



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PATRIK NIEMINEN  
5G-TEKNOLOGIAN LIIKETOIMINNALLISET VAIKUTUKSET  
ESINEIDEN INTERNETILLE

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Pasi Hellsten

## TIIVISTELMÄ

### **PATRIK NIEMINEN:**

5G-tekniikan liiketoiminnalliset vaikutukset esineiden internetille

Commercial effects of 5G-technology on the Internet of Things

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 23 sivua

Maaliskuu 2018

Teknis-taloudellinen TkK-tutkinto-ohjelma, Tietojohtaminen

Pääaine: Tietojohtaminen

Tarkastaja: Pasi Hellsten

**Avainsanat:** 5G-tekniikka, esineiden internet, liiketoiminnan kehittäminen

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tarkastella 5G-tekniikan liiketoiminnallista vaikutusta esineiden internetille. Tarkoituksena oli tutkia, saadaanko 5G-tekniikan esineiden internetille tarjoamat mahdollisuudet jalostettua edelleen liiketoiminnallisiksi hyödyiksi. Työssä tarkasteltiin ensin 5G-tekniikan teoriataustaa sekä esineiden internetin käyttöä liiketoiminnassa. Tämän jälkeen käytiin läpi 5G-tekniikan hyödyntämistä esineiden internetissä sekä sen liiketoiminnallisia mahdollisuuksia. Tulokseksi tutkimuksessa saatiin kartoitettua niitä 5G-tekniikan ominaisuuksia, joilla on esineiden internetissä hyödynnettynä liiketoiminnallisia mahdollisuuksia.

5G-tekniikka on tulevaisuuden mobiiliverkko- sekä tiedonsiirtotekniikka, joka on tällä hetkellä kehitysvaiheessa ja vielä käyttöönottamatta. Sillä luvataan olevan huomattava merkitys tiedonsiirrolle sen tiedonsiirtonopeuksiin, viiveeseen ja tietoliikenteen kasvuun liittyvien parannusten myötä. 5G-tekniikka sisältää mahdollistavia tekniikoita, joiden avulla tämän tekniikkakokonaisuuden tekniset ominaisuudet tullaan saavuttamaan. Tässä työssä esiteltävät mahdollistavat tekniikat ovat solujen pienentäminen, mmWave- sekä massive MIMO -tekniikat.

Esineiden internetin hyödyt liiketoiminnassa on tunnistettu jo viime vuosina, ja siitä onkin olemassa jo muutamia käytännön esimerkkejä. Esineiden internetin liiketoiminnassa hyödyntämisen edut liittyvät tiedon keräämiseen fyysisestä maailmasta, jota voidaan käyttää liiketoiminnan tukena, sekä monimuotoisten palveluiden tarjoamiseen. Hyötyjen lisäksi esineiden internetiin liittyy edelleen muutamia haasteita. Näitä ovat muun muassa erilaiset tekniset haasteet sekä turvallisuuden ja yksityisyyteen liittyvät haasteet.

5G-tekniikan tekniset parannukset mahdollistavat esineiden internetin nopeamman kasvun sekä paremman hyödyntämisen. Tässä työssä esitellyt 5G-tekniikan teknisten parannusten tuottamat mahdollisuudet esineiden internetille ovat energiatehokkuuden sekä viiveen ja luotettavuuden parantuminen. Näillä mahdollisuuksilla voidaan nähdä olevan yhteys liiketoiminnallisiin hyötyihin. Työssä esitellyt liiketoimintaan vaikuttavat 5G-tekniikan ominaisuudet ovat juuri energiatehokkuus, pienempi viive ja parempi luotettavuus sekä verkon saatavuuden parantuminen. Näiden ominaisuuksien avulla saavutettavat liiketoiminnalliset hyödyt liittyvät älykkäämpään verkon resurssien allokointiin sekä uudenlaisten palveluiden tarjoamiseen.

## ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö tarkastelee 5G-tekniikan liiketoiminnallista käyttöä esineiden internetissä. Työtä pohjustamaan on tehty aiheanalyysi ja tutkimussuunnitelma, joista saadun palautteen perusteella työtä on ohjattu oikeaan suuntaan. Haluan osoittaa kiitokseni tämän työn ohjaajalle Pasi Hellstenille sekä töistäni palautetta antaneille opiskelijoille.

Tampereella, 11.3.2018

Patrik Nieminen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimusongelma ja rajaus .....	2
1.3	Tutkimuksen rakenne .....	3
2.	TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN .....	4
2.1	Tutkimusmenetelmä .....	4
2.2	Tutkimusaineisto .....	5
3.	5G-TEKNOLOGIAN TEORIATAUSTA .....	6
3.1	5G-tekniikan vaikutus tiedonsiirtoon.....	6
3.2	Mahdollistavat teknologiat.....	7
3.2.1	Solujen pienentäminen .....	7
3.2.2	mmWave .....	8
3.2.3	Massive MIMO .....	9
4.	ESINEIDEN INTERNET LIIKETOIMINNASSA .....	10
4.1	Esineiden internet käsitteenä .....	10
4.2	Esineiden internetin käyttö liiketoiminnassa.....	11
4.2.1	Tietoa fyysisestä maailmasta.....	11
4.2.2	Esineiden internet ja palvelut .....	11
4.3	Haasteet esineiden internetissä .....	12
4.3.1	Turvallisuus ja yksityisyys .....	13
4.3.2	Tekniset haasteet .....	13
5.	5G-TEKNOLOGIAN AVULLA TOTEUTETUN ESINEIDEN INTERNETIN LIIKETOIMINNALLINEN KÄYTTÖ .....	15
5.1	5G-tekniikan mahdollisuudet esineiden internetille.....	15
5.1.1	Energiatehokkuus .....	15
5.1.2	Viive ja luotettavuus.....	16
5.2	5G-tekniikan liiketoiminnallinen vaikutus esineiden internetille .....	17
6.	YHTEENVETO .....	19
6.1	Tulosten esittely ja päätelmät .....	19
6.2	Tulosten arviointi ja tarve jatkotutkimukselle.....	20
	LÄHTEET .....	21

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

BLE	Bluetooth Low Energy, matalan tehonkulutuksen Bluetooth
IoT	Internet of Things, esineiden internet
LPWA	Low Power Wide Area, matalan tehonkulutuksen laajan alueen verkko
MIMO	Multiple Input Multiple Output, useita vastaanotto- ja lähetyskanavia
NLOS	Non-Line-Of-Sight, ei näköyhteyttä
PAN	Personal Area Network, henkilökohtaisen alueen verkko
RFID	Radio Frequency IDentification, radiotaajuinen tunnistus
SOA	Service Oriented Architecture, palvelupainotteinen arkkitehtuuri

# 1. JOHDANTO

Vaikka esineiden internetin liiketoiminnassa hyödyntämisen potentiaalista on puhuttu jo pitkään, liittyy sen käyttöön edelleen huomattavia haasteita (Al-Fuqaha et al. 2015). Esineiden internet on käsitteenä monille etenkin tekniikan alan opiskelijoille tuttu, mutta sen käytännön ratkaisuihin ei useinkaan törmää. Seuraavan vuosikymmenen aikana ollaan kuitenkin käyttöönottamassa teknologiaa, joka voisi mullistaa esineiden internetin.

Esineiden internetin liiketoiminnalliset mahdollisuudet keskittyvät parempaan oman toiminnan mittaamiseen sekä uudenlaisten palveluiden ja sovellusten tarjoamisen mahdollistamiseen. Näitä mahdollisuuksia ei olla päästy liiketoiminnassa hyödyntämään tämän hetkisen verkon rajoitteiden vuoksi. Näitä rajoitteita ovat muun muassa liian suuret tiedonsiirron viiveet sekä verkon rajallinen saatavuus. Sen lisäksi, että 5G-teknologialla on potentiaali mahdollistaa esineiden internetin toistaiseksi hyödyntämättömät liiketoiminnalliset mahdollisuudet, voi sen teknisillä parannuksilla olla myös suora yhteys liiketoiminnallisiin etuihin.

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tämän kandidaatintyön aiheeksi on valittu 5G-teknologian liiketoiminnalliset vaikutukset esineiden internetille. Termillä ”5G-teknologia” tässä työssä tarkoitetaan viidennen sukupolven langattomia tiedonsiirtokanavia sekä mobiiliverkkoja. Tähän termiin sisällytetään teknologiat, jotka mahdollistavat viidennen sukupolven langattomat verkot. Osassa lähdemateriaaleista puhutaan ”5G-teknologioista”, joilla tarkoitetaan teknologioita, joista yhdessä koostuu 5G-kokonaisuus. Selkeyden vuoksi tässä kandidaatintyössä käytetään tästä kokonaisuudesta termiä ”5G-teknologia”, joka on ylempi käsite sen mahdollistaville teknologioille.

5G-teknologia on uuden sukupolven matkapuhelin- sekä tiedonsiirtoverkko. Parhailleen sitä kehitetään vastaamaan 2020-luvun uusiin liiketoiminnan vaatimuksiin sekä toimintaympäristön haasteisiin (NGMN 2015). Näitä toimintaympäristön haasteita ovat muun muassa liikkuvan datamäärän jatkuva kasvaminen, energiatehokkuusvaatimukset laitteiden määrän kasvaessa sekä kriittisten sovellusten verkolle asettamat vaatimukset. Tällä hetkellä 5G-teknologiaa ei olla vielä laajasti otettu käyttöön, ei organisaatioille eikä myöskään kuluttajille. 5G-teknologian standardointia tehdään jatkuvasti ja se on tarkoitus ottaa laajempaan kuluttajakäyttöön 2020-luvulla (Andrews et al. 2014).

