



**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

Esineiden internet älykaupungeissa: kestävän kehityksen mahdollisuudet

Tietojärjestelmätieteen
kandidaatintutkielma

Laatija:
Belinda Nuotio

Ohjaaja:
FT Kai Kimppa

6.5.2024
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidutkielma

Oppiaine: Tietojärjestelmätiede

Tekijä: Belinda Nuotio

Otsikko: Esineiden internet älykaupungeissa: kestävän kehityksen mahdollisuudet

Ohjaaja(t): FT Kai Kimppa

Sivumäärä: 39 sivua

Päivämäärä: 6.5.2024

Kaupungistuminen on tuonut mukanaan ekologisia, sosiaalisia ja taloudellisia haasteita, joiden vuoksi kaupunkeja on kehitettävä. Älykaupungeissa voidaan esineiden internettiä hyödyntämällä vastata näihin haasteisiin ja parantaa kaupunkien asukkaiden elämänlaatua. Esineiden internetin käyttö on nopeasti yleistymässä, kun erilaisia laitteita ja arkisia esineitä on alettu yhdistää internettiin. Nämä esineet keräävät dataa, jonka avulla älykaupungeissa voidaan edistää kestävän kehityksen tavoitteiden kuten hiilineutraaliuden saavuttamista.

Tämän kandidaatintutkielman tarkoituksena on selvittää, miten vihreää esineiden internettiä hyödyntämällä voidaan edistää kestävästä kehitystä älykaupungeissa. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään esineiden internetin toimintaan, ja siihen miten tärkeä osa älykaupungin rakennetta ja toimintoja esineiden internet on. Tutkielman aineistona on käytetty esineiden internettiä ja älykaupunkeja käsitteleviä tieteellisiä artikkeleita ja muuta aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Kestävyyttä käsitellään pääosin ympäristölliseltä kannalta, ja ratkaisuja on löydetty esimerkiksi energiankulutukseen, ilmansaasteisiin, jätehuoltoon ja liikenteeseen liittyviin haasteisiin.

Älykkään ympäristön, energian ja liikenteen sovelluksilla voidaan edistää älykaupunkien kestävyttä. Ilmansaasteiden määrää voidaan seurata kaupunkien sijoitetuilla sensoreilla, ja kaupunkien jätehuoltoa pystytään tehostamaan keräämällä dataa jäteastioiden täyttymisestä. Esineiden internetin keräämän datan avulla voidaan optimoida myös älykaupungin osien kuten kotien ja tehtaiden energian kulutusta. Kestävyyttä voidaan edistää hyödyntämällä älykkään energian sovelluksia kuten älykästä sähköverkkoa ja älykästä sähköntuotantoa. Liikennettä voidaan tehostaa älykkäällä reitinvalinnalla, älykkäällä pysäköinnillä ja älykkäällä liikenteenohjauksella, jolloin vähennetään liikenteestä syntyviä päästöjä.

Haasteena on kuitenkin esineiden internetin käytön kestävyys, sillä esineiden internet kuluttaa huomattavan määrän energiaa ja materiaaleja. Esineiden internetin käytön yleistymisen johtaa myös todennäköisesti elektroniikkajätteen määrän kasvuun. Jotta esineiden internetin ympäristövaikutukset voitaisiin minimoida, tulisi pyrkiä suunnittelemaan energiatehokkaita ja ympäristöystävällisiä laitteita, komponentteja ja järjestelmiä, jotka on mahdollista hävittää, kierrättää tai käyttää uudelleen kestävästi.

Avainsanat: esineiden internet, älykaupunki, kestävä kehitys

SISÄLLYS

1	Johdanto	7
2	Esineiden internet	9
	2.1 Yleiskuvaus esineiden internetistä	9
	2.2 Esineiden internetin arkkitehtuuri	11
	2.3 Esineiden internetin teknologioita	15
3	Älykaupungit	17
	3.1 Yleiskuvaus älykaupungeista	17
	3.2 Älykaupungin arkkitehtuuri	20
	3.3 Esineiden internet älykaupungeissa	21
4	Kestävyyden kehittäminen älykaupungeissa esineiden internetin avulla	23
	4.1 Kestävyys	23
	4.2 Esineiden internetin kestäviä sovelluksia älykaupungeissa	24
	4.3 Esineiden internetin kestävyys haasteet	28
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	30
	Lähteet	33

KUVIOT

Kuva 1 Esineiden internetin eri sovellusaloja (mukaillen Sobin, 2020, s. 1385)	10
Kuva 2 Internetin evoluutio (mukaillen Gokhale ym., 2018)	11
Kuva 3 Esineiden internetin arkkitehtuurien kerrosrakenteet (kolmikerroksinen, viisikerroksinen, palvelukeskeinen ja autonomiapainotteinen arkkitehtuuri) (mukaillen Gokhale ym., 2018; Kumar & Mallick, 2018; Pujolle, 2006)	15
Kuva 4 Älykaupungin komponentit, ominaisuudet, teemat ja infrastruktuuri (mukaillen Mohanty ym., 2016)	18
Kuva 5 Älykaupungin ominaisuudet (mukaillen Silva ym., 2018)	19
Kuva 6 Vihreän esineiden internetin elinkaaren vaiheet	24
Kuva 7 Esineiden internetin kestäviä sovelluskohteita	31

1 Johdanto

Kaupungistuminen on ilmiö, joka jatkuu niin Suomessa kuin muualla maailmassa (Koste ym., 2020). Se tuo mukanaan erilaisia ekologisia, sosiaalisia ja taloudellisia haasteita, joiden yhdeksi ratkaisuksi on esitetty älykaupungin konseptia.

Älykaupungeilla pyritään parantamaan kaupunkien asukkaiden elämänlaatua ja varmistaa resurssien saatavuus myös tuleville sukupolville yhdistämällä kaupunkiympäristö ja reaaliaikainen tiedonkeräys. (Silva ym., 2018.) Tämän vuosikymmenen älykaupungeissa käytetään muun muassa esineiden internettiä (engl. internet of things, IoT), jotta kaupungit olisivat älykkäämpiä, turvallisempia ja kestävämpiä (Almalki ym., 2023).

Kaikkialla ollaan siirtymässä hyödyntämään esineiden internettiä. Tämä on huomattavissa esimerkiksi arkisten laitteiden ja esineiden kuten jääkaappien, mikrojen ja ovien yhdistämisestä internettiin. (Sharma ym., 2019.) Arvioidaan, että vuoteen 2030 mennessä internettiin yhdistettyjen laitteiden määrä tuplaantuu vuoden 2023 noin 15,1 miljardista 29,4 miljardiin (Transforma Insights, & Exploding Topics, 2023).

Nopea kaupungistuminen vaatii kaupungeilta yhä enemmän valmiutta vastata suuren asukasmäärän tuomiin haasteisiin ja vaatimuksiin. Älykaupungit tuovat keinoja hallita monia kaupunkiin kuuluvia osa-alueita kuten liikennettä, terveyttä, koulutusta, energiaa, ympäristöä ja rakennuksia. (Jasim ym., 2021.) Esimerkiksi liikenneuhkien vähentäminen tai jopa poistaminen on mahdollista, jos hyödynnetään esineiden internetin avulla liikenteestä saatua dataa, ja kehitetään sen avulla kaupungin tieverkostoja (Yahya ym., 2020).

Suomi on luonut erilaisia tavoitteita saavuttaakseen kestävästä kehitystä. Esimerkki tällaisesta tavoitteesta on hiilineutraalisuus vuoteen 2035 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022). Esineiden internetin ansiosta pystytään keräämään suuria määriä dataa, jota voidaan käyttää apuna päätöksenteossa älykaupungeissa, ja teknologia on avainasemassa muun muassa hiilipäästöjen ja energian kulutuksen vähentämisessä (Almalki ym., 2023). Näin esineiden internet voisi siis auttaa saavuttamaan kestävyteen liittyviä tavoitteita.

Tutkielmassa esitellään, miten esineiden internettiä voidaan hyödyntää kestävästä kehityksen edistämiseen älykaupungeissa.

Tutkimuskysymykset, joihin tutkielmassa vastataan ovat:

1. Millaiset ovat vihreän esineiden internetin näkymät älykaupungeissa?
 - a. Miten esineiden internettiä hyödynnetään älykaupungeissa?
 - b. Millä tavoilla esineiden internettiä voidaan käyttää kestävyiden edistämiseen?

Tutkielmassa keskitytään pääasiallisesti pohtimaan kestävyyttä erityisesti ympäristön kannalta kuitenkin unohtamatta kestävyiden sosiaalista puolta. Tutkielman rakenne on seuraavanlainen: Luvussa 2 esitellään esineiden internetin konsepti, ja tutustutaan esineiden internetin eri arkkitehtuureihin, jotka ovat olennainen osa esineiden internetin toimintaa. Luvussa esitellään myös muutamia esineiden internetin käyttämiä relevantteja teknologioita. Luvussa 3 perehdytään älykaupungin käsitteeseen ja sen ydinteemoihin ja ominaisuuksiin sekä esitellään, miten esineiden internet on yhteydessä älykaupungin toimintaan ja rakenteeseen. Luku 4 käsittelee älykaupunkien kestävyyttä ja vastaa ensisijaiseen tutkimuskysymykseen. Ensin esitellään älykaupunkien rooli kestävyiden edistämässä, jonka jälkeen perehdytään erilaisiin esineiden internetin sovelluksiin ja mahdollisuuksiin, joilla voidaan tehdä älykaupungeista entistä kestävämpiä. Luvussa käydään läpi vielä muutamia tulevaisuuden haasteita, jotka tulisi ratkaista kestävyiden optimoimiseksi. Luku 5 sisältää tutkielman yhteenvedon ja johtopäätökset, eli siinä käydään läpi tutkielman keskeisimmät havainnot ja vastaukset tutkimuskysymyksiin.

2 Esineiden internet

2.1 Yleiskuvaus esineiden internetistä

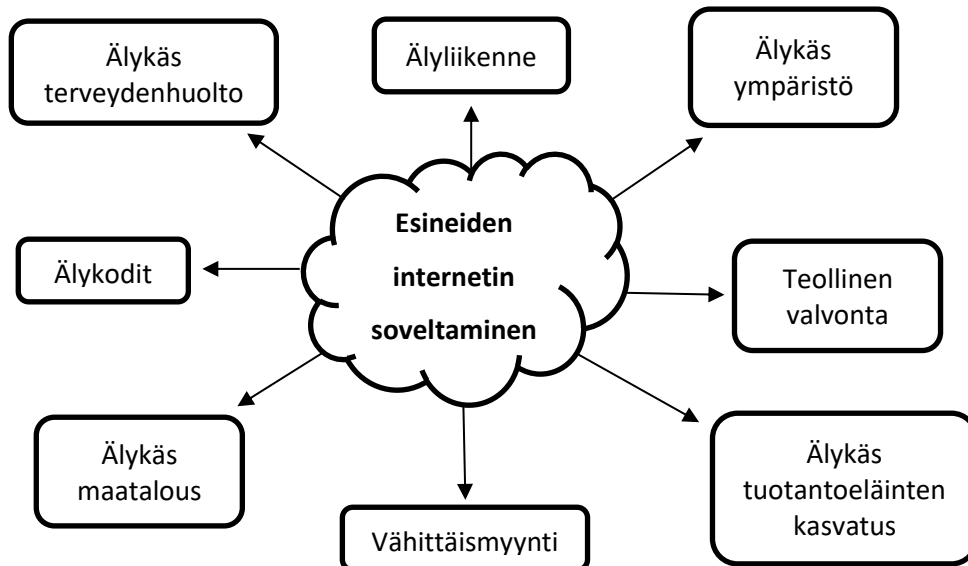
Esineiden internetin (engl. Internet of Things, Iot) uskotaan tulevaisuudessa olevan tärkeä osa yhteiskuntamme jokapäiväistä elämää, kuten esimerkiksi internet on nyt, ja sillä tulee olemaan suuri vaikutus elämämme yhteiskuntamme eri osa-alueisiin (Armentano ym., 2017). Sen tarkoituksena on yhdistää useita fyysisiä kohteita toisiinsa internetin välityksellä. Tällaisia voivat olla esimerkiksi laitteet, mittarit, kulkuneuvot ja rakennukset, mutta keskeistä on, että ne kykenevät keräämään ja välittämään dataa Internetin kautta. Niihin tulee olla siis upotettuna tämän mahdollistavaa elektroniikkaa, ohjelmistoja ja antureita. (Gokhale ym., 2018.)

