

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT  
School of Engineering Science  
Tietotekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

**Perttu Bäckman**

**SELVITYS IOT-ALUSTOJEN NYKYTILASTA JA  
MARKKINATILANTEESTA**

Työn tarkastaja:      Professori Kari Smolander

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Engineering Science

Tietotekniikan koulutusohjelma

Perttu Bäckman

## Selvitys IoT-alustojen nykytilasta ja markkinatilanteesta

Kandidaatintyö 2019

38 sivua, 3 taulukkoa

Työn tarkastajat: Professori Kari Smolander

Hakusanat: IoT, IoT-alusta, esineiden internet

Keywords: IoT, IoT-platform, Internet of Things

IoT (Internet of Things) on ollut viime vuosien puhutuimpia aiheita tietotekniikan saralla. IoT-alustojen tarve kasvaa IoT-laitteiden ja niiden tuottaman tiedon määrän kasvaessa. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää IoT-alustojen nykytila ja tämänhetkinen markkinatilanne. Tässä työssä perehdytään IoT-alustojen arkkitehtuuriin, tekniikkaan ja tietoturvaan. Lisäksi tutkitaan mitkä tekijät vaikuttavat IoT-alustan valintaa. Työssä tutkitaan myös markkinatilannetta ja perehdytään kolmeen eri IoT-alustaan. Selvitettävien IoT-alustojen määrä on rajattu kolmeen suosituimpaan, joista yksi on tarkoitettu teolliseen käyttöön. Tuloksissa selvisi, etteivät IoT ja IoT-alustat ole kokonaisuudessaan standardoituja. Ne ovat joukko tekniikoita, jotka tukevat esineiden internetin tarkoitusta. Tutkimuksessa selvisi monia tekijöitä, jotka vaikuttavat IoT-alustan valintaan. Yhtenä tärkeimpänä näistä mainittakoon tietoturva. Markkinatilanteesta selvisi, että kaksi tämän hetkistä markkinajohtajaa ovat IoT-pilvialustoja, Amazon AWS IoT Core-alusta ja Microsoft Azure IoT Hub-alusta. Teollisen internetin puolella markkinajohtaja on PTC ThingWorx-alusta. IoT tulee kasvamaan tulevaisuudessa voimakkaasti ja IoT-alustojen merkitys tulee lisääntymään, jotta lisääntyneitä laitteiden ja tiedon määrää saadaan hallittua kustannustehokkaasti.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT  
School of Engineering Science  
Degree Programme in Software Engineering  
Perttu Bäckman

### **An overview of the current state and market situation of the IoT-platforms**

Bachelor's Thesis 2019

38 pages, 3 tables

Examiner: Professor Kari Smolander

Keywords: IoT, IoT-platform, Internet of Things

IoT (Internet of things) is one of the most talked topics in the field of information technology in recent years. The need for IoT-platforms is increasing as the number of IoT-devices and amount of data they generate increases. The aim of this bachelor's thesis is to find out the current state of the IoT-platforms and the current market situation. This work focuses on the architecture, technology and security of IoT-platforms. In addition, the factors that influence the choice of IoT-platform will be investigated. The thesis also examines the market situation and three different IoT-platforms. The number of IoT-platforms to investigate is limited to the top three, one of which is for industrial use. The results showed that IoT and IoT-platforms are not fully standardized. They are a set of technologies that support the purpose of the Internet of Things. The study revealed many factors that influence the choice of IoT-platform. One of the most important of these was security. The market study found that the two current market leaders are IoT-cloud platforms, Amazon AWS IoT Core-platform and Microsoft Azure IoT Hub-platform. On the industrial internet side, the market leader is the PTC ThingWorx-platform. IoT will grow strongly in the future and the importance of IoT platforms will be increased in order to manage the increased number of IoT-devices and amount of data in a cost-effective manner.

## **ALKUSANAT**

Työ on tehty Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston tietotekniikan koulutusohjelman kandidaatintyönä syyslukukaudella 2019. Kiitän Kari Smolanderia työn ohjaamisesta ja perhettä tuesta ja jaksamisesta heikkoina hetkinä.

# SISÄLLYSLUETTELO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>JOHDANTO.....</b>                             | <b>3</b>  |
| 1.1      | TAUSTA .....                                     | 3         |
| 1.2      | TAVOITTEET JA RAJAUKSET .....                    | 4         |
| 1.3      | TYÖN RAKENNE .....                               | 5         |
| <b>2</b> | <b>KIRJALLISUUSKATSAUS.....</b>                  | <b>6</b>  |
| <b>3</b> | <b>TUTKIMUSMENETELMÄ JA AINEISTON KERUU.....</b> | <b>8</b>  |
| <b>4</b> | <b>INTERNET OF THINGS.....</b>                   | <b>9</b>  |
| 4.1      | ARKKITEHTUURI.....                               | 10        |
| 4.2      | SENSORIT, AKTUAATTORIT JA LAITTEET .....         | 12        |
| 4.3      | PROTOKOLLAT .....                                | 12        |
| 4.4      | IoT-ALUSTAT.....                                 | 14        |
| 4.5      | TIETOTURVA JA TIETOSUOJA.....                    | 18        |
| 4.6      | IoT-ALUSTAN VALINTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....   | 19        |
| <b>5</b> | <b>MARKKINATILANNE .....</b>                     | <b>22</b> |
| 5.1      | AMAZON AWS IoT CORE.....                         | 23        |
| 5.2      | MICROSOFT AZURE IoT HUB.....                     | 24        |
| 5.3      | PTC THINGWORX .....                              | 25        |
| <b>6</b> | <b>POHDINTAA JA TULEVAISUUS .....</b>            | <b>27</b> |
| <b>7</b> | <b>YHTEENVETO.....</b>                           | <b>29</b> |
|          | <b>LÄHTEET.....</b>                              | <b>31</b> |

## **SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**

|         |   |
|---------|---|
| 5G      | Fifth Generation                                      |
| AMQP    | Advanced Message Queuing Protocol                     |
| API     | Application Programming Interface                     |
| AWS     | Amazon Web Services                                   |
| CoAP    | Constrained Application Protocol                      |
| DDS     | Data Distribution Service                             |
| DoS     | Denial of Service                                     |
| DTLS    | Datagram Transport Layer Security                     |
| HTTP    | Hypertext Transfer Protocol                           |
| IaaS    | Infrastructure as a Service                           |
| IAM     | Identity and Access Management                        |
| IoE     | Internet of Everything                                |
| IIoT    | Industrial Internet of Things                         |
| IoT     | Internet of Things                                    |
| IP      | Internet protocol                                     |
| M2M     | Machine to Machine                                    |
| MOSFET  | Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor     |
| MQTT    | Message Queue Telemetry Transport                     |
| MQTT-SN | Message Queue Telemetry Transport for Sensor Networks |
| REST    | REpresentational State Transfer                       |
| RFID    | Radio-Frequency Identification                        |
| SAS     | Shared Access Signature                               |
| SDK     | Software Development Kit                              |
| TCP     | Transmission Control Protocol                         |
| UDP     | User Datagram Protocol                                |
| XML     | Extensible Markup Language                            |
| XMPP    | Extensible Messaging and Presence Protocol            |

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Esineiden Internet eli IoT (Internet of Things) on ollut viime vuosien ajan yksi puhutuimpia aiheita tietotekniikan saralla. IoT on useamman vuoden ollut esillä tutkimuslaitos Gartnerin Hype-listalla ja nyt se on siirtymässä seuraavaan vaiheeseen [1]. Esineiden Internet on siirtymässä yhä enemmän käytännölliseen vaiheeseen, jossa sen mahdollisuuksia päästään hyödyntämään oikeasti. IoT on liitetty vahvasti myös todennäköisesti tulevaan neljänteen teolliseen vallankumoukseen, jossa fyysiset ja digitaaliset teknologiat yhdistyvät yhä vahvemmin [2].

Vaikka IoT-terminä on jo yli 20-vuotta vanha, se on viime vuosina kasvanut räjähdysmäisesti. Tutkimusyriitys IDC arvioi, että vuonna 2025 tulee olemaan 41,6 miljardia verkkoon yhdistettyä laitetta ja nämä laitteet tuottaisivat 79,4 ZB (tsettatavu) määrän dataa [3]. Tälläkin hetkellä on valtavia määriä laitteita liitettynä verkkoon ja niiden hallintaan tarkoitettuja kaupallisia IoT-alustojakin tarjoaa jo yli 450 yritystä [4].

Uuteen teknologiaan liittyy aina paljon mahdollisuuksia, mutta myös haasteita. IoT on vielä hakemassa lopullista muotoaan, mutta jo nyt liitettyjen esineiden määrä on valtava ja se kasvaa huimaa vauhtia. IoT tarjoaa mahdollisuuksia monille aloille niin tuottavuuden kasvuun kuin helpottamaan päivittäisiä rutiineja.

IoT-alustojen on tarkoitus helpottaa laitteiden käyttöönottoa, hallintaa ja miten IoT-laitteiden tuottamaa tärkeää dataa säilötään ja analysoidaan. Erilaisia IoT-alustoja on kuitenkin markkinoilla runsaasti ja niiden laatu sekä tarjoamat palvelut vaihtelevat suuresti. IoT-alustan valintaan voi vaikuttaa moni tekijä kuten skaalautuvuus, käytettävät protokollat, miten ja missä tuotettu data säilötään ja tietoturva. Tulevaisuuden kannalta on tärkeää löytää tuotetusta datasta yritykselle arvokas tieto ja se, miten pystytään varmistamaan tietoturvan riittävyys.

## 1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän kandidaatintyön päätavoitteena on perehtyä IoT-alustojen nykytilaan ja markkinatilanteeseen. Tavoitteena on tarjota mahdollisimman tuore katsaus niin tämän päivän IoT-teknoologiaan, alustoihin kuin myös niiden markkinatilanteeseen.