Esineiden internet käsitteenä on ollut käytössä vahvasti jo 2000-luvulta alkaen (Haller et al. 2009). Esineiden internet tarkoittaa erilaisten asioiden ja objektien, kuten sensoreiden,

päätelaitteiden ja matkapuhelinten, ympärillemme muodostamaa kokonaisuutta, jossa laitteet kykenevät kommunikoimaan käyttäjänsä kanssa sekä keskenään internet-protokollan yli asetettujen päämäärien hyväksi (Atzori et al. 2010). Esineiden internetin hyödyntämisen vaikutukset liiketoimintaan ovat positiiviset, ja yrityksen kypsyysvaiheesta riippumatta esineiden internetin hyödyntäminen parantaa tehokkuutta sekä tuottavuutta (De Saulles 2016). Näiden hyötyjen saavuttamiseksi, on esineiden internetin liiketoiminnassa hyödyntämisen kuitenkin oltava tehokasta. Eri toimialoilla esineiden internetiä voidaan hyödyntää eri keinoin liiketoiminnan tukena. Osassa tapauksista esineiden internetin hyödyntäminen keskittyy oman toiminnan mittaamiseen sekä optimointiin, osassa esineiden internetin avulla toteutetaan liiketoiminnan kannalta olennainen sovellus tai palvelu. Se, millaista esineiden internetin tehokas käyttö liiketoiminnassa on, vaihtelee siis toimialan mukaan.

Esineiden internetin hyödyntämisestä liiketoiminnassa on jo tutkimustietoa sekä muutamia käytännönkin esimerkkejä. 5G-teknologiaa sen sijaan ei olla vielä laajasti käyttöön otettu. 5G-teknologian uutuuden sekä sen visioidun potentiaalin vuoksi onkin mielekästä tutkia, mitä liiketoiminnallisia vaikutuksia 5G-teknologian käytöllä esineiden internetille on. 5G-teknologian uutuuden vuoksi tullaan osassa tutkimusta hyödyntämänään erilaisia tulevaisuudenkuvia sekä omaa pohdintaa ja päättelyä.

## 1.2 Tutkimusongelma ja rajaus

Tutkimusongelma tässä kandidaatintyössä on se, että ei voida täysin varmasti todeta, voidaananko 5G-teknologian esineiden internetille tarjoamat mahdollisuudet jalostaa edelleen liiketoiminnalliseksi eduksi. Työssä ei ole tarkoitus keskittyä tarkasti 5G-teknologian tai esineiden internetin teknisiin toteutuksiin tai esimerkiksi asetettujen teknologiastandardien sisältöihin. Tiedyt käsitteet kummankin teknologian teknisistä toteutuksista tullaan kuitenkin määrittelemään. Esimerkiksi 5G-teknologian sisältö on mielekästä määritellä esittelemällä sen mahdollistavia teknologioita. Lisäksi suljetaan pois lähestymiskohta, joka tarkastelee esineiden internetin hyötyjä kuluttajien arkielämässä. Sen sijaan tullaan pitämään näkökulma, joka tarkastelee teknologioita niiden liiketoiminnallisten mahdollisuuksien kannalta. Tutkimusta ei tulla rajaamaan tiettyyn toimialaan, vaan tarkoituksena on pohtia esineiden internetin hyödyntämistä liiketoiminnassa yleisesti, ja lisäksi sitä, miten 5G-teknologia tulee vaikuttamaan esineiden internetiin. Lopullisena tavoitteena tutkimuksessa on siis löytää teknisten parannusten sekä liiketoiminnallisen kehittymisen yhteys.

Taulukossa 1 on esitettyä kandidaatintyön tutkimuskysymykset. Päättökysymys on tutkimuksen aihe kysymyksen muodossa. Tutkitaan esineiden internetissä ilmeneviä 5G-teknologian liiketoiminnallisia vaikutuksia. Alatutkimuskysymykset on valittu niin, että niihin vastaamalla voidaan vastata myös päättökysymykseen. Alatutkimuskysymykset

symysten tehtävänä työssä onkin pilkkoa päätutkimuskysymys riittävän pieniin osakokonaisuuksiin. Tutkimuskysymyksien käsittely auttaa myös analysoimaan tutkimusongelmaa eri näkökulmista. Työn rakenne seuraa tutkimuskysymysten teemoja.

**Taulukko 1. Kandidaatintyön tutkimuskysymykset.**

<b>Päättutkimuskysymys</b>	Mitä liiketoiminnallisia vaikutuksia 5G-tekniologialla on esineiden internetille?
<b>Alatutkimuskysymykset</b>	Mitä 5G-tekniologialla tarkoitetaan?
	Miten esineiden internetiä käytetään liiketoiminnassa?
	Miten 5G-tekniologia muuttaa liiketoiminnassa hyödynnettävää esineiden internetiä?

### 1.3 Tutkimuksen rakenne

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan niitä mahdollisuuksia ja muutoksia, joita 5G-tekniologia tuo esineiden internetille sekä, mitä vaikutuksia näillä muutoksilla on liiketoimintaan. Luvussa 3 tutkitaan 5G-tekniologiaa ilmiönä sekä sen ominaisuuksia. Keskitytään seikkoihin, jotka tekevät 5G-tekniologiasta erityisen. Tämä sisältää muun muassa tärkeimpien 5G-tekniologian mahdollistavien tekniologioiden esittelyn. Luvussa 4 tutkitaan esineiden internetiä käsitteenä sekä sen käyttöä liiketoiminnassa. Lisäksi määritellään esineiden internetin haasteita liiketoiminnassa ajatuksena se, että työn loppupuolella pyritään kartoittamaan vastaavatko 5G-tekniologian mahdollisuudet esineiden internetin tämän hetkisiin sekä tuleviin haasteisiin. Työn 5. luvussa keskitytään 5G-tekniologian avulla toteutettuun esineiden internetiin, ja lopulta siihen, mitkä ovat 5G-tekniologian liiketoiminnalliset vaikutukset esineiden internetille. Luvussa 6 tehdään työstä sekä löydetyistä tuloksista yhteenveto ja pohditaan mahdollista tarvetta jatkotutkimukselle.



## 2. TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksen toteutus sisältäen tutkimusmenetelmän sekä –aineiston. Luvussa 2.1 kerrotaan tavasta, jolla tutkimus toteutetaan sekä listataan käytettävät tietokannat sekä aineiston haussa käytettävät hakulausekkeet. Luvussa 2.2 esitellään tiivistetysti käytettävää tutkimusaineistoa sekä avataan tutkimusaineiston valintaperusteita.

### 2.1 Tutkimusmenetelmä

Kandidaatintyön tutkimusmenetelmänä on kirjallisuustutkimus, jossa käytetty aineisto on pääosin peräisin eri sähköisistä tietokannoista. Työssä on hyödynnetty Tampereen teknillisen yliopiston tarjoamia tietokantoja sekä sähköisiä hakupalveluita, jotka olivat Web of Science ja Scopus. Näistä selkeästi eniten käytettiin Scopus-tietokantaa tulosten sopivuuden sekä rajausmahdollisuuksien ansiosta. Tämän kandidaatintyön aiheen luonteen vuoksi haku tiivistelmän sekä avainsanojen perusteella ilmeni kaikista hyödyllisimpänä. Tavallisimpia rajausperusteita olivat viittausten määrä sekä vuosiluvut, esimerkiksi viimeiset viisi vuotta, mutta aineistoa rajattiin myös paljon tutkimalla niiden relevanssia. Edellä mainituista viimeisintä rajaustapaa käytettiin lopuksi, mikäli oli ongelmia tiivistää lopullisten hakutulosten määrä tarpeeksi pieneksi.

Taulukossa 2 on esitettyä tutkimusaineiston etsimisessä käytettyjä hakulausekkeita kahdessa eri tietokannassa. Oikean puoleisimmassa kolumnissa näkyy tietyllä hakulausekkeella saatujen hakutulosten määrä.

**Taulukko 2. Hakutulosten määrä eri hakulausekkeilla Scopus- ja Web of Science- tietokannoissa.**

Hakulauseke	Käytetty tietokanta	Hakutulosten määrä
5G AND business*	Scopus	557
5G AND business* AND challeng*	Scopus	97
"Internet of Things" AND business* AND challeng*	Web of Science	238
5G AND "Internet of Things" AND business*	Scopus	41
5G AND "Internet of Things" AND business*	Web of Science	13

Sellaisten hakulausekkeiden kohdalla, joiden hakutulokset jäivät liian suuriksi (enemmän kuin 50 hakutulosta), tehtiin vielä rajausta julkaisuvuoden (viimeiset kolme tai viisi vuotta) sekä viittausten määrän mukaan.

## 2.2 Tutkimusaineisto

Hakutuloksista on pyritty löytämään kaikista sopivimmat sekä relevanteimmat teokset käytettäväksi kandidaatintyössä. Hakutulosten riittävän rajauksen jälkeen tutkittiin kunkin työn sopivuutta kandidaatintyön tutkimusaineistoksi lukemalla ensin työn otsikot, tiivistelmä sekä tarvittaessa johtopäätökset. Näiden pohjalta tehtiin päätös työn sopivuudesta tutkimusaineistoon. Tutkimusmenetelmä-osiossa mainittujen rajausperusteiden, jotka olivat julkaisuvuosi, viittausten määrä sekä relevanssi, avulla saatiin riittävän kattava kuva saatavilla olevasta lähdeaineistosta aiheeseen liittyen.