Esineiden internetin konseptin esitteli ensimmäisenä Kevin Ashton vuonna 1999, kun hän toi esiin radiotaajuisten etätunnisteiden (engl. radio-frequency identification, RFID) mahdollisuuksia yhdistettäessä internettiin. Sille ei ole muodostunut yleisesti hyväksyttyä määritelmää, vaan eri tutkijat ja tieteilijät määrittelevät sen eri lailla riippuen siitä, että keskitytäänkö enemmän esimerkiksi laitteisiin, IP-protokollaan ja internettiin vai viestintäprosesseihin. (Sharma ym., 2019.) Merkittäviä ja hyväksytyjä määritelmiä ovat esimerkiksi seuraavat:

1. Internet Architecture Board (IAB) määrittelee termin tarkoittavan suurta määrää sulautettuja laitteita, jotka käyttävät IP-protokollien tarjoamia viestintäpalveluja. Näistä laitteista käytetään nimeä ”älyesine”. Kyseiset esineet kommunikoivat keskenään, eivätkä yleensä vaadi manuaalista ohjausta. (Tschofenig ym., 2015.)
2. Oxford English Dictionary taas painottaa määritelmässään internetin asemaa (Oxford English Dictionary, 2023):
”Internetin ehdotettu kehitys, jossa moniin jokapäiväisiin esineisiin on upotettu mikrosiruja, jotka antavat niille verkkoyhteyden ja mahdollistavat datan lähettämisen ja vastaanottamisen.”
3. Internet Engineering Task Force (IETF) viittaa esineiden internettiin termillä ”älyesineiden verkottuminen”, ja sen mukaan älyesineet ovat jollain tavoilla rajoittuneita, esimerkiksi mitä tulee kustannuksiin, tehoon, muistiin tai kaistanleveyteen (Thaler ym., 2015).

Eri määritelmät eivät sinänsä ole erimieltä, vaan ne painottavat esineiden internetissä eri asioita näkökulmansa mukaisesti. Yhdistävinä tekijöinä näissä kaikissa määritelmissä on se, että esineet ovat yhdistettynä internettiin ja niitä ei kutsuta tietokoneiksi, vaan ne ovat erilaisia laitteita ja jokapäiväisiä esineitä, jotka lähettävät ja vastaanottavat dataa.

Esineiden internettiä voidaan soveltaa useilla elämän eri osa-alueilla kuten kuvassa 1 näytetään. Älykkäässä terveydenhuollossa esineiden internettiä voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi potilaiden tilan tai lääkkeiden säilytyslämmityksen tarkkailussa, kun taas älykkäässä maataloudessa esineiden internet helpottaa muun muassa maan kosteuden ja sääolosuhteiden seuraamista, näin parantaen tuottavuutta. (Sobin, 2020.) Esineiden internetin sovellusten käytön laajuus ja tärkeys on kasvanut huomattavasti viime vuosina, ja niiden hyödyistä ollaan jo riippuvaisia (Khanna & Kaur, 2020).



Kuva 1 Esineiden internetin eri sovellusaloja (mukaillen Sobin, 2020, s. 1385)

Internetin evoluutio voidaan luokitella viiteen eri aikakauteen, jotka esitellään kuvassa 2 (Gokhale ym., 2018). Ne ovat dokumenttien internet, kaupankäynnin internet, sovellusten internet, ihmisten internet ja esineiden internet. Ensimmäisellä aikakaudella eli dokumenttien internetin kaudella tulivat elektroniset kirjastot ja asiakirjapohjaiset verkkosivut internettiin. Sen jälkeen kaupankäynnin internetin kaudella verkkokauppa, sähköiset pankkitoiminnot ja osakekauppa sivustot siirtyivät internettiin. Web 2.0 oli sovellusten internetin aikakauden merkittävä uusi konsepti, ja ihmisten internetin

kaudella sosiaaliset verkostot tekivät tuloaan. Esineiden internetin aikakausi ja laitteiden ja koneiden yhdistäminen internettiin aloittavat uuden internetin sukupolven. (Gokhale ym., 2018.)



Kuva 2 Internetin evoluutio (mukaillen Gokhale ym., 2018)

Esineiden internet mahdollistaa tulevaisuuden, jossa fyysiset esineet ovat maailmanlaajuisesti kytkeytyneitä, ja tieto voi kulkea milloin ja missä vain (Kosmatos ym., 2011). Kun internet on yhdistetty suureen määrään fyysisiä kohteita kuten esimerkiksi maanteihin, tuottavat nämä verkostot valtavan määrän käsiteltävää dataa, jota voidaan käyttää hyödyksi analysoimalla sitä, ja täten ymmärtää ja vastata ongelmiin nopeasti (Madakam ym., 2015). Tätä suurta määrää dataa kutsutaan usein massadataksi (engl. big data) (Katal ym., 2013).

2.2 Esineiden internetin arkkitehtuuri

Jotta esineiden internet toimisi, on ratkaisevaa, että kaikki verkkoon yhdistetyt esineet ovat liitettynä toisiinsa. Järjestelmän arkkitehtuuri yhdistää sen fyysiset ja virtuaaliosat, näin turvaten esineiden internetin toiminnan. (Gokhale ym., 2018.) Arkkitehtuuri siis määrittelee esineiden internetin järjestelmän toimivuuden. Arkkitehtuurien tasot ovat looginen abstrakti käsite, eli ne eivät ole fyysisesti havaittavissa. (Vishwakarma ym., 2020.)

Esineiden internetin arkkitehtuurin rakenne on monitahoinen. Siihen kuuluu useita tekijöitä kuten verkkotoiminta, tiedonvälitys, prosessit, turvallisuus ja liiketoimintamallit. Tärkeitä huomioon otettavia asioita suunniteltaessa esineiden internetin arkkitehtuuria ovat laitteiden välinen venyvyys, skaalautuvuus ja toimivuus. Arkkitehtuuriin tulee olla mukautuva, koska esineet voivat liikkua ja niiden tarvitsee olla yhteydessä toisiinsa reaaliaikaisesti. (Gokhale ym., 2018.)

Koska esineiden internet on erittäin laaja konsepti, sillä ei ole ehdotettua ja yhtenäistä arkkitehtuuria (Madakam ym., 2015). Tarkastellaan neljää yleisesti käytettyä esineiden

internetin arkkitehtuurimallia, joiden kerrosrakennetta kuvataan kuvassa 3. (Gokhale ym., 2018; Vishwakarma ym., 2020).

Palvelukeskeisessä arkkitehtuurimallissa palvelu on avaintekijä (Erl, 2008). Tämä arkkitehtuuri tarkoittaa palveluiden kokoamista, tiedonvälitystä ja jakamista (Ibrahim ym., 2014). Palvelukeskeisessä arkkitehtuurissa etuna on se, että siinä käsitellään monimutkaista järjestelmää joukkona hyvin määriteltyjä yksinkertaisia esineitä tai alajärjestelmiä, joka tarkoittaa sitä, että esineitä tai alajärjestelmiä ylläpidetään yksilöllisesti ja niitä voidaan käyttää uudelleen. Tämä mahdollistaa ohjelmisto- ja laitteistokomponenttien tehokkaan päivittämisen ja uudelleenkäyttämisen. (Gokhale ym., 2018.)

Arkkitehtuuri voidaan jakaa neljään eri kerrokseen erottuvien toiminnallisuuksien mukaan, jotka mahdollistavat laitteiden välisen yhteentoimivuuden: Ensimmäiseen, eli aistivaan kerrokseen on integroitu kaikki saatavilla olevat esineet. Tasossa älykkäät järjestelmät pystyvät aistimaan ympäristöä ja välittämään dataa toisilleen automaattisesti. Toinen, eli verkkokerros tarkoittaa infrastruktuuria, joka mahdollistaa kaikkien esineiden yhdistämisen joko langattomasti tai langallisesti. Vahva verkosto on välttämätöntä datan välittämiseksi ja palveluiden tarjoamiselle. Kolmas, palvelukerros mahdollistaa sovellusten ja palveluiden toiminnan esineiden internetissä. Tällä kerroksella toimivat kaikki palvelukeskeiset toiminnot, kuten tiedonvaihto ja -tallentaminen, datanhallinta ja hakukoneet. Konseptuaalisesti korkein, eli käyttöliittymäkerros sisältää käyttäjien ja sovelluksien kanssa käytettävät vuorovaikutusmenetelmät. Ohjelmointirajapinta on osa käyttöliittymäkerrosta. Koska erilaisten yhdistettyjen laitteiden määrä on suuri, on ratkaistava esineiden välinen yhteensopivuusongelma. (Gokhale ym., 2018.)

Esineiden internetin kolmekerroksinen arkkitehtuuri on kätevä ja helppo toteuttaa, ja se on yksi merkittävimmistä ja olennaisimmista esiteltyistä arkkitehtuurimalleista. Se on tyydyttävä runko esineiden internetin toiminnalle, mutta se jää kuitenkin puutteelliseksi, kun etsitään ratkaisuja esineiden internetin kaikille puolille. (Kumar & Mallick, 2018.) Kolmikerroksinen arkkitehtuuri on jaettu kolmeen kerrokseen, jotka ovat havaintokerros, verkkokerros ja sovelluskerros (Jia ym., 2012).

Havaintokerroksen tehtävä on havaita ja kerätä esineiden ympäristöstä tuottamaa dataa, joka tapahtuu teknologian kuten antureiden, RFID-järjestelmien, kameroiden ja GPS:n avulla (Jia ym., 2012; Kumar & Mallick, 2018; Vishwakarma ym., 2020).

Verkkokerroksen tehtävä on kuljettaa data viestintäverkon avulla havaintokerrokselta palvelukerrokselle (Vishwakarma ym., 2020). Tämä tapahtuu käyttämällä esimerkiksi olemassa olevaa matkaviestinverkkoa, radioliityntäverkkoa, pakettivälitteistä tiedonsiirtotekniikkaa, WiFiä, Ethernetiä, jne. Kerros toimii myös tehokkaana ja luotettavana verkkoinfrastruktuurialustana suuren mittakaavan teollisuuden sovelluksille. (Jia ym., 2012.)

Sovelluskerroksen tärkein tehtävä on kuljettaa sovellustyyppin mukainen palvelu käyttäjälle (Kumar & Mallick, 2018). Se siis yhdistää esineiden internetin järjestelmän organisatorisiin sosiaalisiin rajapintoihin, ja tarjoaa sovelluspalveluita esimerkiksi ympäristönseurantaan, tuotannonhallintaan ja logistiikkaan (Jia ym., 2012; Vishwakarma ym., 2020).

Viisikerroksiseen arkkitehtuuriin kuuluvat havaintokerros, kuljetuskerros, käsittelykerros, sovelluskerros ja toimintakerros. Havainto- ja sovelluskerroksien tehtävä arkkitehtuurissa on sama kuin kolmen kerroksen arkkitehtuurissa, mutta kolmen muun kerroksen ansiosta voidaan tarkastella esineiden internetiä tarkemmin. (Sethi & Sarangi, 2017.)