Työn teoriaosuudessa selvitetään IoT-alustojen nykytilaa. Tavoitteena on selvittää mitä termeillä IoT ja IoT-alusta tarkoitetaan, mitkä ovat niiden hyödyt nykyisin niin yrittäjälle, kuluttajalle kuin yhteiskunnalle. Lisäksi tavoitteena on selvittää IoT-alustojen arkkitehtuuria ja millä tasolla niiden tietoturva on nykytilanteessa, kuin myös miksi IoT-alustoja käytetään ja mitkä tekijät vaikuttavat IoT-alustan valintaan.

Työn käytännön osuudessa selvitetään tarkemmin IoT-alustojen markkinatilannetta ja perehdytään kahteen eri palveluntarjoajan kaupalliseen alustaan. Tutkittavat alustat valitaan tämänhetkisen markkinatilanteen mukaan, eli tässä tapauksessa pyritään määrittelemään tämän hetken suosituimmat alustat. Näiden kahden lisäksi perehdytään yhteen nimenomaan teollisuuden käyttöön suunniteltuun IoT-alustaan.

Tutkimuskysymyksinä tässä kandidaatintyössä ovat ”Mitkä alustat ovat markkinajohtajia ja mitkä tekijät vaikuttavat IoT-alustan valintaan?”.

Työssä aihetta rajataan ajatuksella mitä halutaan tietää kerätyn aineiston pohjalta [5]. Tässä kandidaatintyössä tutkimus rajataan käsittelemään ainoastaan kaupallisia IoT-alustoja eli ilmaiset alustat rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Lisäksi työssä ei käsitellä laitteisto IoT-alustoja vaan keskitytään ohjelmistotalustoihin. Tutkittavien kaupallisten IoT-alustojen määrä rajataan kolmeen. Työssä käytettävä materiaali rajataan käsittämään suomen- ja englanninkieliset lähteet. Työssä IoT-teknoologiaa käsitellään yleisellä tasolla, tarkoitus ei ole perehtyä mihin tilanteisiin eri teknologiat soveltuisivat parhaiten, vaan antaa lukijalle käsitys millaisilla tekniikoilla IoT toimii. Lisäksi tutkimus rajataan käsittelemään ainoastaan tutkittavien IoT-alustojen tärkeimpiä perusominaisuuksia, käytettävän ajan rajallisuuden takia. Ottaen huomioon, että kaupallisista IoT-alustoista kaikkien teknologiaa käsittelevien tietojen hankkiminen voi olla hankalaa.



### **1.3 Työn rakenne**

Luvussa 2 käydään läpi kirjallisuuskatsaus siitä mitä aiheesta on aikaisemmin kirjoitettu ja mitä tutkimusta siitä on aikaisemmin tehty.

Luvussa 3 esitellään tutkimusmenetelmät, jolla tätä aihetta käsitellään. Lisäksi kerrotaan miten ja mistä aiheeseen liittyvää materiaalia kerättiin.

Luvussa 4 kerrotaan taustatietoja IoT-teknologiasta, IoT-alustoista, niiden arkkitehtuureista ja rakenteista. Luvussa esitellään myös tarkemmin IoT-alustojen tietoturvaa, nykytilannetta ja tekijöitä, jotka vaikuttavat IoT-alustan valintaan.

Luvussa 5 esitellään markkinoiden kolme johtavaa IoT-alustaa, kukin omassa aliluvussaan. Näistä esitellään keskeiset toiminnot, ominaisuudet ja yhteensopivuudet.

Luvussa 6 pohditaan mitkä seikat saavat yritykset käyttämään IoT-alustoja. Lisäksi arvioidaan miten markkinat ja palvelut tulevat tulevaisuudessa kehittymään.

Luvussa 7 esitetään yhteenveto mitä tässä kandidityössä tuli selville IoT-alustojen nykytilasta ja markkinatilanteesta.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Esineiden internetistä on julkaistu muutamana viimeisenä vuonna paljon tutkimusta ja kirjallisuutta. Kirjallisuus on lähinnä englanninkielistä ja suomalaista kirjallisuutta aiheesta on saatavilla melko vähän.

Collin ja Saarelainen käsittelevät esineiden internetiä kirjassaan ”Teollinen Internet”. Kirja keskittyy käsittelemään IoT-ratkaisuja teollisuuden näkökulmasta ja se tarkoitettu lähinnä käsikirjaksi yritysten avainhenkilöille liiketoimintaratkaisujen tueksi. Kirjassa perehdytään myös IoT-teknologiaan ja IoT-alustoihin, ja pohditaan niiden valintaan liittyviä kysymyksiä. [2]

IoT-teknologiaa käsittelevää kirjallisuutta löytyy englanniksi kirjoitettuna melko paljon. Rayesin ja Salamin kirjoittama ”Internet of Things From Hype to Reality” käsittelee kattavasti IoT-maailmaa ja sen kehitystä. Siinä käydään läpi niin yleiskatsaus IoT:iin kuin myös teknologiat, IoT-alustat ja tietoturva. [6]

IoT-alustoihin liittyvistä komponenteista ja palveluista kerrotaan laajasti kirjassa ”Components and Services for IoT Platforms: Paving the Way for IoT Standards”, jossa Keramidas, Voros ja Hübner ovat koonneet laajan teknisen tietopakettin aiheeseen liittyen. [7]

Tutkimuksia ja julkaisuja liittyen IoT-teknologiaan ja IoT-alustoihin löytyy runsaasti. Näitä materiaaleja löytyy esimerkiksi tutkijoille kehitetystä Google Scholar -palvelusta [2]. Haettaessa hakusanalla ”IoT platform” löytyy yli 19000 tulosta vuodelta 2019.

Jouni Pänkäläinen on tehnyt vuonna 2016 diplomityön Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa aiheesta ”Information security in the Internet of Things – a systematic literature review”. Työssään hän käy läpi 38 artikkelia, joiden avulla muodostetaan kokonaiskuva IoT:n tietoturvasta. Johtopäätöksissä hän toteaa, että on vielä paljon parannettavaa eritoten IoT:n yksityisyydensuojan osalta. Lisäksi hän ilmaisee huolensa yleisesti esineiden internetin tietoturvan tasosta. [8]

Pankaj Ganguly määrittelee tutkimuksessaan ”Selecting the right IoT Cloud Platform” peruskriteerit IoT-pilvialustan valintaan. Tutkimus on vuodelta 2015, mutta peruskriteerit ovat kuitenkin melko hyvin soveltuvia tähän päivään. [9]

### 3 TUTKIMUSMENETELMÄ JA AINEISTON KERUU

Tämän kandidaatintyön tekninen osuus toteutetaan markkinatutkimuksena, jolla selvitetään tämänhetkinen IoT-alustojen markkinatilanne. Tietoa työn teoriaosuuteen, joka käsittelee teknologioita mitä IoT:iin liittyy, kerätään niin kirjallisuudesta kuin muistakin teoreettisista lähteistä. Selvitetään mitä aiheesta on tähän mennessä kirjoitettu, niin suomen- kuin englanninkielisenä. Lisäksi käydään läpi jo olemassa olevia tutkimuksia ja julkaisuja IoT-alustoista ja seikoista, jotka vaikuttavat niiden valintaan ja miksi niitä käytetään. Näin pyritään luomaan kokonaiskuva IoT-alustojen nykytilanteesta. Näistä lähteistä kerätyistä tiedoista huomioidaan lähdekriittisyys, sekä julkaisuajankohta kuin myös kirjoittajan taustat ja asiantuntevuus.

IoT-alustojen markkinatilannetta selvitetään mahdollisten aikaisempien markkinaselvitysten pohjalta ja tutkimalla palveluntuottajien Internet-sivustoja ja muita verkkolähteitä. Markkinatilannetta analysoidaan selvitysten pohjalta ja niiden perusteella valitaan kaksi suosituinta tarkempaan selvitykseen. Markkinatilannetta ei analysoida siitä saatujen rahallisten tuottojen mukaan, koska niitä on hankala kohdentaa nimenomaan IoT-alustoista saaduksi, monien isojen toimijoiden niputtaessa palveluita saman nimen alle. Lisäksi pyritään löytämään tutkimusten ja markkinaselvitysten perusteella nimenomaan teollisuuden käyttöön tarkoitettu markkinoita johtava IoT-alusta, josta tehdään tarkempi selvitys.

Tutkimuksessa pyritään aina välttämään virheiden syntyminen [2]. Markkinatilannetta tutkiessa pyritään käyttämään useita eri lähteitä, jotta pystytään todentamaan mahdollisimman todenmukainen kuva todellisesta markkinatilanteesta. Tällöin voidaan pitää tilannetta mahdollisimman totuus pohjaisena ja faktatietoon perustuvana, kun useat lähteet ovat päätyneet samanlaisiin tuloksiin [2].

IoT-alustojen markkinajohtajat esitellään case study -tyyppisesti, jolloin käsitellään johtavat IoT-alustat yksittäisinä tapauksinaan. Tyypillisesti tapauksetutkimuksessa valitaan yksittäinen tapaus, tilanne tai joukko tapauksia suhteessa toisiinsa [2]. Esittelyssä käsitellään kolme IoT-alustaa jokainen omana lukunaan ja käydään läpi niiden tärkeimmät ominaisuudet.

## 4 INTERNET OF THINGS

Mark Weiser kirjoitti ”The Computer for the 21st century” -artikkelin vuonna 1991, jossa hän piti selvänä, että tulevaisuudessa monet asiat ja esineet tulevat sisältämään tietokoneen [6]. Tätä voidaan pitää ensimmäisenä ennusmerkkinä tulevasta, esineiden internetistä. Itse termi IoT syntyi vuonna 1999 Kevin Ashtonin toimesta, hänen pitäessään Procter & Gamble yritykselle esitystä, joka oli nimetty ”Internet Of Things” [10].

Virallisesti IoT kävi yleistymään 2000-luvun alkupuolella ja verkkoyhtiö Cisco toteaa, että virallisesti IoT syntyi 2008, kun liitettyjen laitteiden määrä ylitti verkkoon liittyneiden ihmisten määrän [11]. 2000-luvun nopeaan kehitykseen vaikuttaa vahvasti MOSFET-piirien (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) kehitys, jolla mahdollistetaan yhä pienemmät ja vähävirtaisemmat laitteet [12].

