (engl. Manufacturing Management

System). Järjestelmästä löytyy työkalun ID-numeron lisäksi esimerkiksi käyttöikä tieto, jonka perusteella arvioidaan, voidaanko työkalulla vielä työstää kappaletta, vai tuleeko työkalu huoltaa. [35]

RFID-tunnisteita voidaan käyttää myös palettien tunnistamisessa. Norbert Kempf:llä on käytössä 500 palettia, joten eri tuotteiden kulun seuraamiseen tuotantolinjalla voitaisiin myös hyödyntää RFID:tä [35]. Erillistä mainintaa tästä ei kuitenkaan löytynyt, mutta se on yksi mahdollinen käyttökohde. RFID:tä hyödynnetäänkin useimmiten varaston- sekä toimitusketjun hallinnassa ja tuotteiden tunnistamiseen tuotantolinjalla.

4.2 Tapaus Sandvik

Sandvik toimittaa muun muassa kaivos- ja urakointiteollisuuden laitteita, kalustoa sekä teknisiä ratkaisuja. Miehittämättömät maanalaisen porauksen laitteet ovat yksi Sandvikin kehittämistä tuotteista. Älykäs teknologia, kuten automaatio sekä etäohjaus ovat avain asemassa jatkuvatoimisen ja miehittämättömän porauksen toteuttamisessa. Miehittämättömien porauslaitteiden avulla työturvallisuus kasvaa, kun ihmiset saadaan siirrettyä kaivoksista ohjaamaan laitteita etäohjauksen välityksellä. Lisäksi automaatio sekä porausohjausjärjestelmä lisäävät tuottavuutta sekä parantavat poraustarkkuutta. [36]

Tiedonsiirto porauslaitteen ja porausohjausjärjestelmän sekä etäohjauskeskuksen välillä tapahtuu WLAN-yhteyden välityksellä. Porauksen automaattinen ohjaaminen sekä porauskaavioiden hallinta toteutetaan porausohjausjärjestelmän kautta. Lisäksi sekä suunnitellun että toteutuneen porauksen seuraaminen onnistuu reaaliaikaisen tiedonsiirron avulla. [36] WLAN-yhteyksien toteuttamisessa Sandvik tekee yhteistyötä elektroniikkateollisuusyritys Ciscon kanssa.

Yksikön ja etäsjainnin välillä siirretään erilaista tietoa porauksesta, joita ovat muun muassa porauksen aika, sijainti ja suorituskyky. Porauksista luodaan laatu- ja suorituskykyraportit ja tiedot siirtyvät laitteen ja etäsjainnin välillä WLAN-verkon välityksellä. [37] Tämän lisäksi Sandvik tekee uutta tutkimusta ja tuotekehitystä 5G-verkon hyödyntämisessä kaivosympäristössä.

4.3 Tapaus ABB

ABB pilotoi yhdessä Atostek Oy:n ja Telian kanssa hanketta, jossa luodaan perustaa uusille teollisille ratkaisuille langattoman 5G-tekniikan, tekoälyn (engl. Artificial Intelligence) sekä konenäön (engl. Machine Vision) avulla. Hankkeen tarkoituksena oli luoda kokoonpanotyön tueksi tekoälysovellus, joka tukee työntekijää seuraamalla

kokoonpanotyötä konenäön avulla. Sovellus siis varmistaa, että tuote kootaan asiakkaan tilauksen sekä työohjeiden mukaisesti. Sovellusta hyödynnetään etenkin kriittisissä sekä työntekijöille vaativissa kokoonpanoissa. [38]

5G-yhteys varmistaa reaaliaikaisen palautteenannon, minkä vuoksi kokoamisen tulisi helpottua ja nopeutua merkittävästi. Aikaa ei tällöin kulu paperidokumenttien lukemiseen. Sovelluksella pyritään ABB:n mukaan parantamaan kokoonpanon sekä itse tuotteen laatua. Sovelluksella haetaan myös tuotantolinjan tuottavuuden kasvattamista. Lisäksi sovelluksen kerrotaan vähentävän virheisiin liittyvää stressiä ja näin ollen parantavan tuotantolinjalla työskentelevien työhyvinvointia. [38]