Kuljetuskerroksen tehtävä on siirtää antureiden keräämää tietoa havaintokerroksesta käsittelykerrokseen ja päinvastoin. Tämä tapahtuu verkkojen kuten RFID, LAN, Bluetooth, NFC ja matkapuhelinverkkojen kautta. (Kumar & Mallick, 2018; Sethi & Sarangi, 2017.) NFC-tiedonsiirtoa (engl. near-field communication) voidaan hyödyntää, kun halutaan siirtää dataa langattomasti laitteiden välillä, jotka ovat alle 10 cm päässä toisistaan. Teknologiaa käytetään esimerkiksi älypuhelimissa, jolloin puhelimella voidaan suorittaa lähimaksuja. (Madlmayr ym., 2008.)

Käsittelykerros on ratkaisu datan valtavan määrän luomaan ongelmaan. Koska esineiltä saatua dataa on erittäin suuri määrä, on sitä hankala käsitellä reaaliaikaisesti. (Vishwakarma ym., 2020.) Kerroksen ominaisuuksiin kuuluvat kuljetuskerroksesta tulevan datan varastoiminen, analysoiminen ja käsitteleminen. Näin se pystyy tarjoamaan alemmille kerroksille erilaisia palveluita. Käsittelykerroksessa

hyödynnetään teknologioita kuten tietokantoja, pilvilaskentaa ja sulautettua tietotekniikkaa. (Sethi & Sarangi, 2017; Vishwakarma ym., 2020.)

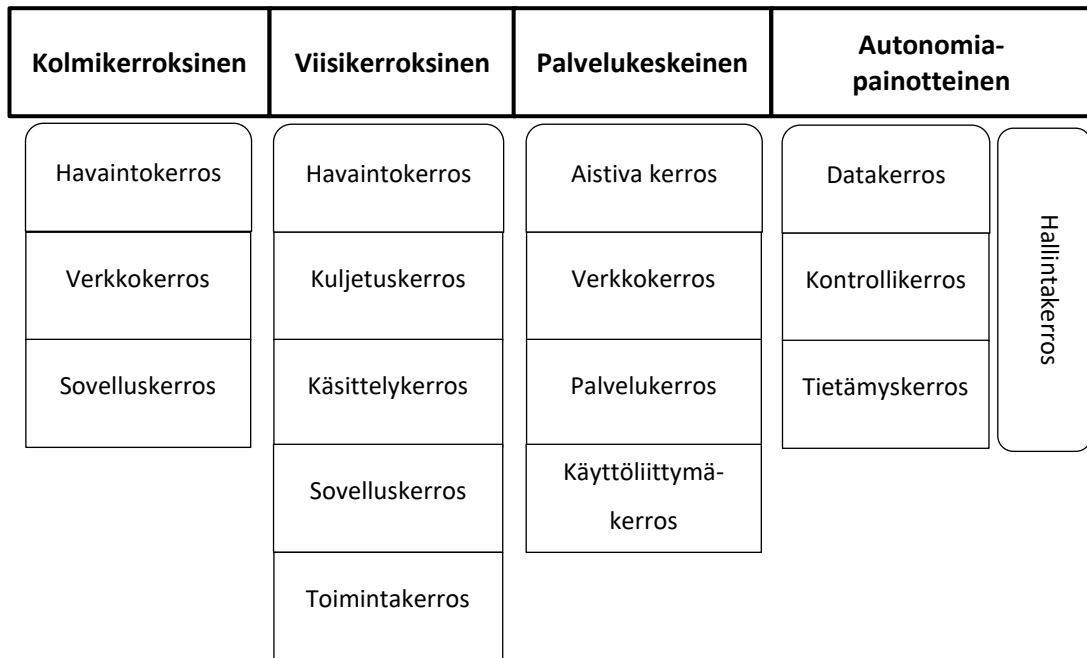
Toimintakerros käsittelee koko esineiden internetin järjestelmää. Kerroksen ohjattaviin asioihin kuuluvat muun muassa sovellukset, liiketoimintamallit ja käyttäjien yksityisyys. (Sethi & Sarangi, 2017.)

Autonomiapainotteinen arkkitehtuuri panostaa verkon suorituskykyyn valitsemalla hyväksytyjä ja omaksuttuja protokollia (Vishwakarma ym., 2020). Koska käyttäjien tarpeet ovat muuttumassa yhä vaativammiksi ja vaihteleviksi, on myös tietoliikenneverkkojen kehityttävä. Verkon tulisi pyrkiä kehittämään sen luotettavuutta, palvelun laatua, liikkuvuutta, dynaamisuutta, jne. (Pujolle, 2006.)

Autonomiapainotteisella arkkitehtuurilla on neljä eri kerrosta: datakerros, kontrollikerros, tietämyskerros ja hallintakerros (Vishwakarma ym., 2020).

Datakerros toimittaa esineiltä saadun datan eteenpäin ylemmälle tasolle (Vishwakarma ym., 2020). Kontrollikerros optimoi palvelun suoritustehon, luotettavuuden ja laadun tarkkailemalla datakerroksen toimintaa (Pujolle, 2006; Vishwakarma ym., 2020).

Tietämyskerros on arkkitehtuurin kerroksista tärkein. Sen tehtävä on tarjota kokonaisnäkemys kaikesta verkkoa koskevasta tiedosta valitsemalla parhaan mahdollisen algoritmin, jotta päästään verkolle sopivimpaan kokonaisratkaisuun. (Vishwakarma ym., 2020.) Hallintakerroksen tehtävä on nimensä mukaisesti hallinnoida muita kolmea kerrosta (Pujolle, 2006; Vishwakarma ym., 2020).



Kuva 3 Esineiden internetin arkkitehtuurien kerrosrakenteet (kolmikerroksinen, viisikerroksinen, palvelukeskeinen ja autonomiapainotteinen arkkitehtuuri) (mukaillen Gokhale ym., 2018; Kumar & Mallick, 2018; Pujolle, 2006)

2.3 Esineiden internetin teknologioita

Esineiden internet on kokonaisuus, jonka toiminta vaatii usean eri teknologian hyödyntämistä (Abdul-Qawy ym., 2015). Eri teknologioiden käyttö mahdollistaa esineiden yksilöllisen identifioimisen ja niiden välisen reaaliaikaisen viestinnän ja yhteyden, luoden näin esineiden internetin ekosysteemin (Sharma ym., 2019).

Tunnistus-, havainto- ja osoitejärjestelmät ovat tärkeitä teknologioita, mitä tulee esineiden internettiin, koska yhdistettyjen laitteiden määrä on suuri, ja jokainen laite on oltava uniikisti tunnistettavissa. uID, URN, RFID ja IPv6 ovat esimerkkejä teknologioista tai järjestelmistä, jotka mahdollistavat esineiden internetin elementtien ohjaamisen internetin kautta automaattisesti ja etänä. IPv6 on otettu käyttöön ratkaisuna IP-osoitteiden määrän nopealle kasvulle, ja se on tuonut mukanaan mekanismeja, jotka tukevat internetin liikkuvuutta. (Abdul-Qawy ym., 2015.)

Radiotaajuinen etätunnistus (engl. radio frequency identification, RFID) on esineiden internetin konstruktion perusta ja sen verkkotoiminnan ydin (Li & Yu, 2011). RFID-teknologia auttaa tunnistamaan ja jäljittämään esineitä. Esineeseen kiinnitetään pieni elektroninen mikrosiru (RFID-tunniste), joka pitää sisällään uniikin tunnisteen ja muuta informaatiota sähköisen tuotekoodin (EPC) muodossa. Tieto saadaan tunnisteista

helposti käyttämällä RFID-lähetin-vastaanotinta, joka lähettää tunnisteseen signaalin radiotaajuutta käyttämällä. (Abdul-Qawy ym., 2015.) RFID-tunnisteita on kahdenlaisia: aktiivisissa tunnisteissa on akku, joka tarkoittaa sitä, että ne voivat olla aina aktiivisia ja lähettää data signaaleja, kun taas passiiviset tunnisteet on aktivoitava datan saamiseksi (Sharma ym., 2019).

Langaton sensoriverkosto (engl. wireless sensor network, WSN) koostuu useista älysensoreista, jotka keräävät, käsittelevät, analysoivat ja välittävät niiden keräämää dataa verkon kautta. Sensori on lähetin-vastaanotin, jossa on mikro-ohjain, antenni, liitäntänä toimiva virtapiiri ja akku tai muu virtalähde. (Sharma ym., 2019.)

Sensoriverkosto auttaa käyttäjää ymmärtämään ympäristöään paremmin (Akyildiz ym., 2002). Yhdistämällä langattomaan sensoriverkostoon RFID teknologiaa on mahdollista seurata muun muassa sijainteja, lämpötilaa ja liikkumista (Atzori ym., 2010).

Langattoman sensoriverkoston odotetaan toimittavan turvallisen ja tehokkaan tietojen koostamismenetelmän, ja takaavan kerätyn datan autenttisuuden (Sang ym., 2006).

Älysensoreiden optimoinnin ja langattoman tiedonsiirron tehostamisen ansiosta älysensorit ovat olennainen osa esineiden internetin verkostoa (Abdul-Qawy ym., 2015).

Aistivia sensoreita ja RFID teknologiaa yhdistämällä voidaan rakentaa RFID-sensoriverkko, joka tukee passiivisen järjestelmän laskenta-, viestintä- ja aistikyvykkyyttä (Atzori ym., 2010).

Esineiden internet tuottaa valtavan määrän dataa. Jotta sitä pystyttäisiin hyödyntämään seurannassa ja reaaliaikaisessa päätöksenteossa, on dataa kerättävä, analysoitava, prosessoitava ja varastoitava älykkäästi. Erilaiset pilvipohjaiset palvelut kuten pilvilaskenta, pilvitallennus ja pilvianalytiikka ovat osoittautuneet toimiviksi ratkaisuuksi. Dataa kerätään esineiltä pilveen, jonka jälkeen se voidaan yhdistää muuhun internetin avulla kerättyyn dataan. Siten dataa voidaan analysoida ja prosessoida pilvipalveluja hyödyntäen. Loppukäyttäjien lisäksi tiedosta hyötyvät älykkäät järjestelmät, joiden avulla voidaan kehittää etäohjausta ja automaattista toimintaa. (Abdul-Qawy ym., 2015.)