IoT on määritelty kirjallisuudessa useilla eri tavoilla, mutta virallista määritelmää termille ei ole. IoT on siis useista eri laitteista, teknologioista ja ohjelmistoista muodostuva kokonaisuus, eikä yksi standardoitu teknologia. Voidaan todeta, että yleisesti IoT:llä tarkoitetaan kokonaisuutta, jonka avulla liitetään internettiin ja toisiinsa erilaisia sensoreita, aktuaattoreita, laitteita ja koneita, joita voidaan myös hallita ja kerätä niiden tuottamaa tietoa. On myös mahdollista, että nämä esineet kommunikoivat keskenään tai voivat olla vuorovaikutuksessa fyysisen maailman kanssa. Esineiden internetiä voidaan hyödyntää lukuisissa erilaisissa kohteissa kuten rakennusautomaatiossa, älykkäissä kaupungeissa, teollisuudessa ja maataloudessa kuin myös lukuisissa kuluttajille suunnatuissa laitteissa. [6]

Koska Internet of Things on todella laaja käsite, on sen alle muodostunut joukko alakäsitteitä. Teollisuudessa käytetään enemmän termiä IIoT (Industrial Internet of Things), tällä viitataan siihen, miten sen yleisin piirre on tapa, jolla ohjelmistopohjainen äly sisältyy teollisesti valmistettuihin koneisiin ja laitteisiin [2]. Toinen nykyisin käytössä oleva termi on IoE (Internet of Everything), eli lyhyesti kaiken internet. Erityisesti verkkoyhtiö Ciscon käyttämällä termillä pyritään tuomaan yhteen ihmiset, prosessit, datan ja asiat. Tarkoituksena luoda uusia mahdollisuuksia niin yrityksille kuin kuluttajille, muuntamalla saatu tieto toiminnaksi [13].

## 4.1 Arkkitehtuuri

IoT-järjestelmälle on luotu seitsemän tasoinen referenssiarkkitehtuurimalli, jossa jokaisella tasolla on oma tehtävänsä, kuten taulukosta 1. käy ilmi. IoT-järjestelmässä tietoa generoidaan useiden erilaisten laitteiden kautta, käsitellään eri tavoin, lähetetään eri paikkoihin ja suoritetaan sovellusten toimintoja. Referenssimalli ei rajoita komponenttien fyysistä sijaintia ja on tärkeää muistaa, että IoT:ssä tieto liikkuu kumpaakin suuntaan. Malli kuvaa, miten kullakin tasolla olevat tehtävät tulisi suorittaa säilyttäen yksinkertaisuuden, korkean skaalaavuuden ja varmistaen yhteensopivuuden. [14]

**Taulukko 1.** Cisco:n IoT referenssiarkkitehtuurimalli [14].

| <b>Taso</b> | <b>Kerros</b>                                |
|-------------|--|
| 7           | Prosessikerros (Collaboration & Processes)   |
| 6           | Sovelluskerros (Application)                 |
| 5           | Erottelukerros (Data Abstraction)            |
| 4           | Tiedon varastointikerros (Data Accumulation) |
| 3           | Reunalaskentakerros (Edge(fog) Computing)    |
| 2           | Yhteyskerros (Connection)                    |
| 1           | Laitekerros (Physical Devices & Controllers) |

Tasolla 1 sijaitsevat fyysiset laitteet ja ohjaimet, joilla on mahdollista hallita useita laitteita. Tällä tasolla sijaitsevat niin sanotut ”esineet”, joihin kuuluu laajasti erilaisia päätelaitteita, joilla ei ole rajoitteita koon, sijainnin tai valmistajan mukaan. [14]

Tasolla 2 sijaitsevat verkkolaitteet, joiden välityksellä tason 1 esineet liittyvät verkkoon, toisiin esineisiin ja tason 3 toimintoihin. Tason tärkeimpinä tehtävinä voidaan pitää luotettavaa ja ajankohtaista tiedonsiirtoa, eri protokollien implementaatioita ja niiden välisiä käännöksiä, reititystä ja kytkentöjä ja verkkotason tietoturva. [14]

Tasolla 3 käsitellään ensimmäistä kertaa esineiden tuottamaa tietoa. Tällä tasolla tietoa suodatetaan, yhdistetään ja puhdistetaan. Tasolla tietoa voidaan käsitellä monilla eri tavoilla,

joilla se muokkautuu ylempien tasojen käyttöön ja siitä saadaan karsittua epäolennaiset pois. [14]

Tasolla 4 tieto tallennetaan ja säilötään. Tämän jälkeen tieto on sovellusten käytettävissä, jotka eivät tarvitse reaaliaikaista tietoa. Tasolla muutetaan tapahtumapohjainen tieto kyselypohjaiseen muotoon, jonka jälkeen se on ylempien tasojen käytettävissä. [14]

Taso 5 sisältää funktiota, jotka ovat suunnattu tiedon renderöintiin ja tallentamiseen niin että mahdollistetaan yksinkertaisempien ja suorituskykyisempien ohjelmien kehittäminen. Kun useat laitteet tuottavat tietoa, saattaa tieto hajaantua useaan tietovarastoon. Lisäksi laitteet saattavat sijaita maantieteellisesti kaukana toisistaan ja prosessointi on optimoitu lokaalisti. Näidenkin syiden takia tällä tasolla tietoa prosessoidaan usealla eri tavalla, kuten yhdistetään useista lähteistä tulevaa ja eri formaateissa olevaa tietoa, varmistetaan tiedon eheys, tiedon suojaaminen ja tiedon indeksointi. [14]

Tasolla 6 sijaitset sovellukset ja tapahtuu tiedon tulkinta. Sovellukset ovat vuorovaikutuksessa tason 5 kanssa ja tiedon, joka on säilössä. Referenssimalli ei ota kantaa millaisia sovelluksia käytetään, vaan voidaan käyttää markkinoiden, laitteiden tai liiketoiminnan kannalta olennaisia ohjelmia. [14]

Tasolla 7 sijaitsee prosessikerros, jossa kuvataan järjestelmää käyttävien ihmisten välistä yhteistyötä ja miten oikeasta tiedosta, oikeaan aikaan saadaan liiketoimintaa hyödyntäviä päätöksiä. [14]

Tämä verkkoyhtiö Cison vuonna 2014 esittelemä malli on vain yksi vaihtoehto. On myös olemassa niin kolme tasoisia suppeampia malleja kuin myös viisi tasoisia malleja. Kuten aikaisemmin on jo mainittu IoT:lle ja eikä myöskään alustoille ole luotu standardeja, jotka määrittelisivät millaisia mallien kuuluisi olla.

## 4.2 Sensorit, aktuaattorit ja laitteet

Esineiden internetin tärkein tehtävä on kerätä tietoa reaali maailman ilmiöistä. IoT-järjestelmien sensorit, aktuaattorit ja laitteet ovat sen tärkeimpiä osia tiedon keräämisen kannalta.

Sensorit ovat komponentteja, jotka keräävät tietoa ja muuntavat sen sähköiseen muotoon. Ne voivat kerätä tietoa esimerkiksi lämmöstä, valosta, äänestä, paineesta, magnetismista tai liikkeestä. Sensorit lähettävät tiedon laitteeseen, johon ne ovat liitetty, käyttäen sähköisiä signaaleja. Ne voidaan liittää laitteisiin joko langattomalla tai kiinteällä yhteydellä. [2]

Laitteeksi kutsutaan useista komponenteista ja sensoreista koostuvaa kokonaisuutta, joka pystyy käsittelemään sensoreilta saatua tietoa ja välittämään sitä eteenpäin. Laite liitetään internettiin joko langattomasti tai kiinteästi. Viimevuosina juuri laitteiden ominaisuudet ovat kehittyneet huomattavan nopeasti. Niistä on tullut vähävirtaisimpia, nopeampia kuin myös kooltaan pienempiä. [6]

Aktuaattorit taas ottavat vastaan elektronisia signaaleja ja kääntävät ne fyysiseksi liikkeeksi eli niillä pyritään vaikuttamaan reaali maailmaan. Laite voi sensorien avulla mitata esimerkiksi huoneen kosteutta ja automaattisesti kosteuden noustessa laite lähettää tiedon aktuaattorille ilmanvaihtoventtiilin avaamisesta. Näitä toimia voivat esimerkiksi olla venttiilin avaaminen, paikan tai kulman vaihtaminen tai valaistuksen säätäminen. [6]

## 4.3 Protokollat

Esineiden internetin käyttämät protokollat voidaan jakaa neljään luokkaan. Nämä neljä luokkaa ovat sovellus protokollat (application protocols), palvelun löytämisprotokollat (service discovery protocols), infrastruktuuri protokollat (infrastructure protocols) ja muut vaikutusvaltaiset protokollat (influential protocols). Seuraavaksi otetaan tarkempaan tarkasteluun muutamia tärkeitä protokollia. [15]

CoAP (Constrained Application Protocol) soveltuu hyvin esineiden internettiin. Se on sovelluskerroksen protokolla ja on suunniteltu käytettäväksi M2M (Machine to Machine) -sovelluksissa. CoAP perustuu REST:iin (REpresentational State Transfer), joka esittää tavan



siirtää tietoa asiakas-palvelin-mallilla yli HTTP:n (Hypertext Transfer Protocol). CoAP toimii UDP-kuljetuskerroksessa (User Datagram Protocol) ja siihen on sisäänrakennettu DTLS (Datagram Transport Layer Security) pohjainen tietoturva. CoAP-protokollaa voidaan hyödyntää vertaisverkon tapaan laitteiden välisessä viestinnässä kuin myös laitteen ja verkkopalvelun tai välityspalvelinta käyttäen yhteyksissä HTTP-palvelinympäristöihin.[2][15]

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) on kevyt, yksinkertainen ja tehokas viestintäprotokolla. Se soveltuu hyvin laitteille, joilla on rajalliset resurssit ja jotka käyttävät heikkoja tai epäluotettavia yhteyksiä. Se soveltuu hyvin tiedon keräämiseen suuresta joukosta laitteita ja tiedon välittämiseen keskitettyyn it-järjestelmään, kuten pilvitietokantaan. MQTT normaali versio käyttää TCP-protokollaa (Transmission Control Protocol) ja siitä on olemassa myös MQTT-SN-versio (MQTT For Sensor Networks), joka käyttää UDP-protokollaa ja on suunniteltu nimenomaan sensoriverkoille.[2][15]

AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) perustuu aihepohjaiseen julkaisija-tilaaja-malliin ja sen vahvuuksia ovat yhteensopivuus, yksinkertaisuus, varmuus ja tietoturva. AMQP tarjoaa viestintään varmistuksia, joilla taataan viestien tulevan varmasti perille.[2][15]

XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol) on pikaviestin standardi, jolla mahdollistetaan kommunikointi internetin välityksellä riippumatta käyttöjärjestelmästä. Se on tietoturvallinen, hajautettu ja melko hyvin skaalautuva. Kuitenkin heikkoutena sen XML (Extensible Markup Language) pohjaisuus, jolloin se tuhlaa verkon resursseja.[2][15]

DDS (Data Distribution Service) on julkaisu/tilausprotokolla reaaliaikaiseen M2M-viestintään, eli sen avulla yhdistetään laitteita, varsinkin tilanteissa, jossa käytetään vastaanotettua dataa reaaliaikaisesti oman toiminnan ohjaamiseen. DDS:n avulla pystytään välittämään jopa miljoonia viestejä sekunnissa tuhansille vastaanottajille. Toisin kuin MQTT ja AMQP luottaa DDS monilähetyksiin ja sen vahvuuksia ovat datayhteyksien laadunvalvonta ja toimintavarmuus.[2][15]

## 4.4 IoT-alustat

IoT-alustaa voidaan pitää IoT teknologiapinon sydämenä. Sen avulla voidaan koota eri tietolähteistä tuleva informaatio yhteen. Sen tehtävänä yrityksille on yhdistää operatiivisten järjestelmien tietovirrat ja yrityksen tietojärjestelmät toisiinsa. Alustalla saadaan myös tallennettu tieto, analytiikka ja sovelluskehitys yhdistettyä, lisäksi sillä hoidetaan IoT-laitteisiin liittyvää tietoturva.[2]

IoT-alustan tärkeimpänä tarkoituksena voidaan kuitenkin pitää sen tehtävää vähentää monimutkaisuutta It-ammattilaisilta, kuten kehittäjiltä, palveluntarjoajilta ja toteuttajilta. Sovellusten kehittäminen, julkaisu ja hallinta koko sovelluksen elinkaaren ajan, kuin myös laitteiden yhdistäminen ja lisäarvoa tuottavien palveluiden lisääminen helpottuu IoT-alustan avulla. Alustat mahdollistavat muun muassa tavallisten ominaisuuksien automaation, joka voi muuten olla todella aikaa ja resursseja vievää työtä. [16]

Itse IoT-alusta voidaan määritellä monella tapaa. Yksi määritelmä on IHS Technologyn käyttämä, jossa IoT-alusta on "pilvipohjainen- tai paikallinen-ohjelmistopaketti ja siihen liittyvät palvelut, jotka mahdollistavat ja tukevat kehittyneitä IoT-palveluita" [16].

IoT-alustoille on määritelty perusominaisuuksia, jotka vaihtelevat hieman eri lähteitten mukaan. Collin ja Saarelainen määrittelevät ominaisuuksia kirjassaan "Teollinen Internet" seuraavanlaisesti.[2]

Alustojen ominaisuuksia:

- liitettävyys
- laitteiden hallinta
- datan aggregointi ja prosessointi
- tietokanta
- datan analysointi, raportointi ja visualisointi
- sovelluskehityksen työkalut ja rajapinnat
- rajapinnat ulkoisiin tietojärjestelmiin
- tietoturva

IoT-alustoja on markkinoilla sadoilta eri palveluntarjoajilta ja niiden ominaisuudet vaihtelevat suuresti käyttötarkoituksen mukaan. Yksinkertaisimmillaan IoT-alusta saattaa mahdollistaa vain sensorin liitettävyyden ja hallinnan, kehittyneimmät taas tarjoavat kokonaisvaltaisesti kaikki aikaisemmin luetellut ominaisuudet. [17]

IoT-alustoille voidaan määritellä myös joukko vaatimuksia, jotka niiden kuuluisi täyttää. Nämä vaatimukset voidaan jakaa erikseen toiminnallisiin ja ei-toiminnallisiin vaatimuksiin.

Toiminnalliset vaatimukset:

- 1) Resurssien löytäminen (Resource Discovery): Esineiden tulisi olla tietoisia, mitä kykyjä ja rajoituksia sillä on ilman, että ihmisen täytyy määritellä ne jokaiselle esineelle.
- 2) Resurssienhallinta (Resource Management): Alustalla tulisi olla valmius arvioida laitteen akun kestoa, muistin käyttöä ja muuta mikä vaikuttaa resurssien jakoon ja ohjelmien vaatimusten täyttämiseen.
- 3) Tiedonhallinta (Data Management): Tieto on tärkeä osa IoT:n arvoa. Tiedonhallinta koostuu tiedon hankkimisesta, tallentamisesta tietokantaan ja prosessoinnista.
- 4) Tapahtumahallinta (Event Management): Tiedonhallinnan jatkoa, tiedon tallennuksen jälkeen muut ohjelmat voivat käyttää sitä tarkoittaen, että tarkkoja päätöksiä voidaan tehdä reaaliajassa.
- 5) Koodien hallinta (Code Management): Alustan tulisi tarjota päivitysominaisuudet, ilman että täytyy päivittää jokainen laite käsin. [17]

Ei-toiminnalliset vaatimukset

- 1) Skaalautuvuus (Scalability): IoT-alustan täytyy olla skaalautuva, sillä esineitä liittyy verkkoon eksponentiaalisesti ja samoin kasvaa niiden tuottaman tiedon määrä.
- 2) Reaaliaikainen tai ajantasainen (Real-Time or Timeliness): Useat ohjelmat luottavat reaaliaikaiseen tietoon, joten tietoa täytyy päivittää jatkuvasti.
- 3) Saatavuus (Availability): Alustan tulisi tarjota kriittisimmät toiminnot jatkuvasti, vaikka se kärsisi muuten virheistä.
- 4) Turvallisuus (Security): Alustan tulee tarjota paras mahdollinen suojaus, jolla taataan että käyttäjän data on turvassa, samalla tarjota tunkeutumisen tunnistus mekanismeja.
- 5) Yksityisyys (Privacy): Miten alustan keräämää tietoa käsitellään ja miten huolehditaan yksityisyydensuojasta.

- 6) Helppo käyttöönotto, huolto ja käyttö (Ease of deployment, maintenance, and use): Keskiverto käyttäjän tulisi kyetä asentaa, pitää huolta ja käyttää alustaa helposti.
- 7) Yhteensopivuus (Interoperability): Alustojen pitäisi tukea mahdollisimman laajaa joukkoa erilaisia laitteita ja ohjelmistoja ilman että kehittäjien täytyy nähdä suurta vaivaa.
- 8) Spontaani vuorovaikutus (Spontaneous Interaction): Uusien laitteiden lisääminen ja laitteiden uudelleen sijoittaminen pitäisi onnistua alustan avustuksella niin että tarvitaan vain vähäistä ihmisen puuttumista.
- 9) Monilukuisuus (Multiplicity): Useiden laitteiden odotetaan kommunikoivan samanaikaisesti ja tarjoavan samoja palveluita, näin ollen alustan tulisi olla kykenevä päättämään mikä laitteista tarjoaa parasta tietoa.
- 10) Mukautuvuus ja joustavuus (Adaptability and flexibility): Alustan tulisi sopeutua pitkäaikaisiin muutoksiin. Sen pitäisi olla myös tarpeeksi joustava lyhytaikaisiin muutoksiin.
- [17]

**Taulukko 2.** IoT-alustojen jaottelu [18]

| Taso | Alusta  |
|------|---|
| 1    | Liitântä (Connectivity platforms)   |
| 2    | Laitteenhallinta (Device management platforms)  |
| 3    | Infrastrukturi palveluna / pilvi (IaaS (Infrastructure as a Service) / Cloud backend platforms) |
| 4    | Sovelluksen käyttöönotto (Application Enablement Platforms)                                     |
| 5    | Kehittyneet analysointi (Advanced analytics platforms)  |

IoT Analytics luokittelee nykyisin IoT-alustat viiden tason kuten taulukko 2. osoittaa. Parasta tietysti olisi, jos kaikki IoT-alustat tukisivat kaikkia aikaisemmin esitettyjä vaatimuksia, mutta yleisesti alusta tukee vain joitain niistä ja niiden mukaan ne jaotellaan viiteen kategoriaan. *Connectivity platforms*: Tarjoavat ominaisuuksia kattavuuteen ja IoT-laitteen yhdistämiseen, yhteyksien hallintaan ja organisointiin, lisäksi ne tarjoavat viestintäpalveluita kytkettyihin IoT-laitteisiin. *Device management platforms*: Hoitavat tehtäviä, joilla varmistetaan, että kytketyt laitteet otetaan käyttöön, konfiguroidaan ja pidetään ajan tasalla säännöllisillä laiteohjelmisto- ja ohjelmistopäivityksillä. *IaaS/Cloud backend platforms*: Tarjoavat yrityskäyttöön soveltuvan skaalautuvan taustaohjelman IoT-

sovellusten ja -palveluiden tiedonhallintaan. *Application enablement platforms:* Mahdollistavat kehittäjien nopeasti luoda, testata ja ottaa käyttöön IoT-sovelluksia tai -palveluita. *Advanced analytics platforms:* Tarjoavat hienostuneita analytiikkatyökaluja sisältäen koneoppimistekniikoita ja streaming-analytiikkaa, joiden avulla voidaan saada IoT-laitteiden tiedosta lisäarvoa. [18]

Viisi tasoisen lajittelun lisäksi IoT-alustat voidaan karkeasti jaotella kuluttaja- ja teollisuusalustoihin. Vaikka toiminnallisuudet voivat olla samankaltaisia, niin alustoissa painotetaan eri asioita kuten taulukosta 3. voidaan huomata.

