



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **AUTOMAATIO OSANA KIERTOTALOUTTA**

Timo Nygren

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Automaatio osana kiertotaloutta

Timo Nygren

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö, 2023, 30 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Tämän työn tavoitteena on selvittää millä eri tavoilla automaatiota hyödynnetään kiertotaloudessa ja kiertotalouden eri osa-alueilla, sekä sovelluksissa. Työssä käydään ensin läpi kiertotaloutta yleisesti, mitä se on ja miten se toimii ja mitä siihen kuuluu. Työssä esitetään kiertotalouden vaatimuksia tulevaisuudelle kestävän kehityksen haasteiden kannalta ja miten automaatio voi parantaa kiertotalouden osa alueita. Työssä käsitellään myös lyhyesti, mitä automaatio on. Työssä käsitellään mitä hyötyjä automaation hyödyntäminen kiertotaloudessa tuo, sekä esimerkkejä jo olemassa olevista automaation käyttökohteista kiertotalouden eri osa-alueissa. Lopuksi kerrotaan tulevaisuuden näkökulmia automaatiolle kiertotaloudessa.

Työn lähteinä käytetään aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, tutkimuksia ja sivustoja. Työssä on käytetty kiertotalouteen ja automaatoratkaisuihin liittyviä havainnollistavia kuvia. Tämän työn avulla voidaan perustella, että kiertotalouden digitaali- ja automaatoratkaisut voivat lisätä tehokkuutta ja kestävyyttä sekä auttaa ympäristöongelmien ratkaisemisessa.

*Asiasanat: Kiertotalous, automaatio, digitalisaatio*

# ABSTRACT

Automation as a part of the circular economy

Timo Nygren

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 30 pp.

Supervisor at the university: Yrjö Louhisalmi

The objective of this work is to find out how automation and digitization is utilized in different areas of the circular economy and its applications. This work first introduces circular economy in general what it is and how it works. This work presents the requirements of the circular economy for the future in terms of challenges of sustainable development and how automation can improve some areas of the circular economy. This work briefly discusses what automation is. This work discusses the benefits of utilizing automation in the circular economy, as well as examples of already existing applications of automation in different areas of the circular economy. Finally, this work goes through perspectives for automation in the circular economy.

This work uses sources from literature and research work related to the topic of the work, as well as websites. Illustrative images related to the circular economy and automation have been used in the work. With the help of this work, it can be argued that digital and automation solutions of the circular economy can increase efficiency and sustainability and help solve environmental problems.

*Keywords: Circular economy, automation, digitization*

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty osana Oulun yliopiston tekniikan kandidatin tutkintoa. Työn tarkoituksena on selvittää tapoja ja näkökulmia kiertotalouden automaatio ratkaisuihin ja kiertotalouden digitalisointiin. Työ on kirjoitettu pääosiltaan aikavälillä 1.1.2023-2.4.2023.

Työn ohjaamisesta ja neuvoista haluan kiittää Yrjö Louhisalmea.

Oulu, 02.04.2023

*Timo Nygren*

Työn tekijä Timo Nygren

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 Johdanto .....	7
2 Kiertotalous yleisesti.....	8
2.1 Kiertotalouden digitaalisratkaisut.....	9
3 Kiertotalouden digitalisaatio .....	11
3.1 Digitalisaation mahdollisuudet.....	11
3.2 Digitalisaation haasteet .....	13
4 Kiertotalous ja automaatio .....	14
4.1 Mitä on automaatio?.....	14
4.2 Jätteen lajittelun automatisointi.....	15
4.3 Jätteiden keräämisen automatisointi .....	17
4.4 Uudelleenvalmistuksen automatisointi .....	19
4.4.1 Elinkaaren hallinta .....	20
5 Tulevaisuuden näkökulmia .....	22
5.1 Tekoälyn integrointi jätehuoltoon .....	22
5.2 Lohkoketju ja IoT kiertotaloudessa.....	24
6 Yhteenveto .....	25

LÄHDELUETTELO

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Network
BCT	Blockchain Technology
CNN	Convolutional Neural Network
EEE	Electrical and Electronic Equipment
IoT	Internet of Things
NIR	Near Infrared
ReLU	Rectified Linear Unit
SQL	Structured Query Language
VIS	Color analysis by camera or spectro-colorimeter
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
XRF	X-Ray Fluorescence
3-R	Reduce, Reuse, Recycle
4-R	Reduce, Reuse, Recycle, Recovery

# 1 JOHDANTO

Kiertotalous on tulevaisuuden kannalta välttämätön ratkaisu resurssien saatavuuden, kuluttamisen ja ehtymisen kannalta. Nykyään ihmisten kulutustottumukset ovat kasvaneet valtaviin määriin ja tämä vaatii uudenlaisia ratkaisuja kiertotalouden osa-alueelle. Tässä työssä käydään läpi automaation ja digitalisaation mahdollisuuksia kiertotalouden ja millä tavoin edellä mainitut ratkaisut voivat turvata materiaalien ja resurssien saatavuutta ja kiertoisuutta.

Aluksi tutustutaan kiertotalouteen ja sen digitaaliratkaisuiden mahdollistajiin yleisellä tasolla. Tämän jälkeen työssä käydään läpi muutamia alueita kiertotaloudesta, joihin on tähän mennessä kirjallisuuden ja tutkimusten perusteella tehty automaatio- ja digitaaliratkaisuita. Tämän jälkeen työ käsittelee hieman tulevaisuuden näkökulmia kiertotalouden osa-alueiden kannalta, kuten millaisia ratkaisuita eri osa-alueet kiertotaloudessa voivat mahdollisesti hyödyntää enemmän. Aihepiiri on laaja ja siihen voisi liittää paljon muitakin osa-alueita, mutta tässä työssä keskitytään lähinnä kriittisimpiin kiertotalouden osa-alueisiin, joita ovat kierrätys, keräys ja uudelleenvalmistus. Työssä esitetään lyhyesti elinkaaren hallintaa tuotteilla.

## 2 KIERTOTALOUS YLEISESTI

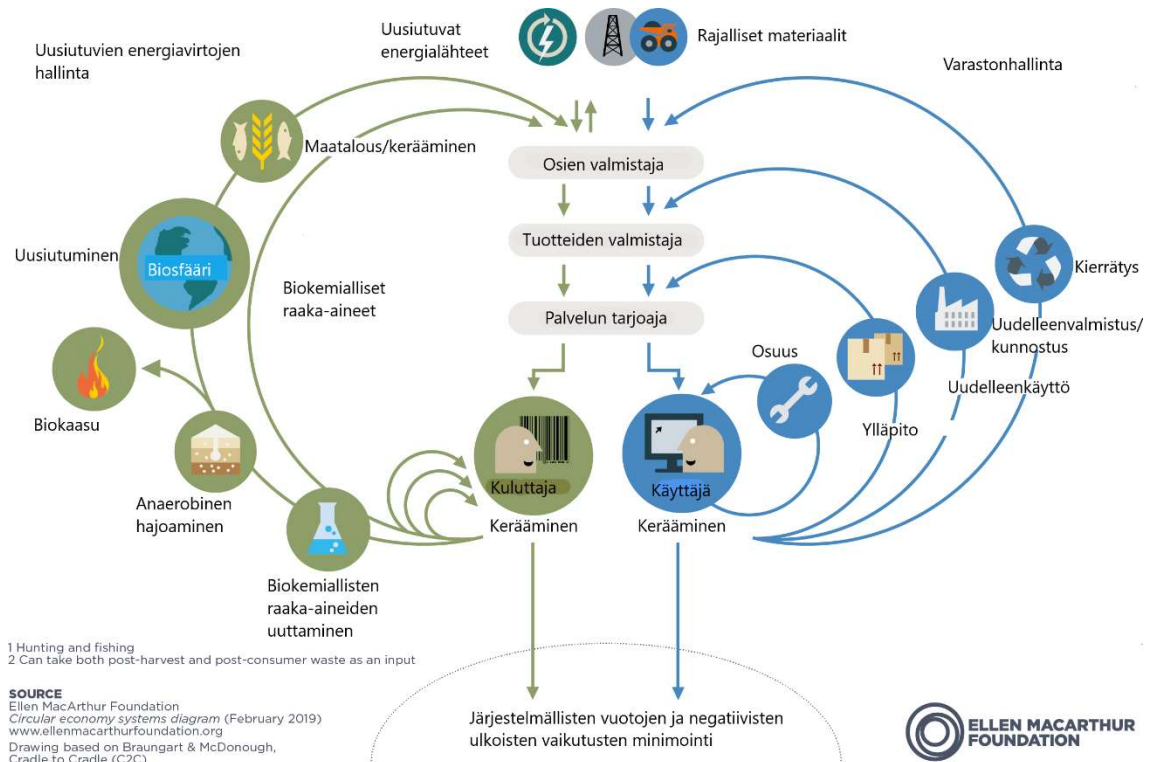
Koska ympäristöongelmat, kuten biologisen monimuotoisuuden väheneminen, veden, ilman ja maaperän saastuminen, luonnonvarojen ehtyminen sekä liiallinen maankäyttö, vaarantavat yhä enemmän maapallon elämää ylläpitäviä järjestelmiä, on kestävämpien sositieteellisten järjestelmien hyödyntäminen tärkeää. (Geissdoerfer et al., 2017, s. 757)