3 Älykaupungit

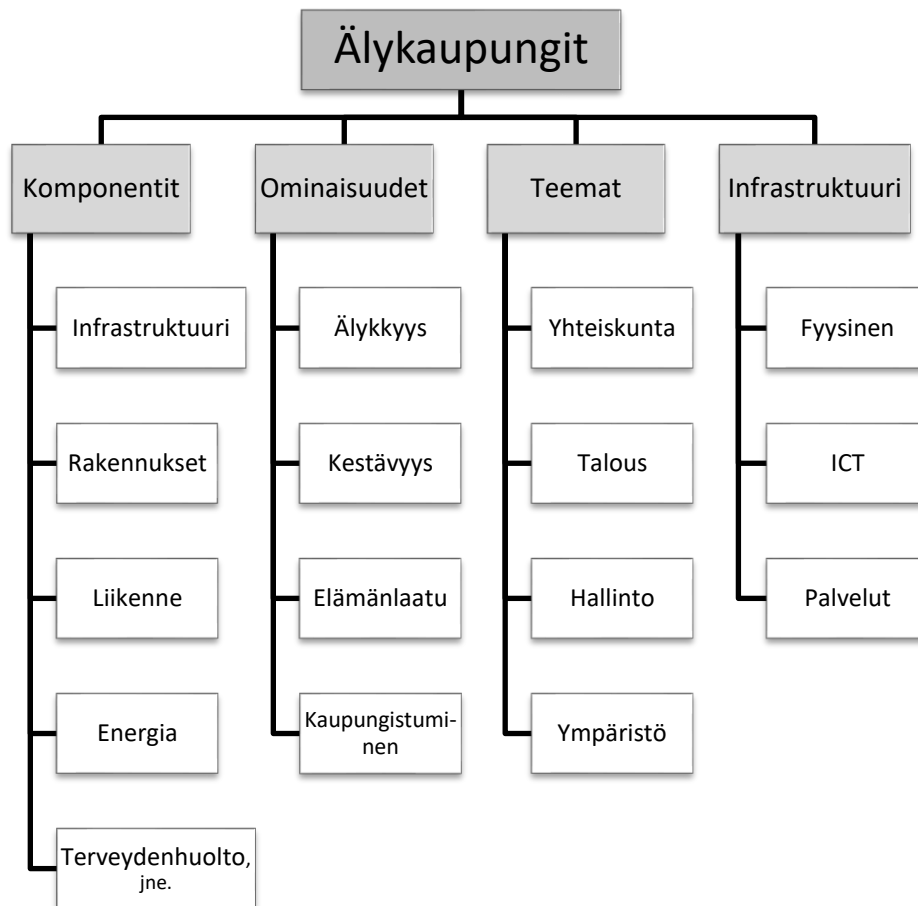
3.1 Yleiskuvaus älykaupungeista

Kaupungistumisen myötä kaupunkien asukkaiden määrä on kasvanut huomattavasti, ja samalla aiheuttanut monille kaupungeille ongelmia kuten ilman saastumista, resurssien hallinnan vaikeuksia, liikeneruuhkia ja terveyteen liittyviä haasteita. Kaupunkien jatkuvan evoluution vuoksi infrastruktuurin on vaikea pysyä muutoksien perässä. Älykaupungin konseptista on alettu puhua vastauksena muun muassa näihin ongelmiin. (Nunes ym., 2021.)

Älykaupungissa suoritetaan kaupungin toimintoja tieto- ja viestintätekniiikkaa hyödyntäen, mutta pohjimmiltaan älykaupunki on esineiden internetin sovellus. Näin ollen älykaupungin taustalla olevat toimintamekanismit ovat samankaltaiset verrattuna esineiden internetin toimintamekanismeihin. Esimerkiksi tiedon tuottaminen, tiedonhallinto ja sovellusten käsittely ovat esineiden internetin tarjoamia älykaupunkien komponentteja. (Silva ym., 2018.)

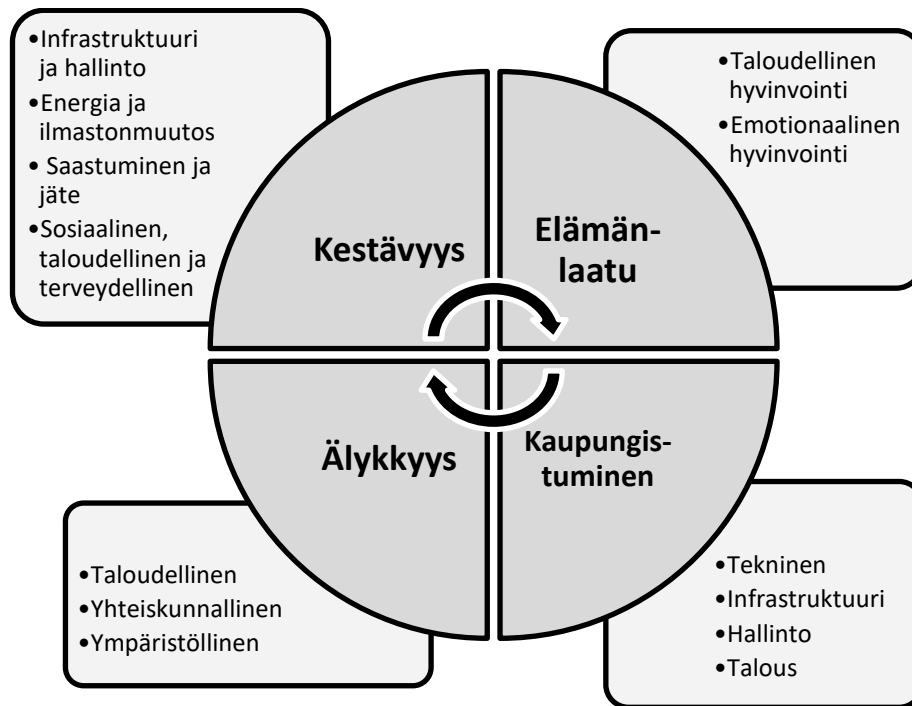
Älykaupungille ei ole virallista määritelmää, mutta yhden suosituksen määritelmän mukaan älykaupungissa yhdistyvät fyysinen, sosiaalinen, liiketoiminnallinen sekä tieto- ja viestintätekninen infrastruktuuri (Harrison ym., 2010). Bakici ym. (2013) ja Ismagilova ym. (2019) kuvaavat älykaupunkeja suurkaupunkeina, jotka käyttävät uusinta teknologiaa yhdistääkseen tiedon, ihmiset ja kaupunkielementit. Myös elämänlaatu ja sen parantaminen älykaupunkien teknologioiden avulla on toistuva teema kirjallisuudessa (Faria ym., 2018; Fernandes ym., 2018; Ismagilova ym., 2019; Kondepudi ym., 2014).

Älykaupunki koostuu komponenteista, ominaisuuksista, teemoista ja infrastruktuurista, jotka on koottu kuvaan 4. Komponentteja on useita, mutta esimerkiksi älykäs infrastruktuuri, älykkäät rakennukset, älykäs liikenne, älykäs energia, älykäs terveydenhuolto, älykäs teknologia, älykäs hallinto, älykäs koulutus ja älykkäät kansalaiset ovat älykaupungin tärkeitä rakenneosia. Älykaupungit ovat kuitenkin erilaisia ja keskittyvät eri asioihin, jonka vuoksi ne painottavat eri komponentteja eri määrissä. (Mohanty ym., 2016.)



Kuva 4 Älykaupungin komponentit, ominaisuudet, teemat ja infrastruktuuri (mukailen Mohanty ym., 2016)

Ominaisuuksia, jotka muodostavat älykaupungin, kuvataan kuvassa 5. Neljä keskeisintä ominaisuutta ovat älykkyys, kestävyys, elämänlaatu ja kaupungistuminen, jotka kukin jakautuvat muutamaankin alaominaisuuteen. Esimerkiksi elämänlaatu jakautuu ominaisuuksiltaan kaupunkilaisten taloudelliseen ja emotionaaliseen hyvinvointiin, kun taas älykkyys koostuu halusta parantaa kaupungin ja kaupunkilaisten taloudellisia, yhteiskunnallisia ja ympäristöllisiä kriteerejä. Kestävyys ja siihen kiinnitetty huomio on ollut yksi älykaupunkien syntyyn vaikuttavista tekijöistä, koska nykyajan kaupunkien toiminta kuluttaa huomattavasti luonnonvaroja. (Silva ym., 2018.) Jotta kaupunki voi olla älykäs tulee sen luoda kestävästä taloudellista kehitystä ja edistää samalla järkevää luonnonvarojen käyttöä (Caragliu ym., 2011). Kaupungistuminen on ajankohtainen yhteiskunnallinen ilmiö, joka aiheuttaa kaupungeille ongelmia kuten ilman saastumista, resurssiniukkuutta ja jätehuollon hankaluuksia (Silva ym., 2018). Älykaupungin tulee vastata kaupungistumisen haasteisiin eri näkökulmien kuten tekniikan, infrastruktuurin, hallinnon ja talouden kautta (Mohanty ym., 2016).



Kuva 5 Älykaupungin ominaisuudet (mukaillen Silva ym., 2018)

Älykaupungin neljä ydintemaa ovat yhteiskunta, talous, hallinto ja ympäristö. Yhteiskuntateema tuo esille, että kaupunki on luotu sen asukkaille ja talousteema merkitsee, että kaupungin tulisi menestyä ja pystyä luomaan työpaikkojen määrän kasvua ja talouskasvua. Hallintoteeman mukaan kaupungin tulee pystyä kokoamaan ja hallitsemaan muita kaupungin elementtejä sekä hallinnoida politiikkaa. Ympäristöteema painottaa sitä, että kaupungin tulee pystyä pysymään toiminnassa nyt ja tulevaisuudessa, eli sen pitää toimia kestävästi ja tulevaisuuden sukupolvet mielessä pitäen. (Mohanty ym., 2016.)

Fyysiset ominaisuudet, tieto- ja viestintätekniikka ja palvelut muodostavat älykaupungin infrastruktuurin. Näistä tieto- ja viestintätekniikka on älykaupungin kohdalla tärkein ja muut komponentit yhteen tuova rakenneosana. (Mohanty ym., 2016.) Myös älykkäiden esineiden verkosto on yksi älykaupungin toiminnan tärkeistä toteuttajista (Silva ym., 2018). Palveluinfrastruktuurin toiminta perustuu tieto- ja viestintätekniikan sekä fyysisen infrastruktuurin eli muun muassa rakennusten, teiden, vesijohtoverkon ja junaraiteiden toimintaan. Esimerkiksi älykäs sähköverkko on palveluinfrastruktuurin komponentti. (Mohanty ym., 2016.)

3.2 Älykaupungin arkkitehtuuri

Älykaupungin toiminta perustuu tieto- ja viestintäteknikkaan ja valtavaan määrään sensoreita, joiden keskinäinen vuorovaikutus ja toiminta vaatii selvän ja toimivan arkkitehtuurin (Gaur ym., 2015). Universaalinen arkkitehtuurin luominen älykaupungeille on teoreettisesti mahdollista, mutta eri kaupunkien vaadittavien ominaisuuksien vaihteluiden vuoksi jää universaali arkkitehtuuri spekulatiiviselle tasolle (Silva ym., 2018).

Silva ym. (2018) ovat koonneet jo olemassa olevien älykaupunkien arkkitehtuurien pohjalta alatasolta ylätasolle kulkevan arkkitehtuurin, jonka ominaisuudet ovat yleisiä useissa teoksissa. Arkkitehtuuri koostuu neljästä kerroksesta, jotka ovat aistiva kerros, siirtokerros, tiedonhallintakerros ja sovelluskerros. Kerroksien lisäksi arkkitehtuurissa on otettu huomioon tiedonsuojauksen tärkeys älykaupungeissa, jonka vuoksi jokaisen kerroksen osana on myös tietoturvamoduulit.

Aistiva kerros on arkkitehtuurin pohjakerros, ja sen päätehtävä on datan kerääminen esineiltä ja laitteilta. Datan kerääminen nähdään tärkeimpänä, mutta myös haastavimpana tehtävänä johtuen datan epäyhtenäisyydestä. Erityisesti älykaupungissa tehtävä on haastava, koska dataa saadaan useista eri älykaupungin toiminnoista, joka tekee datasta yhteensopimatonta. Tasolla käytetään sensoritekniikkaa, joka voi kerätä tietoa esimerkiksi ilmankosteudesta, valosta ja lämpötilasta. Siirtokerroksen tehtävä on kuljettaa dataa ylemmille kerroksille, ja se on usean viestintäverkon konvergenssi. Se koostuu erilaisista langattomista ja langallisista teknologioista sekä satelliittiteknologioista. Tiedonhallintakerros käsittelee, järjestelee, analysoi ja varastoi arvokasta tietoa korkeinta kerrosta eli sovelluskerrosta varten. (Silva ym., 2018.) Datan perusominaisuudet eli luottamuksellisuus, eheys, käytettävyys ja autenttisuus on turvattava (Haque ym., 2022). Tiedonhallintakerroksen tehokkuus on ratkaiseva tekijä älykaupungin toiminnalle, koska älykaupungin toiminnot ovat riippuvaisia tiedonhallinnasta. Sovelluskerros on suoraan yhteydessä kaupunkilaisten kanssa. Sen toiminta vaikuttaa kaupungin toimintojen käyttäjätuottavuuteen. Sovelluskerroksen palveluja ovat esimerkiksi säänennustus, yhdyskuntateknikka ja älykäs liikenne. (Silva ym., 2018.)