Etsittäessä aineistoa teoriapohjaisiin osioihin pyrittiin löytämään useasti viitattuja ja suosittuja töitä, jotka antavat tutkittavasta asiasta kattavan yleiskuvan. Tällaisia töitä löytyy riittävästi niin 5G-teknoologiaan kuin esineiden internetiinkin liittyen. Kun etsitään tutkimusaineistosta isompien käsitteiden sisäisiä ominaisuuksia tai teknologioita, pyritään löytämään työ, joka käsittelee tätä nimenomaista asiaa tai työ, jossa kyseistä asiaa käytetään tutkimuksessa apuna. Tästä esimerkkinä 5G-tekniikan mahdollistavien teknologioiden esittely tai esineiden internetin liiketoiminnallisten käyttökohteiden määrittely. Tutkimusaineistona käytettiin pääasiassa tieteellisiä artikkeleita, joiden lisäksi käytettiin muutamia muita relevantteja sähköisiä julkaisuja.

## 3. 5G-TEKNOLOGIAN TEORIATAUSTA

5G-teknologia tarkoittaa uuden sukupolven matkapuhelin- sekä langattoman tiedonsiirron verkkoa. Sitä kehitetään vastaamaan 2020-luvun uusiin liiketoiminnan vaatimuksiin sekä toimintaympäristön haasteisiin (NGMN 2015). 5G-teknologian standardointia tehdään jatkuvasti ja se on tarkoitus ottaa laajempaan kuluttajakäyttöön 2020-luvulla (Andrews et al. 2014).

Tässä teoriakappaleessa kuvaillaan ensin 5G-teknologian vaikutusta tiedonsiirtoon. 5G-teknologia koostuu erilaisista sisäkkäisistä teknologioista, jotka mahdollistavat luvutut tekniset parannukset. Jotta 5G-teknologian luonnetta ja ominaisuuksia voitaisiin parhaiten kuvailla, syvennyttään myös hieman tarkemmin kolmeen 5G-teknologian mahdollistavaan teknologiaan. Nämä teknologiat ovat solujen pienentäminen, mmWave ja massive MIMO. Mahdollistavia teknologioita esiteltäessä pohditaan myös kunkin mahdollistavan teknologian tuomia mahdollisuuksia sekä haasteita.

### 3.1 5G-teknologian vaikutus tiedonsiirtoon

Teknologioiden, ennen kaikkea mobiiliverkkoteknologioiden, kehittyminen on tällä hetkellä todella nopeaa. Jatkuvan teknologisen kehityksen vuoksi jokaisen mobiili- sekä langattoman tiedonsiirron sukupolven elinkaari on noin kymmenen vuotta (Rappaport et al. 2013). Seuraavana mobiiliverkkojen kehityksessä ollaan siirtymässä uuteen 5G-teknologiaan. Viidennen sukupolven mobiiliverkkoteknologia voidaan nähdä evoluutiona, joka käsittää koko verkon päästä päähän ja tarjoaa suurempia nopeuksia, suurempaa kapasiteettia sekä pienempää viivettä (Shankaranarayanan & Ghosh 2017). Andrews et al. (2014) kertovat artikkelissaan 5G-teknologian olevan enemmän kuin ainoastaan lisäparannus aikaisempaan neljännen sukupolven mobiiliverkkoihin (4G). Artikkelissa kerrotaan 5G-teknologian aikaisempien sukupolvien mobiiliverkkojen sijaan myös yhdistävän verkkoa uudella tavalla. Tämä tarkoittaa esimerkiksi lähietäisyyksillä eri 5G-käyttöliittymien sitomista yhteen WiFi-teknologian avulla.

Neljännen sukupolven mobiiliverkoista on niiden elinkaaren aikana tehty monia uudistuksia, jotka ovat vieneet niiden ominaisuuksia kohti viidennen sukupolven mobiiliverkoille kaavailtuja ominaisuuksia. Kuten Andrews et al. (2014) artikkelissaan mainitsevat, on neljännen ja viidennen sukupolvien matkapuhelinverkoilla kuitenkin huomattavia eroavaisuuksia liittyen muun muassa tiedonsiirtonopeuteen, viiveeseen sekä dataliikenteen määrään.

Verkon ominaisuuksille on asetettu tiettyjä arvoja, jotka 5G-teknologian on suunniteltu saavuttavan. 5G-teknologian on kokonaisuutena suunniteltu mahdollistavan yli 10 Gbps

huipputiedonsiirtonopeuden, 100 Mbps jatkuvan tiedonsiirtonopeuden, alle millisekunnin mittaiset viiveet sekä kasvattamaan vallitsevaa dataliikennettä monituhatkertaiseksi (Nokia 2016). Nämä 5G-tekniikan tekniset parannukset tullaan toteuttamaan teknologioilla, joita esitellään seuraavassa osiossa. Yksi 5G-tekniikan merkittävimmistä parannuksista on suuri yhdistettävien laitteiden määrä (Gupta & Jha 2015). Tämä tuo esiin 5G-tekniikan mahdollisuudet esineiden internetille. Toimivan 5G-tekniikan nähdäänkin olevan avaintekijä kokonaisvaltaisen ja globaalin esineiden internetin käytölle (Palattella et al. 2016).

5G-tekniikka sisältää huomattavia parannuksia edellisiin mobiiliverkkoihin nähden. Voidaan myös sanoa, että 5G-tekniikkaan liittyy ominaisuuksia, jotka mahdollistavat esineiden internetin ketterämmän käytön. Esimerkkinä näistä mahdollisuus yhdistää verkkoon yhä suurempi määrä laitteita. Jotta näitä parannuksia päästään hyödyntämään, tulee 5G-tekniikan olla käyttöönotettu sekä toimia kokonaisuutena.

## 3.2 Mahdollistavat teknologiat

Tässä osiossa esitellään kolme 5G-tekniikkokokonaisuuden mahdollistavaa tekniikkaa. Useissa aiheeseen liittyvissä lähteissä (esimerkiksi, Andrews et al. 2014; Boccardi et al. 2014; Gupta & Jha 2015; Shankaranarayanan & Ghosh 2017; Rajoria et al. 2018) mainitaan tärkeimpinä mahdollistajina hieman eri teknologioita. Tähän katsaukseen on valittu näitä eri lähteitä yhdistävät teknologiat sekä edelleen näistä harkinnan avulla ne kolme tekniikkaa, joilla on eniten vaikutusta 5G-tekniikkaan kokonaisuutena. Seuraavaksi esitellään mahdollistavat teknologiat lyhyesti.

### 3.2.1 Solujen pienentäminen

Nykypäivän mobiiliverkot ovat solukoverkkoja, mikä tarkoittaa, että verkko koostuu yksittäisistä, mutta yhteistyössä toimivista soluista. Yksinkertainen, mutta erittäin tehokas tapa lisätä verkon kapasiteettia on tehdä soluista, joista verkko koostuu, pienempiä (Andrews et al. 2014). Tämä lähestymistapa on todettu jo aiempien sukupolvien solukoverkoissa (Chandrasekhar et al. 2008). Pienet solut tarjoavat korkeampia tiedonsiirtonopeuksia pienemmillä siirtotehoilla lyhentämällä käyttäjän ja tukiaseman välistä etäisyyttä (Rajoria et al. 2018). Solut ovat hiljalleen verkkosukupolvien aikana pienentyneet sadoista neliökilometreistä neliökilometrin murto-osiin. Suomessa solujen koon vaihtelu on edelleen merkittävää kaupunkiympäristön sekä haja-asutusalueiden välillä. Kuitenkin yleinen trendi solukoverkkojen kehittyessä on ollut solukokojen pienentyminen. Tällä hetkellä verkot kehittyvät todella nopealla vauhdilla. Andrews (2013) väittääkin artikkelissaan, että 10–20 vuoden päästä saavutetaan teknologisen kehityksen piste, jossa tukiasemien määrä ylittää mobiilipäätelaitteiden määrän. Tämä tarkoittaa siis, erityisesti kaupunkiympäristössä, piko-(kantama alle 100 metriä) ja femtosolujen (kantama metreissä, tarkoitettu yleensä kotien tai yritysten sisälle) määrän jatkuvaa kasvua.

Tärkeimpinä etuina solujen pienentämisessä ovat taajuusspektrin uudelleenkäytön mahdollistuminen tietyn alueen sisällä sekä käyttäjien välisen resurssikilpailun vähentyminen tukiasemilla (Andrews et al. 2014). Resurssikilpailun ongelmat romahtavat viimeistään siinä vaiheessa, kun verkko tiivistyy siihen pisteeseen, että jokaista käyttäjää palvelee oma tukiasema.

Haasteena nopeassa solujen pienentymisessä ja verkon tiivistymisessä on muun muassa mobiliteetin eli liikkuvuuden mahdollistaminen läpi verkon, joka on yhä heterogeenisempi ja koostuu yhä vaihtelevamman kokoisista soluista (Andrews et al. 2014). Lisäksi solumäärän kasvaessa tarvitaan yhä enemmän tukiasemia, mikä lisää materiaalikustannuksia. Tukiasemista tulee olemaan mahdollista tehdä yhä kevyempiä, mutta kustannukset liittyen tukiasemien asennukseen sekä ylläpitoon tulevat väistämättä nousemaan verkon tiivistymisen seurauksena (Andrews et al. 2014).