Kiertotaloudella tarkoitetaan kulutus- ja tuotantomallia, joka hyödyntää olemassa olevia materiaaleja ja tuotteita mahdollisimman pitkälle. Toimenpiteitä, joilla voidaan pidentää tuotteiden ja materiaalien elinkaarta ovat muun muassa vuokraaminen, lainaaminen, korjaaminen, kunnostaminen ja kierrättäminen. Kiertotalouden voidaan katsoa vaikuttavan kuuteen eri osa-alueeseen, jotka liittyvät tuotteen tai materiaalin elinkaareen. Näitä osa-alueita ovat suunnittelu, tuotanto- ja uudelleenvalmistus, jakelu, kulutus, keräys sekä kierrätys. (Euroopan parlamentti, Ajankohtaista, 2022)

Kiertotalous keskittyy kolmeen peruseriaatteeseen suunnittelun pohjalta. Nämä periaatteet ovat: jätteen ja päästöjen eliminointi, tuotteiden ja materiaalien kierrätys mahdollisimman pitkälle sekä luonnon uudistaminen. Kiertotalouden periaatteita tukee uusiutuviin energialähteisiin ja materiaaleihin siirtyminen. Kiertotalous erottaa taloudellisen toiminnan riippuvuuden rajallisista resursseista ja se luo kestävästä järjestelmästä, joka on hyväksi ympäristö- ja yritystasolla aina yksittäiseen kuluttajaan asti. (Ellen MacArthur Foundation)

Kiertotalousjärjestelmä on sovelluskehys, joka tarjoaa ratkaisuja maailmanlaajuisiin haasteisiin, kuten ilmastonmuutokseen, biologisen monimuotoisuuden vähenemiseen, sekä jätteen ja päästöjen syntyyn. Kiertotaloudessa on kaksi pääasiallista kiertoa, joita noudatetaan: tekninen- ja biologinen kierto. Tekninen kierto keskittyy tuotteiden ja materiaalien prosesseihin, uudelleenkäyttöön, korjaamiseen, uudelleenvalmistukseen ja kierrätykseen. Biologinen kierto perustuu biohajoavien materiaalien tuottamien ravintoaineiden palauttamiseen maaperään, jotta luonto uusiutuisi. (Ellen MacArthur Foundation)





Kuva 1. Kiertotalousjärjestelmien kaavio osien valmistajan, tuotteen valmistajan ja palveluntarjoajan välillä (Ellen Macarthur Foundation).

Kiertotalousmalli muodostaa suljetun silmukan keskittymällä materiaalien ja resurssien kierrätykseen ja uudelleenkäyttöön ja vähentää syötettävien uusien resurssien käyttöä ja minimoi jätevirtoja. (Nautiyal & Goel., 2021, s.31)

## 2.1 Kiertotalouden digitaalisratkaisut

Kiertotalousmallin tavoite on minimoida resursseista syntyvää jätettä ja maksimoida olemassa olevia resursseja. Asiantuntijat arvioivat ja antavat tarkkoja arvioita molempiin näkökulmiin. Kun puhutaan täysin automaattisesta koneoppimista hyödyntävästä päätöksenteon tukijärjestelmästä, herää kysymys tarvitaanko sellaista? Täysin automaattista koneoppimista hyödyntävä järjestelmä harvoin ohittaa ihmisen kyvyt tämänkaltaisissa tehtävissä, mutta sellaisen hyödyntämisestä on paljon hyötyjä. Asiantuntijan käyttö kyseisiin tehtäviin on kalliimpaa, kuin algoritmin käyttö. Pitkällä aikavälillä tällaiseen algoritmiin tukeutuvaan ratkaisuun sijoittaminen luo järjestelmiä, jotka ovat uudelleenkäytettävissä, laajennettavissa ja skaalattavissa. Tällainen näkökulma itsessään korvaa alkukustannukset. Jos prosessoitavan jätteen määrä on suurempaa kuin ihmisasiantuntija voi ajallisesti käsitellä, asiantuntijan palvelu jää puutteelliseksi ja vajavaiseksi.

Koneoppimista hyödyntävä järjestelmä sen sijaan on täysin kykenevä skaalaamaan valtavia määriä tietoa hyödyntäen nopeaa tietojenkäsittelyä ja päätöksentekoa. Automaattinen päätöksentekojärjestelmä on merkittävä etu voimalaitosratkaisuisissa, joissa tarvitaan nopeaa käsittelyä, sillä järjestelmä voi ennakoida tarpeita perustuen aiempiin tarkkailuihin. Vaikka järjestelmä ei aina olisi tarkka, se voi tarjota arvioita tulevasta, kuten energiatarpeista ja jätteen muodostumisesta tulevaisuudessa. Asiantuntijat pystyvät samaan, mutta huomattavasti pienemmässä kokonaisuudessa. Vaikka järjestelmä ei välttämättä aina tarjoa tarkkoja arvioita aikasarjojen ennustamisen suhteen, se pystyy ennustamaan arvojen nousut tai laskut kehityssuunnan mukaan. (Ntalaperas, Angelidis, Vafeiadis, Vergeti., 2021, s.97)

Kestävän kehityksen ja kiertotalousmallin mahdollistajana harkitaan nykyään digitaalitekniikoita, kuten esimerkiksi Esineiden Internet (IoT), massadata (Big Data), joka on analysointiin suunniteltu ohjelmistoperäinen apuohjelma, tekoäly (Artificial Intelligence; AI) sekä lohkoketjumalli eli tietokantajärjestelmä-mekanismi, joka mahdollistaa läpinäkyvän tiedon jakamisen yritysverkossa. (Schöggl, Rusch, Stumpf, Baumgartner, 2023, s.401)

Esineiden internet tarjoaa uudenlaisia viestintämenetelmiä, lisää laitteiden yhteenliitettävyyttä sekä johtaa uusien tietoverkkojen muodostumiseen. Tekoälyllä viitataan teknologioihin, jotka kykenevät suorittamaan tiettyjä tehtäviä yhtä hyvin, tai jopa paremmin, kuin ihmiset. Big data analytiikalla viitataan yleensä sellaisiin strategioihin, joissa analysoidaan suurta tietomäärää, jotka voidaan eritellä riippuen niiden määrästä, lajikkeesta, nopeudesta, todenmukaisuudesta, vaihtelevuudesta ja arvosta. Lohkoketjutekniikka on tuorein digitaalitekniikka ja hajautettu pääkirjatietokanta, joka tallentaa tapahtumatietojen lisäksi myös muuta tietoa. Lohkoketju on luonteeltaan aikaleimattu ja kryptografinen sovellus. (Schöggl et al., 2023, s.402–403)