Kun verrataan Silvan ym. (2018) esittämää arkkitehtuuria esineiden internetin arkkitehtuurimalleihin, voidaan huomata sen muistuttavan eniten viisikerroksista

arkkitehtuuria. Khatoun ja Zeadally (2016) taas esittävät, että älykaupunkien arkkitehtuurien tulisi olla palvelukeskeisiä, koska palvelukeskeinen arkkitehtuuri on luotu palveluihin perustuvia ohjelmistorakenteita varten.

3.3 Esineiden internet älykaupungeissa

Ilman esineiden internettiä ei olisi älykaupunkia, sillä esineiden internet on älykaupunkien tekninen selkäranka, joka tarjoaa älykaupungille sen tarvitsemat kolme ydin ominaisuutta: älykkyyden, yhteenkytkennän ja laitteiston (Mohanty ym., 2016). Esineiden internetin integroimisen ja hyödyntämisen tavoitteena on antaa kaupungeille mahdollisuus kehittyä, tarjota uusia palveluita, mutta myös vähentää manuaalista ohjausta (Janani ym., 2021). Esineiden internet on mahdollistanut innovatiivisten palveluiden tuotannon ja automatisoinnin sekä edistyksellisten sovelluksien tarjoamisen kaupungin eri sidosryhmille (Bellini ym., 2022). Esineiden internetin yhdistämät esineet ja laitteet tuovat yhteen fyysisen ja digitaalisen maailman, jonka kautta pyritään parantaa elämänlaatua, kulttuuria ja tehokkuutta. Älykaupungin sovelluksia tehostetaan esineiden internetin mahdollistaman reaaliaikaisen seurannan ja kaupungin prosessien hallinnan kautta. (Vishnu ym., 2021.)

Esineiden internetin sovellukset älykaupungeissa voidaan ryhmitellä neljään ryhmään: henkilökohtainen ja koti, liikkuva, yleispalvelut ja yritykset. Henkilökohtainen ja koti -kategoria pitää sisällään esimerkiksi kaikkialla toimivat teleterveydenhuollon palvelut, ja liikkuvat sovellukset sisältävät liikennetelematiikan, liikennejärjestelyn ja jätehuollon. Yleispalveluihin kuuluvat esimerkiksi älykäs sähköverkko ja vesiverkon valvonta. Yrityksien esineiden internetin sovellukset liittyvät yleensä työympäristössä tapahtuvaan esineiden yhdistämiseen. (Mehmood ym., 2017.)

Bauer ym. (2021) jakavat älykaupungin palvelut neljään laajaan kategoriaan, jotka ovat älykäs liikenne, älykäs ympäristö, älykäs energia ja älykäs turvallisuus. Esineiden internet ja tieto- ja viestintäteknikka ovat olennainen osa jokaisen kategorian toimintaa. Älykkään liikenteen tehtävä on kehittää järjestelmä, joka reagoi kysyntään, tarjoaa kuluttajalähtöisiä kuljetuspalveluja, ja on valmis sopeutumaan tulevaisuuden itseohjautuviin kulkuneuvoihin. Ajankohtaisia älykkään liikenteen palveluita ovat esimerkiksi älykäs pysäköinti, joka tarjoaa sensoreiden avulla saatua tietoa parkkipaikoista reaaliajassa, ja älykäs liikenteenohjausjärjestelmä, joka pystyy ohjaamaan liikennettä tehokkaasti reaaliajassa liikenteestä kerätyn datan perusteella.

Älykäs ympäristö ottaa huomioon muun muassa veden- ja ilmanlaadun.

Älykaupungeissa voidaan esimerkiksi ennustaa esineiden internetin sensoridatan seurannan avulla hengitysilman pienhiukkaspitoisuutta suurella tarkkuudella, ja tarjota reaaliaikaista vedenlaadun ja -määrän valvontaa ja etäohjausta. Rakennusten energian hallintajärjestelmä, on älykkään energian sovellus, jolla valvotaan reaaliaikaisesti rakennusten energian kulutusta, ja joka optimoi, ohjaa ja hallitsee energian käyttöä ja tuottoa automaattisesti hyödyntäen esineiden internetiä. Älykkään energian sovellukset keskittyvät omaksumaan uusien ja uusiutuvien energiamuotojen käyttämisen sekä tekemään älykaupungista mahdollisimman energiariippumattoman. Älykkään turvallisuuden kategorian sovellukset tarjoavat kaupungin sidosryhmille turvallisuuden palveluja käyttämällä innovatiivisia teknologioita. Esineiden internetin sensoreiden ja esimerkiksi tekoälyn avulla voidaan ennustaa muun muassa katastrofeja, jotka johtuvat maastomuutoksista, ja parantaa koulualueiden turvallisuutta keräämällä tietoa kulkuvälineiden ja opiskelijoiden sijainneista. (Bauer ym., 2021.)

4 Kestävyyden kehittäminen älykaupungeissa esineiden internetin avulla

4.1 Kestävyys

Kestävien älykaupunkien suunnittelusta on tullut ihmisille välttämätöntä, jotta voidaan ylläpitää ja edistää ihmisten terveyttä. Älykkäällä yhdyskuntasuunnittelulla ja teknologialla saavutetaan valtavia ympäristöhyötyjä, jotka kohdistuvat ihmisten lisäksi myös eläimiin ja kasveihin. Älykaupungin kestävyuden ytimessä ovat energiatehokkaat käytännöt, joilla voidaan vähentää energian kysyntää ja saavuttaa kestävä kehityksen tavoitteita. (Almalki ym., 2023.)

Yhdistyneet kansakunnat (2023) päättivät vuonna 2015 seitsemästätoista eri kestävä kehityksen tavoitteesta, joita järjestön 193 jäsenvaltiota sitoutuivat edistämään.

Tavoitteet kohdistuvat talouteen, yhteiskuntaan ja ympäristöön, ja ne pyritään saavuttamaan vuoteen 2030 mennessä (Bali Swain & Yang-Wallentin, 2020).

Älykaupungeilla on suora yhteys varsinkin tavoitteeseen numero yksitoista, joka koskee kaupunkien ja yhteisöjen kestävyyttä, ja jonka tavoitteena on tehdä asutusalueista kattavampia, turvallisempia, joustavampia ja kestävämpiä. Tavoitteeseen kuuluvat kaupunkien eri elementit kuten julkinen liikenne, yhdyskuntajäte, julkiset alueet ja altistuminen ilmansaasteille vaikuttavat asukkaiden elämänlaatuun kaupungeissa. (Blasi ym., 2022.)

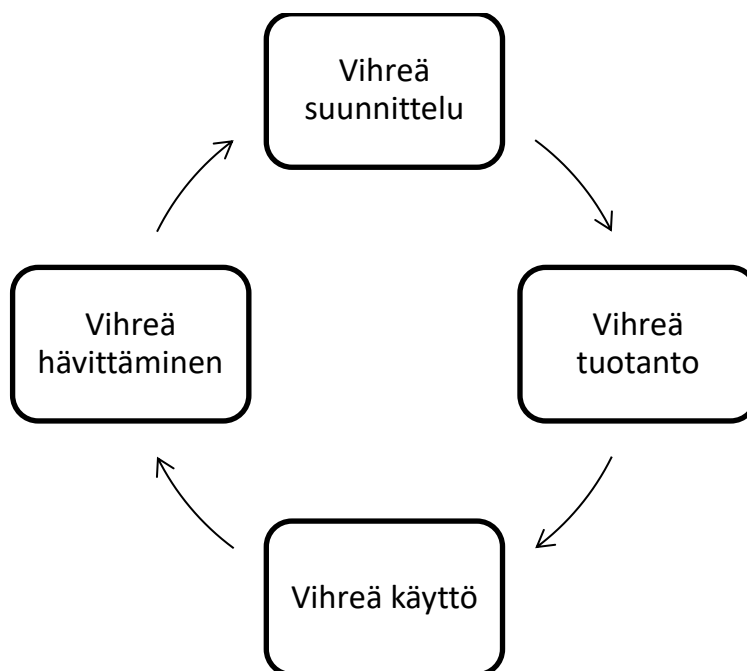
Kestävä kehityksen tavoitteiden vapaaehtoisten paikallisten arvostelujen eurooppalaisessa käsikirjassa (2020) tulee ilmi, että yhdestoista tavoite on kaupunkikeskeisyytensä lisäksi yhteydessä suoraan ainakin yhteentoista muuhun YK:n kestävä kehityksen tavoitteeseen. Älykaupungit kohtaavat muun muassa ympäristöön, terveyteen, eriarvoisuuteen ja talouteen liittyviä haasteita, joille on kaikille omistettu kestävä kehityksen tavoitteita. Älykaupungilla on siis mahdollisuus edistää tavoitteista ainakin numeroita kolme (terveyttä ja hyvinvointia), kahdeksan (ihmisarvoista työtä ja talouskasvua), kymmenen (eriarvoisuuden vähentäminen), kolmetoista (ilmastotekoja), neljätoista (vedenalainen elämä) ja viisitoista (maanpäällinen elämä). Kaupunkien rooli kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa on tärkeä, koska kaupungistuminen samaan aikaan sekä mahdollistaa että estää tavoitteiden saavuttamisen.

Kaupungistuminen kehittää ongelmia kuten sosiaalista syrjäytymistä ja eriarvoisuutta,

mutta se voi myös vahvistaa esimerkiksi tehokasta resurssien käyttöä ja jätehuoltoa. (Blasi ym., 2022.)

4.2 Esineiden internetin kestäviä sovelluksia älykaupungeissa

Esineiden internetillä on älykaupungeissa tärkeä rooli, kun pyritään säästämään luonnonvaroja, vähentämään kustannuksia ja pienentämään teknologisen kehityksen haittavaikutuksia mitä tulee ympäristöön ja ihmisten terveyteen. Älykkäällä esineiden internetin käytöllä ja suunnittelulla voidaan saavuttaa esimerkiksi hiilidioksidipäästöihin, energiatehokkuuteen ja elämänlaatuun liittyviä tavoitteita. (Almalki ym., 2023.) Myös esineiden internetiä tulee kehittää vihreämmäksi, sillä sen toiminta vaatii runsaasti energiaa ja erilaisia resursseja, ja koska esineiden internetin verkoston oletetaan kasvavan huomattavasti tulevaisuudessa (Albreem ym., 2017). Esineiden internetin toiminnan ympäristövaikutukset voidaan minimoida ottamalla huomioon kuvassa 6 esitellyt esineiden internetin elinkaaren neljä vaihetta, jotka ovat vihreä suunnittelu, vihreä tuotanto, vihreä käyttö ja vihreä hävittäminen. Tulisi siis suunnitella energiatehokkaita ja ympäristöystävällisiä laitteita, komponentteja ja järjestelmiä, jotka voidaan kierron lopussa hävittää, kierrättää tai käyttää uudelleen kestävästi. (Murugesan, 2008.)



Kuva 6 Vihreän esineiden internetin elinkaaren vaiheet

Jotta esineiden internetistä saataisiin tehtyä vihreämpi, on otettava huomioon sen käyttämät teknologiat kuten RFID-tunnisteet ja sensoriverkko. RFID-tunnisteista pyritään tekemään pienempiä tai esimerkiksi tarroja, jolloin säästetään luonnonvaroja. Langattomasta sensoriverkosta voidaan tehdä kestävämpi muun muassa käyttämällä uusiutuvaa ja kineettistä energiaa latauksessa, ja datan koon pienentämiseen kehitettyjä algoritmeja, jolloin säästetään tietojen taltiointitilaa. Verkon sensorit voidaan tarpeen tullen laittaa lepotilaan tai poistaa käytöstä väliaikaisesti, jolloin säästetään energian kulutuksessa. (Albreem ym., 2017.)