### 3.2.2 mmWave

Lähes kaikki tämän hetkiset mobiiliverkot toimivat 300 MHz–3 GHz taajuuksilla, ja teknologian kehittyessä sekä mobiilidatan käytön eksponentiaalisesti kasvaessa alkaa tämä taajuustila käymään ahtaaksi (Pi & Khan 2011). Langattoman tiedonsiirron verkot tarvitsevat siis enemmän taajuustilaa ja tämä tarve kasvaa jatkuvasti. Ainoa ratkaisu, jolla saadaan verkoille lisää taajuustilaa, on siirtyä taajuudessa ylöspäin niin kutsutuille mmWave-taajuuksille eli millimetrialloille, jotka käsittävät taajuudet 30–300 GHz (Andrews et al. 2014). Näillä taajuuksilla aallonpituudet ovat siis väliltä 1–10 mm. Sen lisäksi, että saadaan lisää taajuustilaa, pystytään korkeammilla kantotaajuuksilla kattavampaan kaistanleveysallokointiin, joka on suoraan yhteydessä suurempiin tiedonsiirtonopeuksiin (Rappaport et al. 2013).

Jotta uudelle mobiiliverkolle saataisiin riittävästi taajuustilaa, on siis välttämätöntä siirtyä taajuudessa ylöspäin. Sen lisäksi, että tämä on välttämätön toimenpide, saavutetaan vapaammilla taajuuksilla myös suurempia tiedonsiirtonopeuksia tehokkaamman kaistanleveysallokoinnin vuoksi. 5G-teknologian yksittäisten mahdollistavien teknologien tuomien parannusten voidaankin nähdä osittain vahvistavan toisiaan sekä asettuvan lomittain niin, että toinen teknologia voi olla tuomassa ratkaisua toisen haasteisiin.

Siirtymisessä mmWave-taajuuksille kohdataan myös tiettyjä haasteita. Kun siirrytään suuremmille taajuuksille ja aallonpituus pienenee, pienenevät myös antennit. Tällöin myös vapaan tilan vaimennus, joka tarkoittaa signaalin vaimenemista sen kulkiessa vapaassa tilassa ilman esteitä, kasvaa eksponentiaalisesti (Andrews et al. 2014). Taajuutta kasvatettaessa siis signaalin edetessään kokema vaimennus kasvaa lähes väistämättä, ja tämän takia suuret taajuudet lähtökohtaisesti nähdään sopivan ainoastaan lyhyen välimatkan tiedonsiirtoon. Toinen suuri haaste mmWave-taajuuksilla on signaalien esteiden läpäisykyky, kun lähettäjän ja vastaanottajan välillä ei ole näköyhteyttä eli käytettäessä niin sanottua NLOS (*Non-Line-Of-Sight*)-tiedonsiirtoa (Boccardi et al. 2014). Pi ja Khan

(2011) vertailevat artikkelissaan millimetriaaltojen läpäisykykyä eri materiaaleille ja tuloksista nähdään, että mmWave-taajuuksilla aallot läpäisevät todella huonosti etenkin tiettyjä tavallisimpia rakennusmateriaaleja, kuten tiiltä ja betonia. Pi ja Khan kertovatkin artikkelissaan millimetriaaltojen suhteellisen huonon läpäisykyvyn pitävän rakennusten ulkopuolisen sekä sisällä tapahtuvan tiedonsiirron erillään. He mainitsevat, että rakennusten sisällä tiedonsiirrossa tullaan käyttämään esimerkiksi femtosolu- tai WiFi-ratkaisuja.

Millimetriaalloille siirtymisen haasteet liittyvät pääasiassa signaalien etenemisen varmistamiseen. Tämä on osaltaan erottamassa esimerkiksi kaupunkiympäristössä rakennusten sisäistä sekä ulkopuolista tiedonsiirtoa. Rakennusten sisäisiin verkkoihin mahdollisuuksia tuo 5G-tekniikan aiemmin esitelty mahdollistava tekniikka, solujen pienentäminen. Kun verkko koostuu pienemmistä soluista, pystytään rakennusten sisäpuolellekin luomaan tehokkaampia verkkoratkaisuja.

### 3.2.3 Massive MIMO

Massive MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tarkoittaa moniantennitekniikkaa tukiasemalla, jonka pääasiallinen tarkoitus on palvella kymmeniä päätelaitteita tukiaseman sadoilla eri antenneilla (Rajoria et al. 2018). Tämä eri päätelaitteiden palveleminen on mahdollista massive MIMO -tekniikan ansiosta suorittaa samalla ajan hetkellä sekä taajuudella. Massive MIMO on kehitetty aikaisempien moniantennitekniikoiden, kuten MIMO 4x4, pohjalta. Massive MIMO -tekniikka tarvitsee kanavan tilasta jatkuvaa tietoa sekä ala- että ylälinkissä eli tiedonsiirrossa tukiasemalta käyttäjälle sekä käyttäjältä tukiasemalle, ja tämä toteutetaan yleensä pilottisignaaleilla (Gupta & Jha 2015). Antennien määrän kasvattaminen vähentää taajuusriippuvuuksia eli eri taajuuksien käyttö eri laitteiden kanssa vapautuu. Tämän lisäksi spektraalinen tehokkuus eli informaatiomäärä, joka tietyllä kaistanleveydellä voidaan lähettää, kasvaa merkittävästi (Boccardi et al. 2014). Larsson et al. (2014) lisäksi summaa artikkelissaan massive MIMO -tekniikan mukaan tuomiksi vahvuuksiksi laajamittaisen vähätehoisten komponenttien käytön mahdollistumisen, madaltuvan viiveen ja kestävyuden erilaista radiohäirintää vastaan.

Massive MIMO -tekniikan mahdollistama eri laitteiden tehokkaampi palveleminen tukiasemalla on ominaisuus, joka tuo mahdollisuuksia esineiden internetille. Lisäksi verkkoon liittyminen ja siitä poistuminen yksinkertaistuvat, mikä on myös tärkeä ominaisuus esineiden internetin sujuvalle toiminnalle.

Massive MIMO -tekniikkaan liittyy myös haasteita sen synnyttämien mahdollisuuksien lisäksi. Se paljastaa ongelmia, joita ei ole ennen tarvinnut ratkaista; kuinka tehdä suurella volyymilla matalakustanteisia komponentteja, jotka toimivat keskenään yhteistyössä, uusien päätelaitteiden löytäminen sekä järjestelmään synkronisointi ja sisäisen tehonkulutuksen alentaminen, jotta saavutetaan kokonaisvaltaisia energiasäästöjä (Larsson et al. 2014). Edellä mainitut haasteet ovat jatkuvan tutkimuksen kohteena ja mukana massive MIMO -tekniikan kehityksessä.

## 4. ESINEIDEN INTERNET LIKETOIMINNASSA

Esineiden internet on ollut käsitteenä käytössä vahvasti jo 2000-luvulta lähtien (Haller et al. 2009). Esineiden internetin hyödyntämisen vaikutukset liiketoimintaan ovat positiiviset, ja yrityksen kypsyysvaiheesta riippumatta esineiden internetin hyödyntäminen parantaa tehokkuutta sekä tuottavuutta (De Saulles 2016). On siis oleellista, että yritys käyttää esineiden internetiä liiketoimintansa parantamiseen parhaalla mahdollisella tavalla. Esineiden internetin mahdollisuuksien lisäksi liittyy siihen myös merkittäviä haasteita.

### 4.1 Esineiden internet käsitteenä

Esineiden internetin (*Internet of Things, IoT*) pohjimmainen idea on erilaisten asioiden tai objektien, kuten sensoreiden, erilaisten tagien, päätelaitteiden ja matkapuhelinten, ympärilläme oleva kokonaisuus, jossa laitteet kykenevät kommunikoimaan käyttäjänsä kanssa sekä keskenään internet-protokollan yli saavuttaakseen asetettuja päämääriä (Atzori et al. 2010). Esineiden internet voidaan nähdä osana tulevaisuuden internet (*Future Internet*)-kokonaisuutta (Haller et al. 2009). Esineiden internet koostuu kolmesta kerroksesta: havaintokerros, kuljetuskerros sekä sovelluskerros (Jing et al. 2014). Internet-yhteyden avulla laitteista ja objekteista saadaan tehokkaasti käyttödataa ja niille voidaan antaa käskyjä. Atzori et al. (2010) määrittelevät artikkelissaan esineiden internetin pääasialliseksi vahvuudeksi sen merkittävät mahdollisuudet ihmisten jokapäiväiseen elämään sekä erilaiseen ihmisten käyttäytymiseen. Esineiden internetin vaikutukset tuleekin heidän mukaansa näkymään, niin ihmisten työelämässä kuin kotitalouksissakin. Artikkelissa mainitaan esimerkkeinä kotitalouksien automatisoinnin, e-terveydenhuollon ja tehostetun oppimisen tulevaisuudessa korostuvista esineiden internetin sovelluskohteista. Lisäksi esineiden internetin vahvuuksia ovat halvat, mutta tehokkaat sensorit, halpa verkko-yhteys sekä lähes kaikkialla ja lähes kaikille saatavilla oleva mobiiliyhteys (De Saulles 2016).