Telia vastaa sovelluksen 5G-yhteydestä sekä sovelluksen tarvitsemasta laskentakapasiteetista. [38] Telian mukaan siirrettävän datan määrä on suuri ja sovellus vaatii pienet latenssit [39]. Suuret siirrettävät datamäärät vaativat yhteydeltä suurta tiedonsiirtokapasiteettia ja näin ollen myös kaistanleveyden tulee olla suuri. Suuremmat tiedonsiirtonopeudet puolestaan voidaan saavuttaa korkeampien taajuuksien avulla. Pienet, lähes olemattomat, latenssit mahdollistavat sovelluksen reaaliaikaisuuden, joka on yksi sovelluksen tärkeimmistä ominaisuuksista. 5G-teknologia on pätevä teknologia tässä sovelluskohteessa, sillä se pystyy tarjoamaan suuret tiedonsiirtonopeudet, suuren tiedonsiirtokapasiteetin ja lyhyen latenssin.

5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä teollista internettiä tarkasteltiin monen osakokonaisuuden summana. Pohjaa tälle ajattelumallille loi Collin & Saarelaisen määrittelemä teollisen internetin teknologiapinoajattelu. Langattomat yhteydet mahdollistavat monenlaisten toimilaitteiden liittämisen internettiin, eivätkä laitteen liikkeit rajoita yhteyden muodostamista. Erilaisia teollisuuden sovelluksia on useita ja niiden määrä on valtavassa kasvussa. Osa teollisen internetin hyödyistä, kuten prosessien optimointi, tuottavuuden kasvu ja mukautuvuus tulivat selkeästi esiin myös käsitellyissä esimerkkitapauksissa.

Eri sovelluksilla on erilaisia vaatimuksia verkon ominaisuuksille. Vaatimuksia asetetaan etenkin tiedonsiirtonopeudelle, tiedonsiirtokapasiteetille, yhteyden luotettavuudelle, toimilaitteiden akunkestolle sekä kustannustehokkuudelle. Tietyn ominaisuuden saavuttaminen vaatii kuitenkin usein joustoa muissa verkon ominaisuuksissa. Esimerkiksi suurien tiedonsiirtonopeuksien saavuttaminen lyhentää kantaman pituutta. Mikäli myös kantaman tulee olla suuri, silloin teknologian kustannukset kasvavat verkon vaatiman lisääntyvän laitemäärän vuoksi. Mikäli taas laitteelle halutaan pitkä akunkesto, tulee tiedonsiirtonopeudessa tai lähetettyjen datapakettien määrässä joustaa. Voisi sanoa, että jokaiseen sovelluskohteeseen löytyy aina sopiva tiedonsiirtoteknologia, mikäli jonkin ominaisuuden kohdalla voidaan tehdä tarvittaessa kompromissi.

Suurimmat teollisen internetin haasteet liittyvät usein tietoturvaan. Tietoturvaseikat tulee huomioida kaikilla teknologiapinon tasoilla, joten koko ketjun systemaattinen tietoturvan ylläpito on tärkeää. Myös työntekijöiden oikeanlainen asennoituminen tietoturvaan liittyvissä seikoissa on erittäin suuri osa kokonaistietoturvaa. Toinen suuri haasteellinen tekijä on yhteyskatkokset. Yhteyskatkokset tuottavat yleensä viivästyksiä toimintaan ja voivat pahimmassa tapauksessa lamauttaa toiminnan täysin. Teollisuudessa yhteyskatkoksen aikana tilanne voidaan kuitenkin yleensä hoitaa manuaalisesti.