## 3 KIERTOTALOUDEN DIGITALISAATIO

Kiertotalouden tukemisessa ja kehittämisessä digitaalisten ratkaisujen ja datan keräämisen voidaan katsoa omaavan ison roolin. Nämä ratkaisut auttavat tuomaan esille esteitä tuotteiden ja materiaalien arvoketjun sisällä. Tuotteiden suunnittelua ja uudelleenvalmistusta voidaan parantaa ja tuotteita voidaan käyttää uudelleenkäytön, kierrätyksen ja uudelleenvalmistuksen periaatteiden pohjalta aina jätteen käsittelyn asteelle. Jotta tavaroita ja palveluita kyetään tuottamaan enemmän käyttäen vähemmän resursseja, on digitalisaatiolla potentiaalia syrjäyttää nykyinen lineaarinen talousmalli, jolloin voidaan vähentää resurssien kulutusta ja tukea tuotannon tehostumista. (Hedberg & Šipka, 2021, s.783)

### 3.1 Digitalisaation mahdollisuudet

Koska resursseja kulutetaan kiihtyvällä tahdilla, se uhkaa kriittisten materiaalien pitkän aikavälin saatavuutta. Resurssit, joilla on vakiintunut asema modernissa yhteiskunnassamme, ovat alttiita toimitusketjun häiriötekijöille. Resurssienhallintastrategiat ovat pyrkineet vähentämään metallien kriittisyyden riskejä ja näiden materiaalien kysyntä jatkaa edelleen kasvua. Kiertotalous on luokassaan uudenlainen ratkaisu, joka käsittelee metallien kriittisyyttä ratkaisulla, mahdollistaen materiaalien ja tuotteiden uudelleenkäytön, uudelleenvalmistuksen sekä kierrätyksen. Tuotteet, jotka sisältävät kriittisiä materiaaleja, ovat harvoin suunniteltu päivitettäväksi tai purettavaksi käyttöään lopussa. Sellaiset teknologian elinkaaren suunnittelutoimenpiteet, jotka mahdollistavat kiertotalouden ratkaisuja, voivat minimoida kriittisten materiaalien riskejä. (Babbitt, Althaf, Cruz, Bilec, Graedel., 2021, s.353) Kiertotalouteen siirtyminen parantaisi myös sidosryhmien välillä saatavaa tietoa ja yhteyksiä. Tähän kuuluisi arvokkaiden materiaalien, tuotteiden, komponenttien, sekä vaarallisten kemikaalien seuranta ja jäljitys. Tämä mahdollistaisi uudelleenkäytön ja kierrätyksen turvallisemman sekä tehokkaamman toteuttamisen. (Hedberg & Šipka, 2021, s.783)

Digitalisaatio on kirjallisesti ja tieteellisesti esille nostettu avaintekijä, kun puhutaan kiertotalouteen siirtymisen mahdollisuuksista. Digitalisaatio kiihdyttää talousjärjestelmää, jossa resurssien kulutus minimoidaan ja aineelliset arvot maksimoidaan. Industry 4.0 digitaalitekniologioiden, kuten Esineiden internetin,

massadatan, kehittyneiden analytiikan mallien sekä 3D- tulostuksen, voidaan odottaa tuovan kiertoisuutta tuotantoprosesseihin ja liiketoimintamalleihin. Tiedottamalla, kouluttamalla ja aktivoimalla osallistujia kohti kiertotaloutta digitaalitekniikka mahdollistaa myös vahvemman aseman kansalaisten ja kuluttajien roolissa. (Piscicelli, 2023, s.1)



Kuva 2. Digitaalinen kiertotalousmalli kaavio, jossa kuvataan jätteen ja raakamateriaalien kiertoisuutta suunnittelun, tuotannon, käytön tai kulutuksen, uudelleenkäytön, korjaamisen tai uudelleenvalmistuksen ja kierrätyksen välillä (Hedberg & Šipka s.784).

Digitaalinen kiertotalousmallin kaavio luo suljetun silmukan suunnittelun, tuotannon, käytön/kulutuksen, uudelleenkäytön/korjaamisen/uudelleenvalmistuksen ja kierrätyksen välille. Suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon, käytetäänkö vanhoista tuotteista syntyneitä jätettä vai uusia raakoja materiaaleja. Usein molempia vaihtoehtoja käytetään.

Tällä hetkellä maailmatalouden kiertoisuusprosentti on vain noin 8.6 prosenttia. Tämän prosentin kasvattaminen kaksinkertaiseksi hyödyttäisi ilmastonmuutostoimia positiivisesti ja pitäisi maapallon lämpötilan nousun alle 2 celsiusasteen, jolloin kiertotalousmallin hyödyt olisivat huomattavat. (Hedberg & Šipka.,2021, s.783) Kaiken kaikkiaan voidaan olettaa, että kiertotalouden digitalisaatio parantaisi huomattavasti tiedonkulkua ja tuotteiden käytön ohjeistamista sidosryhmien välillä. Digitaaliratkaisut, kuten tekoäly, voi parantaa liiketoimintamalleja ja parantaa tuotteiden suunnittelutoimenpiteitä.

### **3.2 Digitalisaation haasteet**

Kiertotalousjärjestelmän hyödyntämiseen liittyy myös haasteita. Suurin este on tuotteisiin ja materiaaleihin yhdistetyt tiedot liittyen esimerkiksi sisältöön, uudelleenkäyttöön, korjaamiseen ja kierrätykseen. Nämä tiedot eivät välttämättä liiku arvoketjussa materiaalien ja tuotteiden mukana. Tämä voi haitata kiertotalouden harjoittamista kuten huoltoa, uudelleenkäyttöä, korjaamista ja kierrätystä, kun kuluttajat eivät tiedä mitä tehdä tuotteiden ja materiaalien kanssa. (Hedberg & Šipka, 2021, s.783)

Digitaaliratkaisuja ei vielä kehitetä ensisijaisesti tukemaan kiertotaloutta. Käytännöt ja investoinnit eivät ole olleet tarpeeksi nopeita edistämään määrätietoista digitalisaatiota, jossa datan käyttö ja digitaalisten ratkaisujen kehittäminen olisi suunnattu suoraan kiertotalouden kehittämiseen. Lisäksi tiedot ja taidot eivät ole vielä sillä tasolla, että yritykset olisivat valmiita muuttamaan liiketoimintamalleja hyötyäkseen digitalisaatiosta. Digitalisaation potentiaali vastata kestävään kehitykseen ilman ohjausta, kannustimia ja puitteita ei välttämättä toteudu ollenkaan. Tietojen jakaminen sidosryhmien ja arvoketjujen välillä kaatuu standardien ja luottamuksen puutteeseen, unohtamatta digitaaliratkaisujen kalliita kustannuksia, kuten tekoälyn ja 3D-tulostuksen kustannuksia, sekä niiden hyödyntämistä tuotteiden tuottamiseen ja jätehuoltoon. Sidosryhmillä, kuten kuluttajilla, ei aina ole tietoa ja taitoa käyttää digitaalisia ratkaisuja kestävä kehityksen puitteissa, vaikka heitä ohjeistettaisiin tuotteen oikean kulutuksen ja hävityksen osalta, koska digitaaliset sovellusmarkkinat voivat olla ylivoimaisen monimutkaisia. (Hedberg & Šipka, 2021, s.784)

## 4 KIERTOTALOUS JA AUTOMAATIO

### 4.1 Mitä on automaatio?

Automaatio voidaan määritellä tekniikaksi, jolla laite, prosessi tai järjestelmä toimii automaattisesti. Automaatio voidaan määritellä myös teknologian luomiseksi ja soveltamiseksi tuotteiden ja palveluiden tuotannon toimittamiseen valvontaan ja hallintaan. (ISA, 2023) Automaatio on myös termi teknologialle, jossa ihmisen panostus ja kädenjälki on minimoitu. Automaatiotyyppejä on erilaisia, kuten perusautomaatio, prosessiautomaatio, integroitu automaatio sekä tekoälyllinen automaatio (IBM,2023). Automaatio on menetelmä, jossa hyödynnetään monenlaisia tietokone- ja koneavusteisia tehtäviä tuotettavuuden parantamiseksi (RobotWorx, Now a T.I.E brand, 2021).