Suurin haaste esineiden internetille on saada erilaisten laitteiden välille vahva yhteistoimivuus sekä samalla mahdollistaa laitteiden jatkuvasti kasvava älykkyys ja autonominen toiminta (Atzori et al. 2010). Lisäksi jokaiselle esineiden internetin kerrokselle ominaiset tietosuojongelmat ovat eräs merkittävimmistä haasteista (Jing et al. 2014). Yhteistoimivuuden lisäksi esineiden internetin haasteisiin kuuluu resurssitehokkuuden, kuten virran kulutuksen, parantaminen (Atzori et al. 2010).

## 4.2 Esineiden internetin käyttö liiketoiminnassa

Kuten aikaisemmin mainittiin, esineiden internetin käytön hyödyt liiketoiminnassa ovat huomattavat. Esineiden internetin rooli onkin pienentää fyysisen maailman ja sen tietojärjestelmissä olevan vastineen kuilua (Haller et al. 2009). Seuraavaksi luonnehditaan esineiden internetin liiketoiminnallista käyttöä kahdesta eri näkökulmasta.

### 4.2.1 Tietoa fyysisestä maailmasta

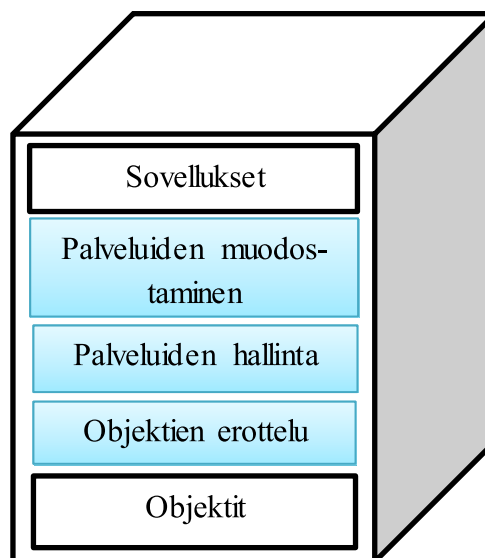
Esineiden internet antaa mahdollisuuksia erilaiseen ympäristön tarkkailuun (*environmental monitoring*) liiketoiminnassa. Muun muassa automaattisen tunnistuksen sekä datan keräämiseen liittyvien teknologioiden, kuten RFID:n (*Radio Frequency IDentification*) ja sensoreiden, avulla yrityksen on mahdollista saada enemmän ja parempaa tietoa siitä, mitä fyysisessä maailmassa tapahtuu (Haller et al. 2009). Esineiden internet tuo siis dataa yrityksen sisällä sekä ulkopuolella vaikuttavasta fyysisestä maailmasta. Esimerkkinä yritysten toimitusketjujen hallinnalle hyödyllinen tieto siitä, mikä on tietyn tuotteen sijainti tietyllä hetkellä. Toinen vieläkin käytännöllisempi esimerkki ympäristön tarkkailusta esineiden internetin avulla on yrityksen toimitilojen valaistuksen mittaaminen ja tarkkailu (Gubbi et al. 2013). Esineiden internetin avulla liiketoiminnan prosesseista saatavan tiedon tarkkuuden sekä reaaliaikaisuuden vuoksi pystytään tietoa hyödyntämällä optimoimaan liiketoiminnan prosesseja, ja niin saavuttamaan liiketoiminnallisia hyötyjä (Spieß & Karnouskos 2007).

### 4.2.2 Esineiden internet ja palvelut

Tulevaisuuden internet on pohja verkkopohjaiselle palvelutaloudelle, jossa palveluiden luonne vaihtelee korkean tason organisaatiopalveluista matalan tason sensoripalveluihin (Haller et al. 2009). Esineiden internet on osaltaan vauhdittamassa sekä myös mahdollistamassa tämän hetkisen liike-elämän palvelullistumista. Esineiden internetissä väliohjelmistoksi kutsutaan kerrosta, joka asettuu teknologisen sekä sovellustason väliin, ja tällä kerroksella on ominaisuus piilottaa, esimerkiksi ohjelmoijalta, yksityiskohtia muista teknologioista, jotka häntä eivät kiinnosta (Atzori et al. 2010). Nykypäivän esineiden internetissä väliohjelmisto toteutetaan usein palvelupainotteisella tavalla, mikä tarkoittaa parempaa yhteensopivuutta sekä joustavuutta kerroksella (Teixeira et al. 2011). Kuvassa 1 on esitettyä väliohjelmisto toteutettuna palvelupainotteisen arkkitehtuurin (*Service Oriented Architecture, SOA*) mukaisesti. Sen avulla pystytään hajottamaan monimutkaiset ja massiiviset systeemit palveluiksi, jotka voidaan nähdä yksittäisinä ja helposti määriteltävinä komponentteina (Atzori et al. 2010). Palvelupainotteisen arkkitehtuurin rakenteesta on selkeästi nähtävillä, miten objekteista tai asioista saatu data jalostetaan edelleen palveluiksi. Atzori et al. (2010) kertovat artikkelissaan jokaisen kerroksen päätehtävistä. *Palveluiden muodostaminen* -kerros tarjoaa yksittäisten palveluiden yhdistelyyn liittyviä



toimintoja, joiden avulla lopulta halutut sovellukset rakentuvat. Atzori et al. (2010) kertovat *palveluiden hallinta* -kerroksen sisältävän päätehtävät, jotka ovat eri objekteille saatavilla. Tällä kerroksella on siis tietoa tietyn sovelluksen yksityiskohtaan yhteydestä tiettyyn objektiin. Artikkelissa kuvataan *objektien erottelu* -kerroksen pääasialliseksi tehtäväksi eri objektien ja niistä saatavan datan erottelu sekä objektien kanssa keskustelu niille ominaisella kielellä sekä tavalla.



**Kuva 1. Palvelupainotteinen arkkitehtuuri väliohjelmistolle (mukaillen (Atzori et al. 2010)).**

Erilaiset toimintaa mittaavat objektit ja sensorit ovat olleet yhtenäinen osa tehdasjärjestelyjä esimerkiksi automaatioon tai turvallisuuteen liittyen. Tällainenkin järjestelmä tulee muuttumaan esineiden internetin myötä langattomaksi systeemiksi, johon voidaan joustavasti tehdä muutoksia juuri tarvittavaan kohtaan (Gubbi et al. 2013). On olemassa osaluokkia, joissa esineiden internetin mahdollisuudet ovat heti nähtävillä sekä osaluokkia, joihin esineiden internet tuo odottamattomia parannuksia.

### 4.3 Haasteet esineiden internetissä

Esineiden internet on suuri muutos, joka tulee parantamaan datan käyttöä ja analysointia huomattavasti, mutta sen tiellä on silti merkittäviä haasteita (Jing et al. 2014). Luonnehditaan seuraavaksi esineiden internetin merkittävimpiä haasteita.

### 4.3.1 Turvallisuus ja yksityisyys

Kaikkialla, missä otetaan käyttöön todella suuren skaalan verkkoa, tulee turvallisuus olemaan merkittävä haaste (Gubbi et al. 2013). Kun verkot kehittyvät yhä joustavammaksi ja älykkäimmiksi, kehittyvät myös tavat, joilla verkkoon voidaan hyökätä. Tapoja, joilla systeemiin voidaan hyökätä, ovat esimerkiksi verkon saatavuuden estäminen käyttäjiltä, virheellisen datan syöttäminen verkkoon ja yksityisten tietojen tutkiminen (Gubbi et al. 2013). Esineiden internet voidaan siis nähdä jopa tavallista verkkoa haavoittuvampana. Atzori et al. (2010) linjaavat artikkelissaan kolme syytä, jotka mahdollistavat hyökkäykset esineiden internetin verkkoon. Ensimmäiseksi syyksi he määrittelevät sen, että esineiden internetin komponentit toimivat suurimman osan ajasta itsenäisesti, mikä tekee fyysisen hyökkäyksen helpommaksi. Toiseksi syyksi artikkelissa mainitaan lähes kaikkien verkon yhteyksien langattomuus, mikä tekee signaalin salakuuntelun yksinkertaisemmaksi. Viimeiseksi syyksi he määrittelevät esineiden internetin komponenteille luonteenomaiset matalat ohjelmisto- sekä tehoressurssit. Komponentteihin on siis lähes mahdollonta sisällyttää tarpeeksi turvallisuutta tukevaa teknologiaa. Nämä syyt kumpuavat esineiden internetin luonteesta sekä osaltaan myös niistä seikoista, joita on luonnehdittu esineiden internetin vahvuuksiksi.

Yksityisyys määrittää säännöt, mihin ja minkälaiseen tietoon yksittäisistä käyttäjistä voi päästä käsiksi (Miorandi et al. 2012). Mikäli käyttäjiin yhdistettävät heistä tietoa sisältävät komponentit ja objektit ovat yhteydessä verkkoon niin, että niillä on esimerkiksi oma tunnistettava IP-osoite, voidaan käyttäjiä seurata ilman, että he itse edes tietävät sitä (Weber 2010). Edellä mainittu seikka on niin turvallisuuteen kuin myös yksityisyyteen liittyvä ongelma. Miorandi et al. (2012) vakuuttavat artikkelissaan esineiden internetissä käytettävien sovellusten sekä teknologioiden luonteiden tekevän yksityisyydestä entistäkin oleellisemmän ja huomiota vaativamman seikan. Artikkelissa mainitaan esimerkkinä terveydenhuollon toimialalle suunniteltujen esineiden internetin sovellusten käyttöönoton hidastuminen ja estyminen sen vuoksi, että esineiden internet ei mahdollista terveydenhuollon sovelluksilta vaadittavaa riittävää yksityisyyden varmistamista. Yksityisyyden varmistaminen onkin yksi tekijä, joka rajoittaa esineiden internetin kehittymistä.