**Taulukko 3.** Kuluttaja- ja teollisuusalusta [19]

|                               | <b>Kuluttaja IoT-alusta</b>                       | <b>Teollisuuden IoT-alusta</b>  |
|-------------------------------|---|---|
| Esimerkit                     | Ylläpidettävät laitteet, kodinlaitteet            | Autoteollisuus, maatalous, ilmaliikenne, armeija, automaatio          |
| Tärkein arvo                  | Sisältyy fyysiseen tuotteeseen                    | Ohjelmat, sulautetut järjestelmät, saatu tieto                        |
| Saatavuus ja skaalautuvaisuus | Vähäinen arvo                                     | Korkea arvo   |
| Turvallisuus ja saatavuus     | Keskimääräinen arvo                               | Korkea arvo   |
| Liitettävyys                  | yksisuuntainen, tieto pilveen, harvoin päivittyvä | kaksisuuntainen tiedonsiirto, etäohjaus, automaatio, usein päivittyvä |

Palveluntuottajat hinnoittelevat IoT-alustansa monenlaisilla eri malleilla. Isot toimivat kuten IBM ja Google käyttävät suhteellisen yksinkertaista hinnoittelumallia, joka perustuu tiedonsiirtoon, johon IBM lisää vielä kustannuksia tiedon analysoinnista. Microsoft käyttää hinnoittelussa mallia, jossa maksetaan lähetettyjen ja vastaanotettujen viestien mukaan. Amazonin AWS on hinnoittelultaan suurista toimijoista monimutkaisin perustuen yhteysaikaan, viestien määrään, laitteen varjon päivittämiseen (device shadow) ja sääntöjen määrään. PTC:n ThingWorx IoT-alustalle ei ole saatavilla julkisia hintoja, vaan ne määräytyvät tilattujen ominaisuuksien mukaan sopimuksilla. [20]

## 4.5 Tietoturva ja tietosuojaja

Huono tietoturva on yksi IoT-järjestelmien yleistymisen pahimmista esteistä [2]. IoT:n myötä on annettu lupauksia, että elämästä tulee mukavampaa ympäristön aistiessa ja automaation lisääntyessä. Kuitenkin kaikki verkkoon liitetyt laitteet lisäävät merkittävästi tietoturva- ja tietosuojariskejä. IoT-laitteiden yleistyessä kaikilla elämän osa-alueilla riskien määrä kasvaa niin kodeissa, liikenteessä kuin työpaikoillakin. [6]

Nykyiset IoT-alustat ovat usein koottu yhteen useista komponenteista, jotka ovat uudelleen hyödynnettyjä aikaisemmista ratkaisuista. Näin yritetään tyydyttää niin kuluttajien kuin myös yritysten tarpeet. Monet alustat käyttävät myös protokollia, standardeja ja konsepteja, jotka eivät ole suunniteltu IoT-järjestelmille. Näistä aiheutuu ongelmia niin tietoturvan kuin tietosuojan osalle. [21]

Varsinkin tietoturvaa koskien IoT:lla on omat uniikit ominaisuudet ja rajoitukset. Seuraavassa huomioita erityispiirteistä.

- a) **Teknologiat.** Käytössä on monia eri teknologioita aina RFID:stä (Radio-Frequency identification) langattomiin sensoriverkkoihin ja pilvipalveluihin. Yleisesti tietoturvan täytyy toimia koko tässä ketjussa ja järjestelmää täytyy arvioida sen heikoimman lenkin perusteella. [6]
- b) **Sovellukset.** IoT paradigmaan kuuluu sovelluksia monelta alalta, jolloin vaatimukset koskien tietoturvaa ovat erilaisia esimerkiksi tehtailla kuin kotona. [6]
- c) **Skaalautuvuus.** Laitteiden määrän lisääntyessä täytyy kehittää uusia kehittyneempiä puolustusmekanismeja, jotka pystyvät skaalautumaan kustannustehokkaasti. [6]
- d) **Saatavuus.** Saatavuuden kustannuksella saatetaan ottaa tietoturvariskejä ja olla reagoimatta epäilyttävään toimintaan, kuten porttiskannuksiin. [6]
- e) **Big Data.** Laitteiden määrän kasvaessa myös tiedon määrä kasvaa huimaa vauhtia. IoT-laitteiden sensorit tuottavat verkkoon valtavan määrän tietoa ja tämä tieto täytyy saada suojattua järkevästi. [6]
- f) **Rajatut resurssit.** Useissa IoT-päätelaitteissa on hyvin rajatut resurssit, kuten prosessori, muistit ja tallennustila. Rajatuilla resursseilla olevat laitteet ovat

alttiimpia hyökkäyksille. Niille on myös vaikeampi toteuttaa tehokkaita tietoturvapalveluita, kuten salausta. [6]

- g) **Syrjäiset sijainnit.** Monet IoT-laitteet sijaitsevat miehittämättömissä paikoissa ja hyökkääjien on mahdollista häiritä näiden toimintaa helpommin. [6]
- h) **Liikkuvuus.** Useat IoT-laitteet vaihtavat sijaintia useasti ja on haastavampaa luoda tehokkaista suojausmekanismeja vaihtuvaan ympäristöön. [6]
- i) **Viiveherkät palvelut.** Monien palveluiden odotetaan olevan lähes viiveettömiä, kuitenkin samalla odotetaan, että pystytään takamaan suojaus ilman palvelukatkoja. [6]

IoT-alustoille on esitetty vaatimuksia, joita niiden pitäisi täyttää tietoturvan osalta.

- Luottamuksellisuus: varmistaa ettei viestejä voi ymmärtää, kuin ainoastaan ne kenelle ne ovat tarkoitettu. [6]
- Eheys: varmistaa ettei viestejä ole muunneltu tai käsitelty kolmannen osapuolen toimesta. [6]
- Todennus: varmistaa, että on tiedossa, kuka kukin on. [6]
- Saatavuus: varmistaa palvelun olevan käytössä. [6]
- Valtuutus: varmistaa, että laitteilla on valtuudet tehdä mitä ne pyytävät. [6]
- Tuoreus: varmistaa tiedon olevan tuoretta. [6]
- Kieltämättömyys: varmistaa ettei laite kiellä tekoa, minkä se on suorittanut. [6]
- Forward Secrecy: varmistaa, kun laite on lähtenyt verkosta, ettei se ymmärrä viestien vaihtoa, joka on tapahtunut sen jälkeen. [6]
- Backward Secrecy: varmistaa, kun laite on liittynyt verkkoon, ettei se ymmärrä viestejä, jotka ovat vaihdettu ennen sen liittymistä. [6]

#### 4.6 IoT-alustan valintaan vaikuttavat tekijät

IoT-projektin tärkeimpiä vaiheita on päättää, hankitaanko valmis IoT-alusta vai tehdäkö oma alusta. IoT-alustan hankkiminen ulkopuoliselta palveluntarjoajalta sitoo asiakkaan pitkäksi aikaa tiettyyn palveluntarjoajaan ja tämän hinnoitteluun. Yleisesti yritykset eivät

vaihtaa IoT-alustoja useasti, sillä vaihtaminen on kallis ja työläs operaatio, joten tämä päätös voi vaikuttaa koko IoT-projektin onnistumiseen. [18]

IoT-alustan tekeminen alusta alkaen itse vaatii pitkän ajan suhteutettuna siihen, että nykyisin vanhimmat markkinoilla olevat alusta tulevat pian parinkymmenen vuoden ikään. Vähäisempienkin ominaisuuksien tekeminen vie mahdollisesti vuosia, ja jotka markkinoilla olevissa IoT-alustoissa tulevat valmiiksi sisäänrakennettuna. Jos yritys mieluummin valitsee itse tehdyn IoT-alustan, saattaa yksinkertaisenkin IoT-projektin aikatauluun tulla vuosia lisää pelkästään alustan tekemisestä. [18]

Valmiin IoT-alustan vaarana on, että valittu alusta jää marginaaliin markkinoiden eläessä voimakkaasti, eikä sen ympärille kasva ekosysteemiä. Tällöin uhkana on, että alustan tehnyt yritys saattaa lopettaa alustan tukemisen nopeallakin aikataululla. Luultavasti tämä uhkakuva lisää mielenkiintoa valita suuren ja vakavaraisen yhtiön IoT-alusta. [19]

IoT-alustan valintaan vaikuttaa muutamia tärkeitä tekijöitä, joita yrityksen tai henkilöiden täytyy harkita ennen hankinta päätöstä.

**Työkalut kehittäjille.** Parhaat IoT-alustat tarjoavat työkalut, joilla asiakkaat voivat itse tehdä tarvittavia muutoksia laitteisiin ja sovelluksiin. Lisäksi alustoihin kuuluu sisältyä työkalut, joilla voidaan rakentaa digitaalisia malleja, jotka vastaavat fyysisiä asioita. [19]

**Tiedon kerääminen ja hakeminen.** On tärkeää harkita, miten IoT-alustalla käsitellään tietoa. Eri IoT-alustat ovat tarkoitettu erilaisiin käyttötarkoituksiin ja on tärkeää perehtyä mihin itse IoT-alustaa tarvitsee ja mikä IoT-alusta tähän soveltuu parhaiten. Esimerkiksi IoT-alustat pystyvät ennustamaan tiedosta, kertovan eri asioita kerätystä tiedosta tai analysoivan tietoa eri tavalla riippuen valmistajasta. Nykyisin monet valmistajat tarjoavat jo kattavat palvelut tiedon käsittelyyn ja on tärkeää, että valmistajat ja näiden IoT-alustat arvioidaan omien tarpeiden mukaan. [19]

**Sovellusten tekeminen ja laitehallinta.** Myyjän yhteistyökumppaneiden kanssa luodulla IoT-ekosysteemillä voi olla suuri merkitys IoT-alustan valinnassa. Sovellusten tullessa yhä enemmän erikoistuneiksi ja olennaisemmiksi yrityksille, täytyy olla varma, että IoT-alustan



ekosysteemi tulee olemaan kilpailukykyinen ja tarjoamaan jatkossakin luovia ratkaisuja. [19]