Perusautomaatiolla voidaan suorittaa yksinkertaisia alkeellisia tehtäviä automaattisesti. Tämän tason automaatio on työn digitalisointia, jolloin hyödynnetään työkaluja perusrutiininomaisten tehtävien virtaviivaistamiseksi ja keskittämiseksi. Liiketoimintaprosessien hallinta ja robottiprosessiautomaatio ovat esimerkkejä perusautomaatiosta.

Prosessiautomaatio käsittelee liiketoimintaprosesseja yhteneväisyyden ja läpinäkyvyyden takaamiseksi, ja sitä useimmiten hallitsevat ohjelmistot sekä yrityssovellukset. Prosessiautomaation käyttäminen voi lisätä tuottavuutta ja tehokkuutta, tarjota uusia näkemyksiä liiketoiminnan haasteisiin sekä ehdottaa ratkaisuja. Prosessin louhiminen ja työnkulun automaatio ovat prosessiautomaation malleja.

Integraatioautomaatiolla tarkoitetaan automaatiomallia, jossa koneet voivat jäljitellä ihmisten tehtäviä ja toistaa toimintoja, kun niille on määritelty ihmisen toimesta koneen säännöt. Esimerkki tämänkaltaisesta automaatiosta on ”digitaalinen työntekijä”. Viime vuosien aikana digitaaliset työntekijät on määritelty ohjelmistoroboteiksi, joita on koulutettu työskentelemään ihmisten ohella tiettyjen tehtävien suorittamiseksi. Digitaalisilla työntekijöillä on tietyt taidot ja ne voidaan ohjata työskentelemään ryhmissä.

Tekoäly on monimutkaisin automaation taso. Tekoälyn lisääminen laitteisiin ja koneisiin tarkoittaa, että ne voivat ”oppia” ja tehdä päätöksiä itsenäisesti aiemmin kohtaamiensa ja analysoimiensa tilanteiden perusteella. Tällaisia ovat esimerkiksi asiakaspalvelussa käytetyt virtuaaliassistentit. (IBM,2023)

## 4.2 Jätteen lajittelun automatisointi

Jätteen muodostuminen on jokapäiväinen ongelma ja tähänkään päivään mennessä ei ole keksitty oikeanlaisia ratkaisuja jäteongelmia vastaan. Automaattiset jätteen lajittelusovellukset hyvin suunniteltuna voivat auttaa luomaan puhtaan ja terveellisen elinympäristön. Vetricha ja Wika (2020) käsittelevät artikkelissaan menetelmiä, joiden avulla voidaan kehittää jätteen tunnistamista läheisyys- ja kapasitiivisten antureiden avulla. Järjestelmä perustuu Arduino Mega 2560 mikro-ohjaimen, LCD- näytön ja ääni-ilmoituksen toimintaan. Käytettävät anturit ovat induktiivisia ja kapasitiivisia läheisyysantureita. Järjestelmä toimii tehtävänsä mukaisesti ja kykenee lajittelemaan metalliset ja ei-metalliset jätteet (märkä- ja kuivajätteet) yksitellen, kunhan jätteen koko on suurempi kuin viisi senttimetriä. Antureiden etäisyyksien tulee olla 0–8 millimetrin etäisyydellä induktiivisella anturilla, ja 0–12 millimetriä kapasitiivisella anturilla. (Vetricha & Wika, 2020, s.1) Järjestelmässä on useita ominaisuuksia, kuten automaattisesti aukeava kansi, joka hyödyntää ultraäänantureita etäisyyden mittaamiseen, kun käyttäjä lähestyy roska-astiaa. Samoilla antureilla mitataan myös jätteen määrää astiassa, jotta käyttäjä tietää onko jäteastiassa vielä tilaa vai onko astia täynnä. Astia kiittää käyttäjää mp3-moduulin ja kaiuttimen avulla, kun jäte on laitettu astiaan. (Vetricha, & Wika, 2020, s.7)

Muovijätteen lajittelu on esiarvoisen tärkeää kiertotalouden kannalta. Nykyisillä kierrätysmalleilla kuluttajamuovien kierrätys on vaikea kokonaisuus, niin lajittelun kuin myös jätteen suurien määrien sekä erilaisten muovilajien vuoksi. (Lubongo & Alexandridis, 2022, s.1.) Teknologiat, joita käytettiin (Lubongo & Alexandridis) tutkimuksessa, perustuivat optisiin lajittelujärjestelmiin, kuten NIR- (Near Infrared), XRF- (X-Ray Fluorescence) ja VIS- (color analysis by camera or spectro-colorimeter) teknologiaan. Muovin tunnistaminen perustuu eri aallonpituuksiin eri teknologian kohdalla. Kun valo saavuttaa kohteen, osa siitä heijastuu takaisin ja osa imeytyy kohteeseen, jolloin laite tunnistaa muovin. Eri materiaalit omaavat erilaisen kyvyn heijastaa ja imeä valoa eri aallonpituuksilla. Heijastuneen valon määrästä erotetaan

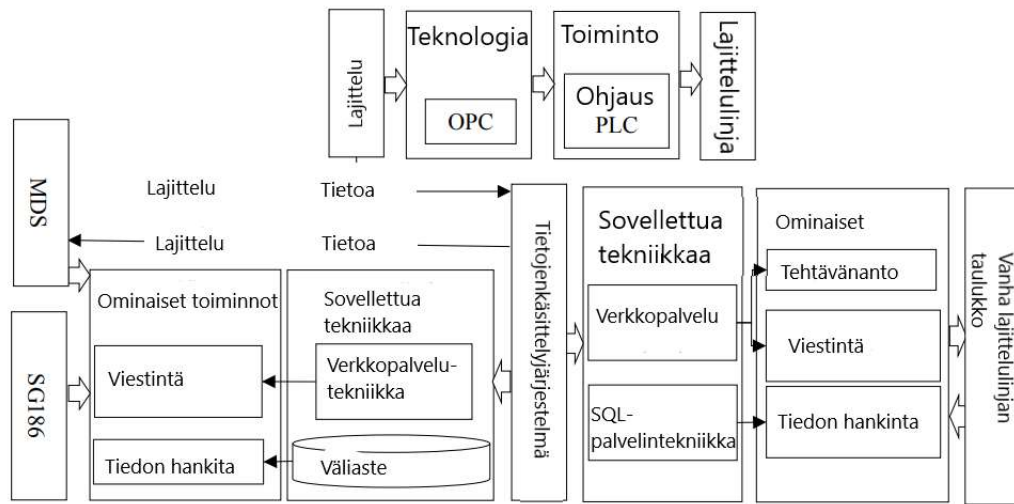
imeytyneen valon määrä ja se tuottaa omanlaisensa ”sormenjäljen”, joka on ainutlaatuinen verrattuna kemikaalisiin ominaisuuksiin kohteessa. Täten muoviset jätteet pystytään lajittelemaan perustuen niiden kemikaalisen rakenteen mukaan. (Lubongo & Alexandridis, 2022, s.4)

Jätteen manuaalinen lajittelu on ongelmallista, tehotonta ja laadultaan heikkoa. Tällä tavalla ei voida taata älykkyyttä, automaatiota ja standardisointia tänä Internetin aikakaudella. Tietotekniikan kehittyessä nopeasti ja verkkoyhteyksien parantuessa on tarpeellista kehittää ja yhdistää tietotekniikka ja teknologia, jotta saadaan aikaiseksi automaattinen lajittelujärjestelmä. Lähivuosina digitaalinen kuvantamisteknologia on kehittynyt ja yleistynyt, kuten myös tekoälyllisen hermoverkon hyödyntäminen kuvioiden tunnistuksessa ja kuvan luokittelussa. Digitaalista kuvantamista hyödynnetään monella eri osa-alueella, kuten lääketieteellisesti ja teollisesti. Edellä mainittujen alojen kokemuksista voidaan todeta, että digitaalinen kuvantaminen yhdistettynä tekoälylliseen hermoverkkoon tarjoaa mahdollisuudet automaattiseen kierrätys- ja lajittelujärjestelmään. (Hu, Liu, Li, Sun, Ni, 2021, s.1)

Hu ja muiden (2021) tutkimuksessa hyödynnetään tekoälyllistä hermoverkkoa (Artificial Neural Network ANN) sähkömittareiden kierrätys- ja lajittelujärjestelmään. Suunnittelussa luodaan toiminnallisia moduuleja ja muodostetaan tietojärjestelmä lajittelujärjestelmän rakentamisen edellytykseksi. Sähkömittareiden lajittelua on tutkimuksessa seurattu ja analysoitu tarkasti, jonka pohjalta on suunniteltu tekoälyllinen hermoverkko.