### 4.3.2 Tekniset haasteet

Seuraavaksi esitellään leikkaus yleisistä teknisistä haasteista. Eräs esineiden internetin tekninen haaste on sen saatavuuden varmistaminen. Tämä tarkoittaa laitteiston sekä ohjelmiston puolella palvelun tarjoamista asiakkaille missä ja milloin vain (Al-Fuqaha et al. 2015). Hyvä saatavuus onkin esineiden internetin yksi tärkeimmistä vahvuuksista. Toinen tekninen haaste on verkkoteknologiaihin, kuten RFID:iin, lyhyen matkan langattomaan tiedonsiirtoon ja sensoriverkkoihin, liittyvät haasteet. Verkkoteknologiaihin liittyviä haasteita ovat muun muassa skaalautuvuus, turvallisuus sekä alustojen yhteensopivuus

(Bandyopadhyay & Sen 2011). Teknologioiden sekä komponenttien suorituskykyvaatimukset sekä niiden oikea mitoittaminen ovat myös verkkoteknologioihin liittyviä haasteita (Al-Fuqaha et al. 2015). Optimaalisin tilanne olisi se, että esineiden internet pystyisi tarjoamaan asiakkaalle juuri tiettyyn käyttötarkoitukseen oikeanlaista suorituskykyä niin, ettei se kuormita verkkoa tarkoituksettomasti tai maksa asiakkaalle kohtuuttomasti. Skaalautuvuuden haaste on siinä, kuinka tarjota asiakkaille uusia laitteita, palveluita ja toimintoja vaikuttamatta olemassa olevien palveluiden laatuun (Al-Fuqaha et al. 2015). Esineiden internetin teknisiä haasteita pyritään havaitsemaan yhä lisää ja ne ovat jatkuvan tutkimuksen alla.

## 5. 5G-TEKNOLOGIAN AVULLA TOTEUTETUN ESINEIDEN INTERNETIN LIIKETOIMINNALLINEN KÄYTTÖ

Esineiden internetin visio, joka pitää sisällään jokapäiväistä elämää sekä liiketoimintaa mullistavan tavan liittää lähes kaikki erilaiset laitteet yhteen, pystytään toteuttamaan tulevaisuuden tiedonsiirtoverkkojen avulla (Palattella et al. 2016). 5G-teknologia lukeutuu näihin mahdollistajiin. 5G-teknologialla toteutettuun esineiden internetiin uskotaan olevan yhteydessä yli viisikymmentä miljardia laitetta mukaan luettuna muun muassa puhelimet, autot ja sähköiset kotitaloudet, minkä vuoksi sitä kutsutaankin myös kaikkien ja kaiken internetiksi (*Internet of everyone and everything*) (Zhang et al. 2016). Palattella et al. (2016) kuvaavat artikkelissaan 5G-teknologian mukana tuomien suuremman tiedonsiirtonopeuden, pienemmän viiveen sekä parantuneen kuuluvuuden olevan merkittävä käännekohta globaalien esineiden internetin kehityksessä. Palattella et al. (2016) korostavat muun muassa 5G-teknologian sen ominaisuuden merkitystä esineiden internetille, että verkkoon voidaan yhdistää valtava määrä lähes millaisia laitteita tahansa.

### 5.1 5G-teknologian mahdollisuudet esineiden internetille

Esitellään seuraavaksi muutamia esineiden internetin liiketoiminnalle hyödyllisiä ominaisuuksia, joihin 5G-teknologia tuo parannuksia. Käsiteltäviksi ominaisuuksiksi on pyritty valitsemaan 5G-teknologian myötä kaikista merkittävimmän muutoksen kokevat ominaisuudet.

#### 5.1.1 Energiatehokkuus

Kuten aiemmin mainittiin, laitteiden määrä esineiden internetissä tulee kasvamaan eksponentiaalisesti, ja tämän takia laitteiden energiatehokkuus tulee olemaan merkittävä seikka tulevaisuudessa. Zhang et al. (2016) kertovat artikkelissaan, että tulevassa 5G-teknologiakokonaaisuudessa on tiettyjä perustavanlaatuisia ominaisuuksia, jotka itsessään parantavat energiatehokkuutta. Artikkelissa viitataan tämänkin työn 5G-teknologian teoriaosuudessa mainittujen solujen pienentämisen hyötyihin energiatehokkuudessa. Yksinkertaisesti, mitä lyhyempi tiedonsiirtomatka on, sitä vähemmän tarvitaan yhdistettyjä elementtejä ja sitä pienempi on koko systeemin energiankulutus. Toinen 5G-teknologian ominaisuuksista, jonka Zhang et al. (2016) mainitsevat parantavan energiatehokkuutta on massive MIMO -teknologia. Heidän mukaansa tämän teknologian ansiosta pystytään valvomaan ja säätelemään yksittäisten antennien energiankulutusta. He kertovat yksinkertaisesti, kuinka tukiasema kykenee sulkemaan käytöstä sellaiset antennit, jotka eivät

tietyllä hetkellä suorita mitään tehtävää. Tämä vaatii myös tukiasemalta tarpeeksi edistyksestä teknologiaa. Artikkelissa mainitaan myös, että siirryttäessä parempiin moniantenniteknoologioihin, pystytään energiatehokkuutta parantamaan ilman, että tiedonsiirtonopeus kärsii siitä.

On olemassa muutamia energiatehokkaita langattomia yhteysprotokollia, jotka tulevat entistä enemmän yleistymään 5G-aikakaudella. Palattella et al. (2016) puhuvat näistä yhteysprotokollista artikkelissaan. Ensimmäinen heidän mainitsemistaan on ZigBee, lyhyen välimatkan yhteysprotokolla (PAN), jonka Palattella et al. (2016) kertovat sopivan erityisen hyvin sensoriverkoille energiatehokkuutensa sekä matalien kustannusten vuoksi. Lisäksi he mainitsevat Bluetooth Low Energy (BLE)-protokollan, joka on älykäs sekä matalan energiankulutuksen versio Bluetooth-teknologiasta. Sen kerrotaan käyvän lyhyen välimatkan tiedonsiirtoon, etenkin kontrolli- ja monitorointisovelluksille esimerkiksi tulevaisuuden autoissa ja älykkäissä kodeissa. Kaksi muuta artikkelissa mainittua teknologiaa ovat Low-Power Wifi sekä Low Power Wide Area (LPWA), jotka ovat myös paranneltuja sekä energiatehokkaampia kuin aikaisemmat versionsa ja sopivat tulevaisuuden esineiden internetissä käytettäväksi. Nämä 5G-teknologian mukanaan tuomat parannukset vastaavat esineiden internetin kasvaessa yhä tärkeämpään energiatehokkuuskysymykseen.

### 5.1.2 Viive ja luotettavuus

Tietuille esineiden internetin sovelluksille minimaalinen viive ja vahva luotettavuus ovat ehdottoman tärkeitä vaatimuksia. Nämä kaksi käsitettä esiintyvät usein yhdessä esimerkiksi tiettyjen korkeaa toimintavarmuutta vaativien esineiden internetin sovellusten ominaisuuksissa. Laitemäärän moninkertaisesti kasvaessa 5G-teknologian tulisi silti mahdollistaa minimaaliset viiveet (Jungnickel et al. 2014). Tällaisia korkeaa toimintavarmuutta ja matalaa viivettä vaativia esineiden internetin sovelluksia käytetään muun muassa tulevaisuudessa älykkäissä liikenteessä ja tehdasautomaatiossa (Schulz et al. 2017). Sovellusesimerkkejä voisivat olla automaattisesti ajavat autot sekä tarkkuutta vaativat kokoonpanolaitteet tehtaan tuotantolinjoilla.

Tang et al. (2016) kertovat artikkelissaan, että kompleksisuuden kasvaessa signaalin ilmaisussa, esimerkiksi moniantenniteknoologioiden takia, koko systeemin laskennallinen viive kasvaa eksponentiaalisesti. Artikkelissa todetaan 5G-teknologian sisältävän yksinkertaisempia signaalin ilmaisumenetelmiä, joita hyödynnettäessä kokonaisen systeemin viivettä saadaan laskettua, vähintään pidettyä samana, riippumatta käytettävien antennien määrästä tukiasemalla. Tämän tutkimuksen kannalta ei nähdä relevantiksi esitellä näitä 5G-teknologian sisältämiä erillisiä menetelmiä, sillä niiden toiminta perustuu signaalin ilmaisun teknisiin ratkaisuihin. Teknologioiden sekä niiden sisältämien menetelmien tarkka tekninen tarkastelu ei sisälly tämän tutkimuksen rajaukseen.