Energiankulutus on suurta kaupungeissa, ja tällä hetkellä kaupungit kuluttavat arviolta 60–80 % maailman energiasta. Kaupungit vastaavat myös 70 prosentista ihmisten aikaansaamista kasvihuonekaasuista, jotka syntyvät pääosin fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja liikenteestä. Kaupunkien vastuu maapallon ilmaston lämpenemisestä on suuri, ja siksi niiltä vaaditaan kiireellisesti toimia liian lämpenemisen estämiseksi. (Yhdistyneiden kansakuntien asuinyhdyskuntaohjelma, 2019.)

Älykäs energia on laaja konsepti, joka koostuu älykkäästä sähköntuotannosta, älykkäästä sähköverkosta, älykkäästä tallennuksesta ja älykkäästä kulutuksesta. Älykkääseen energiajärjestelmään kuuluvat hajautetut kestävät energialähteet, tehokas jakelu ja optimoitu energiankulutus, jotka ovat kaikki yhdistetty älykkäästi tieto- ja viestintäteknikkaa käyttäen. Järjestelmän keskiössä on tiedon kerääminen ja sen hyödyntäminen esimerkiksi sopivan energiankulutuksen määrän asettamiseksi älykkäille laitteille. (Mohanty ym., 2016.)

Esineiden internetin avulla saadaan dataa esimerkiksi siitä, minä aikoina älykaupungin eri osat kuten älykkäät tehtaot, älykkäät kodit ja maatilat kuluttavat eniten energiaa. Tämän tiedon avulla pystytään muun muassa tasapainottamaan energiajärjestelmiä ja minimoimaan järjestelmän ruuhkautumista tai sähkökatkoksen mahdollisuutta kustannustehokkaasti. Esineiden internetin sensoreiden avulla on mahdollista seurata kaikkia kaupungin esineitä, ja varmistamaan näin energiatehokas toiminta. Esimerkiksi ajoneuvoja seuraamalla voidaan tehostaa liikennevalojen energian kulutusta, ja tästä saatu data auttaa kaupungin viranomaisia tekemään jatkossa päätöksiä liikenteestä ja sen mahdollisuuksista. (Hossein Motlagh ym., 2020.)

Almakin ym. (2023) artikkelissa painotetaan miehittämättömien ilma-aluksien roolin tärkeyttä, kun halutaan tehdä esineiden internetistä vihreämpää. Miehittämättömien

ilma-aluksien avulla on mahdollista vähentää siirtotehon tarvetta, kun dataa voidaan hakea, analysoida, käsitellä ja hallita miehittämättömien ilma-aluksien avulla lähempänä laitteita. Mahdollisimman lyhyt paketsiirron polku säästää energiaa ja parantaa tehokkuutta.

Saasteiden määrä on kasvanut sitä mukaa kun teknologiat ja kaupungit ovat kehittyneet. Kaupungeissa ongelmana on varsinkin ilmansaasteet, joilla on suora vaikutus ihmisten terveyteen ja ympäristöön. (Ghoneim & Hamed, 2019.) Ilmansaasteet ovat haaste erityisesti maissa kuten Kiina ja Intia, joissa teollistuminen ja kaupungistuminen on ollut nopeaa (Mannucci & Franchini, 2017). Arvioidaan, että ympäristön ilmansaasteet aiheuttivat vuonna 2019 4,2 miljoonaa ennen aikaista kuolemaa, joista noin 89 % sijoittui matalan ja keskitulotason maihin (Maailman terveysjärjestö, 2022).

Ilmansaasteita seurataan älykkäillä sensoreilla, joiden tiedonsiirtoteho on rajoittunut datan lähettämiseen reaaliajassa. Sensoreita pystytään kuljettamaan ilmaan miehittämättömillä ilma-aluksilla, jolloin datan kerääminen ja lähettäminen ilmasta on helppoa. (Almalki ym., 2023.) Sensoreita voidaan sijoittaa kaupungin eri alueille, jolloin saadun datan ansiosta pystytään määrittämään reaaliaikaisesti kaupungin alueet, joissa on eniten ilmansaasteita, ja mahdollisesti välttämään kyseisiä alueita. Datan ansioista voitaisiin luoda julkisia toimintoja kuten osittaisia tiesulkuja, joilla saataisiin ilmansaasteiden määrää laskettua, tai liian suuren ilmansaasteiden määrän seurauksena laukeavia hälytyksiä. (Toma ym., 2019.)

Villa ym. (2016) kehittivät ohjenuoran miehittämättömälle ilma-alusjärjestelmälle, jolla kerätään tietoa ilmansaasteista. Tutkimus keskittyi arvioimaan kaasusensoreiden käyttöä heksakoptereissa, joilla mitattiin hiilidioksidi-, hiilimonoksidi-, typpidioksidi- ja typpioksidipäästöjä ilmasta. Todettiin, että järjestelmällä pystyttiin identifioimaan valitusta lähteestä peräisin olevia päästöjä.

Yksi isoimmista älykaupungin sovelluksiin kohdistuvista haasteista on jätehuolto. Maailmassa tuotetaan vuosittain noin 2,01 miljardia tonnia yhdyskuntajätettä, josta arviolta 77 % käsitellään ympäristöystävällisesti. (Vishnu ym., 2021.) Huonosti käsitellyllä jätteellä on runsaasti vaikutuksia kaupunkiympäristöön. Se johtaa ilman, veden ja maaperän saastumiseen, ja sitä kautta myös pitkäaikaisiin terveysvaikutuksiin, jotka vaikuttavat kaupunkien kasvumahdollisuuksiin ja talouteen. (Saha ym., 2017.) Ratkaisuja parempaan jätteiden keräykseen etsitään jatkuvasti. Teknologioiden kuten

esineiden internetin, reunalaskennan, tekoälyn ja pilvipalveluiden avulla on mahdollista luoda automatisoitu jätteiden keräysjärjestelmä, jolla voidaan lisätä käyttöä, varastointia ja tuotantokapasiteettia. (Almalki ym., 2023.) Reunalaskennassa on kyse teknologioista, jotka mahdollistavat laskennan verkoston reunalla. Sen tavoitteena on suorittaa tietojenkäsittely mahdollisimman lähellä datan lähdettä. (Shi ym., 2016.)

Jätteiden kerääminen kaupungeissa hoidetaan yleisesti reittimäisesti ja aikatauluja noudattaen, joka ei todennäköisesti ole tehokkain tapa, koska eri jätteenkeräyspisteet täyttyvät eri tahtiin. Jätteiden keräämisen ollessa tehokkaampaa säästettäisiin sekä rahaa että ympäristöä. (Saha ym., 2017.) Gutierrez ym. (2015) esittelevät, miten esineiden internetiä ja paikkatietojärjestelmiä hyödyntämällä voidaan luoda älykäs kyberfyysinen järjestelmä jätteenkeräystä varten. Järjestelmä perustuu esineiden internettiin ja sensoreihin, joita hyödyntämällä voidaan kerätä, lukea ja välittää eteenpäin tietoa jätteastoiden täyttymisestä internetin välityksellä. Kerätyn tiedon perusteella voidaan hallita jätteiden keräämistä tehokkaasti ja dynaamisesti, ja ohjata työntekijöitä tarvittaville jätteidenkeräyspisteille.

Esineiden internetin yhdistäminen liikenteeseen on luonut älykkäät liikennejärjestelmät. Älykkäillä liikennejärjestelmillä on paljon potentiaalia tehdä kaupungeista tehokkaampia ja kestävämpiä. Järjestelmillä voidaan esimerkiksi parantaa reitinvalintaa, pysäköintiä, tapaturmantorjuntaa ja katuvalojen käyttöä. Kun järjestelmät osaavat ohjeistaa käyttäjälle nopeimman ja lyhyimmän reitin riippuen esimerkiksi ruuhkista, säästetään energiaa ja vähennetään liikenteestä syntyviä päästöjä. (Zantalis ym., 2019.) VANET (engl. vehicular ad hoc network) eli ajoneuvojen langattomat verkot mahdollistavat kulkuneuvojen välisen, ja kulkuneuvojen ja infrastruktuurin välisen reaaliaikaisen viestinnän, jolla voidaan mahdollisesti ehkäistä esimerkiksi kolareita tulevaisuudessa. Älykkäät liikennejärjestelmät eivät ota huomioon ainoastaan autoja, vaan ne huomioivat myös vesiliikenteen, junaliikenteen ja ilmaliikenteen, ja parantavat näin älykaupunkien operatiivista tehokkuutta. (Silva ym., 2018.)

Sensoreilla voidaan seurata parkkipaikkoja, ja säästää energiaa, kun ei tarvitse kuluttaa aikaa vapaiden parkkipaikkojen etsimiseen. Katulamppujen toimintaa pystytään tehostamaan tekemällä niistä älykkäitä. Lamppujen ei tarvitse olla päällä aikataulun mukaan, jos ne pystyvät seuraamaan ympäristöään ja olemaan päällä liikenteen tai valoisuuden mukaan. (Zantalis ym., 2019.) Esimerkiksi Barcelonassa on otettu käyttöön

älykkäät katulamput ja sensoreita parkkipaikkojen seuraamiseen suurissa pysäköintitaloissa, ja näin otettu askel kohti älykästä energianhallintaa (Silva ym., 2018).

Espanjassa sijaitseva Santanderin kaupunki tekee yhteistyötä Euroopan komission kanssa osana SmartSantander-projektia, jonka tarkoituksena on tutkia ja kokeilla esineiden internetin teknologioita, sovelluksia, arkkitehtuureja ja palveluja älykaupungissa (Bauer ym., 2021; Silva ym., 2018). Projekti toimii hyvänä esimerkkinä siitä, miten esineiden internettiä voidaan jo hyödyntää käytännössä kestävyuden parantamiseksi älykaupungissa. Santanderissa käytetään yli 12 000 erilaista sensoria ja muita esineiden internetin laitteita kuten esimerkiksi kaupungin asukkaiden älypuhelimia. Kaupungissa on onnistuttu hyödyntämään esineiden internettiä monella eri osa-alueella. Santanderissa mitataan esineiden internetin laitteilla esimerkiksi lämpötilaa, hiilimonoksidin määrää, melua ja ilmansaasteita. Pysäköintiä on tehostettu asfaltin alle asennetuilla sensoreilla sekä opastauluilla, ja kaupungin pääsisääntuloväylille sijoitettujen laitteiden avulla voidaan seurata kaupungin liikenteen volyymin ja teiden käyttöastetta. Santanderissa on onnistuneesti tehostettu jätehuoltoa seuraamalla sensoreiden avulla paperi- ja muovijätteen määrää jättesäiliöissä. Myös kaupungin asukkaat pystyvät osallistumaan halutessaan ilmoittamalla esimerkiksi havaitsemistaan vahingoista ja ongelmista kaupungissa. (Bauer ym., 2021.)

4.3 Esineiden internetin kestävyiden haasteet

Toimivan älykaupungin mukana tulee myös suuri määrä haasteita, jotka koskevat muun muassa kustannuksia, esineiden internetin laitteiden heterogeenisyyttä, datan valtavaa määrää, kestävyttä ja tietoturva (Silva ym., 2018). Erityisesti esineiden internetin haasteita ovat epävakaita ympäristöissä tuotetun datan hallinta, yksityisyys ja turvallisuus, kerätyn datan konteksti, epävarmuus, laatu ja vaillinaisuus sekä datan varastointi ja prosessointi (Bibri, 2018).