Järjestelmän yleisarkkitehtuuri perustuen tekoälyllisen hermoverkon toimintaan on jaettu kahteen lajittelujärjestelmään. Purkumittari lajitellaan järjestelmän läpi ensimmäisessä askeleessa, jonka jälkeen lajittelutiedot tallennetaan ja analysoidaan. Tämän jälkeen asiakasvaatimusten mukaisesti tallennetut ja kerätyt seurantatiedot lajitellaan lajittelujärjestelmän standardien mukaisesti, jotta voidaan parantaa automaattilajittelun tehokkuutta kerättyjen mittareiden kohdalla. (Hu et al, 2021, s.3)





Kuva 3. Järjestelmän yleisrakenne. Lohkokaavio järjestelmän eri moduuleille, jossa ylempi moduuli kuvaa lajittelulinjaa ja alemmat moduulit tietojenhallinta- ja tehtävämoduuleita (Hu et. al, 2021).

Lajittelujärjestelmä on jaettu kahteen moduuliin, jotka on nimetty tehtävähallinnan ja tietojenhallinnan mukaan. Tehtävähallinta moduulin tarkoitus on hallita lajitteluprosessia. Tietojenhallinta moduulilla tallennetaan, seurataan ja käsitellään lajittelujärjestelmän jokaista parametria, joka sähkömittarista ilmenee ja samalla asettaa ja säätää lajittelujärjestelmän parametreja reaaliaikaisesti tallentamalla tietoa. Jotta järjestelmä olisi automaattinen, muodostetaan Azure -tietokanta pilvitallennusta varten, joka taas hyödyntää SQL- palvelinta. Tietotekniikan ja pilvitallennuksen avulla voidaan tallentaa valtavia määriä tietoa. (Hu et. al, 2021, s.4)

### 4.3 Jätteen keräämisen automatisointi

Asumistyylien muuttuessa vaaditaan myös jätteen keräämisen osalta uudenlaisia ratkaisuja. Helsingin Jätkäsaarella on otettu käyttöön uudenlainen jätteenkeräysjärjestelmä, joka yhdistää huipputekniikan ja jätehuollon uudelle tasolle. Maanalaista putkistoverkkoa hyödyntävä järjestelmä vie jätteen jätteenkeräysasemalle, josta se kuljetetaan jätteenkuljetusajoneuvoilla jatkojalostukseen. Jätteet hyödynnetään kierrätysmateriaaleiksi, energiajätteeksi tai biokaasuksi. Järjestelmän toiminta perustuu jätteenkeräämispisteisiin, jotka sijaitsevat asuinalueiden pihossa tai rappukäytävissä. Lajittelu tapahtuu asukkaiden toimesta ohjeiden mukaisesti ja jätteet viedään oikeaan luokkuun ja putkeen. Keräyspisteet tyhjentävät itsensä ja jätteet kulkeutuvat putkea pitkin 70 kilometrin tuntinopeudella oikeisiin jätekontteihin keräysasemalle.

Jätteenkeräyspisteet asuinalueella ovat merkattu värikoodeilla ja niihin voidaan laittaa yleisimpiä jätemateriaaleja, jotka ovat bio- ja sekajäte, paperi, kartonki sekä muovipakkaukset. Lasia, metallia, pahvia ja muita isompia sekajätteitä ei voida kierrättää kyseisen jätteenkeräysjärjestelmän kautta, vaan ne lajitellaan erilliseen lajitteluhuoneeseen. (Rööri Jätkäsaari, 2023)

Ylitäytetyt jäteastiat ja tarpeeton jäteautojen käynti jätteen keräämisessä on ollut aina yksi ydinasioista kestävyuden ja vihreän ympäristön kannalta. (Farooq, Cheng, Khan, Saufi, Kanwal, Bazkiel, 2022, s.1) Nykyään hallitukset ja yritykset etsivät ratkaisuja erilaisten jätteiden keräämisen parantamiseksi hyödyntäen uusia teknologioita ja laitteita, kuten älykkäitä antureita IoT- sovellutuksia ja pilvipalveluita. Jotta tämä tarve täytyisi, on kehitettävä ja toteutettava täysin automaattisia jätteenkeräysjärjestelmiä, joilla on korkea käyttöaste, tuottavuutta ja säilytyskapasiteettia. IoT- alustaa käyttävä automaattinen jätteenkeräysjärjestelmä sallii reaaliaikaisen monitoroinnin ja kommunikoinnin keskusjärjestelmän välillä. (Popa, Carutasu, Cotet, Carutasu, Dobrescu, 2017, s.1)

Popa ja muut tutkimuksessa automaattinen jätteenkeräysjärjestelmä on kykenevä keräämään useanlaista jätettä erikseen. Järjestelmä pystyy keräämään ja lajittelemaan muovipakkaukset, lasipakkaukset, alumiinitölkit, pientä ja suurta elektronista jätettä, paperia, pahvia, paristoja, hehkulamppuja sekä loisteputkilamppuja. Järjestelmän toiminta perustuu erilaisiin moduuleihin, jotka lajittelevat jätteet jätetyypin mukaan. Modulaarisuus mahdollistaa järjestelmän käytön siten, että sitä voidaan käyttää eri sijainneissa ja vaatimuksissa. Jätteen kulku järjestelmässä toimii käyttäjän toimesta. Käyttäjällä on käytössään kosketusnäyttö, josta säiliön ovi aukeaa ja käyttäjä asettaa jätteen sille tarkoitetulle alustalle. Säiliön ovi sulkeutuu ja järjestelmä alkaa tunnistamaan jätettä ja punnitsee sen. Metallintunnistimia käytetään tunnistamaan metallin määrä prosentuaalisesti jätteestä. Jos järjestelmä hyväksyy jätteen, käyttäjä vahvistaa toiminnan. Tämän jälkeen jäte kuljetetaan kuljettimella oikeaan säilytystilaan. Tämä toiminto on kaikissa moduuleissa, oli kyseessä sitten esimerkiksi elektroninen tai muovijäte. (Popa et al., 2017, s.3–7)

#### 4.4 Uudelleenvalmistuksen automatisointi

Uudelleenvalmistus on yksi pääkäytännöistä, kun kuljetaan kohti kiertotalouden harjoittamista ja teollista kestävyyttä. Automaation lisääminen uudelleenvalmistuksen toteuttamiseen tuottaa tehokkuutta, joustavuutta ja tarkkuutta. Uudelleenvalmistus käsittää käytettyjen tuotteiden purkamisen ja uudelleen kokoonpanemisen. (Shahbazi, Johansen, Sundin, 2021, s.1)