LÄHTEET

- [1] "Megatrendi", *Sitra*. <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/megatrendi/> (viitattu 13. lokakuuta 2022).
- [2] "Megatrendikortit 2020", *Sitra*. <https://www.sitra.fi/julkaisut/megatrendikortit-2020/> (viitattu 13. lokakuuta 2022).
- [3] T. Heikkilä, "Vuoden 2021 tärkeimmät megatrendit", *Sijoittaja.fi*, 3. helmikuuta 2021. <https://www.sijoittaja.fi/258979/vuoden-2021-tarkeimmat-megatrendit/> (viitattu 10. lokakuuta 2022).
- [4] "IoT-kasitteita-ja-maaritelmiä.pdf". Viitattu: 16. lokakuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: https://ficom.fi/wp-content/uploads/2021/11/IoT-kasitteita-ja-maaritelmiä.pdf?_ga=2.72745680.2102145069.1665918140-555784101.1665918140
- [5] riikka.vaaja@ficom.fi, "IoT esineiden internet", *FiCom*, 18. toukokuuta 2022. <https://ficom.fi/ict-ala/tietopankki/internetpalvelut/iot-esineiden-internet/iot-esineiden-internet/> (viitattu 16. lokakuuta 2022).
- [6] "What Is Industrial IoT (IIoT)?", *Cisco*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/what-is-industrial-iiot.html> (viitattu 17. lokakuuta 2022).
- [7] "OA_Teollisen_internetin_palvelut_valmistavassa_teollisuudessa.pdf". Viitattu: 19. lokakuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2018/OA_Teollisen_internetin_palvelut_valmistavassa_teollisuudessa.pdf
- [8] J. Collin ja A. Saarelainen, *Teollinen internet*. Helsinki: Talentum, 2016.
- [9] toimitus, "Tärkeä opas teollisuuden IoT-tietoturvaan", *Uusiteknologia.fi*, 4. huhtikuuta 2018. <https://www.uusiteknologia.fi/2018/04/04/tarkea-opas-teollisuuden-iot-tietoturvaan/> (viitattu 19. lokakuuta 2022).
- [10] "Teollisuuden anturointiratkaisut | VTT". <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/teollisuuden-anturointiratkaisut> (viitattu 16. lokakuuta 2022).
- [11] "anturiverkko – Tieteen termipankki". <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:anturiverkko> (viitattu 1. marraskuuta 2022).
- [12] "What is a Gateway? Definition from WhatIs.com", *IoT Agenda*. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/gateway> (viitattu 3. marraskuuta 2022).
- [13] "Mitä on edge computing eli reunalaskenta? | NordVPN", 7. elokuuta 2022. <https://nordvpn.com/fi/blog/reunalaskenta/> (viitattu 21. marraskuuta 2022).
- [14] J. Sandborg, "NoSQL-tietokannat", s. 37.
- [15] T. Laitos, "NoSQL-tietokannat: perusominaisuudet ja luokittelu", s. 31.
- [16] "big data | TEPA-termipankki (erikoisalojen sanasto- ja sanakirjakokoelma)". <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/big%20data> (viitattu 16. marraskuuta 2022).
- [17] "cse-c2400_luento9-langattomat.pdf". Viitattu: 24. marraskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: http://www.cse.tkk.fi/fi/opinnot/T-110.2100/2014_cse-c2400_tietokoneverkot/luennot-files/cse-c2400_luento9-langattomat.pdf
- [18] "Luku 5 Mobiiliverkot ja langaton tiedonsiirto.pdf". Viitattu: 14. joulukuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/889530/mod_resource/content/1/Luku%205%20Mobiiliverkot%20ja%20langaton%20tiedonsiirto.pdf
- [19] R. Want, "An introduction to RFID technology", *IEEE Pervasive Comput.*, vsk. 5, nro 1, ss. 25–33, tammi 2006, doi: 10.1109/MPRV.2006.2.