**Liitettävyys ja joustavuus.** Nykyisin pilvipalvelut ovat tärkeä osa IoT-alustaa, lisäksi IoT-alustat käyttävät monia eri protokollia. Jotkut alustojen valmistajat käyttävät omia patentoituja teknologioitaan, jotka voivat olla hankalia käyttää ja jotka hankaloittavat toiseen alustaan siirtymistä, jos se tulee ajankohtaiseksi. Liitettävyys on yksi IoT-järjestelmän keskeisiä asioita, joten on tärkeää arvioida miten IoT-alusta hoitaa yhteydet, mitä protokollia käytetään ja miten mahdolliset laajentumiset toteutetaan. [19]

**Tehokas käyttöliittymä, skaalautuvuus ja laajennettavuus.** Yksi IoT-alustan perimmäisistä tarkoituksista on tuottaa enemmän automatisoituja ja helpommin suoritettavia prosesseja. Alustan valmistajalla tulisi olla näyttöjä, että heidän IoT-alustallansa on saatu lisättyä tuottavuutta tai vapautettua resursseja haastavampiin ja monimutkaisempiin tehtäviin. API:en (Application Programming Interface) tulisi olla yhteensopivia nykyisten käytössä olevien teknologia alustojen kanssa. [19]

**Turvallisuus.** Yksi suurimpia huolenaiheita IoT:n ympärillä on sen turvallisuus. Varsinkin kun liitetään yhä enemmän laitteita internetiin, se saattaa houkutella ei toivottuja riskitekijöitä. Valittaessa IoT-alustaa täytyy arvioida, kuinka suuri riski kuhunkin vaihtoehtoon liittyy. IoT-alustan toimittaja on vastuussa turvallisuushaasteista, mutta lopulta tullaan kysymykseen vaihtokaupasta riskin ja toimintojen välillä. [19]

## 5 MARKKINATILANNE

IoT markkinoiden kasvaessa nopeaa tahtia myös IoT-alustojen parissa työskentelevien toimijoiden määrän ja markkinoiden arvon odotetaan kasvavan nopeasti. IoT-alustojen markkinoiden arvon uskotaan nousevan 74 miljardin dollarin arvoiseksi vuoteen 2023 mennessä [22]. Jo vuonna 2017 markkinoilta löytyi yli 450 yritystä, joiden tuotevalikoimaan kuului IoT-alusta, muodossa tai toisessa. Suurin osa merkittävistä IT-alan toimijoista ovat mukana kehittämässä esineiden internetiä, joko omia alustojaan tai IoT:iin liittyviä teknologioita juuri markkinoihin liittyvän potentiaalın vuoksi.

Teollisen internetin kehityksestä suunnasta kertoo, että on arvioitu 30 prosentin teollisuusyrityksistä käyttäisi IIoT-alustaa vuonna 2023. Tällä hetkellä, vuonna 2019, arvioiden mukaan teollisuusyrityksistä IIoT-alustoja käyttää 15 prosenttia yrityksistä. [23]

Markkinatilannetta arvioitaessa on huomioitavaa, että useat IoT-alustat soveltuvat niin kotitalouksien kuin myös yritysten ja teollisuudenkin käyttöön. Osa taas on tehty pelkästään teollisuusyritysten käyttöä varten, eivätkä ne sovellu muuhun käyttöön, ominaisuuksien eikä hinnan puolesta.

Business Insider on julkaissut artikkelissaan vertailun IoT-pilvimarkkinoiden markkinaosuuksista. Amazon AWS (Amazon Web Services) piti tässä vertailussa kärkipaikkaa 34% osuudella, toisena oli Microsoftin Azure 23% osuudella ja kolmantena Google Cloud Platform 20% osuudella [24].

Teollisuuden puolella Gartner on arvioinut markkinajohtajaksi PTC:n Thingworx-alustan, jota seuraan Software AG:n IIoT-alusta [23]. Toisaalta tutkimusyhtiö Forrester on nostanut kärkipaikalle Microsoftin Azure IoT-alustan ja toiseksi PTC ThingWorx-alustan [25].

Näiden tulosten pohjalta tarkempaan selvitykseen valikoituivat Amazon AWS IoT Core-alusta ja Microsoft Azure IoT Hub-alusta. Lisäksi teollisuuden käyttöön tarkoitetuista IIoT-alustoista tarkempaan selvitykseen valikoitui PTC ThingWorx-alusta.

## 5.1 Amazon AWS IoT Core

AWS IoT kuuluu Amazon.com Inc. yrityksen tuotteisiin ja se julkaistiin vuonna 2015. Amazon.com Inc. on perustettu vuonna 1994 Yhdysvalloissa ja se oli alun perin verkkokirjakauppa, joka on sittemmin laajentunut ja kasvanut valtavan suureksi monialayhtiöksi, työllistäen nykyisin jo yli 600 000 henkilöä. [26]

AWS IoT Core on IoT-pilvialusta, jolla mahdollistetaan IoT-laitteiden yhdistäminen Amazonin laajoihin pilvipalveluihin ja näin se tarjoaa hieman toisenlaisen lähtökohdan IoT-järjestelmän pohjaksi. Amazon tarjoaa palveluitaan niin teollisuus-, koti- kuin myös kaupalliseen käyttöön. Sen vahvuutena on maailman kattavimman ja laajimmalle levinneen pilvialustan tarjoaminen, sisältäen yli 165 tarjottua palvelua globaaleista datakeskuksista. [27]

Amazon IoT-alusta tarjoaa skaalautuvan infrastruktuurin ja sen hinnoittelumalli uudistettiin 2018 vuoden alussa paremmin asiakkaita palvelevaksi malliksi, joka muodostuu monesta hintakomponentista. Kynnys tutustua Amazonin AWS IoT-palveluun on matala, sillä siihen on saatavilla vuoden ilmainen kokeilujakso, tietyillä rajoitteilla. [28]

Amazon lupaa sen IoT Core-alustan voivan skaalautua niin monelle laitteelle, kuin asiakas haluaa. IoT Core -alustan ohjelmistokehityspaketti tukee laitteiden liittämistä, todentamista, viestien vaihtamista käyttäen MQTT-, Websocket- ja HTTP-protokollia. Verkkoliikenteen salaukseen käytetään TLS-protokollaa (Transport Layer Security). Ohjelmistokielistä suoraan tuettuina ovat C-kieli, JavaScript ja Arduino, lisäksi voi vaihtoehtoisesti käyttää avoimeen lähdekoodiin pohjautuvia kieliä. [29]

Itse alusta koostuu seitsemästä komponentista, joilla mahdollistetaan muun muassa yhteydet internetin välityksellä kuin myös yhteydet muihin AWS pilvipalveluihin. Device gateway mahdollistaa laitteiden turvallisen ja tehokkaan kommunikoinnin laitteiden, pilven ja mobiilisovellusten kanssa. Message broker tarjoaa viestien julkaisu ja vastaanotto mahdollisuudet. Authentication and Authorization vastaa IoT-laitteiden tunnistuksesta ja tunnistautumisesta ja siitä, ettei mitään tietoa siirry tunnistautumattomien laitteiden välillä. Registry pitää kirjaa liitettyjen laitteiden ominaisuuksista ja luo laitteille oman yksilöllisen

tunnuksen. Device Shadow:ta käytetään tallentamaan ja noutamaan laitteen nykyinen tila. Rules Engine mahdollistaa IoT-sovellusten kehittämisen, joilla voidaan kerätä, prosessoida, analysoida viestejä tai toimia saadun tiedon mukaan ilman muun siihen liittyvän infrastruktuurin hallintaa. Sillä voidaan myös hoitaa integrointi muiden AWS-pilvipalveluiden kanssa. Alexa Voice Service Integration tarjoaa mahdollisuuden hoitaa äänentunnistuspalvelut ilman sitä varten suunniteltua rautatasonlaitteistoa pilvipalvelun, mikrofonin ja kaiuttimen avulla. [29]

Amazonin lupaa markkinointipuheissaan, että heidän AWS IoT Core-alusta on täysin turvallinen. Palvelu vaatii, että kaikki siihen liittyvät asiakkaat (laitteet, palvelinohjelmistot, mobiilisovellukset ja ihmiset) käyttävät vahvaa tunnistautumista. Tähän palvelussa käytetään joko X.509 sertifikaattia, AWS IAM (Identity and Access Management) tunnistautumista tai AWS Cognitoa kautta tapahtuvaa tunnistautumista. Lisäksi kaikki heidän palvelimillansa oleva tieto, kuin myös laitteiden välinen viestintä, on salattua. Tämä tehdään TLS-yhteydellä niin MQTT- kuin myös HTTP-protokollilla. [29]

Amazonin IoT Core-alustan etuna on, että sen kautta saadaan helposti käyttöön muut Amazonin laajat pilvipohjaiset palvelut. IoT Core tarjoaa itsessään IoT-alustan peruspalvelut ja näiden lisäksi on mahdollista ottaa käyttöön niin tiedon analysointi, laskenta, tallennus tai monet muut AWS pilvipalvelut. [30]

## **5.2 Microsoft Azure IoT Hub**

Azure IoT Hub on yhdysvaltalaisen ohjelmistoalan yrityksen Microsoftin kehittämä pilvipohjainen alusta, joka julkaistiin vuonna 2016. Microsoft on perustettu vuonna 1975 ja työllistää tällä hetkellä maailmanlaajuisesti yli 140 000 henkilöä. Yhtenä maailman arvokkaimmista yrityksistä Microsoft on haastamassa Amazonin AWS palveluita ja ilmoittanut sijoittavansa IoT-alustansa kehittämiseen 2018-2022 viisi miljardia dollari. [31][24]