Kun tuote on saavuttanut käytettävyytensä lopun, purkaminen on ensimmäinen askel uudelleenvalmistuksen, korjaamisen ja kierrätyksen osa-alueilla. Tuottavuus ja joustavuus tulee ottaa huomioon, kun hyödynnetään robotteja purkutarkoitukseen, mikä johtuu uudelleenvalmistukseen tuotavien tuotteiden monimutkaisuudesta. Yhteistyörobotit tarjoavat tähän tarkoitukseen joustavan, osittain automaattisen ratkaisun. Robotit työskentelevät operaattorin kanssa yhteistyössä turvallisesti yksittäisten tai rinnakkaisten purkutöiden parissa yhteisissä työskentelytiloissa. Yhteistyörobotit käyttävät aktiivista vaatimustenmukaisuuden valvontaa monimutkaisten tuotteiden purkutehtävien suorittamiseksi, sekä turvallisen yhteistyön mahdollistamiseksi operaattorin kanssa. Operaattori kommunikoi robottien kanssa käyttäen uudenlaista menetelmää, joka perustuu kosketustunnistamiseen ja asennonhallintaan. (Huang, Pham, Li, Qu, Wang, Kerin, Su, Ji, Mahomed, Khalil, Stockton, Xu, Liu, Zhou, 2021, s.1)

Uudelleenvalmistuksen on huomattu säilyttävän tuotteen arvoa suuremmissa määrin, kuin kierrätyksen ja kokonaan uuden tuotteen valmistaminen. Uudelleenvalmistusprosessista tulee tehdä suorituskykyisempi ja samalla parantaa työympäristöä ja laatua. Tässä tapauksessa automaatio voi olla ratkaisu. Automaatio ei ole kuitenkaan helposti lisättävissä uudelleenvalmistusketjuun, koska käytettyjen tuotteiden kirjo on valtava. (Hochwallner, Sundin, Johansen, 2022, s.1)

Moduloituihin ja joustaviin purkamissoluihin kuuluu muun muassa teolliset robotit tai käsittelylaitteet, erityiset tartuntalaitteet, purkutyökalut, jotka on kehitetty robotteja varten, kuljetusjärjestelmät, kiinnitysjärjestelmät, älykkäät ohjausjärjestelmät, komponenttien tietokannat sekä säilytysjärjestelmät. Nämä kaikki kuuluvat päämoduuleihin purkamissoluissa. (Kopacek, 2021, s. 409)

Esimerkkinä tämänkaltaisesta purkamissolusta on muun muassa Applen -yhtiön valmistama Daisy-robotti. Daisy on noin kymmenen metriä pitkä, koostuu viidestä käsivarresta ja kykenee purkamaan jopa 15 eri iPhone -mallia. Daisy pystyy purkamaan jopa 200 puhelinta tunnissa tai yhden puhelimen 18 sekunnissa. Daisy pystyy irrottamaan näytön, akun, ruuvit, anturit, logiikkapiirilevyn ja langattoman latauskelan jättäen jäljelle vain puhelimen alumiinikuoren. (Kopacek, 2021, s. 410)

Zen Robotics on Suomessa vuonna 2007 perustettu yritys, joka teki läpimurtonsa vuonna 2011 kehittämällä innovatiivisen jätteenlajittelijarobotin. Laajennettuaan toimintansa myös Aasiaan, Pohjois-Amerikkaan ja Australiaan, yritys kykenee tarjoamaan monenlaisia ratkaisuja. Zen Robotic tarjoaa erilaisia keräilyrobotteja, kuten esimerkiksi Heavy Picker. Heavy Picker on robotti, joka on sopiva sellaisiin tehtäviin, joissa käsitellään raskaampia esineitä, kuten kaupallisesta ja teollisesta toiminnasta syntynyttä jätettä. Toinen ratkaisu on Fast Picker, joka soveltuu pienempien asioiden käsittelyyn varsinkin kunnallisella tasolla haastavissa olosuhteissa. Perinteisessä teollisuusautomaatiossa robotit operoivat määritellyssä ja jäsennetyssä ympäristössä. Jätehuollossa jätevirta on monimutkainen ja karu työskentely-ympäristö, ja sen takia myös vaikeammin ennustettava osa-alue. Tämän takia Zen Robotics kehitti vuonna 2010 oman ainutlaatuisen tekoälylaitteiston, joka perustui kyseisen ajan teknologian tasoon. (Kopacek, 2021, s.410)

#### **4.4.1 Elinkaaren hallinta**

Kuluttajien vaatimukset ovat muuttuneet nopeasti, kuten myös elektroniikkateknologian kehityksen vaatimukset. Kotiautomaatiotuotteita vanhentuu ennätysmäistä tahtia ja sen takia on tärkeä suunnitella ja tehdä strategioita tuotteiden elinkaaren hallinnoimiseksi. Tämänkaltaisille tuotteille ei ole vielä maailmanlaajuisia elinkaaren hallinnan strategioita, koska on puute joustavista itsenäisistä moduloituvista järjestelmistä, jotka on integroitu tähän tarkoitukseen. (Patil, Rebaioli, Fassi, 2022, s.1) Elinkaaren hallinta perustuu kolmeen perusstrategiaan (End-of-Life Management; the ”3-R possibilities; Reduce, Reuse and Recycle), jotka ovat vähentäminen, uudelleenkäyttö ja kierrätys, sekä vaihtoehtoisesti talteenotto (Recover), joka voidaan lisätä vahvistamaan elinkaaren hallintastrategiaa (4-R theory). Purkamisautomaatio ilmeni ensimmäistä kertaa vuonna 1994, kun teollinen puoliautomaattinen purkamissolu-toteutus saatiin aikaiseksi. Puoliksi tai täysin automaattinen purkaminen varsinkin elektronisille laitteille ei ollut ainoastaan standardisoinnin ja Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) -direktiivin

ansiota Euroopan komission toimesta. Yleensä myrkylliset komponentit poistettiin manuaalisesti ja muut materiaalit silputtiin ja heitettiin syrjään. Euroopan komission säätelyjen ja elektronisen jätteen määrän lisääntyminen tekevät manuaalisesta purkamisesta lähes hyödytöntä. Tämän vuoksi automaatioprosessi on välttämätöntä purkamiselle. (Kopacek, 2021, s. 408)

## 5 TULEVAISUUDEN NÄKÖKULMIA

Elektronisen jätteen kasvu on räjähdysmäistä ja sillä on negatiivisia ympäristöllisiä vaikutuksia. Maailmanlaajuinen elektronisen jätteen määrä vuonna 2019 oli 53.6 miljoonaa tonnia ja sen määrän oletetaan kasvavan 74.7 miljoonaan tonniin vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2016 vain 20 prosenttia 44.7 miljoonasta tonnista päätyi kierrätykseen. Tämän lisäksi tällaisten tuotteiden valmistaminen johtaa luonnonvarojen kasvavaan kulutukseen ja tuottaa itsessään myrkyllisiä ja haitallisia aineita. Kiertoisuuden lisääminen EEE (Electric and Electronic Equipment) arvoketjuun on ensiarvoisen tärkeää. Tällä tarkoitetaan elinkaarensa päässä olevien tuotteiden keräystä ja niiden osien uudelleenkäyttöä siten, että arvoketjusta saataisiin kestävämpi. (Fernandes, Rosado da Cruz, Cruz, Lopes, 2023, s.1)

Industry 4.0 (Teollisuuden neljäs vallankumous) on seuraava askel digitalisaation kannalta valmistusprosesseissa ja sitä ajaa eteenpäin yhteyksien ja tiedon lisääntyminen, analytiikka, ihmisen ja koneen välinen vuorovaikutus sekä parannukset robotiikassa. Industry 4.0 luo mahdollisuuksia myös kestävyuden kannalta ja mikä tärkeintä nämä edistysaskeleet ovat kestävämpiä kuin nykyiset liiketoimintakäytännöt. (McKinsey & Company, 2022) Kasvavan automaation ja älykkäiden koneiden ja tehtaiden älykkäiden laitteiden hyödyntäminen auttaa tuottamaan tavaroita tehokkaammin ja tuottavammin koko arvoketjussa Industry 4.0 teknologioita ovat IoT, pilvilaskenta ja analytiikka sekä tekoäly ja koneoppiminen. (IBM)