Vaikka esineiden internetillä voidaan kehittää kestävyttä älykaupungeissa, tuo sen käyttö mukanaan myös haasteita, jotka tulisi ratkaista esineiden internetin käytön kestävyden optimoimiseksi. Esineiden internetin teknologioiden käytön nopean kasvun vuoksi tarvitaan yhä enemmän jo hupenevia materiaaleja, jotta voidaan tuottaa lisää sen toiminnalle välttämättömiä laitteita ja osia. Materiaalien tarve tulee kasvamaan nopeasti sitä mukaa kun kehittyvien alueiden suuret populaatiot kykenevät ottamaan

elektroniikkaa käyttöön. Tämä tulee johtamaan elektroniikkajätteen määrän kasvuun, jonka vuoksi sen kierrätykseen on kiinnitettävä huomiota. (Nižetić ym., 2020.)

Esineiden internetin toiminta vaatii huomattavan määrän energiaa. Sen kestävyyttä ja pitkäaikaisia vaikutuksia tulisi tutkia lisää, jotta saataisiin selvä käsitys sen vaikutuksista energian kulutukseen. Laitteiden energian käytön minimointi on yksi tärkeimmistä esineiden internetin kestävyyskohdistuvista haasteista. (Nižetić ym., 2020.) Tulisi löytää sopiva energiatehokkuuden ja esineiden internetin arkkitehtuurin välinen yhdistelmä, jolla päästäisiin mieluisaan lopputulokseen. Olisi kestävyiden kannalta tärkeää pyrkiä hyödyntämään uusiutuvia energiamuotoja kuten tuulivoimaa sekä aurinko- ja lämpöenergiaa. Myös esineiden internetin käyttämät pilvipalvelut kuluttavat paljon energiaa, jonka vuoksi myös niiden energiankulutusta tulisi tehostaa. (Albreem ym., 2017.)

Älykaupunki tarvitsee toimiakseen valtavan määrän dataa sen ympäristöstä ja ihmisistä, jonka vuoksi tietoturvallisuus on yksi älykaupungin haasteista. Kaupungin asukkailta kerättävä data on yksityisyyden kannalta arkaluonteista, ja vaatii turvallista käsittelyä ja varastointia. Vaarana on, että arkaluonteisen tiedon kuten sijaintitietojen, terveystietojen ja henkilötietojen vuotoja tapahtuu ulkopuolisten ja sisäisten hyökkääjien takia. (Zhang ym., 2017.) Yksityisyyden turvaamiseksi tulisi pyrkiä tallentamaan vain tarvittu data ja minimoimaan ylimääräisen tiedon kerääminen (Al-Turjman ym., 2022). Ihmisten yksityisyyden suojelemista järjestelmässä voidaan yrittää parantaa muun muassa salauksilla, nimettömyydellä ja pääsynvalvonnalla. Sisäisten hyökkäyksien havaitsemista voidaan parantaa esimerkiksi tehostamalla jäljitettävyyttä. Älykaupungin eri toimijoiden kuten yritysten, julkisten organisaatioiden, teollisuuden ja yliopistojen tulisi yhdessä ottaa käyttöön tietosuojakäytäntöjä ja -määräyksiä. (Zhang ym., 2017.) Esimerkiksi Euroopan unionissa on otettu käyttöön yleinen tietosuoja-asetus, jolla säädellään ihmisten henkilötietojen käyttöä ja suojausta. Asetus koskee kaikkia dataa käsitteleviä järjestelmiä, ja määrittää niiden oikeudet ja velvollisuudet. Sen mukaan henkilötietoja tulee käsitellä tietojen omistajan suostumukseen perustuen. (Bauer ym., 2021.)

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tutkielmassa esitettiin kirjallisuudesta löytyviä esineiden internetin kestävyyttä edistäviä sovelluksia keskittyen erityisesti ympäristölliseen kestävyYTEEN.

Kirjallisuuskatsauksessa on esitelty ensimmäisenä esineiden internetiä ja sen toimintaa, jotta voitaisiin vastata tutkimuskysymyksiin kattavasti. Esineiden internetin konsepti on ollut olemassa jo parikymmentä vuotta, jonka aikana se on saanut erilaisia määritelmiä. Määritelmiä yhdistää se, miten ne kuvaavat esineiden olevan yhteydessä internettiin, ja se että niitä ei kutsuta tietokoneiksi, koska esineet voivat olla laitteita tai esimerkiksi jokapäiväisiä esineitä kuten ovia ja kodinkoneita. Näiden laitteiden tulee kuitenkin kyetä lähettämään ja vastaanottamaan dataa internetin välityksellä.

Kirjallisuudesta saatiin selville, että esineiden internetin sovellusmahdollisuudet yhteiskunnassa ovat monipuoliset. KestävyYDEN kehittämisen lisäksi, sitä voidaan hyödyntää myös useilla muilla elämän osa-alueilla kuten terveydenhuollossa, teollisuudessa, kodeissa, maataloudessa ja vähittäismyynnissä kun halutaan parantaa esimerkiksi tuottavuutta tai kustannustehokkuutta. Tämä tapahtuu käytännössä erilaisten teknologioiden kokonaisuudella, joka tekee esineiden yksilöllisestä identifioimisesta ja niiden välisestä reaaliaikaisesta viestinnästä mahdollista. Olennaisia teknologioita ovat esimerkiksi RFID, joka luo esineiden internetin konstruktion perustan, langaton sensoriverkosto, joka koostuu useista älyensoreista, ja pilvipalvelut kuten pilvilaskenta, -analytiikka ja -tallennus, jotka tekevät datan analysoimisesta ja prosessoimisesta tehokkaampaa.

Älykaupungit luovat ratkaisuja kaupungistumisen mukana tuleville haasteille.

Älykaupunkien ja esineiden internetin toimintamekanismit ovat samankaltaisia, koska älykaupunki on pohjimmiltaan esineiden internetin sovellus. Tämä tulee ilmi, kun verrataan esimerkiksi esineiden internetin ja älykaupungin arkkitehtuureja.

Älykaupungin esitetty arkkitehtuuri muistuttaa erityisesti esineiden internetin viisikerroksista arkkitehtuurimallia, mutta koska älykaupungit ovat monimutkaisia kokonaisuuksia, jotka koostuvat komponenteista, ominaisuuksista, teemoista ja infrastruktuureista, on haastavaa tai lähes mahdotonta luoda älykaupungeille yksi universaali arkkitehtuuri.

Ensimmäiseen alatutkimuskysymykseen vastataan sekä kolmannessa että neljännessä luvussa. Esineiden internetiä hyödynnetään älykaupungissa monipuolisesti, sillä nykyiset älykaupungit eivät olisi älykaupunkeja ilman esineiden internetiä. Kaupungit voivat esineiden internetin avulla kehittyä ja tarjota asukkaille uusia palveluita, ja tällä tavalla parantaa kaupungin asukkaiden elämänlaatua. Esimerkkeinä tällaisista palveluista toimivat teleterveydenhuollonpalvelut ja älykäs sähköverkko. Erityisesti esineiden internetin mahdollistama reaaliaikainen seuranta tehostaa älykaupungin sovelluksia.

Toinen alatutkimuskysymys keskittyy esineiden internetin kestäviin sovelluksiin, joita esitellään luvussa neljä. Ympäristölliseen kestävyYTEEN kytkeytyvät erityisesti älykkään ympäristön, älykkään energian ja älykkään liikenteen sovellukset. Kuvassa 7 kerrataan kirjallisuudessa useasti esiintyneitä ja tutkielmassa esiteltyjä sovelluksia. Älykkään ympäristön sovelluksilla kuten ilmansaasteiden seuraamisella voidaan saada vähennettyä valittujen alueiden hiilidioksidi-, hiilimonoksidi- ja typpioksidipäästöjen määrää asettamalla esimerkiksi osittaisia tiesulkuja. Esineiden internetillä tehostettu jätehuolto taas säästää rahaa, aikaa ja ympäristöä estämällä esimerkiksi jäteastioiden ylipursuamista. Älykkään energian sovelluksilla kuten älykkäällä sähköntuotannolla, sähköverkolla ja kulutuksella voidaan optimoida ja seurata älykaupungin eri osien kuten kotien, tehtaiden ja maatilojen energian kulutusta. Esimerkiksi liikennevalojen ja katulamppujen energiankulutusta pystytään tehostamaan seuraamalla liikennettä.

Älykäs ympäristö	Ilmansaasteiden seuraaminen
	Tehokas jätehuolto
Älykäs energia	Älykäs sähköverkko
	Älykäs sähköntuotanto
	Älykäs kulutus
	Energiatehokkuus
Älykäs liikenne	Älykäs reitinvalinta
	Älykäs pysäköinti
	Älykäs liikenteenohjaus
	Tapaturmantorjunta

Kuva 7 Esineiden internetin kestäviä sovelluskohteita

Älykkäillä liikennejärjestelmillä voidaan kehittää muun muassa reitinvalintaa, pysäköintiä, liikenteenohjausta ja tapaturmantorjuntaa. Esineiden internet kerää tietoa reaaliaikaisesti liikenteestä ja tätä tietoa voidaan käyttää liikenteen tehostamiseen ja ruuhkien välttämiseen. Lyhyemmät ajoajat säästävät liikenteestä syntyviä päästöjä ja verkkoon yhdistettyjen ajoneuvojen välinen viestintä voi tulevaisuudessa estää liikenneonnettomuuksia.

Päätutkimuskysymykseen on vastattu, kun lisätään vielä mukaan esineiden internetin kestävyiden kehittäminen. Vihreä esineiden internet vaatii sen vihreää suunnittelua, tuotantoa, käyttöä ja hävittämistä, jotta esineiden internetin ympäristövaikutukset voidaan minimoida. Esineiden internetin ajankohtaisia kestävyiden liittyviä haasteita ovatkin kirjallisuuden mukaan sen vaatimat hupenevat materiaalit, elektroniikkajätteen määrän kasvu, esineiden internetin suuri energiankulutus ja tietoturvallisuus. Esineiden internetillä on kuitenkin todistetusti parannettu jo kestävyyttä esimerkiksi Santanderin kaupungissa, ja kehitystä tapahtuu jatkuvasti.