- [20] "Active RFID | Shop Active RFID Tags & Long Range RFID Readers | atlasRFIDstore". <https://www.atlasrfidstore.com/active-rfid/> (viitattu 29. maaliskuuta 2023).
- [21] hirokato, "RFID and the Differences in Passive, Semi-Passive, and Active Tags", *Computype*, 11. tammikuuta 2022. <https://www.computype.com/blog/rfid-and-the-difference-in-passive-semi-passive-and-active-tags/> (viitattu 11. huhtikuuta 2023).
- [22] "Bluetooth Technology Overview", *Bluetooth® Technology Website*. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/> (viitattu 4. huhtikuuta 2023).
- [23] S. Ashok ja D. R. V. Krishnaiah, "Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology", *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng.*, 2013.
- [24] S. C. Ergen, "ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary".
- [25] "Wi-Fi Standards Explained", *GeeksforGeeks*, 2. maaliskuuta 2021. <https://www.geeksforgeeks.org/wi-fi-standards-explained/> (viitattu 22. huhtikuuta 2023).
- [26] J. Lansford, A. Stephens, ja R. Nevo, "Wi-Fi (802.11b) and Bluetooth: enabling coexistence", *IEEE Netw.*, vsk. 15, nro 5, ss. 20–27, syys 2001, doi: 10.1109/65.953230.
- [27] "DASH7 Alliance – An open specification". <https://www.dash7-alliance.org/> (viitattu 23. marraskuuta 2022).
- [28] "Use-case-Aloxy.pdf". Viitattu: 23. marraskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.dash7-alliance.org/wp-content/uploads/2020/10/Use-case-Aloxy.pdf>
- [29] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue, ja J.-C. Prévotet, "Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility", *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vsk. 21, nro 2, ss. 1561–1581, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2877382.
- [30] "IEEE Xplore Abstract Record". Viitattu: 10. tammikuuta 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7390420>
- [31] "What is LoRaWAN® Specification", *LoRa Alliance®*. <https://loralliance.org/about-lorawan/> (viitattu 20. marraskuuta 2022).
- [32] "LoRaWAN laitteet ja seuranta", *Kaltiot*. <https://kaltiot.com/teknologia/lora-laitteet-seuranta/> (viitattu 20. marraskuuta 2022).
- [33] "LoRa and LoRaWAN: Technical overview | DEVELOPER PORTAL". <https://loradevelopers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/> (viitattu 22. marraskuuta 2022).
- [34] "Vinkkejä verkkokaavion kartoittamiseen". <https://www.microsoft.com/fi-fi/microsoft-365/business-insights-ideas/resources/tips-for-mapping-your-network-diagram> (viitattu 20. marraskuuta 2022).
- [35] "Fastems and Kempf CNC-Technik - FMS with Tool Management", *Fastems*. <https://www.fastems.com/case/kempf-cnc-technik/> (viitattu 5. huhtikuuta 2023).
- [36] "Sandvikin akkukäyttöisten laitteiden valikoima laajenee pitkäreikäporauslaitteella", *Sandvik Mining and Rock Technology*. <https://www.rocktechnology.sandvik/fi/uutiset-media/uutisarkisto/2021/03/sandvikin-akkuk%C3%A4ytt%C3%B6isten-laitteiden-valikoima-laajenee-pitk%C3%A4reik%C3%A4porauslaitteella/> (viitattu 6. huhtikuuta 2023).
- [37] "Älykkyys ja automaatio", *Sandvik Mining and Rock Technology*. <https://www.rocktechnology.sandvik/fi/kampanjat/400i-sarja/%C3%A4lykkyys-ja-automatio2/> (viitattu 6. huhtikuuta 2023).
- [38] "World's first industrial application utilizing 5G and AI adopted at ABB drives factory in Helsinki", *News*, 14. kesäkuuta 2019. <https://new.abb.com/news/detail/25464/worlds-first-industrial-application-utilizing-5g-and-ai-adopted-at-abb-drives-factory-in-helsinki> (viitattu 29. maaliskuuta 2023).

- [39] "Maailman ensimmäinen teollinen 5G-tekoälysovellus syntyi Suomessa". <https://www.telia.fi/yrityksille/artikkelit/artikkeli/5g-tekoalysovellus-syntyi-suomessa> (viitattu 29. maaliskuuta 2023).