Schulz et al. (2017) esittelevät artikkelissaan 5G-tekniikan viivettä vähentäviä ja luotettavuutta parantavia ratkaisuja erikseen radorajapinnalle sekä verkkoarkkitehtuurille. He esittelevät lisäksi tarkat viive- sekä luotettavuusvaatimukset eri esineiden internetin sovelluskohteille, joihin 5G-tekniikka tulee vastaamaan, esimerkkinä tehdasautomaation luotettavuusvaatimus  $10^{-9}$  PLR (*packet loss rate*), joka tarkoittaa hukattujen ja lähetettyjen pakettien suhdetta, ja viivevaatimus, joka vaihtelee välillä  $250 \mu\text{s} - 10 \text{ ms}$ . Hyvinkin selkeästi pystytään siis määrittelemään, sovelluskohteesta riippuen, millaisiin vaatimuksiin 5G-tekniikan odotetaan vastaavan. Schulz et al. (2017) määrittelevät verkon radorajapinnalle 5G-tekniikan mahdollisuuksiksi muun muassa resurssidelegoinnin ja aaltomuotosuunnittelun. Artikkelissa kerrotaan resurssidelegoinnin vapauttavan aiemmin hukkaan menneitä resursseja erityisesti esineiden internetin laitteiden väliseen kommunikaatioon. Aaltomuotosuunnittelun avulla sen sijaan pystytään muun muassa tehokkaasti tukemaan todella pienien pakettikokojen tiedonsiirtoa sekä matalaa tehonkulutusta (Zaidi et al. 2016). Toinen verkon ominaisuus, johon Schulz et al. (2017) mukaan vaikuttamalla saadaan viivettä pienemmäksi ja luotettavuutta suuremmaksi, on verkkoarkkitehtuuri. Heidän mukaansa tekemällä verkkoarkkitehtuurista joustavampaa esimerkiksi niin, että eri langattomat verkot keskustelevat paremmin keskenään ja niin, että laitteiden siirtyminen verkosta toiseen on yksinkertaisempaa, pystyy verkko mukaantumaan paremmin erilaisiin tulevaisuuden palveluvaatimuksiin. Artikkelissa kerrotaan, että tällöin verkko noudattaa paremmin palvelukeskeistä ajattelua ja verkossa toimivat sovellukset ovat vähemmän riippuvaisia käytettävästä radioverkkoteknologiasta tai operaattoreista.

## 5.2 5G-tekniikan liiketoiminnallinen vaikutus esineiden internetille

Harvoissa lähdeaineistoissa puhutaan suoraan 5G-tekniikan liiketoiminnallisista vaikutuksista esineiden internetille. Aiemmin kandidaatintyössä käsitellyt aihepiirit antavat kuitenkin hyvän pohjan pohtia niitä 5G-tekniikan ominaisuuksia, joilla voisi olla liiketoiminnallista vaikutusta esineiden internetille. Tässä kappaleessa yhdistelläänkin lähdemateriaalin tuella työssä aiemmin käsiteltyjä teemoja liittyen esineiden internetin hyödyntämiseen liiketoiminnassa, sen haasteisiin sekä 5G-tekniikan mukanaan tuomiin parannuksiin. Käsiteltyjä aihepiirejä pyritään tarkastelemaan ja yhdistelemään siinä valossa, voidaanko 5G-tekniikan esineiden internetille tarjoamat mahdollisuudet jalostaa edelleen liiketoiminnalliseksi hyödyksi, joka on koko kandidaatintyön tutkimusongelma ja tavoite.

Internet on käynyt läpi muutoksen infrastruktuuripainotteisesta liiketoimintapainotteiseen, ja tällä hetkellä esineiden internet käy samantapaista muutosta (Palattella et al. 2016). Tällä Palattella et al. (2016) tarkoittavat oletettavasti sitä, että esineiden internetin kehitystä ja suunnittelua tullaan kääntämään siihen suuntaan, jossa esineiden internetin liiketoiminnallinen vaikutus on lopullinen tavoite. Tässä kehityksessä korostuu siis myös

5G-tekniikan, joka on merkittävä muutos tulevaisuuden esineiden internetille, liiketoiminnallinen vaikutus. Aiemmin mainituilla 5G-tekniikan mahdollisuuksilla esineiden internetille voidaan nähdä olevan myös liiketoiminnallista merkitystä.

Ensimmäinen näistä mahdollisuuksista on energiatehokkuus. Esineiden internetin kehityksessä ja verkkoon yhteydessä olevien laitteiden määrän räjähdysmäisesti kasvaessa, on verkon energiatehokkuus edellytys sen realistiselle toiminnalle. 5G-tekniikan energiatehokkuus mahdollistaa siis yleisellä tasolla esineiden internetin hyödyntämisen liiketoiminnassa, sisältäen muun muassa monimuotoisten palveluiden toimittamisen asiakkaille sekä fyysisestä maailmasta saatavan tiedon hyödyntämisen liiketoiminnassa. 5G-tekniikka vastaakin tässä mielessä aiemmin työssä mainittuihin esineiden internetin haasteisiin liittyen sensoriverkkojen skaalautuvuuteen. Lisäksi 5G-tekniikan energiatehokkuus voisi avata mahdollisuuden käyttää verkon energiaressit tehokkaammin, jolloin verkon tehonkäyttö olisi organisaatiolle kannattavampaa.

Toinen aiemmin mainituista mahdollisuuksista on viiveen laskeminen sekä luotettavuuden parantuminen. 5G-tekniikan mahdollistaessa matalamman viiveen sekä paremman luotettavuuden, avautuu mahdollisuus ottaa käyttöön uudenlaisia sovelluksia. Nämä sovellukset ovat sellaisia, joiden realistinen toiminta vaatii matalan viiveen sekä korkean luotettavuuden. Esimerkkejä näistä 5G-tekniikan tuomien parannusten myötä esineiden internetillä toteutettavista sovelluksista voisi olla liikenteen automaatioon liittyvät, tehdasautomaatioon liittyvät sekä ehdotonta tarkkuutta vaativat terveydenhuollon sovellukset. 5G-tekniikan sisältämä verkon parempi saatavuus on myös osaltaan mahdollistamassa näitä sovelluksia. 5G-tekniikan myötä siis esineiden internetin mahdollisuudet tarjota erilaisia palveluita sekä sovelluksia voidaan ottaa käyttöön. Voidaan nähdä, että tällä on huomattavaa liiketoiminnallista merkitystä esineiden internetiä liiketoiminnassaan käyttävälle organisaatiolle.

Kuten aiemmin työssä on mainittu, 5G-tekniikka tulee mahdollistamaan globaalin esineiden internetin käytön ja vauhdittamaan sen kehitystä. Sen lisäksi, että 5G-tekniikka tulee avaamaan pääsyä jo esineiden internetiin itseensä sisältyviin mahdollisuuksiin, voidaan sanoa, että osasta 5G-tekniikan parannuksista saadaan esineiden internetin avulla hyödynnettynä liiketoiminnallista hyötyä. Nämä työssä esitellyt parannukset olivat energiatehokkuus, viive ja luotettavuus sekä verkon saatavuuden parantuminen.

## 6. YHTEENVETO

Kandidaatintyössä tutkittiin 5G-tekniikan liiketoiminnallisia vaikutuksia esineiden internetille. Tutkimusongelmaa, voidaanko 5G-tekniikan esineiden internetille tarjoamat mahdollisuudet jalostaa edelleen liiketoiminnalliseksi eduksi, lähestyttiin aluksi tutkimalla 5G-tekniikan teoriataustaa. Ensin tutkittiin, mikä on 5G-tekniikan vaikutus tiedonsiirtoon, minkä jälkeen esiteltiin kolme 5G-tekniikan mahdollistavaa tekniikkaa. Tämä nähtiin hyväksi tavaksi tutkia 5G-tekniikan ominaisuuksia, sillä nämä mahdollistavat tekniikat antavat edellytykset uuden tekniikakokonaisuuden teknisille ominaisuuksille. Mahdollistaviksi tekniikoina valittiin kolme tärkeimmiksi nähtyä tekniikkaa.

Seuraavaksi tutkittiin esineiden internetiä liiketoiminnassa, jota alusti esineiden internetin määrittely käsitteenä. Esineiden internetin käyttöä liiketoiminnassa tarkasteltiin tutkimalla sen hyödyntämistä fyysisen maailman monitoroinnissa sekä monimuotoisten palveluiden tarjoamisessa. Lisäksi tutkittiin esineiden internetin merkittävimpiä haasteita, joista työssä nähtiin relevanteiksi esitellä turvallisuuteen ja yksityisyyteen liittyvät haasteet sekä esineiden internetin tekniset haasteet.

Viimeisessä osassa tutkittiin 5G-tekniikan avulla toteutetun esineiden internetin liiketoiminnallista käyttöä. Aluksi tutkittiin mahdollisuuksia, joita 5G-tekniikalla on esineiden internetille. Näistä työssä esiteltiin energiatehokkuus sekä viive ja luotettavuus. Lopuksi yhdisteltiin työn aiempia tuloksia ja tutkittiin 5G-tekniikan liiketoiminnallista vaikutusta esineiden internetille.