Azure IoT Hub-alusta on IoT-pilvialusta, jolla mahdollistetaan yhteydet IoT-sovellusten ja laitteiden välillä. Microsoft mainostaa alustaa hyvin helppona käyttää ja että se mahdollistaa IoT-maailmaan siirtymisen ilman, että itse tarvitsee hallita ohjelmointia. Alustan internet-

sivustolta löytyy ohjeistuksia ja oppimisympäristöjä, kuten Rasperry Pi -simulaattori, jossa ohjeistetaan IoT Hubin luomisesta laitteen liittämiseen ja siihen, miten sensoridata siirtyy Rasperry Pi:llä ajettavalta ohjelmalta omalle alustalle. [32]

Microsoft lupaa alustalleen laajan skaalaavuuden, käyttövarmuuden ja turvallisuuden. Azure Hub-alusta hyödyntää monia protokollia IoT-laitteiden yhdistämiseen. Tällä hetkellä käytössä ovat HTTPS-, AMQP-, Websockets- ja MQTT-protokollat, lisäksi tarjotaan myös ratkaisuja liittää laitteita, jotka eivät tuo kyseisiä protokollia. [32]

Tietoturva ja yksityisyys on myös hyvin huomioituna Azure IoT-alustalla. Kaikki laitteet liitetään ja niitä hallitaan suojatun yhteyden avulla. Alusta tukee monia tunnistusmenetelmiä kuten X.509 sertifikaattia ja SAS (Shared Access Signature) avainta. Verkkoliikenne IoT-laitteen ja IoT Hub:in välillä salataan käyttäen TLS protokollaa, josta käytössä on pääsääntöisesti TLS 1.2 versio. [32]

Alustan testaaminen onnistuu ilmaisella kokeillulla, jossa on mahdollisuus liittää jopa 500 laitetta ja siirtää 8000 viestiä päivässä. Hinnoittelu Azure IoT Hub-alustalla perustuu siihen, kuinka monta viestiä siirretään päivässä, lisäksi on valittavana kaksi eri peruspalvelutasoa. Esimerkiksi IoT-alusta basic-tasolla maksaa noin 9 €/kk ja standard-tasolla noin 21€/kk, jolloin kumpaakin kuuluu 400 000 viestiä päivässä. [33]

Alustan pystyy liittämään helposti muihin Microsoft Azure -pilvipalveluihin ja näin muokkaamaan siitä itselle sopivan kokonaisratkaisun. Näistä pilvipalveluista esimerkkinä mainittakoon Azure Logic Apps, jolla pystytään automatisoimaan prosesseja tai Azure Stream Analytics, joka analysoi laitteilta saatua tietoa reaaliajassa. Palvelut ovat lisämaksullisia ja nostavat näin ollen IoT-alustan hintaa. [32]

### **5.3 PTC ThingWorx**

ThingWorx on tällä hetkellä markkinoiden johtava teollisuuden käyttöön tehty IoT-alusta. Se kuuluu kansainvälisen teknologiayrityksen PTC:n tuotteisiin. PTC on vuonna 1985 perustettu yli 30 maassa toimiva yritys, joka työllistää yli 6000 henkilöä. Se tuottaa ratkaisuja muunnettuun todellisuuteen, 3D-laitteisiin ja IoT-sovelluksille. ThingWorx IoT-

alusta pystyy hyödyntämään muun muassa PTC:n muunnetun todellisuuden ratkaisuja IoT-alustan käytössä. [34]

PTC osti ThingWorx-alustan 112 miljoonalla dollarilla vuonna 2013, kun ThingWorx toimi vielä startup-yrityksenä [35]. PTC on vahvistanut IoT osaamistaan tämän jälkeen vielä neljästi ostamalla Kepwaren, joka on erikoistunut IoT-laitteiden yhdistämiseen, ja lisätyn todellisuuden osaan Vuforia, näiden lisäksi vielä Axeda- ja Coldlight-yritykset. ThingWorx-alustaa käyttää myös suomalainen matkapuhelinoperaattori Elisa, jonka IoT-ratkaisujen pohjalla toimii ThingWorx-alusta. [36][37][38][39]

ThingWorx-alusta tarjoaa mahdollisuuden joustavasti yhdistää, luoda ja julkaista teollisuuden IoT-sovelluksia. Alustalle on luotu monia laajennuksia ja lisäosia, joilla haetaan ratkaisuja yritysten muuttuviin tarpeisiin. Yritys painottaa tiedon tärkeyttä ja miten tieto saadaan muutettu muotoon, josta siitä on hyötyä. Alusta on saatavilla niin pilvipalveluna, yrityksen palvelimille tai hybridinä. [40]

Alustalle voidaan yhdistää IoT-laitteita monella eri tapaa, kuten REST API:n avulla, jolloin voidaan käyttää HTTP-protokollaa. Lisäksi on mahdollista käyttää kattavia SDK-paketteja (Software Development Kit), Edge Microserver yhteyttä, teollisuuskoneiden valmiita ajureita tai valmiita adapteria, jolla saadaan laite liitettyä Microsoft Azure -pilvipalvelusta. [41]

ThingWorx alustan hinnoittelu ei ole julkinen, vaan perustuu yritysten välisiin sopimuksiin. Alustaan voi kuitenkin tutustua ilmaisella kokeilujaksolla, tarjotulla pilvipalvelimella 30 päivän ajan tai omalla palvelimella 90 päivän ajan. [40]

## 6 POHDINTAA JA TULEVAISUUS

IoT on jo nyt näyttänyt, että sille on paikka maailmassa. Yhä kehittyvä tekniikka mahdollistaa uusien erilaisten laitteiden liittämisen verkkoon. Näiden miljardien laitteiden tuottaman tiedon kontrollointiin ja analysointiin tullaan tarvitsemaan tehokkaat välineet. IoT-alustoilla tulee olemaan jatkuvasti kasvavat markkinat liitettyjen laitteiden lisääntyessä, hallinnan monimutkistumisessa ja vaatimusten kasvaessa.

IoT on tekniikkana vielä suhteellisen tuore, eikä sille ole määritelty standardeja. Tällä hetkellä käytetään laajaa joukkoa erilaisia teknologioita ja standardeja, kuten myös yritysten omia patentoituja tapoja liittää laitteita IoT-alustoille. Tämän tyylinen kehitys voi johtaa siihen, että IoT muuttuu sekavaksi ja vaikea selkoiseksi eri tekniikoiden taistelukentäksi, jolloin sen alkuperäinen tarkoitus saattaa hämärtyä.

IoT on edelleen vahvasti kehitysasteella ja hakee paikkaansa maailmassa. Vuosittain uusien verkkoon yhdistettyjen IoT-laitteiden määrä nousee huimaa vauhtia, varsinkin 5G-yhteyksien on arvioitu luovan paljon uusia mahdollisuuksia hyödyntää esineiden internetiä. On arvioitu, että pitkällä aikavälillä etenkin liikenteessä tullaan näkemään paljon lisää IoT:in hyödyntämistä, kun autoja ja niihin liittyvää tekniikkaa liitetään verkkoon. [43]

IoT:iin liittyvät palvelumallit ja ansaintamahdollisuudet hakevat vielä muotoaan. Kuitenkin jo nyt on huomattu, että IoT on tullut jäädäkseen ja siihen liittyvät palvelut kehittyvät valtavaa vauhtia. IoT-laitteiden tuottama tieto tulee tulevaisuudessa olemaan yrityksille todella tärkeä lähde tuottavuuden nostamiseen, tehostamiseen ja palveluiden parantamiseen. IoT-alustoilla tulee olemaan tulevaisuudessa yhä suurempi merkitys laitteiden ja niiden tuottaman tiedon määrän kasvaessa. Ilman järkeviä ratkaisuja miljardien laitteiden tuottamaa tietoa ei pysty tallentamaan tai käsittelemään tehokkaasti.

IoT-alustojen tulevaisuus tuo mukanaan myös paljon uhkakuvia. Miljardit verkkoon liitetyt laitteet tuottavat jatkuvasti valtavan määrän dataa, josta kiinnostuneita ovat myös verkkorikolliset. IoT:n uhkiin liittyy niin botnet-verkot, DoS-hyökkäykset (Denial of Service), identiteetti- ja datavarkaudet kuin myös laitteiden haltuunotto esimerkkinä ajoneuvot tai sairaalalaitteistot [44]. Nämä tekijät luovat paineita, niin IoT-laitteiden kuin

myös IoT-alustojen valmistajille, miten tulevaisuudessa saadaan varmistettua tietoturvan riittävä taso.



## 7 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli perehtyä IoT-alustojen nykytilaan ja markkinatilanteeseen. Haluttiin myös selventää IoT-termiä ja mitä alakäsitteitä siihen kuuluu. Työssä haluttiin saada selville mitkä tekijät vaikuttavat IoT-alustojen valintaan ja mitä siinä pitää ottaa huomioon, lisäksi mitkä IoT-alustat ovat tämän hetken markkinajohtajia. IoT-alustojen käyttäjien segmentoitumisen takia valittiin tarkempaan selvitykseen kaksi IoT-alustaa, jotka sopivat niin kuluttaja- kuin teollisuussegmentille ja yksi, joka on tarkoitettu ainoastaan teollisuuden käyttöön.

IoT:n perusajatus tulee jo 1990-luvulta ja on viimeaikaisen nopean kehityksen myötä yleistynyt lähes räjähdysmäisesti. Verkkoon liitettyjen IoT-laitteiden määrä ylitti jo vuonna 2008 verkkoon liittyneiden ihmisten määrän. Varovaisten arvioiden mukaan laitteiden määrä tulee ylittämään vuonna 2025 jo 40 miljardin yhdistetyn laitteen rajan. IoT:n tila on jatkuvassa muutoksessa, tutkimuslaitos Gartnerin hype cycle ennustaa IoT:n siirtyvän muutaman vuoden sisään valtavirran kuluttajalle, jolloin palveluiden ja laitteiden määrän odotetaan nousevan yhä lisää [45].

IoT-alustojen nykytilaa tutkiessa selvisi, että valmiita IoT-alustoja on tarjolla runsaasti, mutta markkinat ovat keskittyneet kouralliselle yrityksii. Alustojen ominaisuudet myös vaihtelevat suuresti, jotkut mahdollistavat vain laitteen liittämisen ja yksinkertaisen tiedonsiirron alustoihin, toiset taas tarjoat kaiken mahdollisen analytiikasta, tiedon perusteella ennustamiseen aina lisättyyn todellisuuteen asti.