### 5.1 Tekoälyn integrointi jätehuoltoon

Ympäristön saastuminen on yksi haastavimmista maailmanlaajuisista ongelmista. Väestön toiminnan keskittyminen yhä elektroniikkapohjaisemmaksi on suurimpia syitä dramaattisen jätteen erityisesti akkujätteen syntymiselle. Akkujätteen vääränlainen hävittäminen on ympäristölle haitallista, koska akkujätteistä ympäristöön vapautuvat raskasmetallit ovat vaaraksi sekä ekosysteemeille että terveydelle. Jotta kykenisimme estämään luonnonvarojen ehtymisen sekä ylläpitämään ekologista tasapainoa, tulisi tehokkaan akkujätteenhuollon kierrättämistä parantaa. Tekoäly on käytännössä läsnä jokapäiväisessä elämässämme jokaisessa osa alueessa ja se voi myös vähentää tutkimuksiin liittyviä kustannuksia, lisätä automatisointia sekä nopeuttaa tuotettavuutta. (Pregowska, Osial, Urbańska, 2022, s.1) Tekoäly on yksi tärkeimmistä Industry 4.0

teknologioista. (Agrawal et al., 2022, s.2.) Tekoälyn algoritmien käyttämisellä on huomattavia etuja kiertotalouden harjoittamisen kannalta. Tekoälyyn perustuvat algoritmit pystyvät ratkaisemaan monenlaisia tiedonkäsittelyyn liittyviä tapauksia. Näitä ovat muun muassa toistuvien mallien tunnistaminen, luokittelu, ryhmittely, ulottuvuuksien vähentäminen, kuvan tunnistaminen, luontaisen kielen käsittely sekä ennustava analysointi. Tekoälyä voidaan hyödyntää paljolti myös jätehuollossa, jolloin jätehuolto voidaan yhdistää valvontaan, keräysprosesseihin sekä turvallisuuteen. Tekoälyn avulla voidaan aikatauluttaa jätteen keräämistä. (Pregowska et al., 2022, s.4)

Yksi kriittisimmistä jätehuollon ja kiertotalouden osa-alueista on kierrätys. Litium-ioni-akkuja voidaan kierrättää eri tavoin, kuten pyrometallurgisesti, hydrometallurgisesti ja biologisesti, jotta arvokkaat metallit saadaan talteen. Metallien talteenotto ja kierrätys akkujätteestä on haastava prosessi. Sitä voidaan parantaa ennustavien toimenpiteiden avulla, kuten tekoälyllä. Pregowska ja muiden tutkimuksessa hyödynnettiin koneoppimisen menetelmiä, kuten erilaisia regressiomenetelmiä. Käytetyt regressiomenetelmät, joita käytettiin, olivat Random Forest -regressio, jolla tarkoitetaan puumallin luomista erilaisista näytteistä. Muita regressiomenetelmiä olivat lineaarinen regressio sekä AdaBoost -regressio, joka luo kokonaisuuksia luokittelemalla. Gradient boost -regressiomenetelmä tarjoaa luokittelua ja ennustusmalleja ratkaisupuun mallina. (Pregowska et al) Edellä mainituilla menetelmillä akkujätteestä saatiin kerättyä enimmäismäärä metalleja, kuten sinkkiä (Zn) ja mangaania (Mn). Käyttämättömien matkapuhelinten kohdalla lajittelu tapahtui yhdistämällä tekoälyllistä teknologiaa vanhempiin menetelmiin. Vanhempia menetelmiä olivat magneettinen erottelu, pyörrevirta sekä pyro- ja hydrometallurgiset menetelmät. Näiden menetelmien jälkeen kuvan luokittelu tapahtui hyödyntämällä CNN- teknologiaa (Convolutional Neural Network), jota yhdistettiin ReLU- aktivointitoimintaan. (Pregowska et al., 2022, s.8)

## 5.2 Lohkoketju ja IoT kiertotaloudessa

Jotta EEE- tuotteiden arvoketjua saataisiin kiertotalouden kannalta tehokkaammaksi, on luotava jäljitys-alusta. Tähän tarkoitukseen on olemassa lohkoketjuteknologia (Blockchain Technology; BCT), joka on jo käytössä monella eri alalla. Lohkoketjuteknologia on tietokantajärjestelmä, joka mahdollistaa läpinäkyvää tiedonjakamista yritysverkoissa ja se tallettaa tiedot lohkoissa, jotka ovat liitetty toisiinsa ketjuna. (Amazon Web Services). Lohkoketjussa tiedot tallennetaan kronologisessa järjestyksessä, mikä luo pysyvän ja muuttumattoman tietojen tallentamisen ja avoimuuden takaamisen arvoketjussa. Jäljitettävyydeltään mahdollistaa tietojen tallentamisen jokaisesta tuotteesta missä tahansa vaiheessa arvoketjua, joka mahdollistaa fyysisen kohteen yhdistämisen digitaaliseen esitykseen (digital twin). Tietoja voidaan kerätä jäljityksestä IoT- laitteiden kautta ja tämän avulla voidaan tarjota helppo, totuudenmukainen ja harkittu tapa käsitellä tietoja. (Fernandes et al., 2023, s.2)

Lohkoketjuteknologia voi auttaa löytämään tasapainon vastaanottajien ja yritysten välillä, mitä tulee luottamuksellisten yritystietojen suojaamiseen ja vastaanottajille vaadittujen tietojen kohdalla. Sidosryhmät, kuten kierrättäjät, pystyvät kysymään tietoja tuotteista suojatun viestintäominaisuuksien kautta. IoT-laitteita voidaan käyttää ennakoivan huollon tarkoituksiin ja näin ollen tuotteiden elinkaarta voidaan pidentää. Tämän lisäksi robotteja ja antureita voidaan käyttää parantamaan kierrätystä ja jätehuoltoa. (Hedberg & Sipka, 2021, s.1)

Chenin (2022) tutkimuksessa IoT-käyttöiset laitteet asennetaan jäteastioihin, jolloin ne antavat reaaliaikaista tietoa jätteenmuodostumiskäyttäytymisestä. Kuvankäsittelyä käytetään kaatopaikkojen roskaindeksin laskemiseen, ja ne tarjoavat selkeää tietoa kierrätyksen kehityssuunnista ja tarjoavat ehdotuksia tuottavuuden parantamiseksi. Älykäs jätehuolto voi IoT- sovelluksia hyödyntämällä auttaa jätehuoltopalveluita ja kaupunkia, sillä IoT-laitteiden lisäämisen myötä toiminta muuttuu tehokkaammaksi ja kuluilta säästyään. (Xiangru Chen 2022 s. 3127)



## 6 YHTEENVETO

Resurssien kulutus on kasvanut väistämättä, kun teknologia on kehittynyt ja kulutustottumukset ihmisillä ovat muuttuneet. Tätä varten on entistä tärkeämpää hyödyntää kiertotalouden ratkaisuja. Kiertotalouden ratkaisut voivat tarjota tulevaisuudessa parempia ratkaisuja ympäristön ja ihmisten kannalta. Tämän lisäksi voidaan todeta, että kiertotaloudesta voidaan saada entistä parempi ja tehokkaampi, kun siihen lisätään digitaalitekniologiaa ja automaatiota. Kiertotalous pyrkii pitämään resurssit ja tuotteet mahdollisimman pitkään hyödynnettynä.

Haasteita kiertotalouden harjoittamiseen liittyy vielä muun muassa siihen liittyvän tiedon jakamisen kohdalla. Sidosryhmillä ei ole riittävää tietoa kiertotaloudesta itsessään tai sen tarjoamista ratkaisuista. Kiertotalouden harjoittamisen digitalisaatio on myös monelle yritykselle kynnys, koska laitteistojen ja ohjelmistojen päivittäminen voi olla kallista. Teknologian kehitys lisää resurssien kulutusta ja se vaatii uudenlaisia ratkaisuja kiertotalouden kannalta. Tämän vuoksi elektronisten laitteiden kierrätystä ja kiertoisuutta tulee kasvattaa ja parantaa digitaalisilla ja automaattisilla ratkaisuilla, jotta niiden kiertotaloudesta saadaan tehokkaampaa.