### 6.1 Tulosten esittely ja päätelmät

Työssä tarkoituksena oli edetä 5G-tekniikan ominaisuuksista 5G-tekniikan liiketoiminnallisiin vaikutuksiin esineiden internetille. Kaiken kaikkiaan tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että 5G-tekniikan tekniset parannukset voidaan jalostaa esineiden internetissä hyödynnettynä liiketoiminnalliseksi eduksi. Nämä kandidaatintyössä esitellyt 5G-tekniikan parannukset, joilla voidaan nähdä olevan yhteys liiketoiminnallisiin hyötyihin ovat energiatehokkuus, viiveen ja luotettavuuden parantuminen sekä verkon parempi saatavuus. Näiden ominaisuuksien hyödyntäminen edellyttää kokonaisuutena toimivaa 5G-verkkoa. Ei voida olla siis varmoja, saadaanko näillä ominaisuuksilla liiketoiminnallista hyötyä 5G-verkon ensimmäiseksi ilmestyvissä versioissa.

Energiatehokkuus vauhdittaa esineiden internetin kehitystä yleisellä tasolla, minkä lisäksi se voisi avata organisaatiolle mahdollisuuden käyttää verkon energiareсурssit tehokkaammin. Tällöin verkon tehonkäyttö olisi kannattavampaa. Energiatehokkuus on myös edel-



lytys sensoriverkon ketterälle toiminnalle, mikä voi avata uusia liiketoiminnallisia mahdollisuuksia organisaatiolle. Viiveen ja luotettavuuden parantumisen sekä verkon paremman saatavuuden tärkeimmät liiketoiminnalliset vaikutukset liittyvät monimuotoisten palveluiden tarjoamisen mahdollistumiseen. Paremman luotettavuuden ja pienemmän viiveen ansiosta voidaan toteuttaa palveluita ja sovelluksia, jotka eivät nykyisillä teknologioilla ole mahdollisia verkon rajoitteiden vuoksi. Näitä sovelluskohteita on muun muassa terveydenhuollon sekä tehdasautomaation toimialoilla. Verkon paremman saatavuuden avulla voidaan verkkoa sekä haluttuja resursseja hyödyntää tehokkaammin. Tämä avaa myös mahdollisuuksia uudenlaisten palveluiden kehittämiseksi.

## 6.2 Tulosten arviointi ja tarve jatkotutkimukselle

Tutkimuksen tulokset olivat selkeitä ja niiden avulla pystyttiin vastaamaan tutkimusongelmaan. Tutkimuksessa onnistuttiin esittelemään yleisluontoinen kuva 5G-tekniologiasta, esineiden internetin hyödyntämisestä liiketoiminnassa sekä 5G-tekniologian liiketoiminnallisesta vaikutuksesta esineiden internetille. Työhön valitut tärkeimmät teemat liittyen 5G-tekniologian mahdollistaviin teknologioihin sekä sen käyttöön esineiden internetissä toistuivat useissa aiheeseen liittyvissä lähteissä, joten voidaan sanoa, että tutkimusaineiston perusteella työhön onnistuttiin valitsemaan oleelliset teemat.

Haasteita tutkimukselle tuotti 5G-tekniologian uutuuden takia tieteellisen lähdemateriaalin vähyys ja käytännön esimerkkien uupuminen. Tämän vuoksi etenkin, kun tarkasteltiin 5G-tekniologiaa liiketoiminnallisesta näkökulmasta, käytettiin omaa ajattelua ja päättelyä oleellisena apuna tutkimuksessa. Tutkimuksen aiheen luonteen vuoksi tietyiltä osa-alueilta päädyttiin valitsemaan oleelliset teemat. Tästä johtuen tutkimusta 5G-tekniologian liiketoiminnallisista vaikutuksista esineiden internetille tehtiin tietystä näkökulmasta ja tiettyjen valittujen teemojen pohjalta. Tutkimuksen tuloksia ja niiden yleispätevyyttä olisi saatu lisättyä laajentamalla tutkimusta eri osa-alueilla. Voidaan kuitenkin sanoa, että tutkimuksen laajuus oli kandidaatintyölle sopiva.

Tässä kandidaatin työssä annettiin yleisluontoinen kuva 5G-tekniologiasta sekä sen hyödyntämisestä esineiden internetissä. Lisää tutkimusta voisi suorittaa tietyn 5G-tekniologialla toteutetun esineiden internetin sovelluksen liiketoiminnallisista ominaisuuksista. Kiinnostavaa voisi myös olla jatkotutkimus 5G-tekniologialla toteutetun esineiden internetin liiketoiminnallisesta hyödyntämisestä tietyllä toimialalla.

## LÄHTEET

- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 17(4), pp. 2347-2376.
- Andrews, J.G. (2013). Seven ways that hetnets are a cellular paradigm shift, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 51(3), pp. 136-144.
- Andrews, J.G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S.V., Lozano, A., Soong, A.C.K. & Zhang, J.C. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 32(6), pp. 1065-1082.
- Atzori, L., Iera, A. & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*, Vol. 54(15), pp. 2787-2805.
- Bandyopadhyay, D. & Sen, J. (2011). Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization, *Wireless Personal Communications*, Vol. 58(1), pp. 49-69.
- Boccardi, F., Heath Jr., R., Lozano, A., Marzetta, T.L. & Popovski, P. (2014). Five disruptive technology directions for 5G, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52(2), pp. 74-80.
- Chandrasekhar, V., Andrews, J.G. & Gatherer, A. (2008). Femtocell networks: A survey, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 46(9), pp. 59-67.
- De Saullés, M. (2016). *The Internet of Things and Business*. Routledge, London.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 29(7), pp. 1645-1660.
- Gupta, A. & Jha, R.K. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies, *IEEE Access*, Vol. 3 pp. 1206-1232.
- Haller, S., Karnouskos, S. & Schroth, C. (2009). The Internet of things in an enterprise context, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 5468 pp. 14.
- Jing, Q., Vasilakos, A.V., Wan, J., Lu, J. & Qiu, D. (2014). Security of the Internet of Things: perspectives and challenges, *Wireless Networks*, Vol. 20(8), pp. 2481-2501.
- Jungnickel, V., Manolakis, K., Zirwas, W., Panzner, B., Braun, V., Lossow, M., Sternad, M., Apelfröjd, R. & Svensson, T. (2014). The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52(5), pp. 44-51.

- Larsson, E.G., Edfors, O., Tufvesson, F. & Marzetta, T.L. (2014). Massive MIMO for next generation wireless systems, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 52(2), pp. 186-195.
- Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F. & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges, *Ad Hoc Networks*, Vol. 10(7), pp. 1497-1516.
- NGMN (2015). NGMN 5G White Paper. NGMN Alliance. Vol 1.0. Saatavilla: <https://www.ngmn.org/5g-white-paper/5g-white-paper.html> (viitattu 23.3.2018).
- Nokia (2016). 5G for Mission Critical Communication, Nokia white paper. Saatavilla: [http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/5G/Nokia\\_5G\\_for\\_Mission\\_Critical\\_Communication\\_White\\_Paper.pdf](http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/5G/Nokia_5G_for_Mission_Critical_Communication_White_Paper.pdf) (viitattu 23.3.2018).
- Palattella, M.R., Dohler, M., Grieco, A., Rizzo, G., Torsner, J., Engel, T. & Ladid, L. (2016). Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 34(3), pp. 510-527.
- Pi, Z. & Khan, F. (2011). An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49(6), pp. 101-107.
- Rajoria, S., Trivedi, A. & Godfrey, W.W. (2018). A comprehensive survey: Small cell meets massive MIMO, *Physical Communication*, Vol. 26 pp. 40-49.
- Rappaport, T.S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G.N., Schulz, J.K., Samimi, M. & Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! *IEEE Access*, Vol. 1 pp. 335-349.
- Schulz, P., Matthe, M., Klessig, H., Simsek, M., Fettweis, G., Ansari, J., Ashraf, S.A., Almeroth, B., Voigt, J., Riedel, I., Puschmann, A., Mitschele-Thiel, A., Muller, M., Elste, T. & Windisch, M. (2017). Latency Critical IoT Applications in 5G: Perspective on the Design of Radio Interface and Network Architecture, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55(2), pp. 70-78.
- Shankaranarayanan, N.K. & Ghosh, A. (2017). 5G, *IEEE Internet Computing*, Vol. 21(5), pp. 8-10.
- Spieß, P. & Karnouskos, S. (2007). Maximizing the business value of networked embedded systems through process-level integration into enterprise software, 2007 2nd International Conference on Pervasive Computing and Applications, ICPCA'07, pp. 536-541.
- Tang, H., Zhang, W., Hardjawana, W. & Vucetic, B. (2016). Improving latency and reliability in 5G Internet-of-Things networks, 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, SmartGridComm 2016, pp. 509-513.

Teixeira, T., Hachem, S., Issarny, V. & Georgantas, N. (2011). Service oriented middleware for the internet of things: A perspective (invited paper), Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Vol. 6994 LNCS pp. 220.

Weber, R.H. (2010). Internet of Things - New security and privacy challenges, Computer Law and Security Review, Vol. 26(1), pp. 23-30.

Zaidi, A.A., Luo, J., Gerzaguet, R., Wolfgang, A., Weiler, R.J., Vihriala, J., Svensson, T., Qi, Y., Halbauer, H., Zhao, Z., Zetterberg, P. & Miao, H. (2016). A Preliminary Study on Waveform Candidates for 5G Mobile Radio Communications above 6 GHz, 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE, pp. 1-6.

Zhang, D., Zhou, Z., Mumtaz, S., Rodriguez, J. & Sato, T. (2016). One Integrated Energy Efficiency Proposal for 5G IoT Communications, IEEE Internet of Things Journal, Vol. 3(6), pp. 1346-1354.