Lähteet

- Abdul-Qawy, A. S., Pramod, P. J., Magesh, E., & Srinivasulu, T. (2015). The internet of things (iot): An overview. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 5(12), 71–82. <https://doi.org/10.15242/iie.e0315045>
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- Albreem, M. A. M., El-Saleh, A. A., Isa, M., Salah, W., Jusoh, M., Azizan, M. M., & Ali, A. (2017). Green internet of things (IoT): An overview. *2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICSIMA.2017.8312021>
- Almalki, F. A., Alsamhi, S. H., Sahal, R., Hassan, J., Hawbani, A., Rajput, N. S., Saif, A., Morgan, J., & Breslin, J. (2023). Green IoT for eco-friendly and sustainable smart cities: Future directions and opportunities. *Mobile Networks and Applications*, 28(1), 178–202. <https://doi.org/10.1007/s11036-021-01790-w>
- Al-Turjman, F., Zahmatkesh, H., & Shahroze, R. (2022). An overview of security and privacy in smart cities' IoT communications. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 33(3), e3677. <https://doi.org/10.1002/ett.3677>
- Armentano, R., Bhadoria, R. S., Chatterjee, P., & Deka, G. C. (2017). *The Internet of Things: Foundation for Smart Cities, eHealth, and Ubiquitous Computing*. CRC Press.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Bakıcı, T., Almirall, E., & Wareham, J. (2013). A Smart City Initiative: The Case of Barcelona. *Journal of the Knowledge Economy*, 4(2), 135–148. <https://doi.org/10.1007/s13132-012-0084-9>
- Bali Swain, R., & Yang-Wallentin, F. (2020). Achieving sustainable development goals: Predicaments and strategies. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 27(2), 96–106. <https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1692316>

- Bauer, M., Sanchez, L., & Song, J. (2021). IoT-Enabled Smart Cities: Evolution and Outlook. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *21*(13), 4511-.
<https://doi.org/10.3390/s21134511>
- Bellini, P., Nesi, P., & Pantaleo, G. (2022). IoT-Enabled Smart Cities: A Review of Concepts, Frameworks and Key Technologies. *Applied Sciences*, *12*(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app12031607>
- Bibri, S. E. (2018). The IoT for smart sustainable cities of the future: An analytical framework for sensor-based big data applications for environmental sustainability. *Sustainable cities and society*, *38*, 230–253.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.034>
- Blasi, S., Ganzaroli, A., & De Noni, I. (2022). Smartening sustainable development in cities: Strengthening the theoretical linkage between smart cities and SDGs. *Sustainable Cities and Society*, *80*, 103793.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103793>
- Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). Smart Cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, *18*(2), 65–82.
<https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>
- Erl, T. (2008). *SOA: principles of service design*. Prentice Hall.
- Faria, P. A. M., Ferreira, F. A. F., Jalali, M. S., Bento, P., & António, N. J. S. (2018). Combining cognitive mapping and MCDA for improving quality of life in urban areas. *Cities*, *78*, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.02.006>
- Fernandes, I. D. S., Ferreira, F. A. F., Bento, P., Jalali, M. S., & António, N. J. S. (2018). Assessing sustainable development in urban areas using cognitive mapping and MCDA. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, *25*(3), 216–226. Scopus.
<https://doi.org/10.1080/13504509.2017.1358221>
- Gaur, A., Scotney, B., Parr, G., & McClean, S. (2015). Smart city architecture and its applications based on IoT. *Procedia computer science*, *52*, 1089–1094.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.122>
- Ghoneim, M., & Hamed, S. M. (2019). Towards a Smart Sustainable City: Air Pollution Detection and Control using Internet of Things. *2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/ICOA.2019.8727690>

- Gokhale, P., Bhat, O., & Bhat, S. (2018). Introduction to IOT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1), 41–44.
<https://doi.org/10.17148/IARJSET.2018.517>
- Gutierrez, J. M., Jensen, M., Henius, M., & Riaz, T. (2015). Smart Waste Collection System Based on Location Intelligence. *Procedia Computer Science*, 61, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.09.170>
- Haque, A. K. M. B., Bhushan, B., & Dhiman, G. (2022). Conceptualizing smart city applications: Requirements, architecture, security issues, and emerging trends. *Expert Systems*, 39(5), e12753. <https://doi.org/10.1111/exsy.12753>
- Harrison, C., Eckman, B., Hamilton, R., Hartswick, P., Kalagnanam, J., Paraszczak, J., & Williams, P. (2010). Foundations for Smarter Cities. *IBM Journal of Research and Development*, 54(4), 1–16. <https://doi.org/10.1147/JRD.2010.2048257>
- Hossein Motlagh, N., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of Things (IoT) and the Energy Sector. *Energies*, 13(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/en13020494>
- Ibrahim, N., Alagar, V., & Mohammed, M. (2014). A context-dependent service model. *EAI Endorsed Transactions on Context-aware Systems and Applications*, 1(2). <http://dx.doi.org/10.4108/casa.1.2.e3>
- Ismagilova, E., Hughes, L., Dwivedi, Y. K., & Raman, K. R. (2019). Smart cities: Advances in research—An information systems perspective. *International Journal of Information Management*, 47, 88–100.
<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.004>
- Janani, R. P., Renuka, K., & Aruna, A. (2021). IoT in smart cities: A contemporary survey. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 187–193.
<https://doi.org/10.1016/j.gltip.2021.08.069>
- Jasim, N. A., TH, H., & Rikabi, S. A. (2021). Design and Implementation of Smart City Applications Based on the Internet of Things. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 15(13).
<https://doi.org/10.3991/ijim.v15i13.22331>
- Jia, X., Feng, Q., Fan, T., & Lei, Q. (2012). RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT). *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, 1282–1285.
<https://doi.org/10.1109/CECNet.2012.6201508>

- Katal, A., Wazid, M., & Goudar, R. H. (2013). Big data: Issues, challenges, tools and Good practices. *2013 Sixth International Conference on Contemporary Computing (IC3)*, 404–409. <https://doi.org/10.1109/IC3.2013.6612229>
- Khanna, A., & Kaur, S. (2020). Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review. *Wireless Personal Communications*, *114*(2), 1687–1762. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07446-4>
- Khatoun, R., & Zeadally, S. (2016). Smart cities: Concepts, architectures, research opportunities. *Communications of the ACM*, *59*(8), 46–57. <https://doi.org/10.1145/2858789>
- Kondepudi, S. N., Ramanarayanan, V., Jain, A., Singh, G. N., Nitin Agarwal, N. K., Kumar, R., Singh, R., Bergmark, P., Hashitani, T., & Gemma, P. (2014). Smart sustainable cities analysis of definitions. *The ITU-T focus group for smart sustainable cities*.
- Kosmatos, E. A., Tselikas, N. D., & Boucouvalas, A. C. (2011). Integrating RFIDs and Smart Objects into a Unified Internet of Things Architecture. *Advances in Internet of Things*, *1*(1), Article 1. <https://doi.org/10.4236/ait.2011.11002>
- Koste, O.-W., Lehtovuori, P., Neuvonen, A., & Schmidt-Thomé, K. (2020). Miksi Suomen kaupungistuminen jatkuu. *Argumentteja keskusteluun Suomen kaupungistumisen syistä*.
- Kumar, N. M., & Mallick, P. K. (2018). The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers. *Procedia Computer Science*, *132*, 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.170>
- Li, B., & Yu, J. (2011). Research and Application on the Smart Home Based on Component Technologies and Internet of Things. *Procedia Engineering*, *15*, 2087–2092. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.390>
- Maailman terveysjärjestö. (2022, joulukuuta 19). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Madakam, S., Lake, V., Lake, V., & Lake, V. (2015). Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, *3*(05), 164. <http://dx.doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- Madlmayr, G., Langer, J., Kantner, C., & Scharinger, J. (2008). NFC Devices: Security and Privacy. *2008 Third International Conference on Availability, Reliability and Security*, 642–647. <https://doi.org/10.1109/ARES.2008.105>

- Mannucci, P. M., & Franchini, M. (2017). Health Effects of Ambient Air Pollution in Developing Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/ijerph14091048>
- Mehmood, Y., Ahmad, F., Yaqoob, I., Adnane, A., Imran, M., & Guizani, S. (2017). Internet-of-Things-Based Smart Cities: Recent Advances and Challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 16–24. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600514>
- Mohanty, S. P., Choppali, U., & Koungianos, E. (2016). Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 5(3), 60–70. <https://doi.org/10.1109/MCE.2016.2556879>
- Murugesan, S. (2008). Harnessing green IT: Principles and practices. *IT professional*, 10(1), 24–33. <https://doi.org/10.1109/MITP.2008.10>
- Nižetić, S., Šolić, P., Gonzalez-De, D. L.-I., & Patrono, L. (2020). Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. *Journal of cleaner production*, 274, 122877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
- Nunes, S. A., Ferreira, F. A., Govindan, K., & Pereira, L. F. (2021). “Cities go smart!”: A system dynamics-based approach to smart city conceptualization. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127683-. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127683>
- Oxford English Dictionary. (2023). Oxford University Press; Oxford English Dictionary. <https://doi.org/10.1093/OED/9540187193>
- Pujolle, G. (2006). An Autonomic-oriented Architecture for the Internet of Things. *IEEE John Vincent Atanasoff 2006 International Symposium on Modern Computing (JVA '06)*, 163–168. <https://doi.org/10.1109/JVA.2006.6>
- Saha, H. N., Auddy, S., Pal, S., Kumar, S., Pandey, S., Singh, R., Singh, A. K., Banerjee, S., Ghosh, D., & Saha, S. (2017). Waste management using Internet of Things (IoT). *2017 8th Annual Industrial Automation and Electromechanical Engineering Conference (IEMECON)*, 359–363. <https://doi.org/10.1109/IEMECON.2017.8079623>
- Sang, Y., Shen, H., Inoguchi, Y., Tan, Y., & Xiong, N. (2006). Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Networks: A Survey. *2006 Seventh International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications*

and Technologies (PDCAT'06), 315–320.

<https://doi.org/10.1109/PDCAT.2006.96>

Sethi, P., & Sarangi, S. R. (2017). Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, e9324035.

<https://doi.org/10.1155/2017/9324035>

Sharma, N., Shamkuwar, M., & Singh, I. (2019). The history, present and future with IoT. *Internet of things and big data analytics for smart generation*, 27–51.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-04203-5_3

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646.

<https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>

Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018). Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities.

Sustainable Cities and Society, 38, 697–713.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053>

Siragusa, A., Vizcaino, M. P., Proietti, P., & Lavalle, C. (2020, helmikuuta 6).

European Handbook for SDG Voluntary Local Reviews. JRC Publications Repository. <https://doi.org/10.2760/670387>

Sobin, C. C. (2020). A Survey on Architecture, Protocols and Challenges in IoT.

Wireless Personal Communications, 112(3), 1383–1429.

<https://doi.org/10.1007/s11277-020-07108-5>

Thaler, D., Tschofenig, H., & Barnes, M. (2015). Architectural considerations in smart object networking. *Tech. no. RFC*, 7452.

Toma, C., Alexandru, A., Popa, M., & Zamfiroiu, A. (2019). IoT Solution for Smart Cities' Pollution Monitoring and the Security Challenges. *Sensors*, 19(15),

Article 15. <https://doi.org/10.3390/s19153401>

Transforma Insights, & Exploding Topics. (2023, heinäkuuta 1). *Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2023, with forecasts from 2022 to 2030 (in billions) [Graph]*. Statista.

<https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>

Tschofenig, H., Arkko, J., Thaler, D., & McPherson, D. (2015). *Architectural considerations in smart object networking*.

Työ- ja elinkeinoministeriö. (2022). Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. *Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja*, 2022(53).

- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition*. United Nations.
<https://doi.org/10.18356/9789210024914>
- Villa, T. F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L., & Gonzalez, F. (2016). Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements. *Sensors*, *16*(12), 2202. <https://doi.org/10.3390/s16122202>
- Vishnu, S., Ramson, S. R. J., Senith, S., Anagnostopoulos, T., Abu-Mahfouz, A. M., Fan, X., Srinivasan, S., & Kirubaraj, A. A. (2021). IoT-Enabled Solid Waste Management in Smart Cities. *Smart Cities (Basel)*, *4*(3), 1004–1017.
<https://doi.org/10.3390/smartcities4030053>
- Vishwakarma, N. K., Singh, R. K., & Sharma, R. R. K. (2020). Internet of things architectures: Do organizational strategies matters? *Business Process Management Journal*, *26*(1), 102–131. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-03-2018-0092>
- Yahya, O., Alrikabi, H., & Faezipour, M. (2020). *Using internet of things application for disposing of solid waste*. <https://doi.org/10.3991/ijim.v14i13.13859>
- Yhdistyneiden kansakuntien asuinyhdyskuntaohjelma. (2019). *The Strategic Plan 2020–2023*. UN-Habitat.
- Zantalis, F., Koulouras, G., Karabetsos, S., & Kandris, D. (2019). A review of machine learning and IoT in smart transportation. *Future Internet*, *11*(4), 94.
<https://doi.org/10.3390/fi11040094>
- Zhang, K., Ni, J., Yang, K., Liang, X., Ren, J., & Shen, X. S. (2017). Security and privacy in smart city applications: Challenges and solutions. *IEEE communications magazine*, *55*(1), 122–129.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600267CM>