Yritysten, jotka haluat siirtyä hyödyntämään IoT:n tarjoamia mahdollisuuksia, täytyy tarkkaan harkita, miten siihen maailmaan halutaan siirtyä. Hankkiako valmis IoT-alusta vai alkaako projekti IoT-alustan tekemisestä? Tutkimuksissa selvisi, että toiminnallisuuksiltaan perustason IoT-alustan valmistaminen tulee lisäämään projektiin käytettyä aikaa vähintään vuodella verrattuna valmiisiin IoT-alustoihin.

Markkinaselvitys osoittautui hankalaksi toteuttaa, koska tietoa niin voitoista tai asiakasmääristä ei ole juuri saatavilla. Aikaisempia markkinaraportteja tutkimalla selvisi, että tämän hetkiset markkinajohtajat ovat todennäköisemmin Amazonin AWS IoT Core -

alusta ja Microsoftin Azure IoT Hub -alusta. Nämä kummatkin ovat niin sanottuja pilvialustoja, jotka yhdistyvät helposti näiden yritysten muihin pilvipalveluihin tarjoten samalla kattavat palvelut esimerkiksi laskentatehossa, tallennuksessa ja tiedon käsittelyssä. Teollisuuden käyttöön tarkoitettujen IoT-alustojen markkinajohtaja on raporttien mukaan PTC:n ThingWorx.

Esineiden internetin voidaan olettaa kasvavan lähivuosina huimaa vauhtia ja IoT-alustojen merkitys tulee kasvamaan tämän myötä voimakkaasti. Liitettyjen IoT-laitteiden ja näiden tuottaman tiedon määrä on jo nyt valtava ja tulee kasvamaan todella nopeasti, myös huolet tietoturvasta ja tiedon yksityisyydestä lisäävät IoT-alustojen tarvetta. IoT-alustoja tullaan tarvitsemaan, jotta pystytään hallitsemaan niin tietoturvaa, laitteita kuin myös niiden tuottamaa tietoa. Kasvavat markkinat tulevat varmasti lisäämään kilpailua ja tuottamaan jatkuvasti laadukkaampia IoT-alustoja ja näihin liittyviä ratkaisuja markkinoille tyydyttämään asiakkaiden tarpeita.

## LÄHTEET

1. Gartner. Inc. IoT is moving beyond the hype. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 10.11.2019]. Saatavissa: <https://www.gartner.com/en/information-technology/insights/internet-of-things>
2. Collin, J. & Saarelainen, A. 2016. Teollinen Internet. Talentum: Helsinki.
3. IDC. The Growth in Connected IoT Devices Is Expected to Generate 79.4ZB of Data in 2025. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 10.11.2019]. Saatavissa: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS45213219>
4. IoT Analytics. IoT Platform Comparison: How the 450 providers stack up. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 11.11.2019]. Saatavissa: <https://iot-analytics.com/iot-platform-comparison-how-providers-stack-up/>
5. Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P. 2009. Tutki ja kirjoita. Helsinki: Tammi.
6. Rayes, A., Salam, S. 2017. Internet of Things From Hype to Reality. Springer.
7. Keramidas, G., Voros, N., Hübner, M. 2016. Components and Services for IoT Platforms: Paving the Way for IoT Standards. Springer.
8. Pänkäläinen, J. Information security in the Internet of Things – a systematic literature review. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. School of Business and Management, Tietotekniikan koulutusohjelma. 2016. 76 s.
9. Pankaj Ganguly. Selecting the right IoT Cloud Platform. 2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA) (2016). pp. 316–320.
10. Ashton, K. That 'Internet of Things' Thing. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 19.11.2019]. Saatavissa: <https://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>
11. Evans, Dave. The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 19.11.2019]. Saatavissa: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINA\\_L.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINA_L.pdf)
12. Omura, Y., Mallik, A., Matsuo, N. 2017. MOS Devices for Low-Voltage and Low-Energy Applications. John Wiley & Sons
13. Evans, Dave. The Internet of Everything. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 20.11.2019]. Saatavissa: [https://www.cisco.com/c/dam/global/en\\_my/assets/ciscoinnovate/pdfs/IOE.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/en_my/assets/ciscoinnovate/pdfs/IOE.pdf)

14. Cisco. The Internet of Things Reference Model. [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.11.2019]. Saatavissa: [http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT\\_Reference\\_Model\\_White\\_Paper\\_June\\_4\\_2014.pdf](http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf)
15. Al-Fuqaha, Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M.; Ayyash, M. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials 2015, Vol. 17, No. 4, pp. 2347-2376.
16. Lucero, S. 2016. IoT platforms: Enabling the Internet of Things. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 23.11.2019]. Saatavissa: <https://cdn.ihs.com/www/pdf/enabling-IOT.pdf>
17. M. A. A. da Cruz, J. J. P. C. Rodrigues, J. Al-Muhtadi, V. V. Korotaev and V. H. C. de Albuquerque. A Reference Model for Internet of Things Middleware. IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 2, April 2018. pp. 871-883
18. IoT Analytics. IoT Platforms - The central backbone for the Internet of Things. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 22.11.2019]. Saatavissa: <http://www.iot-analytics.com/wp/wp-content/uploads/2016/01/White-paper-IoT-platforms-The-central-backbone-for-the-Internet-of-Things-Nov-2015-vfi5.pdf>
19. Perry, M. 2016. Evaluating and Choosing an IoT Platform. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.
20. Skerrett, I. 2018. Price Comparison of IoT Platform Vendors. [Viitattu: 24.11.2019]. Saatavissa: <https://medium.com/@iskerrett/price-comparison-of-iot-platform-vendors-b07ab4bbf0e>
21. IEC. 2016. IoT 2020: Smart and secure IoT platform. [verkkodokumentti]. [Viitattu 5.12.2019]. Saatavissa: <https://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-IoT2020-LR.pdf>
22. Cision. Why the Internet Of Things (IOT) Platform Market is Expected to Reach \$74 Billion by 2023. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://www.prnewswire.com/news-releases/why-the-internet-of-things-iot-platform-market-is-expected-to-reach-74-billion-by-2023-300946951.html>
23. Gartner. Inc. Magic Quadrant for Industrial IoT Platforms. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://b2bsalescafe.files.wordpress.com/2019/09/gartner-magic-quadrant-for-industrial-iot-platforms-june-2019.pdf>

24. Business Insider. Microsoft is beefing up its Azure cloud IoT platform in bid to threaten AWS's dominance. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://www.businessinsider.com/microsoft-unveils-features-for-azure-iot-platform-2019-10?r=US&IR=T>
25. Microsoft Azure. Forrester names Microsoft a leader in Wave report for Industrial IoT Software Platforms. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://azure.microsoft.com/de-de/blog/forrester-names-microsoft-a-leader-in-wave-report-for-industrial-iot-software-platforms/>
26. Amazon.com Inc. About Amazon. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 5.12.2019]. Saatavissa: <https://www.aboutamazon.com/our-company/about-amazon>
27. Amazon.com Inc. What is AWS. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 5.12.2019]. Saatavissa: <https://aws.amazon.com/what-is-aws/>
28. Amazon.com Inc. AWS IoT Update – Better Value with New Pricing Model. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 5.12.2019]. Saatavissa: <https://aws.amazon.com/blogs/aws/aws-iot-update-better-value-with-new-pricing-model/>
29. Amazon.com Inc. AWS IoT Core features. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 5.12.2019]. Saatavissa: <https://aws.amazon.com/iot-core/features/>
30. Amazon.com Inc. What is IoT Core. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 5.12.2019]. Saatavissa: <https://aws.amazon.com/iot-core/>
31. Microsoft. Facts about Microsoft. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://news.microsoft.com/facts-about-microsoft/>
32. Microsoft. What is Azure IoT Hub? [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://docs.microsoft.com/fi-fi/azure/iot-hub/about-iot-hub>
33. Microsoft. Azure IoT Hub pricing. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://azure.microsoft.com/en-gb/pricing/details/iot-hub/>
34. PTC. PTC: Enabling Industrial Digital Transformation. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ptc.com/en/about>
35. PTC. PTC Acquires ThingWorx. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://support.ptc.com/company/thingworx/>
36. PTC. PTC Acquires ColdLight. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ptc.com/en/about/coldlight>

37. PTC. PTC Acquires Vuforia. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ptc.com/en/about/vuforia>
38. PTC. PTC to Acquire Axeda to Expand Internet of Things Technology Portfolio [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://investor.ptc.com/news-releases/news-release-details/ptc-acquire-axeda-expand-internet-things-technology-portfolio>
39. ThingWorx. Elisa is Paving the Way with Their IoT Service Solution. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: [https://www.pdsvision.com/wp-content/uploads/2016/06/PDVision\\_Elisa\\_paving-the-way-with-iot-service-solution.pdf](https://www.pdsvision.com/wp-content/uploads/2016/06/PDVision_Elisa_paving-the-way-with-iot-service-solution.pdf)
40. PTC. ThingWorx IIoT Platform. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ptc.com/en/products/iiot/thingworx-platform>
41. PTC. Connect Your Data to ThingWorx. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 6.12.2019]. Saatavissa: <https://developer.thingworx.com/en/platform/connect>
42. IEEE ComSoc. Gartner: 5G IoT endpoints to triple between 2020 and 2021; Surveillance cameras to be largest market over next 3 years. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 3.12.2019]. Saatavissa: <https://techblog.comsoc.org/2019/10/17/gartner-5g-iot-endpoints-to-triple-between-2020-and-2021-surveillance-cameras-to-be-largest-market-over-next-3-years/>
43. Joshi, N. 8 types of security threats to IoT. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 3.12.2019]. Saatavissa: <https://www.allerin.com/blog/8-types-of-security-threats-to-iot>
44. Brookes, J. Internet Of Meat' Is On The Rise, Says Gartner. [verkkodokumentti]. [Viitattu: 7.12.2019]. Saatavissa: <https://which-50.com/internet-of-meat-is-on-the-rise-says-gartner/>