Koska kiertotalous käsittää niin monta osa-aluetta aina raaka-aineesta tuotteen valmistamiseen ja kierrätykseen, on tärkeää automatisoida ja digitalisoida kierrätys, keräys- ja uudelleenvalmistus alueet. Tämä mahdollistaa jo olemassa olevien materiaalien ja tuotteiden uudelleen käyttöä mahdollisimman pitkälle. Tulevaisuudessa tekoälyn ja IoT-laitteiden hyödyntäminen voi tehostaa ja parantaa entistä enemmän kiertotalouden harjoittamista. Tekoäly voi tarjota nopeampaa ja tarkempaa tiedonkeruuta ja IoT-laitteet parempaa ja tehokkaampaa tiedontallentamista. Lohkoketjuteknologialla tarjotaan tiedon läpinäkyvyyttä ja liikkumista sidosryhmien välillä turvallisesti, nopeasti ja tehokkaasti.

# LÄHDELUETTELO

Agrawal R, Wankhede A, Kumar A, Luthra S, Majumdar A, Kazancoglu Y. (2022). An Exploratory State-of-the-Art Review of Artificial Intelligence Applications in Circular Economy using Structural Topic Modeling. *Operations Management Research* 15(3-4), 609-626.

Saatavissa: <https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1007/s12063-021-00212-0>

Ajankohtaista: Euroopan parlamentti. (2.12.2015). *Mitä kiertotalous on ja miksi sillä on merkitystä?* Haettu 25.1.2023 osoitteesta

<https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/economy/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>

Amazon Web Services. (julkaisuaika tuntematon). What is Blockchain Technology?

Amazon. Haettu 14.3.2023 osoitteesta

<https://aws.amazon.com/what-is/blockchain/?aws-products-all.sort-by=item.additionalFields.productNameLowercase&aws-products-all.sort-order=asc>

Babbit C, Althaf S, Cruz Rios F, Bilec M, Graedel T. (2021). The role of design in circular economy solutions for critical materials. *One Earth*, 4(3), 353-354.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.02.014>

Chen Xiangru. (2022). Machine learning approach for a circular economy with waste recycling in smart cities. *Energy Reports* 8, 3127-3140.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.193>

Ellen Macarthur Foundation. (2020). *The butterfly diagram: visualizing the circular economy*. Haettu 25.1.2023 osoitteesta

<https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>

Ellen MacArthur Foundation. (2020). *What is circular economy?* Haettu 25.1.2023 osoitteesta

[https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview?gclid=CjwKCAiAk--dBhABEiwAchIwkSLUwqYwW1CmU\\_f70n06dww7dox2bTurS6x4qJX8Kf2oAKC5kQlJnRoCYDAQAvD\\_BwE](https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview?gclid=CjwKCAiAk--dBhABEiwAchIwkSLUwqYwW1CmU_f70n06dww7dox2bTurS6x4qJX8Kf2oAKC5kQlJnRoCYDAQAvD_BwE)

Farooq, Cheng, Khan, Saufi, Kanwal, Bazkiaei. (2022). Sustainable Waste Management Companies with Innovative Smart Solutions: A Systematic Review and Conceptual Model. *Sustainability* 14(20), 13146, s.1-19.

Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su142013146>

Fernandes L, Rosado da Cruz A, Cruz E, Lopes S. (2023) A review on Adopting Blockchain and IoT Technologies for Fostering the Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment Value Chain. *Sustainability (Switzerland)*, 15(5), 4574.

Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su15054574>

Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken N, Hultink E. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.048>

Hedberg A, Šipka S. (2021). Toward a circular economy: The role of digitalization. *One Earth*, 4(6), 783-785.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.020>

Hochwallner M, Sundin E, Johansen K. (2022). Automation in Remanufacturing: Applying Sealant on a Car. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 21, 147-158.

Saatavissa: <https://doi.org/10.3233/ATDE220134>

Hu H, Liu B, Li W, Sun H, Ni T. (2021). Digital Image Processing Technology in Design and Development of Automatic Sorting System for Energy Meter Recovery. *Journal of Physics: Conference Series* 2143, 012042.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2143/1/012042>

Huang J, Pham D, Li R, Qu M, Wang Y, Kerin M, Su S, Ji C, Mahomed O, Khalil R, Stockton D, Xu W, Liu Q, Zhou Z. (2021). An experimental human-robot collaborative disassembly cell. *Computers & Industrial Engineering*, 143, 107189.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2021.107189>

IBM. (julkaisuaika tuntematon). *What is automation?* Haettu 11.3.2023 osoitteesta <https://www.ibm.com/topics/automation>

IBM. (julkaisuaika tuntematon). *What is Industry 4.0?* Haettu 27.3.2023 osoitteesta <https://www.ibm.com/topics/industry-4-0>

ISA. (julkaisuaika tuntematon). *What is automation?* Haettu 11.3.2023 osoitteesta <https://www.isa.org/about-isa/what-is-automation>

Rööri Jätkäsaari. (julkaisuaika tuntematon). *Rööri Jätkäsaari*. Haettu 26.2.2023 osoitteesta <https://jatkasaarenroori.fi/>

Kopacek P. (2021). Automated Disassembly a Tool for saving the Environment. *IFAC-PapersOnLine*, 54(13), 408-412.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.482>

Lubongo C, Alexandridis P. (2022). Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastics Waste. *Recycling*, 7(2).

Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/recycling7020011>

McKinsey & Company (17.8.2022). *What are Industry 4.0, the Fourth Industrial Revolution, and 4IR?*

Saatavissa: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir>

Metabolic (6.2.2017). *The Seven Pillars of the Circular Economy*.

Saatavissa: [https://www.metabolic.nl/news/the-seven-pillars-of-the-circular-economy/?gclid=CjwKCAiAk--dBhABEiwAchIwka45EvTIPnV\\_1tDM0C5CQKCP8G4KMfMSpnyypR1lyXKSxqIJYESCohoCGGcQAvD\\_BwE](https://www.metabolic.nl/news/the-seven-pillars-of-the-circular-economy/?gclid=CjwKCAiAk--dBhABEiwAchIwka45EvTIPnV_1tDM0C5CQKCP8G4KMfMSpnyypR1lyXKSxqIJYESCohoCGGcQAvD_BwE)

Nautiyal H, Goel V. (2021). Sustainability assessment: Metrics and methods. *Methods in Sustainability Science: Assessment, Prioritization, Improvement, Design and Optimization*, 27-46.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823987-2.00017-9>

Ntalaperas D, Angelidis I, Vafeiadis G, Vergeti D. (2021). A Decision-Support System for the Digitization of Circular Supply. 97-107.

Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74886-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74886-9_8)

Patil T, Rebaioli L, Fassi I. (2022). Cyber-Physical systems for end-of-life management of printed circuit boards and mechatronics products in home automation: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, e00422, 32.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2022.E00422>

Piscicelli L. (2023). The sustainability impact of a digital circular economy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 61, 101251.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101251>

Popa C, Carutasu G, Cotet C, Carutasu N, Dobrescu T. (2021). Smart city platform development for an automated waste collection system. *Sustainability (Switzerland)*, 9(11).

Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su9112064>

Pregowska A, Osial M, Urbańska W. (2022). The Application of Artificial Intelligence in the Effective Battery Life Cycle in the Closed Circular Economy Model- A Perspective. *Recycling*, 7(6).

Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/recycling7060081>

RobotWorx Now a T.I.E brand. (julkaisuaika tuntematon). *Types of Automation*. Haettu 11.3.2023 osoitteesta

<https://www.robots.com/articles/types-of-automation>

Schöggel J, Rusch M, Stumpf L, Baumgartner R. (2023). Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing. *Sustainable Production and Consumption*, 35, 401-420.

Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2022.11.012>

Shahbazi S, Johansen K, Sundin E. (2021). Product design for automated remanufacturing- a case study of electric and electronic equipment in sweden. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16).

Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su13169039>

Vetricha W, Enina W. (2020). Automated Trash Sorting Design Based Microcontroller Arduino Mega 2560 with LCD Display and Sound Notification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 725(1).

Saatavissa: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012054>